



*o livro de texto*

# ***Cortiça no sector aeroespacial: do cultivo à aplicação***

**ecoCORK**



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

*"Funded by the Erasmus+ Programme of the European Union. However, European Commission and Turkish National Agency cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein"*

# **Cortiça no sector aeroespacial: do cultivo à aplicação**

*Editado por* Selim Gürgen

Mehmet Alper Sofuođlu

Mellih Cemal Kuşhan



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

"Funded by the Erasmus+ Programme of the European Union. However, European Commission and Turkish National Agency cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein."

# Conteúdo

<b>Prefácio</b>	<b>i</b>
<b>1. Introdução à Ciência da Cortiça: Cultivo, Extração e Processamento</b>	<b>1</b>
1.1 Floresta	1
1.1.1 Descrição Botânica	4
1.1.2 Silvicultura/Agro-florestação	7
1.1.2.1 Regeneração do Povoamento	7
1.1.2.2 Povoamentos Juvenis	8
1.1.2.3 Povoamentos Maduros	8
1.1.3 Gestão Sustentável	9
1.1.4 Ameaças ao Cultivo	11
1.1.4.1 Doenças	11
1.1.4.2 Alterações Climáticas	12
1.2 Extração de Cortiça	13
1.2.1 Processo de Descortiçamento	14
1.2.1.1 Intensidade de Descortiçamento	17
1.2.1.2 Efeito no Crescimento das Árvores	20
1.2.2 Operações Após a Colheita	21
1.2.2.1 Armazenamento no Campo	21
1.2.2.2 Variação do Teor de Água	23
1.2.2.3 Armazenamento no Estaleiro e Preparação para o Processamento	23
1.2.2.4 Tipos de Cortiça em Bruto	25
1.2.2.5 Requisitos Industriais	28
1.2.3 Defeitos da Cortiça e Implicações	29
1.2.4 Classificação das Pranchas de Cortiça	32
1.2.4.1 Classes de Espessura	32
1.2.4.2 Classificação de qualidade	32

1.2.4.3 Índice de Valor Integrado da Cortiça	34
1.3 Tratamento Pós-Colheita	35
1.3.1 Cozedura	35
1.3.1.1 Como a Cozedura Afeta a Cortiça	37
1.3.2 Processo Pós-Cozedura	38
1.3.3 Processamento de Cortiça Húmida	39
1.3.4 Segunda Fervura	39
<b>2. Sustentabilidade, Pegada de Carbono e Potenciais Produtos de Cortiça</b>	<b>46</b>
2.1 Cortiça e Sustentabilidade	47
2.1.1 Ecossistema da Cortiça	47
2.1.2 Serviços Ambientais	50
2.1.3 Gestão Sustentável	53
2.1.4 Efeito das Alterações Climáticas no Ecossistema da Cortiça	57
2.2 Pegada de Carbono dos Produtos de Cortiça	58
2.2.1 Introdução à Pegada de Carbono	58
2.2.2 Fixação de Carbono das Florestas	60
2.2.3 Ciclo de Vida dos Produtos de Cortiça	64
2.2.4 Valores da Pegada de Carbono	67
2.3. Potenciais Usos da Cortiça	68
2.3.1 Principais Propriedades da Cortiça	68
2.3.2 Aplicações da Cortiça	75
2.3.3 Cortiça na Construção	76
2.3.4 Têxtil e Mobilidade	79
2.3.5 Farmácia e Cosmética	81
2.3.6 Outras Aplicações	82

<b>3. Sectores de Produtos de Cortiça, Propriedades da Cortiça e Tendências Futuras da Cortiça</b>	<b>90</b>
3.1 Introdução	90
3.2 Sectores para a Produção de Cortiça	93
3.2.1 Aglomerados de Cortiça para Utilização Geral	95
3.2.2 Isolamento Térmico e Sonoro	97
3.2.3 Caso de Isolamento Sonoro	98
3.2.4 Estruturas tipo Sanduíche	100
3.2.5 Automóvel	104
3.2.5.1 Caso de estudo	105
3.2.6 Tecnologia de Absorção de Energia	111
3.3 Conclusões	113
<b>4. Fabrico e aplicação de compósitos à base de cortiça na aviação</b>	<b>119</b>
4.1 Uma visão geral dos compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça	119
4.1.1 A definição e os tipos de compósitos estruturados em sanduíche	119
4.1.2 Propriedades, vantagens e desvantagens dos compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça mais importantes para a aeronáutica	121
4.1.3 As áreas de aplicação dos compósitos sanduíche à base de cortiça na aeronáutica	124
4.2 Métodos de fabrico de compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça	129
4.2.1 Métodos de fabrico de painéis sanduíche planos	129
4.2.1.1 Fabrico de painéis sanduíche planos sob compressão mecânica	129
4.2.1.2 Fabrico de painéis estruturados tipo sanduíche por compressão a vácuo	130
4.2.2 O processo de fabrico de painéis de curvatura simples ou dupla	132
4.2.3 Peculiaridades do ponto de montagem dos painéis estruturados tipo sanduíche	136
4.2.3.1 O reforço de painéis tipo sanduíche nos pontos de montagem de outros elementos estruturais	136
4.2.3.2 Reforço dos painéis estruturados tipo sanduíche nos pontos de montagem de outros elementos estruturais quando estes elementos são aparafusados	137

4.2.4 Características dos fechos dos bordos dos painéis estruturados em sanduíche	138
4.3 Aplicações de compósitos de cortiça para vedações	140
4.3.1 Fluidos mais comuns utilizados na indústria aeroespacial	141
4.3.2 Tecnologias de vedação de fluidos	142
4.3.3 Aplicações aeroespaciais testadas pelo tempo	144
4.4 Ensaios de materiais compósitos estruturados em sanduíche com núcleo de cortiça	145
4.4.1 Análise do espectro de materiais compósitos sanduíche com núcleo de cortiça	145
4.4.2 Bancada de ensaio e condições de medição	146
4.4.3 Conclusão da primeira análise	151
4.4.4 Conclusão da segunda análise	152
4.5. Ensaios de flexão de compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça	153
4.5.1 Amostras	153
4.5.2 Realização de ensaios de flexão	156
4.5.3 Comparação dos resultados, análise	158
4.5.4 Ensaios de tração	159
4.5.5 Resultados dos ensaios de tração	159
<b>5. Aplicações Aeronáuticas/Aeroespaciais dos Compósitos de Cortiça</b>	<b>166</b>
5.1 Introdução	166
5.2 Propriedades Gerais dos Compósitos de Cortiça	169
5.2.1 Propriedades Mecânicas/Físicas	170
5.2.1.1 Alterações das Propriedades Mecânicas em Função da Temperatura	174
5.3 Utilizações Atuais da Cortiça em Aplicações Aeronáuticas/Aeroespaciais	176
5.3.1 Componentes Estruturais com Cortiça em Aplicações Aeroespaciais	178
5.3.2 Projetos sobre a Utilização da Cortiça em Estruturas Aeroespaciais: Projeto Aerocork	183
5.4 Aplicações Potenciais de Compósitos de Cortiça em Estruturas Aeronáuticas/Aeroespaciais	184
5.4.1 Compósitos de Matriz Cerâmica e Cortiça em Aplicações Aeronáuticas/Aeroespaciais	184

5.4.2 Isolamentos para Sistemas de Lançamento Espacial	185
5.4.3 Cortiça na Missão a Marte	187
5.5 Conclusões	188

## **Prefácio**

Este livro é produzido no âmbito de um projeto financiado pela União Europeia no âmbito do Programa Erasmus+ KA203: Parcerias Estratégicas para o Ensino Superior. O projeto intitulado *EcoCork: Educational Development for Sustainable and Eco-friendly Cork Composites in Aerospace Applications*, (#2020-1-TR01-KA203-092763) é conduzido por um consórcio de seis parceiros; Universidade Eskişehir Osmangazi (Türkiye), Universidade de Aveiro (Portugal), Amorim Cork Composites (Portugal), Instituto Catalão de Cortiça (Espanha), Universidade de Ciência e Tecnologia de Wrocław (Polónia) e Universidade Técnica Gediminas de Vilnius (Lituânia).

A “terra mãe” da cortiça é a Europa, especialmente Portugal e Espanha. Por esta razão, os produtos à base de cortiça têm crescido como um valor comum partilhado na Europa, liderando assim a ciência da cortiça ao mesmo tempo que moldam a tecnologia de ponta neste campo. Como material natural, a cortiça proporciona várias vantagens para diferentes aplicações de engenharia. A sustentabilidade e as propriedades amigas do ambiente são as vantagens mais importantes para o futuro do nosso planeta. Uma vez que a indústria aeroespacial é um dos sectores líderes a nível mundial, a cortiça tem sido investigada do ponto de vista aeroespacial no projeto *EcoCork*.

Este manual fornece um conhecimento detalhado sobre a ciência da cortiça desde o cultivo até às aplicações. O Capítulo 1 aborda o cultivo, a colheita e a transformação da cortiça. O capítulo 2 centra-se na sustentabilidade e nas propriedades ecológicas da cortiça. O Capítulo 3 apresenta uma discussão sobre os produtos de cortiça, as propriedades da cortiça e as tendências futuras da cortiça. O Capítulo 4 aborda o fabrico e implementação de produtos à base de cortiça. O capítulo 5 analisa as aplicações aeronáuticas e espaciais com produtos de cortiça.

Editores

Selim Gürgen

Mehmet Alper Sofuoğlu

Melih Cemal Kuşhan



# CAPÍTULO 1

## Introdução à Ciência da Cortiça: Cultivo, Extração e Processamento

G.F. Serra, F.A.O. Fernandes\*, G.J.A. Sousa, R.J. Alves de Sousa, A.B. Pereira

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Santiago, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

\*Correspondência: fabiofernandes@ua.pt

### Resumo

Este capítulo fornece uma visão geral dos principais aspetos da ciência da cortiça. Descreve os passos essenciais, partindo das especificidades da manutenção e cultivo da floresta, descortiçamento, e finalmente, os passos necessários para transformar a casca exterior do sobreiro numa matéria-prima adequada para desenvolver produtos de engenharia. Neste âmbito, é também abordada a contribuição da cortiça para alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - cidades mais seguras e inclusivas, fabrico sustentável, entre outros. O capítulo começa por abordar os desafios de cultivo e manutenção das florestas (montados de sobreiro e sobreirais), os diferentes tipos de sobreiros e florestas, o cultivo planeado de modo a manter a disponibilidade do material e as principais ameaças. Em seguida, são abordadas as técnicas e cuidados a ter na extração da cortiça – ferramentas, qualificação humana, tempo entre colheitas e diferentes tipos e qualidades de cortiça extraída. Finalmente é abordada a utilização da cortiça como matéria-prima, o seu processamento, passando pelos diferentes tratamentos e transformações necessárias para torná-la uma matéria-prima adequada para estruturas ou produtos.

**Palavras-chave:** Cortiça, Floresta, Matéria-prima, Material de engenharia.

### 1.1 Floresta

O sobreiro, ou *Quercus suber L.* – o seu nome científico – é um tipo de carvalho com uma casca espessa e enrugada que contém uma camada contínua de cortiça na sua parte exterior. O sobreiro alcançou importância económica devido às propriedades, estética e sustentabilidade da sua casca. Os sobreiros podem ser divididos em dois sistemas agroflorestais distintos:

- O montado – associado a culturas ou pastagens para gado – com um pequeno número de árvores por hectare (cerca de 50 – 150 árvores por hectare). Este sistema, representado na Figura 1.1, é referido como montado e dehesa em Portugal e Espanha, respetivamente;
- Os sobreirais, um povoamento mais denso nas regiões montanhosas que não permitem agricultura por baixo dos sobreiros.

Os atuais sobreiros, no seu estado maduro, resultaram principalmente da gestão dos proprietários dos povoamentos ou da regeneração natural dos mesmos. Contudo, em alguns casos, resultaram da sementeira

artificial aliada à regeneração natural. Portanto, a maioria dos povoamentos tem uma distribuição espacial heterogénea e os sobreiros não apresentam a mesma idade.



Figura 1.1 Paisagem típica de um montado/dehesa (cortesia da APCOR© [1]).

O sobreiro propaga-se nas zonas mediterrânicas ocidentais da Europa do Sul e do norte de África, integrando principalmente os 2 tipos de sistemas agroflorestais – o montado e os sobreirais – e são normalmente utilizados para caça e para pastagem de gado, para além de produção de cortiça.

Esta espécie semi-tolerante está bem adaptada a climas como o mediterrânico e solos de baixa fertilidade. Os montados desempenham um papel ecológico crítico na contenção da desertificação e erosão do solo, bem como contribuem para a manutenção da biodiversidade. O montado suporta uma ecologia única e frágil, constituindo um habitat para espécie raras e ameaçadas como a águia imperial (*Aquila adalberti*) em perigo de extinção. Juntamente com a Amazónia, Bornéu e a Savana Africana, os montados de sobreiro são um dos 36 ecossistemas mais importantes do mundo para a preservação da biodiversidade, albergando mais de 200 espécies animais e 135 espécies vegetais [2].

O sobreiro demonstra uma grande plasticidade ecológica. Tem a capacidade de adaptar a sua fenologia e atividade fisiológica às condições ambientais em mudança, tais como temperaturas elevadas e até cenários de seca. O sobreiro cresce otimamente a altitudes desde o nível do mar até aos 600 m; contudo, é possível desenvolver-se em altitudes máximas de até 2000 m. Relativamente à distribuição sazonal de chuva, o sobreiro está adaptado a precipitações mais elevadas de outubro a março (outono – inverno) e muito pouca ou nenhuma chuva no verão. A precipitação média anual é de 600 – 800 mm, mas o mínimo para um desenvolvimento arbóreo equilibrado deve ser 500 mm. No entanto, o sobreiro tem a capacidade de sobreviver em anos de baixa precipitação, por exemplo, abaixo dos 400 mm. Por outro lado, embora sejam admissíveis precipitações de até 1700 mm, o sobreiro é suscetível a alagamento.

A temperatura média anual ideal varia entre 13 °C e 16 °C. A temperatura mínima absoluta para sobrevivência do sobreiro é de -12 °C, e a temperatura média mínima durante o inverno é de 4-5 °C. As temperaturas típicas do verão no Mediterrâneo podem atingir mais de 40 °C. No entanto, um aspeto

importante é a boa resposta do sobreiro ao aumento da temperatura e a temperatura ótima de 33-34 °C nas plântulas de sobreiro [3]. Geralmente, temperaturas à volta de -5 °C e 40 °C podem ser considerados os limites mínimo e máximo. A espécie é também bastante tolerante em relação aos solos, sendo as únicas exceções os calcários e os substratos calcários. O sobreiro permite uma gama de pH do solo entre 4.8 e 7.0 e cresce preferencialmente em solos siliciosos e arenosos bem drenados. No entanto, o crescimento em solos pouco profundos, pobres em azoto e pobres em matéria orgânica continua a ser possível. Além disso, os sobreiros são capazes de prevenir a degradação do solo e gerar altos níveis de biodiversidade. Os sobreiros aumentam a matéria orgânica dos solos, procurando nutrientes no subsolo e devolvendo-os ao solo através da queda de folhas e ramos, tornando-os mais produtivos.

Os montados e sobreirais estão espalhados pela bacia ocidental do Mediterrâneo (mais de 2 milhões de hectares), mais especificamente, no sul da Península Ibérica e no norte de África. Uma representação geográfica dos sobreiros pode ser observada na Figura 1.2. Os sobreiros encontram-se também presentes em França e Itália. De acordo com Pereira [4], nos anos 90: Portugal tinha cerca de 713 000 ha de sobreiro, Espanha cerca de 475 000 ha, França 68 000 ha, Itália 65 000 ha, Marrocos 348 000 ha, Tunísia 90 000 ha e a Argélia, normalmente referida como tendo 440 000 ha, teve provavelmente uma diminuição para cerca de 230 000 ha.

Dois grupos de populações de sobreiro com genéticas distintas foram identificados em duas regiões diferentes: uma na Península Ibérica e áreas Francesas próximas, e outra no Norte de África, Provença (França) e ilhas mediterrânicas (Sicília, Sardenha e Córsega). O primeiro grupo demonstrou uma maior diversidade genética dentro da sua população e uma menor diferenciação entre a sua população do que o segundo grupo.



Figura 1.2 Distribuição geográfica dos sobreiros: As regiões verdes representam a área nativa, as cruces indicam populações isoladas e os triângulos indicam onde o *Quercus Suber* foi introduzido e naturalizado [5].

Portugal e Espanha têm as maiores florestas de sobreiro, sendo também os principais produtores de produtos de e à base de cortiça. Portugal tem a maior área de montado e lidera atualmente as exportações de produtos de cortiça, sendo o maior fabricante. Estima-se uma produção anual de cerca de 374 000 toneladas de produtos de cortiça, sendo a maioria proveniente de Portugal e Espanha, que são responsáveis por 74% do total (51% e 23%, respetivamente) [6]. A produção anual pode variar devido a fenómenos climáticos ou catástrofes naturais. A título de exemplo e em Portugal, os incêndios florestais de 2003 ou a seca severa de 2004.

Para além do *Quercus Suber*, existem outros sobreiros, tais como o *Quercus Cerris* e o *Quercus Variabilis*. Este último adapta-se aos climas orientais e é vulgarmente conhecida como sobreiro Chinês [7]. A microestrutura do último é semelhante à do *Quercus Suber*, mas as células são muito mais onduladas e colapsadas. As células são normalmente mais pequenas e presentes em maior número por unidade de volume, resultando num tipo mais denso de cortiça. Cerca de 1.2 milhões de hectares de floresta são compostos pelo *Quercus Variabilis* e dela resultam cerca de 50–100 quilotoneladas de cortiça processada. No entanto, a diferença de qualidade é significativa. A cortiça do *Quercus Suber L.* apresenta uma matéria-prima de qualidade muito superior. Além disso, apresenta níveis muito mais elevados de homogeneidade, resultando em pranchas de maior dimensão e regularidade.

### **1.1.1 Descrição Botânica**

A espécie a que o sobreiro pertence – a ordem das *Fagales* e a família das *Fagaceae* – é considerada como contendo mais de 40 variedades e, em última análise, está dividida em quatro grupos: *subcrinita*, *macrocarpa*, *genuine* e *occidentalis* [9]. Híbridos naturais entre variações com sistemas de reprodução semelhantes também ocorrem, tais como o cruzamento de *Q. ilex* com *Q. suber* [10, 11]. Apresentam diferentes formas botânicas e podem variar no período de floração, a forma e o tamanho das folhas (incluindo flores e frutos), e a forma da própria árvore. A grande diversidade em termos de morfologia e fenótipo deve-se em grande parte à transferência passada de material genético de uma espécie para o património genético de outra, também conhecida como introgressão (hibridação introgressiva). A qualidade da cortiça e da descendência de uma árvore pode apresentar uma grande variação dentro da mesma população de árvores.

Os sobreiros são árvores de caule curto com ramos grossos que atingem alturas máximas de 16 m. No entanto, as árvores cultivadas em povoamentos menos densos podem ter grandes circunferências de caule e dimensões de copa (podem atingir cerca de 500 m<sup>2</sup> de projeção de copa), especialmente em árvores maduras com 150 – 200 anos de idade. Em povoamentos densos, as árvores possuem geralmente coroas mais estreitas e caules mais altos, dados que as outras árvores circundantes influenciam as suas dimensões. As Figuras 1.3 e 1.4 mostram exemplos de sobreiros isolados e de uma área densamente arborizada. Como resultado da poda em idade jovem e da sua continuidade, muitos sobreiros atuais no montado controlado têm formas diferentes. Estes têm tipicamente um caule bifurcado. A bifurcação começa com uma altura baixa, seguida de dois ou três ramos principais, com ângulos abertos em relação ao caule e uma coroa circular com uma parte superior achatada.



Figura 1.3 Sobreiro isolado com um diâmetro de coroa maior (cortesia da APCOR© [1]).



Figura 1.4 Sobreiros numa zona densamente arborizada (cortesia da APCOR© [1]).

O sistema radicular da espécie é dimórfico, com uma raiz primária forte e longa e ramos laterais grossos, que podem exibir uma grande expansão horizontal com numerosas raízes superficiais em árvores cultivadas ao ar livre. A raiz principal pode atingir vários metros de penetração no solo. Isto demonstra e justifica a capacidade dos sobreiros de atingir aquíferos profundos no verão, tornando possível manter uma elevada hidratação das folhas e assim manter o seu desenvolvimento durante períodos de grande procura de água e radiação [12]. O sistema radicular está frequentemente associado a várias micorrizas.

Os rebentos são roxo-escuro, ovoides e minúsculos, com aproximadamente dois milímetros de comprimento. As folhas são verde-escuras com uma densa pubescência branca na face inferior e uma

densa rede de estomas com células de guarda que se estendem a partir do plano epidérmico [13]. A forma das folhas varia entre ovoide e oblongo com uma borda enrugada ou ondulada. O comprimento e largura da folha variam entre 4 e 7 cm e 2 a 3 cm, respetivamente. A forma e o tamanho da folha variam consideravelmente entre as árvores e a copa das mesmas. A Figura 1.5 mostra as folhas típicas de um sobreiro.



Figura 1.5 Formas típicas das folhas (cortesia da APCOR© [1]).

A atividade fisiológica inicia-se por volta de fevereiro/março com o desenvolvimento do rebento. O seu alongamento e geração de novas folhas começam no início da primavera até junho. As folhas sobrevivem até cerca de 14 meses, variando de 11 a 18 meses [14, 15]. Por conseguinte, as folhas tendem a cair na primavera (a menos que ocorram chuvas fortes no inverno, levando a uma desfoliação mais rápida). Devido à queda sazonal das folhas, durante a primavera, a coroa da árvore é ainda dominada pelo desbotamento das folhas do ano anterior, contrastando com outras espécies que exibem as folhas recém surgidas. Quando o sobreiro tem cerca de 15 a 20 anos, a frutificação e floração começam (de abril até ao final de maio). A polinização ocorre durante a primavera, e pode ocorrer com pólen da mesma árvore ou de árvores vizinhas. Como resultado, a descendência pode diferir significativamente uma da outra.

Os frutos do sobreiro, as bolotas, que podem ser vistas na Figura 1.6, têm formas e tamanhos diferentes – desde menos de 2 cm até mais de 5 cm de comprimento. A maturação da bolota pode ocorrer em ciclos anuais e bienais [16]. No primeiro caso, o período de crescimento da bolota ocorre durante o final do verão e outono, atingindo a maturação completa em novembro [17]. Quanto às bolotas bienais, estas têm um período vegetativo com crescimento mínimo, seguido de um período de crescimento intenso na primavera do seu segundo ano. A frequência deste último é influenciada pela duração do período vegetativo, ou seja, pode ser encurtado por secas intensas e longas no verão. Por década, uma árvore tem tipicamente 2 a 3 anos de alta produção de bolota. O tempo frio durante o período de floração pode induzir danos e contribuir para a substancial variabilidade interanual da produção de bolota [18].

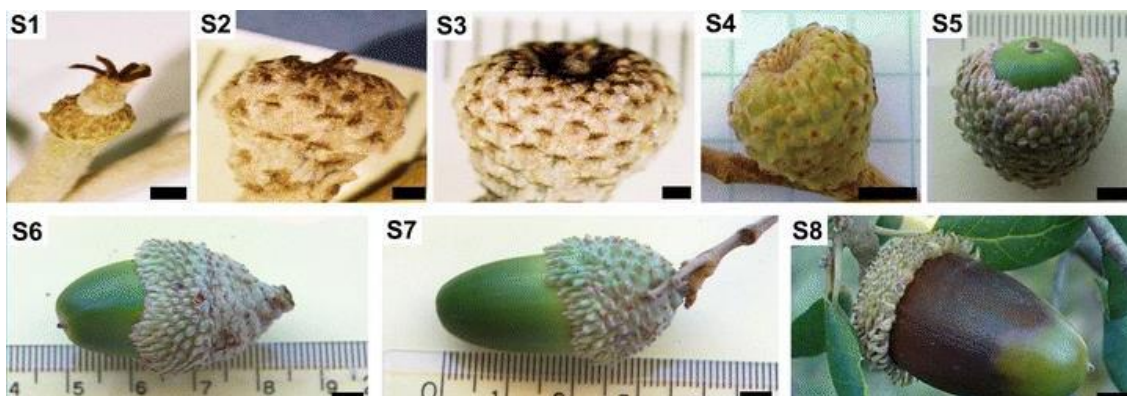


Figura 1.6 Fases de desenvolvimento da bolota de cortiça até à maturação (adaptado de [19]).

## 1.1.2 Silvicultura/Agro-florestação

### 1.1.2.1 Regeneração do Povoamento

A maioria dos sobreiros resulta da regeneração espontânea dos brotos de bolota. A regeneração artificial dos povoamentos de sobreiro é uma prática relativamente nova, tendo avançado substancialmente nos anos 90 em resultado de políticas da UE e de incentivos à florestação de terras agrícolas em pousio. Nos últimos quinze anos, vários milhares de hectares de sobreiros foram estabelecidos em Portugal e Espanha, quer através de uma plantação, quer através de sementeira direta. No entanto, a taxa de mortalidade nos primeiros anos é geralmente elevada. As razões estão geralmente relacionadas com a falta de solo adequado ou preparação do mesmo, a fim de estabelecer um sistema radicular eficiente crítico para o verão; a sensibilidade da planta ao stress hídrico na sua idade jovem; e o facto de a bolota e as plantas jovens serem altamente apetitosas para ratos e gado, respetivamente [20-22].

A preparação do local implica a monda, muitas vezes realizada com um sulco de disco, e a melhoria das propriedades do solo para facilitar o desenvolvimento do sistema radicular. As técnicas de preparação podem envolver o rasgamento ou subsolagem a uma profundidade de cerca de 60 e 80 cm, particularmente em solos de rocha dura, ou o arado e o assoreamento ao longo de contornos seguidos de arado profundo e/ou gradagem de discos. Pode abranger toda a área ou ser limitada à linha de plantio. Tipicamente, é aplicado um fertilizante à base de azoto, fósforo e potássio a uma taxa de 40 – 100 g por planta.

É possível a plantação na primavera ou no outono com plântulas cultivadas num viveiro e/ou sementeira. Um diagrama com as operações anuais é representado na Figura 1.7. O número de árvores plantadas por hectare é inferior ao de outras espécies produtoras de madeira. São recomendados espaçamentos de cerca de 4 m<sup>2</sup> para equilibrar a densidade e os custos de instalação. No entanto, são também utilizados espaçamentos mais largos (8 m x 4m) e mais densos (4 m x 2 m).

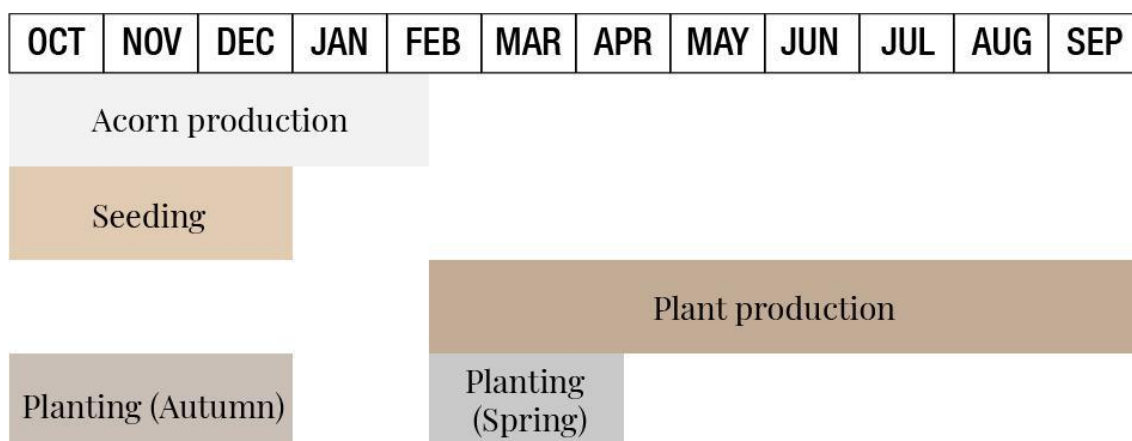


Figura 1.7 Eventos anuais relacionados com a arborização (adaptado de [23]).

Devido à elevada taxa de mortalidade nos anos iniciais, a planta é considerada estabelecida quando atinge uma idade de 8 – 10 anos. Embora se acredite que a proteção de jovens plântulas com abrigos individuais para árvores as protege do gado e estimula o crescimento inicial em altura, esta técnica resultou em taxas de mortalidade mais elevadas e em plantas jovens com caules mais finos e subdesenvolvidos em regiões com seca severa e temperatura elevadas [24]. Quando a precipitação da primavera e do verão é insuficiente, a irrigação deve ser aplicada duas ou três vezes durante os períodos de maior necessidade. A monda é também sugerida durante os primeiros anos após plantação, quer em redor de plântulas individuais, quer em toda a área.

### **1.1.2.2 Povoamentos Juvenis**

Este período vai desde o estabelecimento da árvore até à primeira extração de cortiça, que ocorre geralmente entre os 25 e 40 anos de idade. Tipicamente, 25 anos são suficientes em países como Portugal e o sul de Espanha. São necessários períodos mais longos para povoamentos com stress ambiental e densos.

As árvores jovens têm ramificações extensas e frequentemente carecem de um rebento principal. Como resultado, a execução da poda é fundamental para obter um caule limpo de pelo menos 2.5–3 m de altura. Normalmente, são efetuadas 3 podas: primeiro entre os 3-6 anos de idade para remover todos os ramos dos primeiros 2/3 do caule, seguida de outra poda entre os 12-15 anos de idade, e finalmente, a poda após o primeiro descortiçamento. Devido à elevada suscetibilidade dos sobreiros à competição durante os primeiros anos, a poda deve ser efetuada o mais tardar na idade de 4–5 anos e, posteriormente, a cada 3–4 anos até se atingir a idade de 10–15 anos.

### **1.1.2.3 Povoamentos Maduros**

Em povoamentos maduros, as atividades silvícolas mais críticas são o desbaste e o descortiçamento. O desbaste é feito para alcançar um fator de espaçamento pré-estabelecido. O fator de espaçamento é definido como o produto da distância média entre as árvores e o diâmetro médio da copa da árvore.



Embora esta regra empírica não seja confirmada experimentalmente devido à falta de dados substanciais, assume-se geralmente que a concorrência excessiva entre árvores reduz a produção de cortiça. Assim, recomenda-se um fator de espaçamento de modo a cada árvore ter o espaço necessário ao desenvolvimento sem restrições da sua coroa. Enquanto alguns gestores florestais exploram a aplicação de fertilizantes entre períodos de descortiçamento, com o objetivo de aumentar a produção de cortiça, a escassa literatura sobre o tópico indica que a aplicação de fertilizantes tem pouca influência no crescimento ou qualidade da cortiça.

Devido ao facto de a bolota ter sido economicamente importante, os sobreiros eram podados com o objetivo de melhorar a produção de frutos. Esta prática ainda é utilizada para melhorar a vitalidade das árvores e o rendimento da cortiça, embora nunca tenha sido comprovada experimentalmente. A gestão das ervas daninhas também pode ser realizada, dependendo do tipo de cultivo. É fundamental que a monda mecânica, tal como as outras, não seja prejudicial à estrutura radicular superficial dos sobreiros.

Os sobreiros podem viver até aos 250–350 anos de idade. No entanto, a atividade do seu câmbio cortical, bem como a espessura da casca, diminuem à medida que envelhecem. A qualidade da cortiça necessária para a viabilidade industrial termina nos 150-200 anos. Assim, o sobreiro é uma espécie protegida com regulamentos bem definidos sobre operações silvícolas, descortiçamento, corte e fim de vida.

### ***1.1.3 Gestão Sustentável***

Da floresta ao cliente, toda a cadeia depende de uma produção consistente e sustentável e, portanto, de uma gestão adequada das florestas e bosques de sobreiro, especialmente considerando a distribuição geográfica global do sobreiro e a sua extensão. Segundo a World Wide Fund for Nature (WWF), quase 100 mil pessoas no sul da Europa e no norte de África dependem direta ou indiretamente destas florestas.

Estas florestas são um modelo de equilíbrio entre a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável – o facto de nenhuma árvore ser abatida durante o processo de descortiçamento é uma novidade em termos de sustentabilidade. A agricultura do sobreiro proporciona uma vasta gama de atividades florestais, agrícolas, de pastoreio florestal, cinegéticas e económicas. O sector da cortiça está na vanguarda deste crescimento sustentável, sustentando milhares de empregos e permitindo que as famílias permaneçam nas suas terras. As florestas de sobreiro são distintas de outros sistemas florestais, na medida em que o produto não é a madeira (caule), o que leva ao fim da vida da árvore, mas sim a casca que pode ser colhida várias vezes.

O crescimento da cortiça, um elemento crítico para os proprietários florestais e um fator de gestão primária, define os atributos da matéria-prima para o processamento industrial, dado que a cortiça é direcionada para a produção de rolhas de vinha, que requerem uma espessura mínima das placas de cortiça. Os rendimentos da produção de cortiça dependem do crescimento da cortiça e da árvore, bem como de variáveis de gestão como a intensidade de extração da cortiça, ou seja, a área descortificada e o intervalo temporal entre a descortiçamento. Como resultado, o inventário dos montados requer

informação suplementar sobre outras espécies arbóreas. Os modelos de previsão de cortiça têm sido utilizados há muito tempo, mas o crescimento do sobreiro e a modelação da produção na gestão dos povoamentos só recentemente foi desenvolvida.

A sustentabilidade das florestas de sobreiro e da cadeia da cortiça é uma questão de preocupação generalizada, considerando a sua importância na proteção ambiental contra a erosão e desertificação dos solos, bem como nos quadros sociais e económicos das populações e áreas afligidas. A cortiça tem também um impacto social e cultural significativo e um legado que se estende muito para além das suas áreas de crescimento. O planeamento e certificação da gestão sustentável do sobreiro ganhou recentemente proeminência neste contexto.

A principal fonte de preocupação para a sustentabilidade das florestas de sobreiro são os sistemas de montado, dada a falta de regeneração ou regeneração insuficiente [25]. A regeneração natural ocorre com pouca frequência nestes ambientes escassos, e os povoamentos atuais são, em grande parte, maduros e com uma idade excessiva. Embora uma abundância de plantas possa ser normalmente visível perto de sobreiros velhos na primavera, como resultado da germinação das bolotas espalhadas pela região, a maioria perecerá no ano seguinte. As jovens plântulas requerem proteção, por exemplo, do sol, o que não é o caso em ambientes tão abertos, bafejados pelo sol e aquecidos. O contrário verifica-se em florestas densas de sobreiros, proporcionando as condições ideais para a regeneração natural. O número de plantas jovens é elevado nestes povoamentos, apesar do crescimento lento devido à concorrência.

No entanto, nestas condições, a área florestal é minúscula em comparação com a extensão dos sistemas de montado. Para assegurar a viabilidade a longo prazo dos povoamentos de sobreiro, é necessário considerar a regeneração artificial através da sementeira ou plantação de plântulas cultivadas em viveiros [23]. A florestação de sobreiros tem sido um esforço substancial em Portugal e Espanha, apoiado por incentivos da Política Agrícola Comum Europeia ao longo das últimas duas décadas. Após a preparação do solo, estas iniciativas de arborização plantam árvores a uma alta densidade de aproximadamente 600 plantas por hectare. Apesar da sobrevivência nem sempre ser satisfatória, os primeiros 5-8 anos são críticos para o sucesso da arborização.

Outro risco para a regeneração natural dos povoamentos de sobreiro é a sua natureza multifuncional, especificamente no que diz respeito à cadeia alimentar. Por exemplo, as plantas jovens que sobreviveram às duras condições do Verão estão em risco na presença de gado. Nestes casos, a agricultura deve ser proibida nas regiões regeneradoras até as jovens árvores atingirem 10 ou mais anos.

A Europa e o resto do mundo partilham um compromisso para a gestão sustentável das florestas. O papel crítico das florestas no planeta tem sido reconhecido e progredido em sucessivas resoluções internacionais, especificamente as suas múltiplas funções (sociais, económicas, ambientais e culturais) que contribuem para o desenvolvimento sustentável da sociedade, particularmente nas zonas rurais, produzindo bens renováveis e proteção ambiental. O objetivo da gestão florestal sustentável é auxiliado por um conjunto de critérios e indicadores de acompanhamento que servem de diretrizes de ação. Os

critérios abrangem todas as áreas de gestão florestal e servem para avaliar o desempenho da gestão. Os indicadores são medidas/parâmetros quantitativos, qualitativos ou descritivos que, quando medidos ou controlados numa base regular, revelarão a alteração de um critério. Os critérios e indicadores na Figura 1.8 são consistentes com os descritos nos acordos pan-europeus sobre gestão florestal sustentável. Isto é uma prioridade devido às áreas ambientalmente e socialmente sensíveis onde se encontram as florestas de sobreiro. Este conceito começa a germinar e a desenvolver-se a nível do público e das partes interessadas. O processo de certificação dos povoamentos de sobreiro para a gestão sustentável das florestas mal começou, e alguns casos já foram concluídos.

Criteria	Indicators
1. Resources and carbon cycles	Forest area, Growing stock, Age structure, Diameter distribution, Carbon stock
2. Ecosystem health and vitality	Soil condition, Defoliation, Forest damage, Deposition of air pollutants
3. Productive functions	Increment and fellings, Services, Roundwood, Non-wood goods, Forests under management plans
4. Biological diversity	Naturalness, Tree species composition, Introduced tree species, Regeneration, Deadwood, Genetic resources, Landscape pattern, Threatened species, Protected forests
5. Protective functions	Soil, water and other ecosystem functions, Infrastructure, Managed natural resources
6. Other socio-economic functions	Forest holdings, Contribution to GDP, Net revenue, Expenditure for services, Occupational safety and health, Forest workforce, Trade in wood, Energy from wood, Accessibility for recreation, Cultural and spiritual values

Figura 1.8 Resumo dos critérios existentes e indicadores associados que estabelecem um quadro para a gestão sustentável das florestas (adaptado de [4]).

#### 1.1.4 Ameaças ao Cultivo

##### 1.1.4.1 Doenças

Poucas doenças graves afetam o sobreiro, apesar das 300 espécies de fungos e oomycetes descritas na literatura. Destas, pelo menos 100 são patogénicas [26]. Felizmente, apenas um reduzido número são infeções primárias capazes de atacar árvores saudáveis. A maioria são agentes patogénicos oportunistas

que invadem os tecidos do sobreiro anteriormente comprometidos por causas abióticas ou bióticas [26]. Recentemente, várias espécies de fungos oportunistas têm vindo a despertar um interesse crescente devido à sua capacidade de colonizar tecidos do sobreiro como endófitos durante um longo período, sem causar sinais de doença [27]. Árvores saudáveis gerem normalmente estes endófitos [28]. No entanto, quando os fatores de stress ambiental enfraquecem as árvores, os primeiros fungos contidos são capazes de colonizar os tecidos vizinhos, resultando no declínio gradual da árvore e na sua eventual morte [29]. O aumento da frequência e gravidade das secas e o aumento das temperaturas favorecem os agentes patogénicos mais termotolerantes. Quando combinados com o stress fisiológico induzido pelo clima, alguns destes agentes patogénicos provocam o declínio dos sobreiros e a sua morte [30].

O declínio dos carvalhos é frequentemente referido como uma doença multifatorial envolvendo vários fatores abióticos e bióticos (por exemplo, seca, geadas, pragas de insetos, e agentes patogénicos) que variam em tipo, intensidade, frequência, e mesmo no local/região [31,32]. Contudo, foi demonstrado que as doenças dos géneros *Diplodia* e *Phytophthora* afetam significativamente vários ambientes em termos do declínio e mortalidade [33,34].

#### ***1.1.4.2 Alterações Climáticas***

O aquecimento global causa a perda de florestas em todo o mundo [35]. No Mediterrâneo, isto é verificado pelo aumento das temperaturas médias e por uma diminuição geral da precipitação anual, que se distribui de forma cada vez mais irregular ao longo das estações, resultando frequentemente em secas mais longas [36]. As alterações climáticas podem afetar potencialmente os povoamentos de sobreiro, alterando o crescimento e a mortalidade das árvores, bem como a produção e qualidade da cortiça [37,38]. A seca e as altas temperaturas, em particular, têm demonstrado inibir o crescimento da cortiça [39]. A adaptação das práticas de gestão florestal, tais como a otimização dos horários de extração da cortiça, a redução das superfícies de descortiçamento, e o aumento da densidade das árvores, poderia aumentar a produtividade da cortiça face às alterações climáticas [40]. Devido à singularidade dos montados de sobreiro, a promoção de técnicas de gestão sustentável a longo prazo e intervenções proactivas baseadas em iniciativas de florestação para preservar a biodiversidade e os serviços ecossistémicos deve ser avaliada a nível local ou regional [41].

Os sobreiros não são os únicos afetados pela alteração do clima. Os agentes patogénicos do sobreiro, bem como a forma como estes agentes patogénicos interagem com o seu hospedeiro, são também afetados. Por outro lado, as alterações climáticas podem influenciar diversos agentes patogénicos de formas distintas, e a literatura sobre a adaptação dos agentes patogénicos ao clima ainda é limitada [42].

Vários fatores afetam a forma como um agente patogénico sobrevive e propaga-se: temperatura, precipitação, humidade relativa, luz, humidade das folhas, humidade do solo, radiação solar, turbulência do ar, e outros fatores. No sul da Península Ibérica, onde o oomicete *Phytophthora cinnamomi* é uma causa significativa do declínio do sobreiro, a combinação de secas prolongadas e estações húmidas,

juntamente com as péssimas características do local (solos inférteis com baixos níveis de fósforo, solos pouco drenados) e um ambiente favorável à doença (por exemplo, povoamentos localizados em terrenos montanhosos virados a sul) produzem condições ideais para o agente patogénico [31]. Face as atuais alterações climáticas, com o aumento das temperaturas médias e da frequência de eventos climáticos extremos (e.g., seca, inundações e tempestades) na Europa, a proliferação de *Phytophthora root rots* é provável, aumentando a instabilidade e vulnerabilidade destes ecossistemas [43].

Além disso, o stress fisiológico grave reduz a vitalidade das árvores, tornando-as mais suscetíveis aos parasitas. Quando combinado com a seca contínua, os endófitos patogénicos, tais como *Brevundimonas mediterranea*, têm aumentado as taxas de infeção relacionadas com a perda do sobreiro [32]. O impacto ecológico dos fungos *Xylariaceae* em várias espécies de árvores florestais tem aumentado na região mediterrânica em resultado de anos invulgarmente secos [6]. É necessária investigação adicional para determinar o efeito do aumento das temperaturas e da seca em algumas características específicas das espécies de sobreiro e na dinâmica populacional.

## **1.2 Extração de Cortiça**

A extração de cortiça, ou descortiçamento, é um processo antigo e manual que envolve o corte de grandes pranchas de forma retangular, que são depois arrancadas da árvore, exigindo mãos meticolosas e experientes para evitar qualquer dano à casca da árvore. O procedimento utiliza a fragilidade do felogénio e as camadas de células de cortiça mais recentes para remover a casca da árvore sem danificar o interior da casca (câmbio). Como resultado, este processo é puramente sazonal, no final da primavera e início do verão, exigindo que o sobreiro seja fisiologicamente ativo. Em média, o sobreiro pode ser extraído 15 a 18 vezes ao longo da sua vida com intervalos de nove anos, e a primeira extração (cortiça virgem) ocorre aos 25 anos de idade. Aos 34 anos de idade, obtém-se a cortiça secundária, e finalmente, aos 43 anos, obtém-se a cortiça de reprodução, que contém as propriedades ideais para a produção de rolhas da melhor qualidade. O processo de descortiçamento do sobreiro é constituído por cinco fases:

1. Abrir – A prancha de cortiça é separada do entrecasco cortando-o verticalmente ao longo da sua ranhura mais visível com o machado.
2. Separar – A prancha é separada com a introdução do gume do machado entre a barriga da mesma e do entrecasco, executando um movimento de torção do machado.
3. Traçar – Com um corte horizontal delimita-se o tamanho da prancha de cortiça a sair e aquela que fica na árvore.
4. Extrair – A prancha é gentilmente retirada da árvore para que não se parta (quanto maior a prancha, maior é o seu valor comercial).
5. Remoção de resíduos – Na base da árvore ficam alguns fragmentos de cortiça, que são martelados inúmeras vezes para erradicar quaisquer parasitas que possam aparecer.

Os requisitos industriais para a matéria-prima são determinados pela aplicação específica, que atualmente está orientada principalmente para a produção de rolhas. Assim, é necessária uma espessura adequada (ou seja, pranchas de cortiça com uma espessura mínima de 27 mm), e sem falhas significativas, tais como descontinuidades graves (ou seja, fraturas profundas). Estas são as principais razões pelas quais a cortiça virgem e secundária, obtida da primeira periderme e da primeira periderme traumática, respetivamente, não são consideradas para o fabrico de rolhas.

### **1.2.1 Processo de Descortiçamento**

A casca é arrancada durante a atividade peridérmica quando as células-mães do felogénio e as células do pedúnculo recentemente criadas estão inchadas, e as paredes das células são finas e fracas. Primeiro, corta-se através da casca, depois agarra-se e puxa-se. Uma força suave na direção radial é suficiente para separar a casca ao nível da zona ativa do felogénio neste estado. O *timing* desta operação é crítico para evitar danos no floema e nos câmbios subjacentes. Como resultado, a extração de cortiça está limitada ao período de pico de atividade do felogénio, ocorrendo tipicamente entre meados de maio e início de agosto. O tempo determina o período de descortiçamento, o que pode causar atrasos ou antecipação das operações. Como se vê pela criação de rebentos e folhas, o início do novo crescimento é tipicamente um sinal da atividade fisiológica da árvore e uma condição necessária para planear o início do processo de descortiçamento. Uma abordagem comum é avaliar a facilidade com que a cortiça pode ser extraída de alguns sobreiros. Quando não é facilmente extraída, a casca não pode ser removida por métodos convencionais; se a força aplicada for excessiva, pode ocorrer uma rutura ao nível do câmbio, resultando em danos irreversíveis. Contudo, devido à variabilidade do estado fisiológico das árvores dentro de um povoamento, é possível que algumas árvores não produzam cortiça durante a operação de extração da cortiça, ou seja, árvores enfraquecidas ou doentes, ou que seja impossível remover a cortiça de algumas partes de uma árvore, ou seja, devido ao ataque parcial das copas. O conhecimento dos descortidores é fundamental para completar tecnicamente com sucesso a operação e tomar as decisões necessárias.

O descortiçamento é efetuado manualmente. Normalmente, a equipa de trabalho é composta por duas pessoas que trabalham na mesma árvore simultaneamente. A Figura 1.9 ilustra o processo de extração da cortiça. Um machado de descortiçamento com uma lâmina de corte curva e um braço de madeira razoavelmente longo com uma extremidade cinzelada é utilizado para separar as pranchas de cortiça. O processo de extração da cortiça começa com um corte horizontal ao longo do perímetro da árvore à altura do peito ou ligeiramente superior, seguido de dois/três cortes verticais, dependendo do perímetro da árvore. O corte é feito equilibrando o machado e ajustando a força de modo a cortar através da camada de cortiça, mas não penetrando na casca interna. Os golpes de corte subsequentes seguem uma linha reta ou em torno do caule. A camada de cortiça é separada inserindo o braço do machado no corte e alavancando-o para fora. A prancha de cortiça é extraída a seguir. A camada de cortiça em contacto com o solo na extremidade inferior do caule é removida, deixando uma superfície limpa e despojada. A

técnica é repetida de forma semelhante no caule e ramos principais da árvore até que a capacidade de extração da cortiça seja atingida. Escadas, originalmente de madeira, agora normalmente de alumínio, são utilizadas para aceder aos ramos superiores. O descortiçamento é um processo bastante rápido quando realizado por funcionários qualificados, e uma equipa (2 elementos) atinge aproximadamente uma média de 900 kg/dia [4]. No caso de árvores grandes com caules curtos e vários ramos espessos espalhados, o descortiçamento é realizado por vários grupos de descortiçadores que devem subir pela árvore de pé sobre os ramos, como se pode ver na Figura 1.9c. Estas árvores produzem uma quantidade considerável de cortiça (centenas de quilos). O sobreiro Whistler, o maior e mais antigo sobreiro de Portugal, que por acaso é também considerado o maior do mundo pelo Livro de Recordes do Guinness, com um peso de 102 toneladas, foi descortiado em 2000, produzindo 650 kg de cortiça, enquanto a anterior colheita de cortiça em 1991 rendeu 1.2 toneladas [44].



Figura 1.9 a) Corte da casca - linhas horizontais e verticais; b) O braço do machado é utilizado para extrair a prancha de cortiça; c) Visão geral da operação de descortiçamento; d) O uso de escadas para o descortiçamento da parte superior; e) Descortiçamento dos ramos (cortesia de APCOR ©[1]).

O descortiçamento é realizado por um vasto grupo de trabalhadores, a maioria especializado na extração de cortiça, aproximadamente 100. Para além de descortidores, estes grupos são compostos por um gestor e indivíduos que recolhem e transportam as pranchas para um local central, bem como por aqueles que as empilham. A Figura 1.10 demonstra como as pranchas são colhidas do solo e carregadas no trator.



Figura 1.10 Trator carregado com pranchas de cortiça (cortesia APCOR© [1]).

A extração de cortiça é um acontecimento espetacular enraizado no passado cultural e social destas regiões. Aparece frequentemente no artesanato, como a cerâmica e os azulejos pintados à mão. Tem havido algumas tentativas de automatizar o processo de descortiçamento. Embora tenham sido testadas abordagens mais complexas, tais como a utilização de um jato de água de alta pressão ou um feixe de laser, estas foram descartadas devido a restrições práticas ou de custos. Além disso, foram propostas algumas máquinas de serrar manuais motorizadas para operação de corte e testadas no terreno [45]. Embora limitadas à extração vertical e de caule curto, os resultados são promissores em termos de precisão de corte e despesas operacionais.

Imediatamente após a remoção da casca da cortiça, o caule do sobreiro parece castanho-dourado e liso. Escurece durante as semanas seguintes, acabando por atingir uma cor castanha-avermelhada escura, uma vez que os tecidos exteriores do floema secam rapidamente, dando ao caule uma textura rugosa, como se vê na Figura 1.11. Após anos de exposição às intempéries, o caule torna-se castanho-acinzentado escuro e ainda mais áspero com sulcos profundos que variam em profundidade, dependendo da intensidade de crescimento da camada subjacente.





Figura 1.11 Aspeto do caule de cortiça após descortiçamento (cortesia APCOR© [1]).

#### ***1.2.1.1 Intensidade de Descortiçamento***

A intensidade de descortiçamento é definida como a área de casca removida em relação ao tamanho da árvore. O coeficiente de descortiçamento é definido pela Eq. 1.1 como a relação entre a altura de descortiçamento e a circunferência do sobreiro à altura do peito,  $pbh_{overcork}$  (a 1.3 m de altura) [45]:

$$\text{Coeficiente de descortiçamento} = \frac{\text{altura de descortiçamento}}{pbh_{overcork}} \quad (1.1)$$

A legislação ou os procedimentos de boas práticas restringem o coeficiente de descortiçamento. Em Portugal, o coeficiente máximo de descortiçamento é regulado por lei [4]. Este depende do estado de desenvolvimento da árvore: 2.0, 2.5, e 3.0 para o primeiro, segundo, e sucessivos descortiçamentos, respetivamente (Figura 1.12). A cortiça não pode ser extraída até a árvore atingir uma circunferência de 70 cm (22 cm de diâmetro) à altura do peito. Este é também o limite para a extração em ramos. Em Espanha, a restrição é de 60 cm em torno da circunferência à altura do peito (19 cm de diâmetro). Quando os ramos são retirados do sobreiro, a altura de descortiçamento inclui a altura do caule e o comprimento do ramo medido ao longo do ramo descascado mais comprido. A idade para a produção depende do crescimento radial. Contudo, é geralmente aceite que o diâmetro requerido é atingido aos 20 - 25 anos em cenários típicos de crescimento ou 30 - 40 anos em ambientes menos favoráveis.

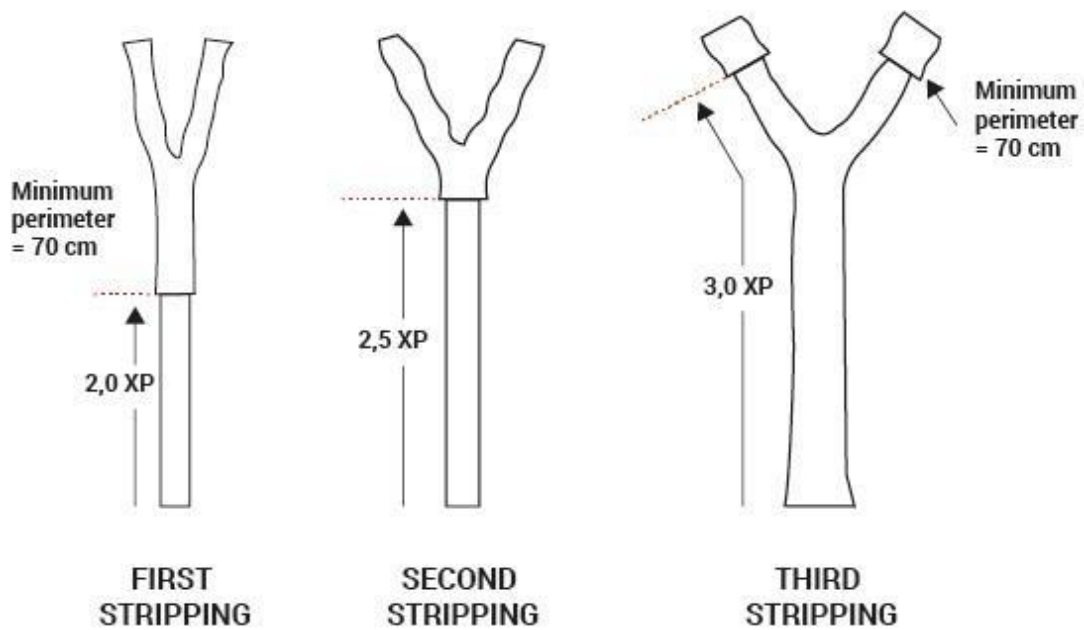


Figura 1.12 Três fases de descortiçamento da vida do sobreiro (adaptado de [46]).

Os limites de intensidade foram estabelecidos com base na experiência e no senso comum empírico relativamente à percentagem da superfície do caule e dos ramos que uma árvore pode tolerar perder da sua periderme sem perda irreparável de vitalidade. A intensidade da extração de cortiça está ligada à frequência das extrações, definida como o número de anos entre duas extrações, referido como o ciclo de produção. Não existem estudos disponíveis que meçam a influência do tempo do ciclo de extração da cortiça no crescimento da árvore. O crescimento da cortiça ao longo do ciclo foi extensivamente examinado, e parece que a duração do ciclo foi ditada pela necessidade de atingir uma espessura especificada na prancha da cortiça para posterior utilização industrial. Como resultado, a duração pode variar por região, dependendo da média anual de crescimento da cortiça. Na maioria de Portugal e no sul de Espanha, uma espessura de prancha de aproximadamente 3–3.5 cm é normalmente atingida em 9 anos. No entanto, a obtenção desse valor na Catalunha, Espanha, ou sul de França leva mais de 15 anos. Existe um limite legal de 9 anos para o período mínimo entre extrações tanto em Portugal como em Espanha. A idade pode ser determinada contando os anéis numa secção transversal de cortiça, sendo os anos de extração contados como meio ano, como ilustrado na Figura 1.13.

A extração de cortiça num povoamento pode ocorrer simultaneamente em todas as árvores - cortiça de idade uniforme - ou num subconjunto de árvores - cortiça de idade desigual. Duas rotações de extração de cortiça são estabelecidas em povoamentos de cortiça de idade desigual, a árvore e o povoamento, dependendo do número de idades distintas da cortiça no povoamento. Para ajudar na gestão florestal, o ano de extração é registado na árvore, pintando de branco o último dígito no caule após a extração da cortiça - por exemplo, se extraído em 2005, o número 5 é pintado, como ilustrado pela Figura 1.14. A atual estratégia de gestão favorece zonas de gestão de cortiça de idade regular e duas ou três idades da cortiça em grandes povoamentos.

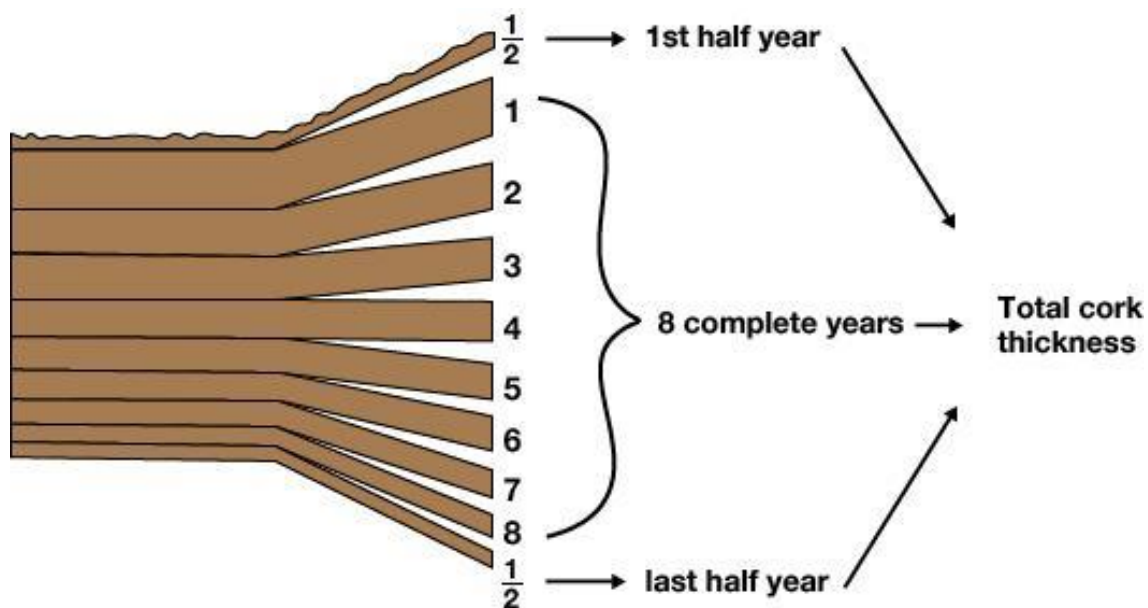


Figura 1.13 Representação da contagem dos anéis numa secção de cortiça para determinar a sua idade (adaptado de [7]).

Historicamente, também se praticava o descortiçamento fracionado do caule: aproximadamente metade da altura do caule era tirada num ano, e a área restante após 4-5 anos. Assim, uma árvore sofria 2 ciclos de cortiça separados por um atraso de 3-5 anos. Esta prática é atualmente proibida ou fortemente desencorajada, uma vez que o corte repetitivo na mesma parte do caule resulta em reações às feridas que formam uma cinta à volta do caule, resultando em cortiça de má qualidade. Estes sobreiros continuam a ser muito característicos do ambiente do montado.



Figura 1.14 Indicação do ano de extração da cortiça (cortesia da APCOR© [1]).

### *1.2.1.2 Efeito no Crescimento das Árvores*

Reconhece-se que o trabalhador envolvido na extração da cortiça deve ser hábil e cuidadoso para cortar através da casca sem danificar a árvore. De facto, é necessário um golpe forte e rápido, ou a cortiça absorverá a maior parte da energia, mas não extremamente forte ao ponto de penetrar o floema ou o câmbio. As feridas resultantes da extração da cortiça, fornecem pontos de entrada para infeção e ataque biológico. A árvore responde formando calosidades emergentes no caule, por vezes de forma bastante proeminente, como a linha limite entre extrações em descortiçamento fracionado. Este fenómeno é facilitado pelas linhas de corte repetitivas no local exato durante os descortiçamentos subsequentes. A produção de cortiça diminui nas zonas de reação, e os seguintes descortiçamentos são tecnicamente mais desafiantes, com maiores probabilidades de dano. O efeito dos danos causados às árvores pelas extrações subsequentes no seu crescimento foi analisado em [47]. Em geral, o desenvolvimento radial das árvores foi reduzido em cerca de 13% em comparação com o das árvores não danificadas [47]. A produção de cortiça diminuiu em 14% com um efeito pronunciado nos 2 anos subsequentes à extração [47].

Uma investigação sobre os danos causados pelo descortiçamento em 4 regiões selecionadas na região da Estremadura reportou uma incidência significativa de danos (afetando 31%-46% das árvores) e correlações notáveis entre danos e buracos causados pelo ataque do escaravelho *Cerambyx* e subsequente infeção fúngica por *Biscogniauxia mediterranea* (Figura 1.15) [48]. A necessidade de mão-de-obra altamente qualificada para o descortiçamento, a desinfecção dos instrumentos de corte entre os descortiçamentos individuais das árvores, e o controlo rigoroso da operação são temas recorrentes na gestão do sobreiro, mas nem sempre são seguidos.

O descortiçamento da cortiça tem um impacto fisiológico direto na árvore. A região onde a cortiça foi removida sofre uma maior perda de água por transpiração do caule, enquanto os estomas fecham rapidamente nas horas seguintes (por exemplo, sem atividade estomacal após 24h), causando a perturbação dos processos nutricionais e só voltando ao normal após 24-30 dias. Durante este período, forma-se felogénio traumático e várias camadas de células de cortiça, protegendo o floema ativo da perda de mais água. Uma vez que este processo requer um consumo de reserva significativo, a atividade do câmbio vascular diminui, e o crescimento da madeira cessa durante esta fase. Existem poucos resultados de investigação sobre a influência da remoção da cortiça ou a sua gravidade no crescimento radial da árvore. Devido à dificuldade de observar anéis anuais no sobreiro, é impossível rastrear como a extração de cortiça afeta o crescimento seguinte utilizando a análise de discos de caule. Contudo, parece que quando uma árvore começa a produzir cortiça, a anatomia da madeira é alterada: células mais pequenas com paredes mais espessas, mais fibras, e menos parênquima, elementos da madeira irregularmente distribuídos sem a transição gradual característica da madeira primitiva para a tardia [48]. A redução do crescimento da madeira em árvores maduras nos 2 anos pós-extração da cortiça também é relatada (cerca de 15% num ciclo de produção de 9 anos) [49]. Contudo, a remoção da cortiça não reduziu o crescimento radial global da árvore em árvores muito jovens que crescem em condições favoráveis [13].

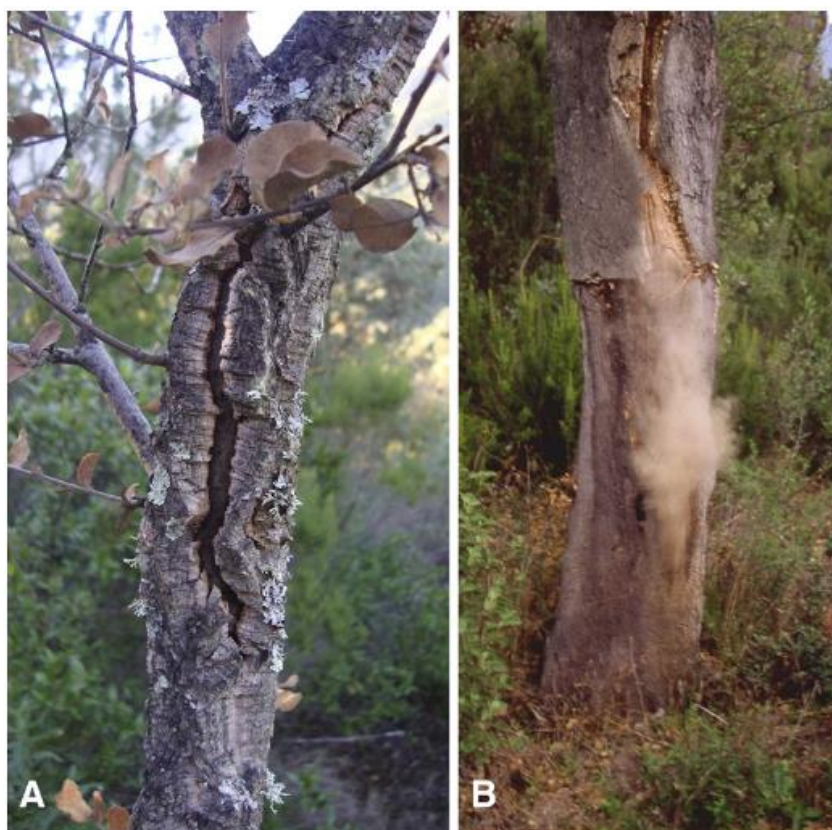


Figura 1.15 Sobreiro *Biscogniauxia mediterranea*: a) Estromas negros característicos erupcionados através da casca; b) Um cancro esporulante no tronco inferior [43].

### ***1.2.2. Operações Após a Colheita***

#### ***1.2.2.1 Armazenamento no Campo***

Os descortiçadores deixam as pranchas de cortiça retiradas no chão. Serão depois recolhidas por trator e empilhadas num pátio. Em zonas íngremes com acesso limitado, as pranchas de cortiça são transportadas utilizando um trator de correia ou mulas (em Espanha).

A criação de pilhas é um processo meticuloso, começando com a seleção do local (plano, seco, e facilmente acessível por estrada). As pranchas de cortiça seguem a forma do caule (curvo - costas de cortiça viradas para o lado convexo). Estas são empilhadas umas sobre as outras com a cortiça de costas voltadas para cima e cuidadosamente dispostas para criar uma parede exterior reta e sólida para a pilha, utilizando pranchas de forma regular. As tábuas de forma irregular e mais pequenas são colocadas no interior da pilha. As dimensões das pilhas variam, mas são tipicamente de 8-10 m de largura, 2-2.2 m de altura, e 30-50 m de comprimento. As Figuras 1.16 e 1.17 mostram alguns exemplos. A pilha é construída assim que as tábuas chegam do povoamento. Como resultado, as pilhas contêm pranchas de cortiça de diferentes espessuras e qualidades, uma vez que ainda não foi feita qualquer segmentação. Pilhas distintas são construídas inteiramente de pranchas de cortiça (400 cm<sup>2</sup> de superfície mínima), incluindo cortiça virgem e secundeira.



Figura 1.16 Empilhamento de pranchas no terreno (cortesia da APCOR© [1]).



Figura 1.17 Pilha de pranchas (cortesia de APCOR© [1]).

Os mestres do empilhamento de cortiça são profissionais qualificados que fazem a pilha sabendo que os potenciais compradores irão inspecioná-la. De facto, a comercialização da cortiça e o acordo sobre um preço é estabelecido na sequência de uma inspeção visual da pilha. Enquanto os espécimes do núcleo da pilha são por vezes tirados antes de fazer uma oferta, as pranchas à vista desempenham um papel significativo. O preço é determinado pelo peso, com a unidade de pesagem padrão de 15 kg. No entanto, é necessário um acordo adicional sobre a quantidade de água que a cortiça contém e o desconto de peso associado, tal como especificado na secção seguinte. A duração do armazenamento no campo varia e pode durar algumas semanas ou, em última análise, até 1 ano. Os acordos feitos entre produtor e cliente determinam o preço em grande parte, mas frequentemente, a logística na instalação industrial dita o momento em que a cortiça é recolhida. O armazenamento no campo e a construção de pilhas foram recentemente eliminados, e as pranchas de cortiça são diretamente entregues no estaleiro industrial após a extração da cortiça. No entanto, a fim de obter uma maturação e estabilização perfeitas, a cortiça deve ser deixada ao ar livre após o descortiçamento. O Código Internacional de Práticas Rolheiras (CIPR) estabeleceu diretrizes rigorosas para esta etapa, incluindo o empilhamento das pranchas sob materiais não contaminantes durante não menos de 6 meses [50].

### ***1.2.2.2 Variação do Teor de Água***

A cortiça apresenta um teor de humidade durante o descortiçamento dada a atividade do felogénio e a turgescência das células. Após o descortiçamento, as pranchas de cortiça contêm cerca de 25% de água, mas isto varia significativamente entre amostras, desde 10% a 50% [51]. A prancha de cortiça é húmida no centro e seca nas extremidades. Após a separação do caule, a camada interna de cortiça de 1 mm de espessura é translúcida, como se espera de um tecido preenchido com água. No momento da extração, a cortiça tem um teor de água inferior ao da madeira recolhida durante a colheita (mais de 50% de humidade). A razão é a baixa higroscopicidade da cortiça e o longo período de secagem do atual ciclo da cortiça para as camadas exteriores da periderme. À temperatura ambiente, as pranchas de cortiça perdem rapidamente água. Após cerca de 9 dias, as pranchas de cortiça empilhadas no campo devem ter um teor de água inferior a 14% e podem ser consideradas cortiça seca comercial. A cortiça totalmente equilibrada tem um nível de humidade entre 6-10%. O armazenamento em pilhas no campo não afeta a largura do anel de crescimento da cortiça ou a porosidade das pranchas de cortiça.

Ao negociar a venda de uma pilha de cortiça, o preço é geralmente acordado quando pesado. A cortiça transportada logo após o descortiçamento tem um desconto de 20% no teor de água, o qual é normalmente sujeito a um debate vigoroso. O teor real de água pode ser estimado, e a proporção de água em relação ao peso da cortiça pode ser calculada. Utilizando um teor de 25% de humidade no momento do descortiçamento, 14% após 9 dias, e 10% após 1 mês, 100 kg de cortiça seca (0% de humidade) pesarão 125, 114, e 110 kg, respetivamente. Isto sugere que o "desconto" ao peso devido à água seria: a) em relação a uma cortiça seca absoluta, 20, 12.3, e 9.1% da cortiça pesada após o descortiçamento, 9 dias e 1 mês, respetivamente; b) em relação à cortiça seca ao ar (o método comum) com 10% de humidade, 10, 2.3, e 0% da cortiça pesada após o descortiçamento, 9 dias e 1 mês, respetivamente.

### ***1.2.2.3 Armazenamento no Estaleiro e Preparação para o Processamento***

Tradicionalmente, as instalações industriais têm uma área significativa ao ar livre dedicada ao armazenamento de cortiça. A área de armazenamento de pranchas de cortiça (zona de estabilização) tem uma ligeira inclinação e é cimentada para evitar que a água da chuva se acumule perto do solo. Esta precaução destina-se a evitar o crescimento de micróbios ou contaminação nas pranchas de cortiça, o que poderia introduzir bolor ou acentuar sabores indesejáveis. Os fabricantes prestam muita atenção a esta questão, uma vez que defeitos nas rolhas de cortiça e conseqüentemente, sabores indesejáveis no vinho, são questões críticas de qualidade.

As pilhas de pranchas de cortiça nos pátios, representadas na Figura 1.18, podem ser dispostas de forma regular (da mesma forma que as pilhas do campo) ou mais aleatoriamente organizadas se construídas diretamente da descarga do camião, como na Figura 1.19. Na fábrica, a origem das matérias-primas é preservada, e as pilhas de armazenamento são separadas de acordo com as suas origens como um primeiro passo para rastrear a cortiça dentro do processo industrial.



Figura 1.18 Pranchas armazenadas no pátio de forma regular (cortesia da APCOR© [1]).



Figura 1.19 Pranchas no pátio após a descarga do caminhão (cortesia da APCOR© [1]).

A duração do armazenamento depende muito das exigências do processo industrial em termos de fluxo de matéria-prima. Historicamente, foram realizados períodos prolongados de até 2 anos, depois encurtados para 1 ano, e declarados como necessários para a estabilização química e estrutural das pranchas de cortiça. Como é o caso de um grande número de normas empíricas, também esta carece de uma base científica. As operações sucessivas e seguintes de ebulição em água, na fábrica, resultam no relaxamento estrutural das tensões, enquanto a secagem das camadas internas da cortiça e a oxidação do ar dos produtos metabólicos tiveram lugar no campo. É importante ter em conta que os produtos metabólicos estão limitados às poucas camadas celulares próximas do felogénio. Atualmente, as boas



práticas oficiais recomendam um período de armazenamento de 6 meses. No entanto, a matéria-prima é frequentemente processada com períodos de armazenamento mais curtos devido a fatores económicos e logísticos relacionados com a sazonalidade da produção de cortiça e o custo extremamente elevado da matéria-prima. A duração do armazenamento não tem efeito nas variações da largura do anel e na porosidade da cortiça, nem nas propriedades mecânicas das rolhas (em durações de 0-6 meses) [52].

A preparação para o processamento industrial tem lugar no pátio de armazenamento e implica a recolha das pranchas de cortiça em paletes para as cozer em água. Durante este procedimento, as pranchas com uma qualidade extremamente baixa são separadas e definidas como resíduos de pranchas de cortiça em bruto, bem como as pranchas de cortiça com inclusões de bolor e manchas amarelas. Várias pranchas da porção mais baixa do caule de sobreiro têm o colar de cortiça colocado no solo na junção das raízes da árvore (rodapé). Esta secção é cortada da tábua à altura de cerca de vinte cm para evitar o ataque microbiano do solo. Este procedimento também se inicia no campo antes da construção de pilhas.

#### ***1.2.2.4 Tipos de Cortiça em Bruto***

A cortiça virgem, formada na primeira periderme do sobreiro, pode ser vista em árvores jovens como a representada na Figura 1.20a, antes da primeira extração de cortiça ou em ramos não descortiçados de sobreiros maduros. Assim, a primeira extração de cortiça com a idade de 25 anos resulta em cortiça virgem. Devido à sua estrutura irregular e dureza excessiva, esta cortiça é imprópria para a produção de rolhas de cortiça. Esta cortiça é também utilizada para vários fins, tais como pavimentos e isolamentos.

Após a primeira extração da cortiça, desenvolve-se a nova periderme traumatizada até à extração subsequente (cortiça secundária). Esta segunda extração ocorre após 9 anos e resulta numa cortiça menos rígida com uma estrutura mais uniforme (Figura 1.20b). No entanto, a cortiça secundária apresenta frequentemente fissuras profundas, tornando-a também mais adequada para aglomerados, bem como para utilização na construção e outros produtos. A cortiça de reprodução (Figura 1.20c) está contida na seguinte periderme - quando a árvore tem cerca de 43 anos - bem como quaisquer outras que se possam desenvolver posteriormente. Esta é a matéria-prima que a indústria utilizará para o fabrico de rolhas, com descortiçamentos a cada 9 anos a partir deste ponto, durante cerca de 100-150 anos. A cortiça virgem pode ser obtida de árvores maduras cuja cortiça pode ser extraída de uma altura elevada devido à expansão radial das árvores. Nesta situação, uma tira de cortiça virgem é colocada na parte mais alta do caule até ser atingido o limite de altura desejado. A Figura 1.21 mostra uma árvore jovem após a extração da cortiça, com os limites entre as extrações de cortiça visíveis: cortiça virgem localizada na parte superior, cortiça secundária na região inferior seguinte, e a casca interna exposta na parte inferior restante do caule.

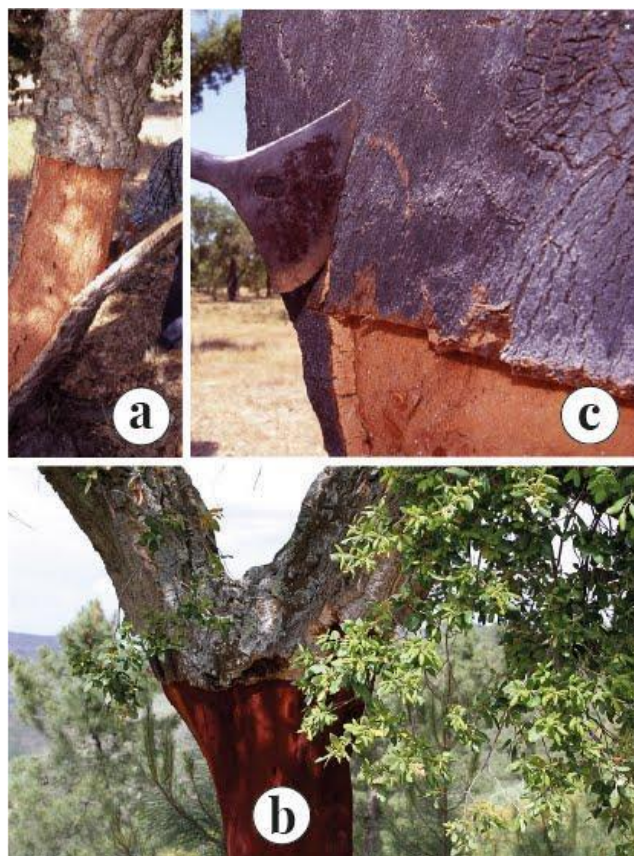


Figura 1.20 Três tipos de cortiça bruta: a) cortiça virgem (cortesia da APCOR© [1]); b) cortiça secundária [53]; c) cortiça de reprodução (cortesia da APCOR© [1]).



Figura 1.21 Neste caule é possível visualizar, de cima para baixo, a cortiça virgem, a cortiça secundária, e o felogénio exposto após o descortiçamento da cortiça [54].

A cortiça virgem também pode ser obtida a partir de ramos podados ou de árvores jovens que tenham sido removidos durante as operações de desbaste. Como os sobreiros são podados no Inverno, a camada de cortiça adere firmemente à casca interior. A cortiça é removida manualmente com um pequeno machado ou equipamento mecânico de descortiçamento. A cortiça é obtida, em qualquer dos casos, em partes que vão desde alguns centímetros até tiras mais compridas (aproximadamente 20 cm), embora inclua uma quantidade significativa da casca interna. Esta variedade de cortiça é referida como madeira de cortiça (também conhecida como cortiça de inverno). Esta matéria-prima tem um valor industrial mais baixo, uma vez que deve ser cuidadosamente limpa após trituração para remover a madeira dos grânulos de cortiça.

Resumidamente, os tipos possíveis de cortiça (matéria-prima) a serem obtidos da exploração destas árvores estão na Tabela 1.1, juntamente com as suas principais características e aplicações industriais.

Tabela 1.1 Tipos de cortiça obtidos a partir da exploração dos sobreiros e a sua respetiva caracterização e utilização (adaptado de [3]).

	Origin	Characteristics	Main use
Virgin cork	First cork extraction of young trees	It contains deep fractures and a distorted structure	Trituration for agglomerates
	Increase of cork stripping height from stem and branches during the juvenile and first age of mature trees		
	From branches of pruned felled trees (obtained manually with an axe)	It contains a large portion of inner bark and wood. (Also called winter cork)	Trituration for expanded agglomerates
Secondary cork	Second cork extraction	It contains deep fractures	Trituration for agglomerates
Reproduction cork	From third extraction onwards	May be obtained either by stripping of the standing tree or by axe removal after felling. In the latter, it contains portions of inner bark	Planks for production of stoppers
	Under-aged cork from tree fellings		Refuse, pieces and very thin planks for trituration for agglomerates

### ***1.2.2.5 Requisitos Industriais***

A indústria produz uma variedade de bens com diferentes graus de incorporação e transformação tecnológica da cortiça. Ainda assim, a viabilidade económica de todo o sector é principalmente definida pelo fabrico de rolhas de cortiça natural, principalmente para o engarrafamento de vinho. Atualmente, a adequabilidade da cortiça como matéria-prima para esta aplicação determina em grande parte o seu valor comercial e os objetivos do gestor florestal.

Ao determinar a adequabilidade da matéria-prima para processamento, a espessura da prancha é a variável crítica. Portanto, é comum que o potencial cliente industrial preste muita atenção à distribuição da espessura das pranchas de cortiça quando inspeciona as pilhas de campo. A espessura das pranchas obtidas de várias árvores dentro do mesmo povoamento e entre povoamentos dentro da mesma região varia significativamente. O fator decisivo é a fração de pranchas de cortiça com uma espessura adequada (mínimo de 27 mm) para o fabrico de rolhas. As pranchas mais finas são utilizadas para fazer discos de cortiça para rolhas técnicas, tais como as utilizadas em garrafas de champanhe.

A espessura da prancha é determinada pelas circunstâncias ambientais, genética das árvores, e a duração do ciclo da cortiça: as camadas de cortiça mais espessas são obtidas com intervalos mais longos entre extrações. Esta é uma variável de gestão que os silvicultores podem utilizar para otimizar o valor da produção, tendo em conta os requisitos industriais. Além disso, é dada consideração à qualidade das pranchas de cortiça em termos de homogeneidade do tecido corticeiro. Porosidade excessiva causada por canais lenticulares, visível na Figura 1.22, e outras descontinuidades tais como fissuras ou galerias de insetos reduzem significativamente a produção e a qualidade das rolhas, o que pode resultar em rejeições de qualidade. Nesta situação, tais pranchas são consideradas resíduos e processadas para obter grânulos de cortiça com o objetivo de produzir aglomerados de cortiça.

As dimensões das pranchas de cortiça em bruto variam de acordo com a dimensão da árvore e fatores operacionais relacionados com o descortiçamento do sobreiro. São aproximadamente retangulares, com uma altura de 1-1.8 m e uma largura de 0.4–0.8 m. As pranchas de cortiça utilizadas para fazer rolhas possuem uma altura média de 1.19 m e uma largura média de 0.47 m, resultando numa área média de 0.37 m<sup>2</sup> [47]. As dimensões comparáveis nas pranchas de cortiça destinadas à produção de discos revelaram uma altura média de 0.75 m e uma largura de 0.35 m, resultando numa área média de 0.19 m<sup>2</sup> [56]. Peças com uma superfície inferior a 400 cm<sup>2</sup> não se enquadram na categoria de pranchas e são empilhadas separadamente para utilização na produção de granulados. Depois de ferverem em água, as pranchas de cortiça são classificadas de acordo com a sua espessura e qualidade. O critério primário é a sua aptidão para o fabrico de rolhas.

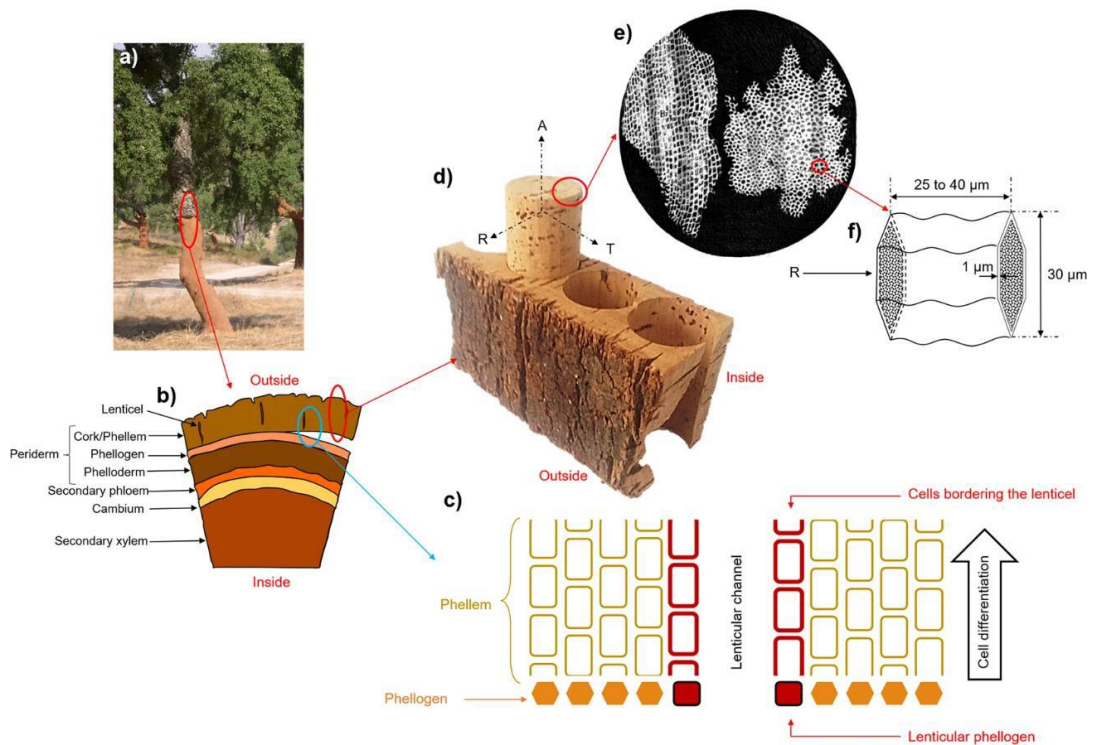


Figura 1.22 Canais lenticulares que atravessam a camada de cortiça: (a) Cortiça após colheita; (b) Secção transversal do sobreiro; (c) Região felogénica com diferenciação celular; (d) Produção de rolhas a partir da casca (A - direção axial, R - direção radial, T – direção tangencial). É possível observar os canais lenticulares alinhados com a direção radial; (e) Primeira observação de células de cortiça por parte de Robert Hooke em 1665; (f) Forma e dimensões típica da célula “phellem” [55].

### 1.2.2 Defeitos da Cortiça e Implicações

A porosidade causada pelos canais lenticulares, uma característica fisiológica natural e importante que permite a comunicação entre as células vivas da árvore e o ambiente externo, não pode ser considerada como um defeito. Contudo, quando em excesso, pode comprometer a qualidade da prancha de uma forma que já não pode ser utilizada para rolhas, uma vez que pode aumentar a permeabilidade dos fluidos e, portanto, contaminar o vinho ou causar fugas.

A cortiça também contém ocasionalmente traços de origem biológica ou externa que se correlacionam com falhas estruturais e têm um certo impacto na qualidade da matéria-prima, dependendo do seu tipo e quantidade. Estes podem ser classificados da seguinte forma:

- **Galerias de insetos:** o sobreiro pode sofrer ataques de insetos que desenvolvam galerias no tecido da cortiça (camada de felogénio) (Figura 1.23). Formigas - sendo a mais comum a *Crematogaster scutellaris Oliv.* - vivem na casca do sobreiro e escavam canais que correm aleatoriamente através da prancha. Para além de contaminantes ocasionais, tais como partículas de areia, excrementos de insetos e hifas fúngicas, as galerias estão completamente vazias [57]. Além disso, os coleópteros (*Coroebus undatus F*) põem ovos nas fendas das costas da cortiça, e as larvas, que crescem até um tamanho considerável de 3 cm, alimentam-se do felogénio. Estas áreas que foram atacadas por tais insetos não são adequadas para o fabrico de rolhas.

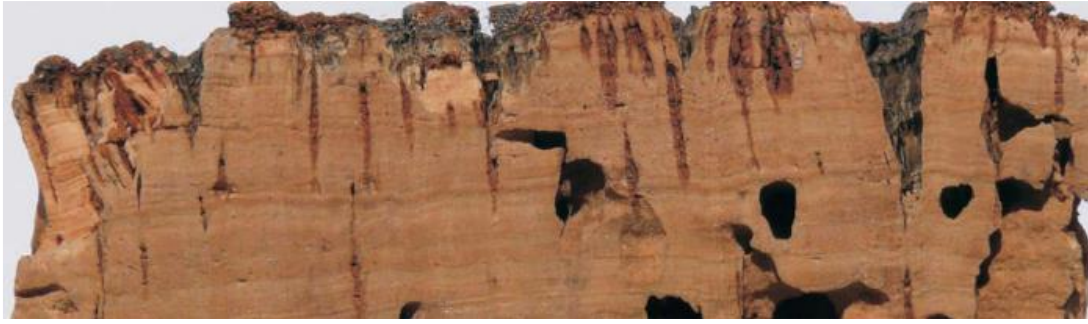


Figura 1.23 Galerias de insetos causadas por formigas [58].

- Pregos: o defeito conhecido como "prego" (Figura 1.24) consiste na presença de células lignificadas no tecido de cortiça, com paredes espessas, frequentemente quase sem lúmen aberto e composição química lignocelulósica. Ocorrem devido à inatividade de algumas células de felogénio, levando à regeneração de uma nova porção de felogénio. Devido a isso, apresentam maior tenacidade, densidade, e baixa elasticidade [6].

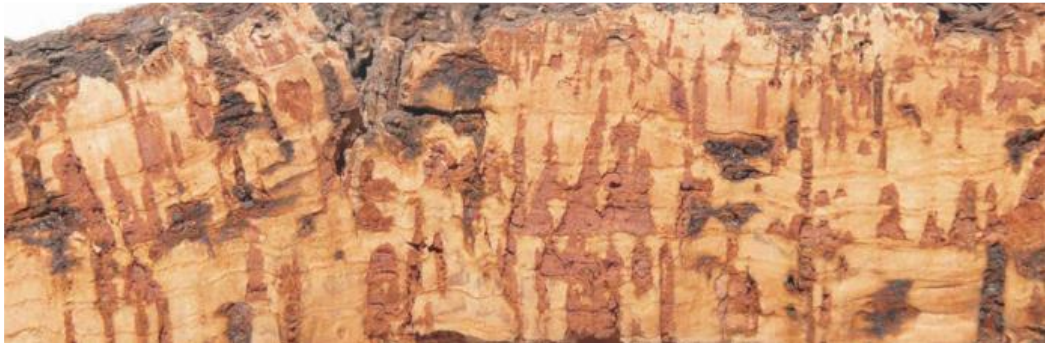


Figura 1.24 "Pregos" em uma prancha de cortiça [58].

- Sulcos profundos podem ocorrer na parte traseira da prancha (Figura 1.25). Correm verticalmente, penetrando o tecido de cortiça. As linhas de sulco indicam falha do tecido como resultado da tensão tangencial de crescimento e são assim mais prevalentes em árvores com uma elevada taxa de crescimento radial (típica na cortiça secundária).



Figura 1.25 Pranchas com sulcos profundos [58].

- Manchas: As pranchas podem apresentar manchas, tais como amarelas ou cor de mármore, resultantes de ataques microbianos. *Armillaria Mellea*, basidiomicetos saprófitas que crescem no solo e materiais lignocelulósicos, causam manchas amarelas (Figura 1.26). As células da cortiça protegem a

árvore da invasão patogénica. A cortiça torna-se cinzenta, e os tecidos circundantes revelam uma descoloração branco-amarelada e um odor a mofo distinto. Os extrativos polares substituem a lignina e os polissacarídeos na composição química da cortiça. A descoloração é mais comum na base do caule, mais próxima do solo. Como resultado, as pranchas manchadas não são utilizadas no fabrico de rolhas de vinho. Quanto à mancha cor de mármore, um ataque fúngico (*Melophia opiospora* Sacc) provoca uma coloração azulada da cortiça nas camadas exteriores e em torno dos canais lenticulares. Para além do local da perfuração, a parede da célula de cortiça permanece intacta, e as hifas não têm impacto nas propriedades da cortiça [57]. Tal cortiça não é utilizada para fazer rolhas de cortiça. Em vez disso, pode encontrar valor acrescentado sendo utilizada para fins decorativos devido à sua distribuição aleatória de manchas semelhantes a mármore e linhas de contorno escuras.



Figura 1.26 Exemplo de uma mancha amarelada em um pedaço de cortiça [59].

- Cortiça húmida: trata-se de um defeito de cortiça que resulta em níveis de humidade excepcionalmente elevados (400 - 500 %) e cuja causa é desconhecida. Natividade [6] sugere que é causado pela perda de impermeabilidade celular, que por sua vez resulta da deposição anormal de suberina nas camadas secundárias das paredes das células. Este defeito ocorre principalmente nas camadas anuais mais recentes, adjacentes à barriga das pranchas e na região adjacente à base do caule. O principal inconveniente é a retração excessiva que a cortiça sofre na região afetada após a secagem (levando por vezes mesmo ao colapso das células), o que prejudica a sua capacidade de vedação e estabilidade dimensional; portanto, não é adequada para a produção de rolhas [60]. Figura 1.27 apresenta um exemplo de cortiça húmida numa prancha de cortiça.



Figura 1 Exemplo do defeito de cortiça húmida [58].

## 1.2.4 Classificação das Pranchas de Cortiça

### 1.2.4.1 Classes de Espessura

A espessura das pranchas é o aspecto principal na definição da aplicação final da cortiça, com impacto no seu processamento industrial e comércio. A abordagem industrial consiste em classificar as pranchas de acordo com a sua espessura, conforme especificado pelas normas e apresentado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 Classes de espessura de pranchas utilizadas na indústria da cortiça (adaptado de [4]).

Comercial class	Thickness (mm)
Extra thin	9 - 22
Thin	22 - 27
Half standard	27 - 32
Standard	32 - 40
Large	40 - 54
Extra large	>54

As classes foram criadas tendo em mente o potencial para processamento posterior. As classes de espessura mais adequadas para a produção de rolhas são 27 - 32 mm, e assim, os fabricantes de cortiça pretendem produzir pranchas de cortiça nesta faixa de espessura. A espessura da prancha de cortiça é determinada pela duração do ciclo de produção da cortiça e pela taxa de crescimento anual da cortiça. Nos maiores locais de produção de cortiça, um ciclo de produção de cortiça de 9 anos é adequado para satisfazer as necessidades de matéria-prima industrial primária.

A espessura global da prancha é medida da barriga para trás. Assim, a camada exterior do dorso deve ser considerada ao determinar a aptidão industrial de uma prancha. Embora os preços das pranchas de cortiça variem significativamente entre as classes, geralmente, o preço/kg das pranchas nas gamas 27-32 mm e 32-40 mm é o mesmo e serve de referência para outras classes. Os preços das pranchas na gama de 22-27 mm são quase 1/2 deste valor de referência, e 1/3 para pranchas mais finas do que 22 mm, e quase 2/3 do valor de referência para pranchas na gama de 40-54 mm de espessura.

### 1.2.4.2 Classificação de Qualidade

As pranchas de cortiça são comercialmente categorizadas em múltiplas classes com base na sua qualidade. Esta inspeção visual das porções transversais e radiais da prancha de cortiça e da sua superfície do ventre é utilizada para determinar a sua qualidade. O primeiro parâmetro de qualidade está associado à porosidade fornecida pelos canais lenticulares, que variam em número, mas principalmente em área. Uma prancha de alta qualidade contém uma quantidade mínima de canais lenticulares. Em segundo lugar, a presença de falhas e o seu potencial impacto no processamento. A classificação de uma



única prancha de cortiça baseia-se na noção integrada deste rendimento potencial em artigos de cortiça natural de alta qualidade, tais como rolhas e discos.

As pranchas de cortiça são classificadas com base na sua qualidade em 6 classes (1ª a 6ª) e uma classe adicional de resíduos. A avaliação é manual e depende muito do operador. Assim, está envolvido um elevado grau de subjetividade, e a classificação pode variar entre operadores. Embora seja comum e fácil distinguir entre cortiça muito boa e de qualidade fraca, isto não é verdade para a cortiça de qualidade média. Como resultado, existem variações significativas entre as classificações estabelecidas por vários peritos. Um estudo que utilizou um catálogo de referência de 480 amostras de cortiça classificadas por cinco especialistas independentes [61] revelou apenas uma correlação de 5.3% na classificação das amostras individuais (mas com uma correspondência de 100% em relação às qualidades superior e inferior - 1ª qualidade e recusa).

Esta categorização de seis qualidades (e de resíduos) de pranchas de cortiça já não é utilizada na prática. Pelo contrário, são utilizadas classes de qualidade agregada adicionais: um sistema de classificação atual utiliza uma gama de 1ª – 3ª para representar pranchas de alta qualidade, uma gama de 4ª - 5ª para representar pranchas de qualidade média, e uma 6ª classe para representar pranchas de baixa qualidade. Outra possibilidade, e provavelmente a mais utilizada, é reduzir a classificação de qualidade das pranchas em apenas 2 categorias: uma gama de 1ª – 5ª para representar pranchas de cortiça adequadas para a produção de rolhas de cortiça e uma 6ª classe que inclui pranchas de menor qualidade e desempenho para a produção de rolhas.

A relação entre a classificação de qualidade e a quantificação da porosidade baseada na inspeção visual foi examinada, e a porosidade e o tamanho dos poros aumentaram com a classe de classificação. Isto é verdade tanto para as secções tangencial como transversal ou radial. Contudo, dentro de cada classe, existe uma diversidade considerável, e as diferenças nos valores médios entre as classes contíguas são estatisticamente insignificantes. A Tabela 1.3 apresenta parâmetros diferentes para a porosidade em pranchas de cortiça de classes de qualidade variável.

Tabela 1.3 Parâmetros médios relacionados com a porosidade para diferentes graus de qualidade de pranchas de cortiça (observações na secção tangencial) (adaptado de [4]).

	Quality class				
	1st	1st - 3rd	3rd	4th - 5th	6th
Porosity coefficient (%)	3.3	4.5	6.0	6.7	12.4
No. of pores/ 100 cm <sup>2</sup>	568	584	785	860	815
No. of pores > 0.8 mm <sup>2</sup> /100 cm <sup>2</sup>	47	84	111	121	176
Average pore area (mm <sup>2</sup> )	0.58	0.83	0.81	0.79	1.57
Maximum pore area (mm <sup>2</sup> )	19.7	23.1	21.1	26.3	82.0

A divisão em apenas três classes permite uma maior diferenciação e uma classificação consistente. Por exemplo, o coeficiente de porosidade pode ser utilizado para categorizar as pranchas, estabelecendo os seguintes limites de classe: as pranchas de alta qualidade têm uma porosidade inferior a 6%, e as pranchas de qualidade média têm de ter uma porosidade inferior a 10%. As dimensões ou formas dos objetos vistos na imagem da superfície da cortiça podem ser usados para distinguir canais lenticulares de outros defeitos, tais como galerias de insetos [62].

### 1.2.4.3 Índice de Valor Integrado da Cortiça

Dado que o valor da prancha é determinado por uma combinação de espessura e qualidade relacionada com a porosidade, foi recomendada uma variável combinada para indicar o valor da cortiça com base no valor comercial relativo de várias combinações de gamas de espessura e de classes de qualidade. Esta ferramenta pode ser utilizada para avaliar o valor de produção de um determinado povoamento de cortiça, considerando a espessura das pranchas e a distribuição da qualidade [4]. Foi proposto o seguinte índice de qualidade (Eq. 1.2):

$$Q = \sum_{k=1}^{n_k} Q_k P_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} Q_i}{n_t} \quad (1.2)$$

Onde  $Q_k$  é o preço índice para a cortiça da classe  $k$ ,  $p_k$  é a proporção de unidades de amostragem de cortiça em cortiça da classe  $k$ ,  $n_k$  é o número de classes de qualidade,  $Q_i$  é o preço índice para a unidade de amostragem extraída da árvore  $i$ , e  $n_t$  é o número total de árvores amostradas.

Os preços índice estão ligados à classe de qualidade da cortiça mais valorizada, como ilustrado na Tabela 1.4, com um exemplo estabelecido por um painel de peritos. Claramente, os números podem precisar de ser atualizados para refletir as mudanças no mercado da cortiça ou para refletir condições únicas de comércio e processamento.

Tabela 1.4 Índice de preços para cortiça de diferentes espessuras e qualidade (adaptado de [4]).

Thickness (mm)	Quality class			
	1st - 3rd	4th - 5th	6th	Refuse
14 - 18	22	10	8	8
18 - 22	31	13	8	8
22 - 27	50	30	13	8
27 - 32	100	60	28	8
32 - 40	100	60	28	8
>40	66	33	17	8

### 1.3 Tratamento Pós-Colheita

Após a receção das pranchas em bruto na fábrica, estas são mantidas em condições ambientais e depois passam por um procedimento conhecido como preparação, que implica ferver em água, aparar, e classificar as pranchas. Um esquema completo do processo de preparação é representado na Figura 1.28.

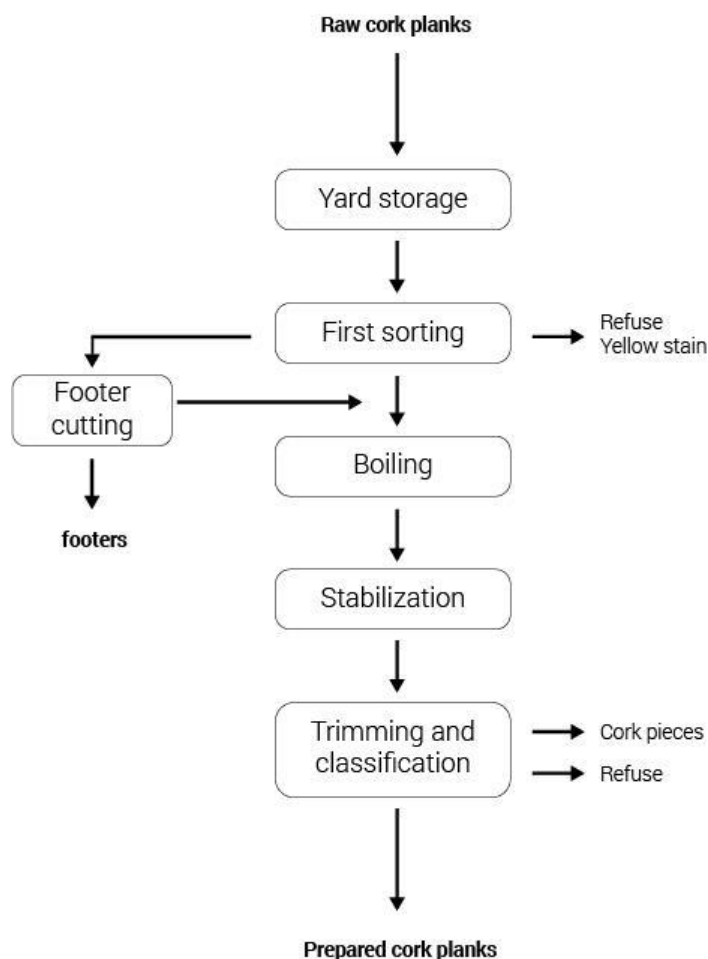


Figura 1.28 Preparação das pranchas de cortiça em bruto na fábrica (adaptado de [4]).

#### 1.3.1 Cozedura

Cozer a cortiça é um processo aplicado a todas as pranchas de cortiça de reprodução, utilizadas para criar rolhas e discos. O método tem assistido a uma modernização significativa nos últimos anos. Durante muitos anos, as pilhas de pranchas foram empilhadas em tanques de grande capacidade, fervendo água utilizando um forno normalmente abastecido com lenha. O processo era repetido para lotes subsequentes utilizando a mesma água. De modo a repor a quantidade absorvida na cortiça ou evaporada, água limpa era introduzida. A cada 4-5 dias, o tanque era esvaziado, limpo, e enchido de novo com água. Nestas condições, a água tornava-se rapidamente castanha com excesso de espuma e com concentrações de partículas em suspensão e dissolvidas nas águas residuais muito elevadas. Por exemplo, após 1 dia de operação, os sólidos dissolvidos ascendiam a 0.24% e os fenólicos solubilizados a 0.04% da massa da prancha de cortiça [63].

A atual técnica e equipamento de cozedura da cortiça sofreu uma evolução significativa. As pranchas estão agora empilhadas em paletes de aço inoxidável, e o tratamento da água realiza-se numa autoclave fechada de aço inoxidável. O esquema simplificado representado na Figura 1.29 representa a operação de fervura. A água é aquecida a 95°C e circula no interior da autoclave utilizando permutadores de calor. Os filtros nas linhas de água removem os sólidos em suspensão. O autoclave vazio é carregado com pranchas de cortiça, e a água é adicionada após o fecho e circula durante 1 hora. Finalmente, o autoclave é drenado, a porta é aberta, e as pranchas são removidas. O fundo piramidal truncado do autoclave evita a deposição de sólidos. O autoclave é principalmente automatizado e controlado por computador, incluindo a carga/descarga. Em algumas situações, vapor a 110-120°C pode ser utilizado para expandir pranchas finas para fabricar discos para rolhas de champanhe.

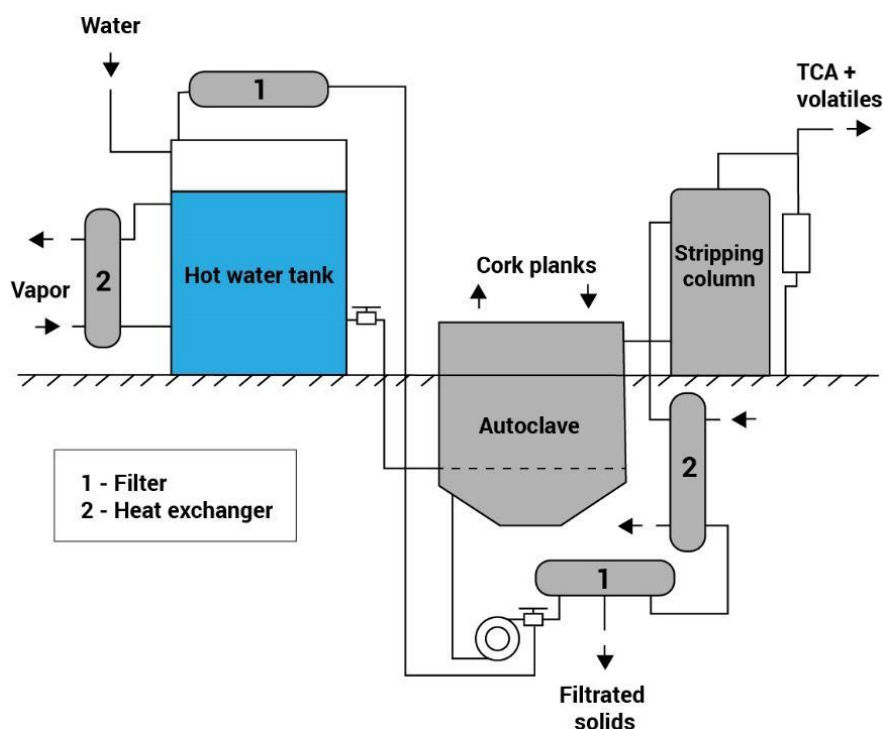


Figura 1.29 Diagrama representativo de um autoclave para cozedura de cortiça com circulação de água e eliminação de resíduos voláteis (adaptado de [4]).

Para evitar a entrada de substâncias com teor de cloro elevado na cortiça, o que poderia resultar em contaminação do vinho, a água utilizada não é clorada. Noutras circunstâncias, como no sistema representado no esquema da Figura 1.29, uma coluna de extração é utilizada para extrair e concentrar os resíduos voláteis da água quente. A água ao ferver extrai e concentra 2,4,6-tricloroanisol (TCA) e clorofenóis, que contaminam o vinho.

As águas residuais são um problema de resíduos devido às suas concentrações médias de demanda química de oxigénio (COD) e demanda bioquímica de oxigénio (CBO) de 7.4 e 1.3 g/L, valores de pH de 4.8 – 5.1, e elevada toxicidade devido à presença de compostos fenólicos e polifenólicos em concentrações de 9 g/L (fenol) e 0.5 g/L (como ácido cafeico), respetivamente [64,65]. Foram propostos

vários processos, incluindo ultrafiltração [66], floculação combinada, flotação, degradação e desintoxicação fúngica [64], floculação de cloreto férrico [65], oxidação química com o reagente de Fenton [68]. Vários dos poluentes fenólicos significativos encontrados em águas residuais de cortiça, tais como esculetin (6,7-dihidroxicumarina) [69], ácido gálico [70], ácido elágico [71], e apocinina, foram investigados como compostos modelo para tratamento [72].

### ***1.3.1 Como a Cozedura Afeta a Cortiça***

O principal objetivo da cozedura da cortiça é alterar as propriedades mecânicas das pranchas, para as aplanar, facilitando futuros processos de corte. A combinação de aquecimento e água resulta num enfraquecimento significativo da cortiça logo após a ebulição. Isto alivia as tensões de crescimento, reduzindo as ondulações nas paredes celulares e aumentando a homogeneidade da estrutura celular.

A cortiça expande-se em dimensão devido ao endireitamento das paredes celulares: a espessura das pranchas de cortiça aumenta cerca de 15%, relativamente à expansão radial das células, enquanto a expansão é de cerca de 6% tanto na direção tangencial como axial [73]. É razoável prever que a expansão das diferentes pranchas de cortiça com cozedura varia significativamente, uma vez que este valor depende das ondulações celulares devido a tensões internas, que são propriedades extremamente variáveis. Embora os valores típicos da expansão radial da prancha de cortiça se situem tipicamente entre 11-15%, são também obtidos valores individuais que variam entre quase 0 e mais de 40%. Medido pelo coeficiente de porosidade, a porosidade da cortiça diminui com a temperatura da água [74]. Assim, a cozedura da cortiça em água melhora a qualidade das pranchas na prática, aumentando o seu tamanho e diminuindo os diâmetros dos canais lenticulares. Além disso, a curvatura das pranchas de cortiça em bruto é virtualmente removida, tornando as pranchas praticamente planas (Figura 1.30), o que facilita o fabrico de rolhas e a introdução de equipamento automatizado no processo de fabrico.



Figura 1.30 Pranchas de cortiça após fervura.

A temperaturas inferiores a 100 °C, a alteração dimensional da cortiça causada pela ebulição é irreversível. Isto significa que a imersão e secagem repetidas da cortiça, como ocorre durante a lavagem e branqueamento da rolha, não tem qualquer efeito sobre as suas dimensões.

Uma vez que a duração da extração e a área de superfície de cortiça-água são demasiado limitadas, a ebulição da cortiça extrai uma quantidade ínfima dos compostos solúveis em água correspondente a menos de 2% dos extratos de água da cortiça. Portanto, apesar das frequentes afirmações, a extração de compostos químicos da cortiça não é o objetivo do processo de ebulição nas condições empregues na indústria. O mesmo se aplica ao que é referido como esterilização microbiológica da prancha.

A frequência da renovação da água e da extração dos resíduos voláteis não se destina a maximizar a extração do material, mas sim a evitar a contaminação das pranchas por parte da água em ebulição, concentrando-se progressivamente em substâncias potencialmente nocivas.

### ***1.3.2 Processo Pós-Cozedura***

Após a água ser fervida, as pranchas de cortiça descansam - secas ao ar durante 2-3 dias - um processo chamado estabilização. As paletes são empilhadas umas sobre as outras para ajudar a aplanar as pranchas. Normalmente, eram construídas enormes pilhas de pranchas cozidas, e a secagem durava várias semanas. Este processo foi alterado nos últimos anos, tendo vindo a ser utilizados tempos de estabilização mais curtos para evitar o crescimento microbiano que poderia comprometer a natureza inofensiva da rolha de cortiça no que diz respeito ao vinho. Imediatamente após a ebulição, o teor de humidade da prancha diminui de cerca de 70% para 40%. Após 2 dias, o teor de humidade deve descer para cerca de 14-18 %, considerado como o teor de humidade de trabalho suficiente na indústria.

Após a secagem, cada prancha de cortiça é examinada individualmente por um trabalhador experiente responsável por cortar e aparar a prancha em peças mais uniformes para processamento adicional. A primeira etapa é remover secções defeituosas (ou a prancha inteira) para que esta seja processada em rolhas ou discos:

- As pranchas de cortiça húmida são separadas para secagem em estufa ou secagem ao ar a longo prazo;
- As pranchas com manchas amarelas ou com bolor são excluídas do fabrico e enviadas para trituração;
- As pranchas que contêm galerias de insetos são rejeitadas e removidas para trituração;
- As pranchas, ou parte delas, com uma elevada percentagem de defeitos, como fissuras, são descartadas e retiradas para trituração;
- As pranchas, ou porções delas, excessivamente finas (espessura inferior a 13 mm) são rejeitadas e enviadas para trituração.

As pranchas são cortadas à mão com uma faca. O objetivo é classificar as pranchas rejeitadas e separar as porções impróprias para processamento posterior. Além disso, se a prancha for heterogénea em espessura e qualidade, será cortada em prancha mais pequenas e homogéneas, permitindo a perfuração

para rolhas ou o fabrico de discos. Além disso, as pranchas grandes são divididas, permitindo que os trabalhadores as manuseiem mais prontamente manualmente. As medidas das pranchas de cortiça em bruto demonstram uma área média de 3745 cm<sup>2</sup>, com dimensões de cerca de 47 cm na horizontal e 119 cm na vertical. Em contraste, as medições de pranchas posteriormente preparadas revelam dimensões médias de 34 e 70 cm nas direções horizontal e vertical (área média das pranchas 1674 cm<sup>2</sup>), respetivamente [75]. Este procedimento resulta na perda de 5% da matéria-prima inicial.

A perda de matéria-prima de cortiça foi medida experimentalmente durante o corte de pranchas para processamento posterior em comparação com pranchas finas a serem utilizadas no fabrico de discos de cortiça [56]. O material desperdiçado representa cerca de 19.5% da sua massa inicial, enquanto o rendimento entre pranchas varia entre 0 e 50%, dependendo da forma e das características de qualidade das pranchas individuais.

O corte das pranchas endireita os bordos e cria secções transversais mais apelativas, enquanto classifica as mesmas por calibre e classe de qualidade. Operações como o corte são minimizadas no fabrico de rolhas e discos para evitar perdas de matéria-prima. Os requisitos específicos da fábrica determinam a separação nas classes de espessura e qualidade: é comum dividi-la apenas em três classes de calibre, 14 a 22, 22 a 27, e superiores a 27 mm, e 2 classes de qualidade, a 1<sup>a</sup>-5<sup>a</sup> classe como matérias-primas primárias para a produção de rolhas e discos, e uma 6<sup>a</sup> qualidade de valor inferior. Quando a prancha de cortiça é o produto final do processo, é dada maior atenção para assegurar que as arestas e a espessura são uniformes, e a categorização da qualidade é mais explícita, por exemplo, como 1<sup>a</sup>-3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>-5<sup>a</sup>, e 6<sup>a</sup> classe, ou de acordo com as exigências do cliente.

### ***1.3.3 Processamento de Cortiça Húmida***

As pranchas com secções de cortiça húmida são separadas e secas até um teor de humidade de 14% ou menos, que é o padrão para a cortiça. Isto pode ser conseguido através da secagem natural ao ar durante um período de 1-2 anos ou através da secagem forçada ao ar quente em câmaras de secagem. Adaptadas dos fornos de secagem de madeira, estas câmaras foram implementadas em unidades mais modernas, utilizando ciclos de secagem com aumento da temperatura do ar. As condições variam por fábrica: um exemplo é um período de secagem de 96 horas a uma temperatura final de 90 °C; outro é um período de secagem de 2 semanas a uma temperatura final de 80 °C. Após a secagem, as pranchas são lançadas na linha de processamento e passam pelo circuito operacional padrão para o fabrico de rolhas/discos.

### ***1.3.4 Segunda Fervura***

Quando a cortiça é suficientemente seca até atingir um teor de humidade entre 5 a 8% (o que denota equilíbrio) entre a cozedura das pranchas de cortiça e a sua transformação em rolhas ou discos, as vantagens de uma maior quantidade de humidade sobre a resistência do material e as capacidades de

maquinagem são perdidas. Este é normalmente o cenário se as pranchas fervidas não forem processadas na fábrica de preparação ou se forem armazenadas durante mais de duas a três semanas.

Nesta situação, as pranchas são sujeitas a uma segunda operação de cozedura seguindo a mesma técnica anteriormente indicada, mas por uma duração mais curta de 30 minutos. Devido ao facto de as tensões internas da cortiça já terem sido aliviadas durante a fervura inicial, como acima mencionado, não ocorre mais nenhuma expansão da cortiça.

## Referências

- [1] Associação Portuguesa da Cortiça, Available: <https://www.apcor.pt/>
- [2] Amorim Cork Composites. Available: <https://amorimcorkcomposites.com/en/why-cork/environmental-and-social-benefits/>
- [3] Ghouil, H., Montpied, P., Epron, D., Ksontini, M., Hanchi, B., Dreyer, E. (2003). Thermal optima of photosynthetic functions and thermostability of photochemistry in cork oak seedlings, *Tree Physiol.* 23:1031–1039.
- [4] Pereira, H. (2007). *Cork: Biology, Production and Uses*, Amsterdam: Elsevier Publications.
- [5] Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayán J. (2017). Chorological maps for the main European woody species, 12:662–666.
- [6] Moricca, S., Linaldeddu, B.T., Ginetti, B., Scanu, B., Franceschini, A., Ragazzi, A. (2016). Endemic and emerging pathogens threatening cork oak trees: Management options for conserving a unique forest ecosystem, *Plant Dis.* 100:2184–2193.
- [7] Natividade, J.V. (1950). *Subericultura*, Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, Lisboa,
- [8] Pereira, H. (2015). Cortiça chinesa: como se compara com a cortiça do *Quercus suber*?
- [9] Natividade, J.V. (1950). *Subericultura*, Ministério da Economia Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, Lisboa.
- [10] Elena-Rossello, J.A., Lumaret, R., Cabrera, E., Michaud, H. (1992). Evidence for hybridization between sympatric holm-oak and cork-oak in Spain based on diagnostic enzyme markers, *Veg.* 99:115–118.
- [11] Boavida, L.C., Silva, J.P., Feijó, J.A. (2001). Sexual reproduction in the cork oak (*Quercus suber* L). II. Crossing intra- and interspecific barriers, *Sex. Plant Reprod.* 14(14):143–152.
- [12] Nardini, A., Lo Gullo, M.A., Salleo, S. (1999). Competitive strategies for water availability in two Mediterranean *Quercus* species, *Plant. Cell Environ.* 22:109–116.
- [13] Molinas, M.L. (1991). The stomata of the cork-oak, *Quercus suber*. An ultrastructural approach, *Nord. J. Bot.* 11:205–212.



- [14]Fialho, C., Lopes, F., Pereira, H. (2001). The effect of cork removal on the radial growth and phenology of young cork oak trees, *For. Ecol. Manage.* 141:251–258.
- [15]Oliveira, G., Correia, O., Martins-Loução, M.A., Catarino, F.M. (1994). Phenological and growth patterns of the Mediterranean oak *Quercus suber* L., *Trees* 91, 9:41–46.
- [16]Díaz-Fernández, P.M., Climent, J., Gil, L. (2004). Biennial acorn maturation and its relationship with flowering phenology in Iberian populations of *Quercus suber*, *Trees - Struct. Funct.* 18:615–621.
- [17]Merouani, H., Apolinário, L.M., Almeida, M.H., Pereira, J.S. (2003). Morphological and physiological maturation of acorns of cork oak (*Quercus suber* L.), *Seed Sci. Technol.* 31:111–124.
- [18]García-MOZO, H., Hidalgo, P.J., Galán, C., GÓMEZ-CASERO, M.T., Domínguez, E. (2001). Catkin frost damage in Mediterranean cork-oak (*Quercus suber* L.), *Isr. J. Plant Sci.* 49:41–47.
- [19]Miguel, A., de Vega-Bartol, J., Marum, L., Chaves, I., Santo, T., Leitão, J., Varela, M.C., Miguel, C.M. (2015). Characterization of the cork oak transcriptome dynamics during acorn development, *BMC Plant Biol.* 15:1–22.
- [20]Cardillo, E., Bernal, C.J. (2006). Morphological response and growth of cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings at different shade levels, *For. Ecol. Manage.* 222:296–301.
- [21]Pardos, M., Jiménez, M.D., Aranda, I., Puértolas, J., Pardos, J.A. (2005). Water relations of cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings in response to shading and moderate drought, *Ann. For. Sci.* 62:377–384.
- [22]Herrera, J. (1995). Acorn predation and seedling production in a low-density population of cork oak (*Quercus suber* L.), *For. Ecol. Manage.* 76:197–201.
- [23]Montero González, G., Cañellas, I.M. (1999). Manual de reforestación y cultivo de alcornoque (*Quercus suber* L.), 102.
- [24]Quilhó, T., Lopes, F., Pereira, H. (2003). THE EFFECT OF TREE SHELTER ON THE STEM ANATOMY OF CORK OAK (*QUERCUS SUBER*) PLANTS, *IAWA J.* 24:385–395.
- [25]Pulido, F., Díaz, M. (2002). Dinámica de la regeneración natural del arbolado de encina y alcornoque.
- [26]Luque, J., Parlade, J., Pera, J. (2000). Pathogenicity of fungi isolated from *Quercus suber* in Catalonia (NE Spain), *Undefined.* 30:247–263.
- [27]Moricca, S., Ginetti, B., Ragazzi, A. (2012). Species- and organ-specificity in endophytes colonizing healthy and declining Mediterranean oaks, *Phytopathol. Mediterr.* 51:587–598.
- [28]Schulz, B., Boyle, C. (2005). The endophytic continuum, *Mycol. Res.* 109:661–686.
- [29]Moricca, S., Ragazzi, A. (2008). Fungal endophytes in Mediterranean oak forests: a lesson from *Discula quercina*, *Phytopathology.* 98:380–386.

- [30]Picco, A.M., Angelini, P., Ciccarone, C., Franceschini, A., Ragazzi, A., Rodolfi, M., Varese, G.C., Zotti, M. (2011). Biodiversity of emerging pathogenic and invasive fungi in plants, animals and humans in Italy, 145:988–996.
- [31]Moreira, A.C., Martins, J.M.S (2005). Influence of site factors on the impact of *Phytophthora cinnamomi* in cork oak stands in Portugal, *For. Pathol.* 35:145–162.
- [32]Linaldeddu, B.T., Sirca, C., Spano, D., Franceschini, A. (2011). Variation of endophytic cork oak-associated fungal communities in relation to plant health and water stress, *For. Pathol.* 41:193–201.
- [33]Linaldeddu, B.T., Scanu, B., Maddau, L., Franceschini, A. (2014). *Diplodia corticola* and *Phytophthora cinnamomi*: the main pathogens involved in holm oak decline on Caprera Island (Italy), *For. Pathol.* 44:191–200.
- [34]Pérez-Sierra, A., López-García, C., León, M., García-Jiménez, J., Abad-Campos, P., Jung, T. (2013). Previously unrecorded low-temperature *Phytophthora* species associated with *Quercus* decline in a Mediterranean forest in eastern Spain, *For. Pathol.* 43:331–339.
- [35]Allen, C.D, Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., (Ted) Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *For. Ecol. Manage.* 259: 660–684.
- [36] Giorgi, F., Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region, *Glob. Planet. Change.* 63:90–104.
- [37]Carnicer, J., Coll, M., Ninyerola, M., Pons, X., Sánchez, G., Peñuelas, J. (2011). Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 108:1474–1478.
- [38]Besson, C.K., Lobo-do-Vale, R., Rodrigues, M.L., Almeida, P., Herd, A., Grant, O.M., David, T.S., Schmidt, M., Otieno, D., Keenan, T.F., Gouveia, C., Mériaux, C., Chaves, M.M., Pereira, J.S. (2014). Cork oak physiological responses to manipulated water availability in a Mediterranean woodland, *Agric. For. Meteorol.* 184:230–242.
- [39]Caritat, A., Gutiérrez, E., Molinas, M. (2000). Influence of weather on cork-ring width, *Tree Physiol.* 20:893–900.
- [40]Palma, J.H.N., Paulo, J.A., Faias, S.P., Garcia-Gonzalo, J., Borges, J.G., Tomé, M. (2015). Adaptive management and debarking schedule optimization of *Quercus suber* L. stands under climate change: case study in Chamusca, Portugal, *Reg. Environ. Chang.* 15:1569–1580.

- [41]Hidalgo, P.J., Marín, J.M., Quijada, J., Moreira, J.M. (2008). A spatial distribution model of cork oak (*Quercus suber*) in southwestern Spain: A suitable tool for reforestation, *For. Ecol. Manage.* 255:25–34.
- [42]Desprez-Loustau, M.L., Robin, C., Reynaud, G., Déqué, M., Badeau, V., Piou, D., Husson, C., Marçais B. (2010). Simulating the effects of a climate-change scenario on the geographical range and activity of forest-pathogenic fungi, 29:101–120.
- [43]Braisier, C.M. (1996). *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change, *Ann. Des Sci. For.* 53:347–358.
- [44]Corticeira Amorim S. G. P. S. (2005). The art of cork, 35, [2].
- [45]Beira, J., Prades, C., Santiago, R. (2014). New tools for extracting cork from *Quercus suber* L.: increasing productivity and reducing damage, *For. Syst.* 23:22–35.
- [46]Brito dos Santos, S. (1995). *ABC Do Podador de Sobreiros*, Instituto Florestal .
- [47]Costa, A., Pereira, H., Oliveira, A. (2004). The effect of cork-stripping damage on diameter growth of *Quercus suber* L., *For. An Int. J. For. Res.* 77:1–8.
- [48]Martín, J., Cabezas, J., Buyolo, T., Patón, D. (2005). The relationship between *Cerambyx* spp. damage and subsequent *Biscogniauxia mediterranea* infection on *Quercus suber* forests, *For. Ecol. Manage.* 216:166–174.
- [49]Knapic, S., Louzada, J.L., Leal, S., Pereira, H. (2008). Within-tree and between-tree variation of wood density components in cork oak trees in two sites in Portugal, *For. An Int. J. For. Res.* 81:465–473.
- [50]Código Internacional das Práticas Rolheiras (2011), CELIEGE - European cork federation.
- [51]Gonzalez Adrados, J., Calvo Haro, R. (1994). Variación de la humedad de equilibrio del corcho en plancha con la humedad relativa. Modelos de regresión no lineal para las isotermas de adsorción, *Investig. Agrar. Sist. y Recur. For.* 3:199–209.
- [52] Fernandes, P. (2004). Influência do período de estabilização da cortiça e da cozedura na largura dos anéis de crescimento, no coeficiente de porosidade da cortiça e em algumas características tecnológicas das rolhas de cortiça natural, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- [53]C.B.-S. 4. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Portugal-Norte-176-Korkeiche-2011-gje.jpg>
- [54]Pissarra, J. (2017). *Cortiça e descortiçamentos* - Banco de Imagens da Casa das Ciências.
- [55] Crouvisier-Urien, K., Chanut, J., Lagorce, A., Winckler, P., Wang, Z., Verboven, P., Nicolai, B., Lherminier, J., Ferret, E., Gougeon, R.D., Bellat, J.P., Karbowiak, T. (2019) . Four hundred years of cork imaging: New advances in the characterization of the cork structure, *Sci. Reports* 2019 91. 9:1–10.

- [56]Fernandes, R.M.O. (2005). Estudo da influência do calibre e da qualidade das pranchas de cortiça delgada no rendimento do processo fabril de produção de discos de cortiça natural, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- [57] Liese, W., Günzerodt, H., Parameswaran, N. (1983). Alterações biológicas da qualidade da cortiça que afectam a sua utilização, Lisboa.
- [58]UNAC, Guia de comercialização de cortiça no campo (2013). EDRV, Lda, Lisboa.
- [59]Pérez-Terrazas, D., González-Adrados, J.R., Sánchez-González, M. (2018). Feasibility study of near infrared spectroscopy to detect yellow stain on cork granulate, *IForest - Biogeosciences For.* 11:111.
- [60]Fortes, M.A., Rosa, M.E., Pereira, H. (2004). *A Cortiça*, IST Press, Lisboa.
- [61]Corkassess (2001), Field assessment and modelling of cork production and quality. Final report. Contract FAIR.CT97.1438.
- [62] Gonzalez-Adrados, J.R., Pereira, H. (1996). Classification of defects in cork planks using image analysis, *Wood Sci. Technol.* 30. 30:207–215.
- [63]Pereira, H., Melo, B., Pinto, R. (1994). Yield and quality in the production of cork stoppers, *Holz Als Roh- Und Werkst.* 5:211–214.
- [64]Mendonça, E., Pereira, P., Martins, A., Anselmo, A.M. (2004). Fungal biodegradation and detoxification of cork boiling wastewaters, *Eng. Life Sci.* 4:144–149.
- [65]Domínguez, J.R., De Heredia, J.B., González, T., Sanchez-Lavado, F. (2005). Evaluation of Ferric Chloride as a Coagulant for Cork Processing Wastewaters. Influence of the Operating Conditions on the Removal of Organic Matter and Settleability Parameters, *Ind. Eng. Chem. Res.* 44:6539–6548.
- [66]Acero, J.L., Benítez, F.J., Leal, A.I., Real, F.J. (2005). Removal of phenolic compounds in water by ultrafiltration membrane treatments, *J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 40:1585–1603.
- [67]Minhalma, M., De Pinho, M.N. (2001). Flocculation/flotation/ultrafiltration integrated process for the treatment of cork processing wastewaters, *Environ. Sci. Technol.* 35:4916–4921.
- [68]Silva, C.A., Madeira, L.M., Boaventura, R.A., Costa, C.A. (2004). Photo-oxidation of cork manufacturing wastewater, *Chemosphere.* 55:19–26.
- [69]Acero, J.L., Benitez, F.J., Real, F.J., Leal, A.I., Sordo, A. (2007). Oxidation of Esculetin, a Model Pollutant Present in Cork Processing Wastewaters, by Chemical Methods, 27:317–326.
- [70]Benitez, F.J., Acero, J.L., Garcia, J., Leal, A.I. (2003). Purification of cork processing wastewaters by ozone, by activated sludge, and by their two sequential applications, *Water Res.* 37:4081–4090.
- [71]Benítez, F.J., Acero, J.L., Leal, A.I., Real, F.J. (2005). Purification of ellagic acid by UF membranes, *Chem. Eng. Technol.* 28:1035–1040.

[72]Benitez, F.J., Real, F.J., Acero, J.L., Leal, A.I., Cotilla, S. (2005). Oxidation of acetovanillone by photochemical processes and hydroxyl radicals, *J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 40:2153–2169.

[73]Rosa, M.E., Pereira, H., Fortes, M.A. (1990). Effects of Hot Water Treatment on the Structure and Properties of Cork, *Wood Fiber Sci.* 149–164.

[74]Cumbre, F., Lopes, F., Pereira, H. (2000). The effect of water boiling on annual ring width and porosity of cork., *Wood Fiber Sci.* 32:125–133.

[75] Costa, A., Pereira, H. (2004). Caracterização e Análise de Rendimento da Operação de Traçamento na Preparação de Pranchas de Cortiça para a Produção de Rolhas, in: *Silva Lustiana*, 51–66.

## CAPÍTULO 2

### Sustentabilidade, Pegada de Carbono e Potenciais Produtos de Cortiça

*Maria Verdum\*, Albert Hereu, Patricia Jové*

Catalan Cork Institute Foundation, Palafrugell, Spain

\*Correspondência: mverdum@icsuro.com

#### Resumo

Este capítulo aborda a importância da cortiça em relação à sustentabilidade e à economia verde, bem como a sua utilização atual e futura para além da conhecida rolha de cortiça. O presente capítulo explorará também a ligação entre o consumo de cortiça e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, bem como os desafios colocados pelas alterações climáticas. O capítulo é composto por três secções: (i) a cortiça e a sustentabilidade, (ii) a pegada de carbono dos produtos de cortiça e (iii) as possíveis aplicações da cortiça. A primeira secção centra-se na sustentabilidade e na cortiça e descreve os serviços ecológicos prestados pelo montado de sobreiro. A segunda secção centrar-se-á na pegada de carbono (conceito, cálculo e valores para diferentes produtos de cortiça). Na terceira secção será apresentada uma visão geral das várias utilizações e aplicações da cortiça. Na conclusão do capítulo, a compreensão da cortiça como material sustentável, o conceito de pegada de carbono da cortiça e as várias etapas do seu cálculo, uma introdução às várias aplicações da cortiça e as características que tornam a cortiça adequada para a indústria aeroespacial indústria são explicados.

**Palavras-chave:** Cortiça, Sustentabilidade, Ecossistema de Cortiça, Serviços Ambientais, Alteração Climática, Pegada de Carbono, Ciclo de Vida.

#### Nomenclatura

CO<sub>2eq</sub> Dióxido de carbono equivalente

GEE Gases com efeito de estufa

ACV Avaliação do ciclo de vida

ODS Objetivos de desenvolvimento sustentável

## 2.1 Cortiça e Sustentabilidade

### 2.1.1 *Ecossistema da Cortiça*

#### Ecologia

Em termos ecológicos, o sobreiro ou *Quercus suber* L. é nativo do Sudoeste europeu e noroeste de África. É adequado a este tipo de clima, pelas seguintes razões:

- Verão curto;
- Chuvas abundantes e uniformemente distribuídas;
- Invernos bastante moderados;
- Períodos seco temperados pela humidade atmosférica;
- Solos siliciosos bastante permeáveis, húmidos e profundos.

O sobreiro desenvolve-se em condições quentes, húmidas e sub-húmidas desde o nível do mar até aos 2000 m. O crescimento ótimo é obtido a uma altitude de 600 m [1]. Este é o caso das zonas de clima mediterrânico com temperatura média anual de 13-18°C, invernos húmidos, verões de temperaturas elevadas e com precipitação média anual que não ultrapassa os 900 mm. A árvore do sobreiro é muito sensível ao alagamento. A precipitação nas zonas mediterrânicas concentra-se no final do outono e no inverno, melhorando a adaptabilidade dos sobreiros. Esta espécie também está bem-adaptada a invernos amenos e verões quentes e secos. As melhores condições de solo adequadas para o crescimento do sobreiro são os solos siliciosos e/ou arenosos e os solos bem arejados e drenados [1]. Ainda assim, esta espécie também é tolerante a solos pobres e rasos.

Há alguns anos, os sobreiros foram introduzidos nos Estados Unidos da América e em vários países, desde a Austrália à Bulgária e América do Sul, sem sucesso. Alguns aspetos, como a conservação das sementes ou problemas no crescimento das plantas jovens, têm sido responsáveis pela não obtenção de árvores adultas. O longo ciclo de vida da árvore também não ajuda. Porém, é possível encontrá-la em diversos parques ao redor do mundo devido ao seu alto valor ornamental.

O montado de sobreiro cobre uma área mundial de mais de 2.1 milhões de hectares. Esta área abrange uma grande área na Europa, principalmente Portugal e Espanha, mas também em França, Itália e nos países do norte da África como Marrocos, Argélia e Tunísia. De acordo com os inventários florestais das áreas de sobreiro, tem-se a seguinte distribuição geográfica: 713000 ha em Portugal, 475000 ha em Espanha, 68000 ha em França, 65000 ha em Itália, 348000 ha em Marrocos e 90000 ha na Tunísia. O mapa de distribuição dos sobreiros e da produção de cortiça é apresentado na Figura 2.1.

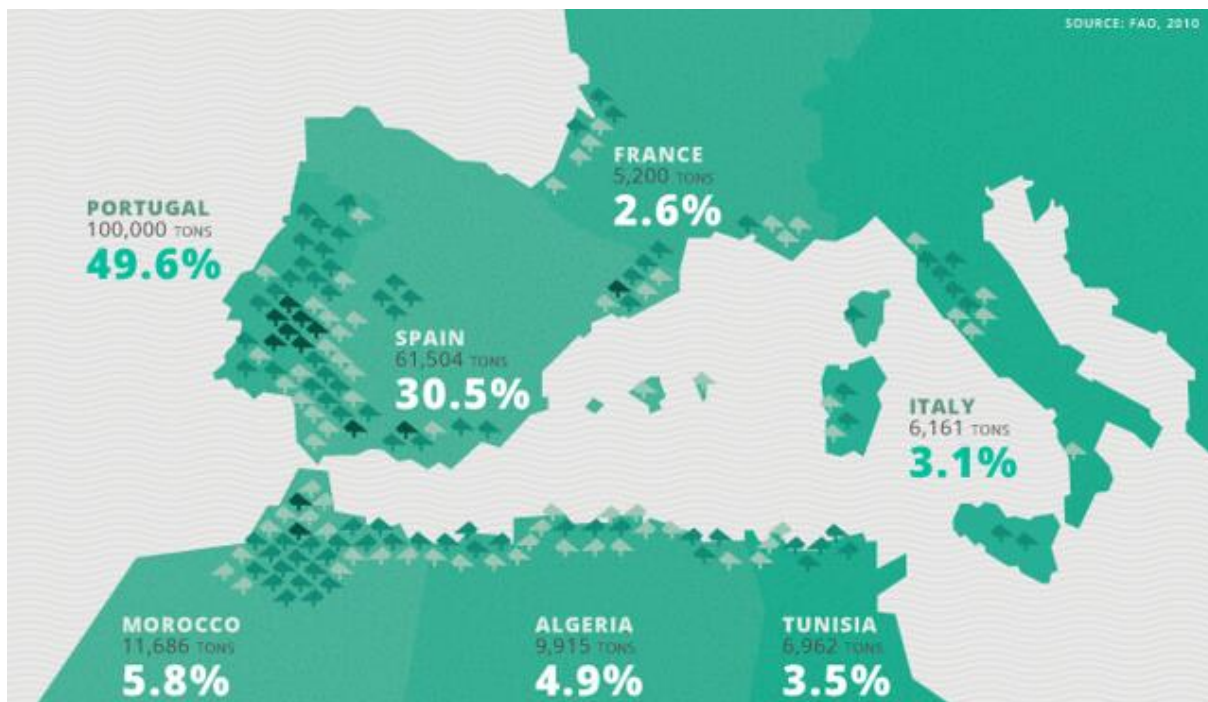


Figura 2.1 Distribuição dos sobreiros e toneladas de produção de cortiça.

(<https://www.amorimcork.com/en/cork-and-wine/raw-material-and-production-process/>).

### **Biodiversidade**

As paisagens de montado representam um ecossistema importante devido à sua rica biodiversidade, salvaguardando uma vasta gama de habitats para flora e fauna [2, 3]. Esta é a razão pela qual o Mediterrâneo é conhecido como um dos 35 “hot spots” globais. Biodiversidade é a variedade da vida em todas as suas formas, níveis e combinações: ecossistema, espécies e diversidade genética [4].

Em resumo, os ecossistemas de sobreiro são descritos como multifuncionais com uma camada de cobertura arbórea dominada por sobreiros (*Quercus suber* L.) frequentemente associados a azinheiras (*Quercus ilex* e *Q. rotundifolia*), oliveiras bravas e pinheiros [1, 5] e com uma espécie herbácea [6]. A dinâmica temporal desses sistemas tem sido relatada por diversos autores [7-9].

As paisagens de montado são um reservatório de biodiversidade, albergando diversas espécies, algumas em vias de extinção como a águia-imperial (*Aquila adalberti*). É também habitat de grande biodiversidade natural de fauna silvestre (cerca de 24 espécies de répteis e anfíbios, mais de 160 espécies de aves e 37 espécies de mamíferos). Além disso, a Bacia do Mediterrâneo é a região do mundo com o terceiro maior número de espécies de plantas endêmicas. Concretamente, nos montados de sobreiro, a biodiversidade vegetal pode atingir um patamar de 135 espécies por metro quadrado. Esta biodiversidade inclui vários tipos de plantas aromáticas, medicinais e culinárias. A vegetação rasteira inclui arbustos, como lavanda, medronheiros ou morangueiros.



### Impacto social e económico

A paisagem de sobreiros é um dos melhores exemplos de equilíbrio entre conservação e desenvolvimento em benefício das pessoas e do ambiente. Este ecossistema não-natural é a consequência de séculos de gestão com atividades de silvicultura focadas em moldarem o sobreiro e o seu ambiente. Em resultado de algumas práticas como o pastoreio, a roçagem ou a aragem para a agricultura, os montados de sobreiro foram gradualmente transformados em matos abertos.

Atualmente, os ecossistemas de montado de sobreiro incluem um mosaico de quatro tipos: florestas, savanas de carvalho (ou montados em Portugal e “dehesa” em Espanha), matagais e pastagens (Figuras 2.2 e 2.3). “Montado” é o termo português usado para descrever paisagens onde a agricultura mista centrava-se em extensos carvalhais intercalados com áreas de arbustos e/ou pastagens. Como mencionado acima, savanas de carvalho e pastagens são mantidas como resultado da presença humana de longo prazo e atividades relacionadas nesta área [10, 11].



Figura 2.2 Savanas de carvalho ou montados em Portugal e *dehesas* em Espanha (<https://gosuber.es/>).



Figura 2.3 Floresta na Catalunha.

O ecossistema da cortiça é um exemplo de exploração florestal sustentável e representa uma importante fonte de rendimento proveniente maioritariamente da produção de rolhas. Apesar do elevado valor de mercado das rolhas (quase 70% do valor de mercado da cortiça), outras práticas

agrícolas e de silvicultura têm ocorrido paralelamente à extração da cortiça. A criação de gado, a recolha de ervas, fungos e plantas medicinais, a produção de mel e o ecoturismo são algumas das atividades que também se desenvolvem nas paisagens de montado [12,13]. Existem milhares de empregos diretos (empregos na área florestal) e indiretos relacionados a esse ecossistema.

### **Impacto ambiental**

Os montados de sobreiro como barreira natural contra a desertificação e o seu papel na resistência ao fogo são outros aspetos a ter em conta. Pelo facto de os sobreiros de recolherem cerca de 26,7% da precipitação total, os mesmos protegem contra a erosão e potenciam a taxa de infiltração das águas pluviais. Os sobreiros transportam uma quantidade substancial de nutrientes do solo dos níveis mais baixos para os mais altos, tornando-os acessíveis a outras plantas. Por último, a sua porosidade e composição orgânica conferem-lhe uma elevada capacidade de retenção de água.

Em suma, o sobreiro é uma espécie que deve ser preservada, tendo em conta a sua importância ecológica e económica. Por um lado, os montados de sobreiro suportam um dos maiores níveis de biodiversidade florestal do mundo, perdendo apenas para a Floresta Amazónica. Neste sentido, os montados de sobreiro são hotspots de biodiversidade e constituem ecossistemas únicos e reconhecidos pelo seu valor ecológico [14]. As paisagens de montado de sobreiro bem geridas evitam a rápida proliferação de espécies matagais mediterrânicas, o que aumenta o risco de incêndios e a perda de habitats e biodiversidade [15]. Por outro lado, a extração da cortiça e o elevado valor acrescentado das rolhas são responsáveis por milhares de negócios nos diferentes níveis da sua produção (floresta, indústria e/ou laboratório). A indústria da cortiça contribui para evitar o abandono dos montados de sobreiro porque dá emprego em diferentes áreas florestais.

#### ***2.1.2 Serviços Ambientais***

Como uma estratégia de gestão de recursos naturais, o conceito de serviços ambientais ganhou muita atenção na última década. Além disso, os serviços ambientais têm sido progressivamente integrados às políticas ambientais [16]. Simultaneamente, os pagamentos por serviços ambientais continuam a atrair interesse significativo de académicos e praticantes da conservação [17].

O primeiro passo na prestação de serviços ambientais é quantificar e analisar economicamente os benefícios diretos e indiretos dos serviços ambientais associados ao montado de sobreiro. Os diferentes serviços ambientais oferecidos por um ecossistema são classificados, de acordo com outros estudos [18], em quatro categorias: (a) provisão de bens e serviços, (b) regulação, (c) suporte e (d) serviços culturais. Assim, os ecossistemas oferecem múltiplas funcionalidades,

como fornecimento de alimentos, água, combustível, materiais, proteção solar, regulação da água, prevenção de incêndios, uso recreativo, ciclos de nutrientes, entre muitas outras.

Este documento toma como exemplo um estudo realizado pelo Dr. Jesús Rives e seus colegas, estudo esse que apresenta uma metodologia para realizar este tipo de serviço: “O valor dos serviços ambientais dos montados de sobreiro na Catalunha - Avaliação dos serviços ambientais do ecossistema” [18]. Em consonância com este estudo, um exemplo de metodologia utilizada para determinação de serviços ambientais é apresentado na Figura 2.4.

No caso da quantificação e análise económica dos benefícios ambientais diretos e indiretos associados aos sobreiros na Catalunha, o primeiro passo é selecionar a amostra florestal o mais representativa possível e depois selecionar os critérios. Nesta etapa é importante considerar alguns aspetos tais como:

- Atividade principal: extração de cortiça e possibilidade de atividades complementares;
- Operação no campo;
- Dimensões representativas do campo ao nível da Catalunha (entre 200 e 1000 ha);
- Estrutura de floresta madura – representativa das classes diamétricas das plantas;
- Sem perturbações recentes significativas;
- Árvores distribuídas em várias áreas;
- Disponível em PTMGF atualizado e com mapeamento digital.

As informações dos campos selecionados são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Caracterização dos campos selecionados [18].

Area	Albera- Salines	Gavarres	Selva-Gironès	Montseny	Montnegre
Total surface (ha)	201,7	937,9	269,9	479,2	481,0
Altitude min and max (m)	155-395	75-325	325-704	475-980	91-357
Average slope(%)	40%	30%	20-80%	25%	20%
Average temperature (°C)	2,3-28,2	2,5-30,7	1,6- 28,3	-2,0-25,0	2,7-29,0
Rainfall(mm)	580,8	819,0	900,0	850,0	750,0

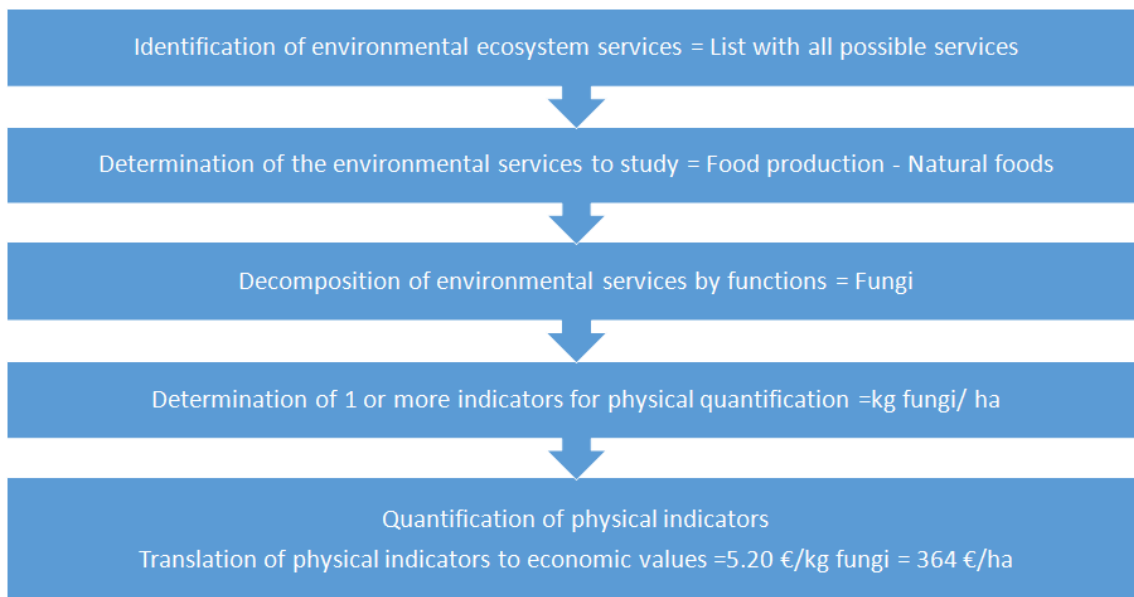


Figura 2.4 Metodologia para determinação de serviços ambientais [18].

PROVISION SERVICES		REGULATION SERVICES		
<b>Food supply</b>		<b>Cycles</b>		
Natural foods	Fungi	Amount of soil eroded	T eroded soil/year	
	Wild fruits	Soil erosion rate	T eroded soil/year/ha	
	Chestnut	Amount of ropoloceros through the BMS	Number of individual/ha	
	Pine nuts		Number of species of ropoloceros through the BMS	Species/ha
	Honey		Number of swarms	number swarms/ha
	Aromatic and medicinal plants	%	Bee population	Bees/ha
<b>Forest resources</b>		Climate regulation	Amount of carbon accumulated	Totals t CO2/ha
Wood	Fungi	Fire prevention/control	number of fires in the last 100 years	Ha burned
	Quercus suber			number of fires in the last 20 years
	Pinus pinaster		Road density, property management and fire protection	
	Pinus insignis/radiata		Amount of water for the fire	m3/ha
	Eucaliptus		number of traps	number of traps
Other woods	t/ha	<b>Functions of human well-being</b>		
Cork	Cork (virgin cork, reproduction cork)	Recreational activities	Number of visitors	n° visitors/year
Pineapples and resins	pineapples and resins	Tourism and ecotourism	number of annual overnight stays	n° concerted visits/year
Other forestry products	Biomass		total rural tourism places	days with occupation
	Firewood	Nº of visits	nº places	
	Decorative bushes	environmental education activities	nº students/year	
		Education/interpretation		

Figura 2.5 Exemplos dos diferentes serviços ambientais oferecidos por um ecossistema são classificados em quatro categorias: (a) provisão de bens e serviços, (b) regulação, (c) suporte e (d) serviços culturais [18].

O segundo passo é a identificação dos serviços ecossistémicos ambientais a serem estudados e a decomposição desses serviços por funções. Assim, os diferentes serviços ambientais oferecidos por um ecossistema são classificados em 4 categorias, como já mencionado. Exemplos de cada serviço e algumas funções de cada um deles são apresentados de seguida na Figura 2.5. O próximo passo é a determinação de um ou mais indicadores para quantificação física e a respetiva quantificação de cada um deles.

### 2.1.3 Gestão Sustentável

A cortiça assegura a sustentabilidade económica, social e ecológica dos montados [11]. Esta sustentabilidade deve ser caracterizada em três vertentes: natural, social e económica, de acordo com a diversificação das funções florestais [19] e das aplicações da cortiça.

A gestão sustentável da produção de cortiça assenta no facto de a casca poder ser retirada do tronco sem comprometer a viabilidade da árvore, uma vez que regenera uma nova camada de cortiça. A extração da cortiça para a produção de rolhas exige a retirada periódica da cortiça da casca em grau considerado compatível com a preservação da árvore em excelentes condições fisiológicas e com a produção deste produto final. Esta gestão sustentável da cortiça associada ao ciclo de vida do sobreiro está representada na Figura 2.6.

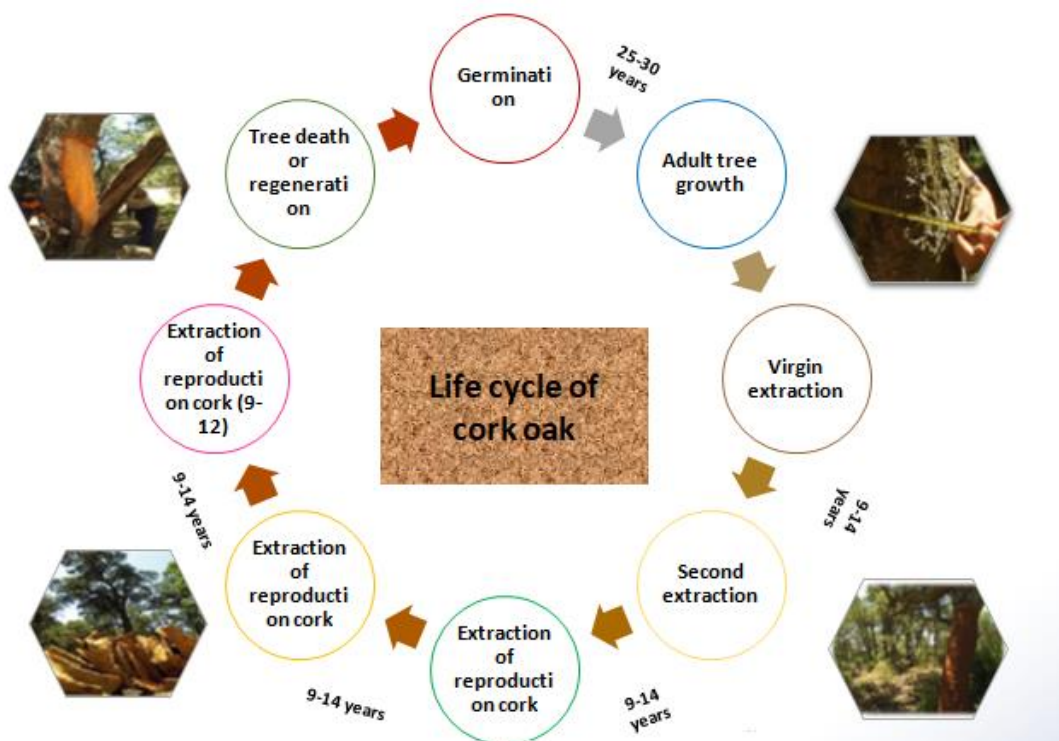


Figura 2.6 Ciclo de vida da cortiça que mostra como se obtém a casca da cortiça desde a germinação das sementes até à árvore morta (ICSuro).

Como se pode ver na Figura 2.6, o primeiro descortiçamento é feito quando a árvore tem entre 25 e 30 anos ou quando a árvore é adulta (depende da região). A esta primeira casca obtida chama-se cortiça virgem. Então, depois de 9 a 14 anos, dependendo da região, a árvore é novamente descortificada obtendo-se a segunda casca ou cortiça secundária. Estas primeiras pranchas de cortiça não são adequadas para a produção de rolhas devido às suas propriedades mecânicas e características visuais. Após estes dois períodos, a casca do sobreiro é removida periodicamente em intervalos de 9 a 14 anos, obtendo outro material chamado de cortiça de reprodução. Estas últimas cascas são úteis para o fabrico de rolhas de cortiça. O processo de descortiçamento é contínuo até que a árvore tenha entre 150-250 anos. Estas condições permitem obter a cortiça de qualidade comercial.

O descortiçamento é feito manualmente (Figura 2.7). Portanto, o descortiçamento é um processo manual que requer alguma perícia para evitar ferir a árvore: sem atingir e danificar o câmbio vascular abaixo do felogénio. Esta competência dos descortecedores é necessária para executar corretamente a operação e fazer a seleção correta quanto ao início do descortiçamento.



Figura 2.7 Processo de descortiçamento (ICSuro).

Utilizando um machado com lâmina de corte curva e um braço de madeira relativamente comprido como alavanca para separar as pranchas de cortiça, procede-se ao processo de descortiçamento. Primeiro, o descortecedor faz cortes longos na cortiça: horizontalmente à volta do perímetro da árvore e alguns cortes verticais. Em seguida, as pranchas ou camadas de cortiça são separadas inserindo o braço do machado no corte até que a prancha de cortiça seja extraída [1]. Normalmente, a equipa de cortiça é constituída por 2 descortecedores, sendo o processo realizado de forma bastante rápida e com um rendimento médio de cerca de 900 kg/dia de trabalho [20]. Atualmente, existe um processo mecanizado alternativo para a extração da cortiça.

A Figura 2.8 mostra o aspecto visual das cortiças virgem, secundária e de reprodução após a colheita. As pranchas de cortiça virgem e secundária apresentam algumas diferenças no aspecto visual em comparação com as pranchas de reprodução. Essas diferenças devem-se ao desenvolvimento e à regularidade do tecido denominado periderme. A superfície de ambas as primeiras cascas de cortiça é irregular e apresenta estruturas lignocelulósicas. Assim sendo, ambas as cascas de cortiça virgem e secundária não são adequadas para a produção de rolhas naturais.

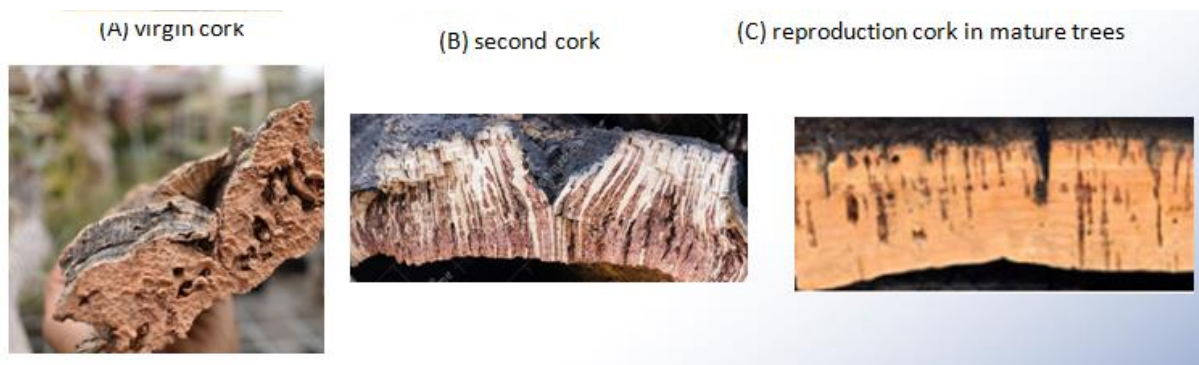


Figura 2.8 *Quercus suber*: (A) cortiça virgem; (B) cortiça secundária; e (C) cortiça de reprodução obtida de árvores maduras (ICSURO).

O processo de extração da cortiça é feito apenas quando o sobreiro está fisiologicamente ativo ou durante o período de atividade da periderme: quando a célula-mãe do felogénio e as células da cortiça recém-formada se encontram túrgidas e as paredes celulares são finas e frágeis. Aplicando uma força moderada, a camada de cortiça ao nível da zona felogénica ativa pode ser facilmente separada [1] neste estado. Esta fase corresponde ao final da primavera e início do verão. Após o descortiçamento, o felogénio morre e um novo é formado.

As condições citadas acima são essenciais para garantir que a árvore não seja prejudicada, caso contrário é possível gerar pontos de infeção durante o descortiçamento. Nesse caso, um ataque biológico poderia produzir a morte da árvore.

Mas como é possível a regeneração da casca da cortiça? Quando observamos um corte transversal de um tronco de árvore (Figura 2.9), podemos diferenciar dois meristemas ou um grupo de células indiferenciadas com capacidade de divisão celular (câmbio e felogénio). Ambos os meristemas são capazes de produzir tecidos em ambos os lados. No caso do câmbio, o mesmo é responsável pela formação do xilema ou lenho (na parte interna) e do floema, que é o principal tecido condutor de alimentos nas plantas vasculares (na parte externa). Esta é a estrutura típica das plantas lenhosas. O felogénio é responsável pela formação da feloderme e do felema/súber (ou cortiça) na parte interna e externa, respetivamente. Deste modo, a periderme é a soma da feloderme, felema e felogénio [1].

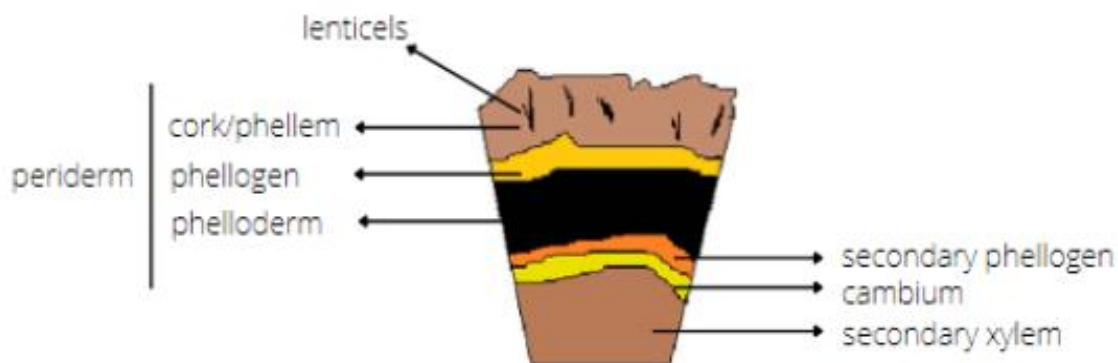


Figura 2.9 Secção transversal do tronco de sobreiro (ICSuro).

A periderme é um tecido protetor e, em algumas espécies, só é funcional durante um período. No caso do *Quercus suber*, as sucessivas mortes e subseqüentes regenerações da periderme são responsáveis pela produção de cortiça. Além disso, a periderme do sobreiro apresenta algumas características especiais relacionadas com o seu desenvolvimento, regularidade, intensidade de crescimento e longevidade e, como já referido, a sua capacidade de regeneração após a remoção torna esta espécie bastante única.

Após a sua extração, a cortiça pode ser utilizada em múltiplas aplicações. Atualmente, as rolhas de cortiça natural são o produto mais valioso e produzido na indústria da cortiça. As rolhas de cortiça representam 70% do total das receitas geradas pela indústria da cortiça. De acordo com o registo da APCOR, as rolhas naturais ou para vinhos representavam 60 % do mercado, enquanto outros tipos de rolhas representavam 21 %, como é o caso das rolhas para espumantes (19 %).

A cortiça não adequada para a indústria rolheira, tal como a cortiça virgem ou de baixa qualidade, é utilizada para produzir grânulos de cortiça que são classificados de acordo com a sua densidade e granulometria [21]. A presença de defeitos como descontinuidades excessivas ou fraturas profundas tornam a cortiça imprópria para a produção de rolhas, pelo que não são utilizadas cascas de cortiça virgens e secundárias para esta atividade. Estes grânulos de cortiça podem ser utilizados como produto final em diversas aplicações tirando partido das suas propriedades que se caracterizam pela baixa densidade, elasticidade e impermeabilidade a gases e líquidos.

A qualidade da prancha de cortiça é um fator importante na decisão da utilização final desta matéria-prima. Esta qualidade é avaliada por uma verificação visual das pranchas de cortiça. Conforme referido anteriormente, a classificação das pranchas de cortiça é feita por um operador especializado tendo em conta critérios subjetivos que diferem consoante a sua utilização final. No caso da utilização da cortiça na produção de rolhas, as principais características consideradas são principalmente a porosidade, a espessura da cortiça bruta e a ausência de alguns defeitos como galerias de insetos ou fissuras tangenciais.



### 2.1.4 Efeito das Alterações Climáticas no Ecossistema da Cortiça

A espécie de sobreiro proporciona benefícios ecológicos, económicos e sociais. Desde a década de 1950, porém, que se reconhece o declínio de alguns montados. Esse declínio acelerou nos últimos 30 anos desde a década de 1980 [22]. A capacidade das florestas mediterrânicas para responder a mudanças sistemáticas, tais como suportar intensas influências humanas ou alterações climáticas, é limitada. No entanto, as causas desta situação ainda não são claras.

Fatores bióticos e abióticos, como mudanças climáticas ou alguma intervenção humana, podem levar a uma perda consistente de florestas de carvalho, particularmente na bacia do Mediterrâneo. Por exemplo, como resultado de algumas práticas como limpeza, pastoreio ou lavoura para agricultura, os montados de sobreiro foram gradualmente transformados em florestas abertas [15].

Kim et al. [5] sugeriram algumas hipóteses para o declínio do *Quercus suber*. De acordo com este estudo, alguns agentes naturais como o aumento da temperatura média anual, períodos de seca, extremos pluviométricos ou a diminuição de 57 mm na precipitação média anual nas últimas 2 décadas têm sido apontados como causadores da degradação florestal. Essas mudanças ambientais podem levar a um aumento da vulnerabilidade das árvores a insetos e agentes patogénicos e/ou a um declínio fisiológico das árvores [23], porque a sobrevivência e o desenvolvimento de patógenos aumentam quando a temperatura sobe no inverno.

No caso do aumento da temperatura, prevê-se que a temperatura média anual na região mediterrânea suba 2-4.5 °C, de acordo com o relatório do IPCC. Durante um verão quente, um aumento na temperatura do ar pode prejudicar o crescimento das árvores devido ao aumento das taxas de respiração e ao stress hídrico imposto pela crescente evapotranspiração [5]. Além disso, fenómenos ambientais como períodos de seca severa, flutuação rápida dos níveis de água no solo, encharcamento e/ou inundações prolongadas podem estar implicados no declínio do sobreiro. Esses fenómenos podem ser particularmente importantes no início das síndromes de declínio [24].

Esse fenómeno de declínio está associado ao aumento do número de árvores com sintomas de “morte súbita” relacionados à infeção pelo fungo *Phytophthora cinnamomi* [25, 26]. Outras razões que levam ao declínio da cortiça são a presença de besouros nas cascas ou uma invasão pelo caule, bem como fungos de doenças radiculares [26].

O impacto humano é outro fator a ter em consideração. Algumas atividades humanas, como industrialização, urbanização, superexploração ou incêndios florestais, podem causar deterioração ambiental em alguns países mediterrâneos. Algumas de suas consequências são as mudanças climáticas ou grandes problemas ambientais, como o declínio do solo, a sedimentação, a perda da biodiversidade ou a poluição da água e do ar. No final do século XIX e início do século

XX, a extração excessiva de taninos após o descortiçamento foi uma das principais causas do declínio a longo prazo dos montados [27].

As florestas mediterrâneas têm uma longa história de pastoreio. Algumas evidências científicas mostraram que o pastoreio do gado é um fator ecológico que pode servir para a conservação das florestas mediterrâneas, se usado adequadamente. Masson et al. descobriram que o pastoreio no montado francês pode resultar no controlo de arbustos inflamáveis. No passado, outros estudos culpavam os animais domésticos pela sua destruição. Estes investigadores sugeriram que o uso excessivo e a exploração do montado de sobre podem reduzir a sua taxa de regeneração abaixo do nível sustentável na bacia do Mediterrâneo [28, 29]. Segundo Costa et al. [20], o abandono das práticas tradicionais de manuseamento da terra resultou em transformações significativas na utilização dos terrenos, como a substituição de usos agrícolas e florestas nativas de carvalho por matagais e plantações de eucalipto e pinheiro (*Pinus pinea* L.) de rápido crescimento.

## **2.2 Pegada de Carbono dos Produtos de Cortiça**

### **2.1.1 Introdução à Pegada de Carbono**

As alterações climáticas são o principal problema para o futuro da natureza e da humanidade, e são necessárias reduções significativas nas emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) para mitigar problemas futuros e colocar o mundo num caminho sustentável. As emissões líquidas totais de GEE antrópicos continuaram a aumentar durante a última década, assim como as emissões líquidas cumulativas de CO<sub>2</sub> desde 1850. O setor florestal oferece oportunidades significativas de mitigação ao fornecer alimentos, madeira e outros recursos renováveis, bem como a conservação da biodiversidade. Os recursos naturais podem ser renováveis ou não renováveis, conforme possam ser extraídos mais de uma vez e repostos naturalmente, e têm o potencial de tornar a indústria aeronáutica mais eficiente.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) e a pegada de carbono são ferramentas cada vez mais populares para a avaliação ambiental de produtos que levam em consideração todo o seu ciclo de vida. A diferença entre um ACV e uma pegada de carbono está relacionada às categorias de impacto estudadas. A pegada de carbono concentra-se em uma categoria de impacto ambiental: emissões de gases de efeito estufa (CO<sub>2eq</sub><sup>1</sup>). A análise da pegada de carbono é um subconjunto de uma avaliação completa do ciclo de vida de um produto, atividade ou processo. A ACV identifica as entradas e saídas de matéria e energia ao longo da vida útil de um processo, produto, serviço,

---

<sup>1</sup> O equivalente de CO<sub>2</sub>, abreviado CO<sub>2eq</sub>, é uma métrica utilizada para avaliar as emissões de outros gases de efeito de estufa com base no seu potencial de aquecimento global (PAG), convertendo os níveis de outros gases na quantidade equivalente de dióxido de carbono com o mesmo PAG.

pessoa ou organização, dependendo do âmbito do estudo. Essa análise, juntamente com a pegada de carbono, permite a padronização dos dados, a realização de análises e comparações e a determinação do impacto ambiental do objeto de pesquisa na mesma unidade ( $CO_{2eq}$ ), independentemente do contexto.

Para avaliar o desempenho ambiental de diferentes produtos, podemos usar a ACV e traduzir os resultados em  $CO_{2eq}$  como uma pegada de carbono. Podemos definir a metodologia de avaliação do ciclo de vida como a avaliação dos impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de sua vida por meio do inventário de recursos materiais, consumos energéticos e questões ambientais por meio da obtenção de matérias-primas, fabricação, uso e descarte do produto ou serviço (abordagem do berço ao túmulo) (Figura 2.10).

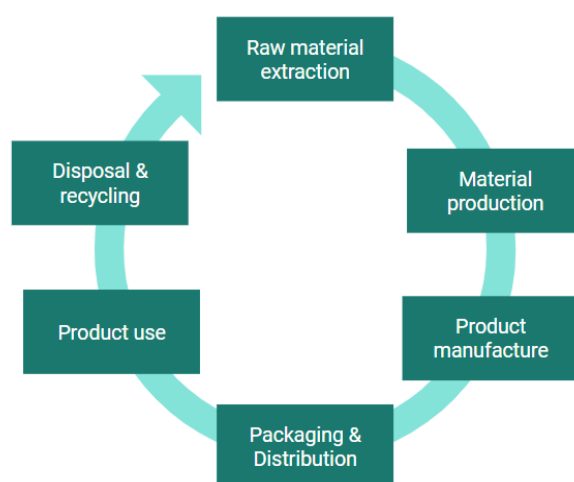


Figura 2.10 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ICSURO).

O material de cortiça está intimamente relacionado com a preservação da biodiversidade, pilar do desenvolvimento sustentável, bem como com a redução das emissões de gases com efeito de estufa e do sequestro de  $CO_2$ . A cortiça regenera após cada descortiçamento, permitindo que o sobreiro resista à perda de uma quantidade significativa de casca, normalmente mais de 50 % do tronco total e da superfície dos ramos. O fato de as rolhas serem criadas a partir da casca de árvores vivas levou os formuladores de políticas a favorecer o seu uso em detrimento de alternativas menos naturais. Existem alguns estudos de avaliação do ciclo de vida que se centram na gestão do montado de sobreiro e na sua relação com o ambiente [30-33].

A pegada de carbono do sector da cortiça deve ser considerada em todas as suas diferentes fases, desde a gestão florestal (não só a extração), passando pelos processos de fabrico e distribuição do produto, até ao fim de vida do produto (nomeadamente eliminação, incineração, reciclagem, etc.). Além disso, o carbono biogénico sequestrado em produtos de base florestal (cortiça, madeira, etc.) geralmente não é incluído porque é libertado na atmosfera durante as fases de processamento

e fim de vida por decomposição, incineração ou degradação biológica. A absorção e emissão de carbono biogénico retardado na floresta (madeira, casca de cortiça, raízes e folhas) é retido no produto de cortiça durante a utilização do produto até ao fim de vida (considerando a incineração com/sem utilização de energia, a deposição em aterro com degradação anaeróbia da cortiça, e a compostagem como fases de fim de vida consoante as possibilidades de cada território e serviços públicos de recolha e gestão de resíduos e subprodutos).

### **2.2.2 Fixação de Carbono das Florestas**

De acordo com o mais recente relatório do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) das Nações Unidas de 2022, é "inequívoco que o impacto humano aqueceu atmosfera, o oceano e a terra". No século XXI, o aquecimento global atingirá 1.5°C e 2°C, a menos que as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases de efeito estufa sejam drasticamente reduzidas nas próximas décadas. Do ponto de vista físico-científico, limitar o aquecimento global causado pelo homem a um nível predeterminado implica limitar as emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> e alcançar emissões líquidas de CO<sub>2</sub> zero, além de reduções significativas em outras emissões de gases de efeito estufa. Embora os seres humanos sejam responsáveis pela queima de combustíveis fósseis, a assimilação e o armazenamento de carbono em médio prazo nas florestas podem ajudar na redução das emissões de gás carbónico provenientes de combustíveis fósseis.

Os bosques de *Quercus suber* são ecossistemas excepcionais porque são consequência de práticas de gestão humana tradicionais de longa data e de uma relação simbiótica entre os seres humanos e o ambiente. Os montados de sobro, como todas as florestas, contribuem para a mitigação das alterações climáticas, removendo CO<sub>2</sub> da atmosfera através da atividade fotossintética e armazenando-o nos seus tecidos perenes durante o processo de crescimento natural e no solo como matéria orgânica. Os sobreiros são árvores longevas, isto é, eles são capazes de armazenar carbono por períodos muito longos, e sua casca excepcionalmente dura pode durar muito tempo depois da morte do sobreiro. O mesmo acontece com os produtos de cortiça, pois são extremamente duráveis e podem ser usados por longos períodos, bem como em aterro (o material da cortiça não é facilmente degradado), armazenando a maior parte do carbono contido na casca da cortiça (carbono biogénico) colhido no montado de sobro, contribuindo assim para a redução do efeito de estufa provocado pelo gás CO<sub>2</sub>.

O sequestro de carbono nos ecossistemas florestais é avaliado pelo equilíbrio entre a absorção de carbono fotossintético e o dióxido de carbono emitido pela respiração do ecossistema (incluindo a decomposição da matéria orgânica do solo, que fornece os nutrientes essenciais para a vida). Deste modo, é extremamente importante medir o equilíbrio do ecossistema ou a produção líquida.

O ecossistema florestal de sobro absorve entre 2-14 toneladas de CO<sub>2</sub>/ha/ano [34-38], sendo que esta quantidade depende do tipo de ecossistema (prados ou floresta) e das condições climáticas.

O ICOS (Sistema Integrado de Observação de Carbono) foi desenvolvido pela União Europeia para auxiliar os esforços globais para quantificar o balanço de carbono. A capacidade anual de retenção de carbono do montado ou montado de sobro português foi avaliada através de pesquisas realizadas em Portugal. Por exemplo, no centro de Portugal (Herdade da Machoqueira), um montado de sobro (*Quercus suber*) com 50 anos de idade, com um sub-bosque de espécies arbustivas semidecíduas e prados nativos pode reter até  $-388 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$  [37] (ou seja, 14.2 toneladas de  $\text{CO}_2$  por hectare por ano). No entanto, a ocorrência de condições adversas, como um ano seco, pode resultar em decréscimos significativos (cerca de 45%) no sequestro de carbono.

O stock de carbono no montado depende principalmente da localização do montado uma vez que isso afeta a densidade de árvores por hectare, o período de extração de cortiça e a taxa de crescimento. A variação anual do sequestro de  $\text{CO}_2$  também depende das condições climáticas num determinado ano. A tabela seguinte apresenta os resultados do sequestro líquido de carbono (fixação menos emissão ou taxa de troca líquida do ecossistema) do montado de sobro segundo vários estudos, e apresenta também a variação da troca líquida de  $\text{CO}_2$  em função das condições climáticas bem como como média final. Os resultados da fixação de carbono em estudos são frequentemente relatados em unidades de  $\text{g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ , podendo ser convertidos para valores padrão de tonelada  $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Além disso, quando os estudos relatam intervalos de valores, estes são transformados em valor médio, como pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Taxa de troca líquida do ecossistema (tonelada  $\text{CO}_2$ / ha.ano)

	Author	Ton $\text{CO}_2$ /ha·year	Ecosystem	Period	Location
1	Pereira [34]	-3.1	Holm oak and cork oak woodland	2003-2006	Alentejo, Portugal
2	Garcia [82]	-2.9	Cork oak forest	2005	Catalonia, Spain
3	Costa-e-Silva et. al. [37]	-14.2	Cork oak woodland	2011	Central Portugal
4	Spampinato et al. [38]	-5.0	Cork oak woodland	2017	Calabria, Italy
5	Montero et al. [35]	-1.9*	Cork oak woodland and forest	2004	Spain

\*Resultado do quociente do incremento anual da biomassa total (1031232 toneladas  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ) dividido pela área de distribuição do montado de sobro em Espanha (541179 ha segundo dados do INIA-CSIC).

A medição da biomassa, relatada como peso seco, quantifica a quantidade de carbono fixada nos ecossistemas florestais, bem como a quantidade comparável de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) removido da atmosfera. O carbono fixado nos tecidos vegetais (madeira, folhas, etc.) representa cerca de metade da biomassa, enquanto o dióxido de carbono equivalente é calculado multiplicando o teor de carbono da biomassa pela razão entre os pesos moleculares do carbono anidrido e do carbono elementar.

A utilização da cortiça está intrinsecamente relacionada com o sequestro de CO<sub>2</sub>. A extração periódica da cortiça faz com que os sobreiros produzam entre 250% a 400% mais cortiça [39] do que produziriam se a cortiça não fosse removida (após a remoção da cortiça, a árvore começa rapidamente a produzir nova casca para se proteger), aumentando assim a fixação de CO<sub>2</sub>. A gestão e exploração sustentável do montado de sobreiro, devido à exploração comercial deste material, promove a formação de mais cortiça, e assim mais CO<sub>2</sub> é sequestrado [40]. Adicionalmente, estes produtos de cortiça podem ter uma vida útil de anos (como as rolhas de cortiça) ou dezenas de anos (como os pavimentos e outros materiais de construção). De facto, ainda não existem estudos aprofundados sobre a influência da reciclagem de rolhas no aumento da vida útil da cortiça, por exemplo, as iniciativas de aplicação de rolhas recicladas e granuladas em aplicações urbanas como as promovidas pela Catalan Cork Institute Foundation. Na fase de fim de vida, também foram consideradas as emissões de carbono biogénico. Concretamente, em caso de incineração, considerou-se que todo o carbono biogénico dos produtos de cortiça era devolvido à atmosfera (após o período de utilização dos produtos de cortiça). No caso de aterro, apenas 2% do carbono biogénico contido nos produtos é normalmente considerado libertado, com o restante permanecendo permanentemente retido no aterro [41]. O prolongamento de sua vida útil permite que suas características de neutralidade carbónica sejam estendidas até o instante de sua decomposição ou aproveitamento energético.

A colheita da cortiça ocorre no verão (maio a agosto) e é realizada após a árvore atingir 0.7 m (Portugal), 0.65 m (Catalunha e Andaluzia) ou 0.60 m (Extremadura) de perímetro de tronco a 1.3 m a partir do solo. Na mesma árvore, dois descortiçamentos consecutivos são separados por intervalos mínimos de 9 ou 14 anos (dependendo do território). A primeira extração da cortiça pode ocorrer quando o diâmetro do tronco é suficientemente grande. A primeira casca extraída chama-se cortiça virgem e, devido às irregularidades da superfície exterior, costuma ser triturada e utilizada na construção. Atualmente, esta primeira cortiça destina-se à indústria de granulação de cortiça na produção de grânulos que serão aglomerados para o fabrico de produtos de cortiça negra utilizados como isolantes na construção.

Após o primeiro descortiçamento, entre os 9-14 anos, realiza-se o segundo descortiçamento. Esta cortiça de segunda extração chama-se cortiça secundária (*matxot* em catalão, *segundero* em espanhol), e como as suas características não são ótimas para a produção de rolhas (a utilização

de maior valor acrescentado), é enviada para a indústria de granulação para a produção de granulado branco de cortiça para isolamento e outros aglomerados de cortiça.

O terceiro descortiçamento e os descortiçamentos subsequentes produzem pranchas de cortiça mais uniformes. A cortiça de reprodução é utilizada para o fabrico de rolhas de cortiça natural para a indústria de vinhos e discos de cortiça natural para a montagem de rolhas de cortiça aglomerada (denominadas rolhas técnicas) para espumantes. As garrafas de espumante possuem uma maior pressão interna e as rolhas técnicas providenciam uma vedação mais eficiente das garrafas. A cortiça obtida através da poda dos ramos e dos troncos irregulares do sobreiro dá origem a um subproduto da cortiça conhecido por cortiça morta (*suro pelut* em catalão ou *falca* em português), que é uma mistura de várias variedades de cortiça, entrecasca e madeira. Depois de separada da madeira, a cortiça é considerada de qualidade inferior (virgem e secundeira) e é triturada e aglomerada para utilização na criação de materiais de construção.

Considera-se que 150 -200 anos é a idade máxima de exploração de um sobreiro [37]. A densidade de árvores de uma floresta de sobreiros varia muito dependendo da região (50–150 árvores por hectare), e uma densidade média de 100 árvores por hectare pode ser assumida para ACV ao longo da fase de produção de cortiça. A produção de cortiça florestal pode variar muito dependendo do território, o que indica circunstâncias climáticas e ecológicas variáveis, que por sua vez influenciam a densidade das árvores, a taxa de desenvolvimento dos sobreiros e a intensidade do descortiçamento. Por exemplo, podemos calcular a produção de 1.49-3.48 toneladas de cortiça total por hectare na floresta catalã [42].

Existem dois principais modelos de gestão ou ecossistemas de montado de sobreiro: sistemas agrossilvipastoris (principalmente em Portugal e Sul de Espanha) e sistemas florestais (ou seja, Catalunha e Sul de França). Os pontos quentes ambientais nos dois modelos são distintos. No sistema florestal, estão associados à limpeza, manutenção de estradas, transporte de trabalhadores e cortiça. Nos sistemas agrossilvipastoris, os pontos quentes são adubação, poda e limpeza. Os dois critérios de imputação dos impactos ambientais condicionam significativamente os resultados obtidos para a cortiça virgem em sistemas agrossilvipastoris e para a cortiça virgem e secundária em sistemas florestais. A comparação dos impactos encontrados para a cortiça virgem e a secundeira em Portugal e na Catalunha revela que os impactos na Catalunha são significativamente menores devido aos procedimentos de gestão menos intensos descritos acima. Tanto Portugal (região do Alentejo) como a Catalunha mantêm os seus montados de forma diferente. Em Portugal, os povoamentos de sobreiro são sistemas agrossilvipastoris de manutenção intensiva caracterizados por uma baixa densidade arbórea. Os sistemas florestais da Catalunha têm maior densidade de árvores, menos operações automatizadas e nenhuma fertilização. Devido a estas distinções, a cortiça produzida em Portugal tende a ter maiores repercussões ambientais do que a cortiça produzida na Catalunha [41].

O Cork Carbon Footprint Model (CCFM), desenvolvido para o setor corticeiro português [33], pode ser extrapolado para outros territórios corticeiros como Espanha. Este modelo comprova que o sector da cortiça é um sumidouro de carbono; isto significa que o setor da cortiça como um todo retém mais CO<sub>2</sub> do que emite para a atmosfera no fabrico de produtos de cortiça. A Figura 2.11 mostra que o carbono levado pela floresta para fins biológicos é maior que as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de todo o setor, incluindo o carbono biogénico. Além disso, a figura mostra que os processos mais emissores de GEE são a fabricação de produtos aglomerados, principalmente devido às resinas que são misturadas com os grânulos de cortiça durante a produção de aglomerados de cortiça. Com este valor, torna-se claro que os montados de sobre e os produtos derivados da cortiça obtidos com a extração da cortiça têm potencial para mitigar o efeito de estufa através da redução da emissão de carbono para a atmosfera.

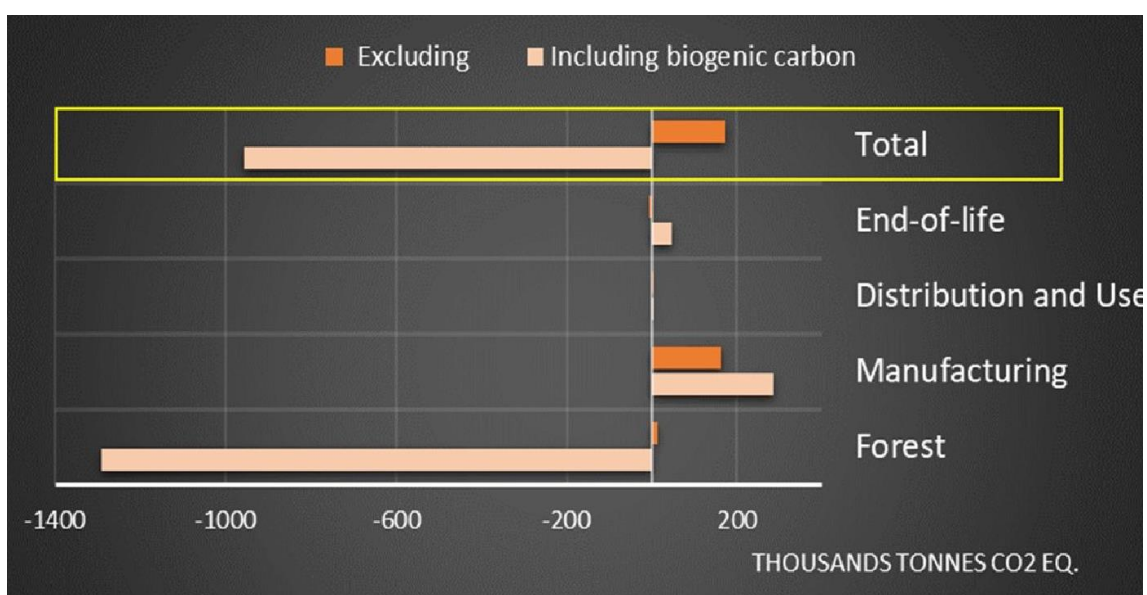


Figura 2.11 Pegada de carbono da cortiça por etapa do setor calculada pelo Cork Carbon Footprint Model [43].

### 2.2.3 Ciclo de Vida dos Produtos de Cortiça

O desenvolvimento e implantação de Regras de Categoria de Produto (RCP) pode ser vantajoso no caso de produtos de cortiça, pois permite a comparação de diferentes estudos e ajuda a evitar erros de cálculo ao fornecer uma metodologia padronizada. De facto, no momento da redação deste documento, o Comité Técnico Espanhol de Normalização (CTN 56 SC5), responsável pela normalização dos produtos de cortiça e liderado pela *Catalan Cork Institute Foundation*, está a desenvolver um RCP para uniformizar a metodologia de cálculo a pegada ambiental dos diferentes tipos de rolhas. Podemos encontrar na literatura alguns estudos de ACV que investigam o efeito ambiental dos principais produtos de cortiça, como por exemplo, rolhas de cortiça natural,



rolhas de champanhe e pisos flutuantes de cortiça. Atualmente, na Catalunha está a ser atualizada uma análise ambiental integrada de alguns produtos de cortiça [44].

Conforme indicado anteriormente, o CO<sub>2</sub> sequestrado permanece na biomassa do sobreiro e posteriormente nos produtos da cortiça até ser libertado para a atmosfera por combustão ou decomposição. Consideram-se a fase florestal (incluindo as atividades de gestão do sobreiro), a fase de fabrico (incluindo os vários processos de produção de produtos de cortiça), a fase de utilização (incluindo o transporte de produtos de cortiça usados para locais de distribuição) e o fim de estágio de vida (incluindo as estratégias de gestão de reciclagem, compostagem, incineração ou geração de energia e aterro). Tendo em conta as emissões e armazenamento de CO<sub>2</sub> biogénico (CO<sub>2</sub> armazenado no próprio material da cortiça), é fundamental referir que o destino em fim de vida tem um impacto considerável nos resultados, pois pode alterá-los consideravelmente. Não é possível supor que todo o CO<sub>2</sub> biogénico presente no ciclo do sistema persista. Considerando que as rolhas recicladas podem ser utilizadas na criação de outros aglomerados de cortiça (i.e. construção), Demertzi [33] calculou que 30 % da matéria-prima é incluída no produto acabado. Em caso de reciclagem, estima-se que 30 % do carbono contido nas rolhas naturais permaneça no sistema sem ser libertado para a atmosfera, enquanto 70 % do carbono biogénico contido nas rolhas naturais é libertado para a atmosfera (devido à combustão do pó de cortiça). Quando o CO<sub>2</sub> biogénico é incluído nos cálculos, o sequestro de CO<sub>2</sub> na fase florestal é considerado uma emissão negativa, pois diminui a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

De acordo com a norma ISO 14067:2018 *Gases de efeito estufa — Pegada de carbono de produtos — Requisitos e diretrizes para quantificação*, quando o carbono biogénico é armazenado em um produto por mais de 10 anos, ele deve ser documentado e valorizado, mas não deve ser incluído na pegada de carbono.

As percentagens utilizadas para os destinos finais dos vários produtos de cortiça devem ter por base os principais destinos finais dos resíduos sólidos urbanos e as estratégias de reciclagem. A reciclagem aumentaria significativamente a vida útil do setor da cortiça como um todo. Há que ter em conta que no ano de 2020 foram recolhidas 440 toneladas de rolhas nas estações de tratamento de vidro em Espanha, segundo a ECOVIDRIO (entidade sem fins lucrativos responsável pela gestão da reciclagem de todos os resíduos de embalagens de vidro em Espanha). No seu conjunto, em Espanha, as adegas aderentes ao Sistema Integrado de Gestão de Resíduos declararam 3700 toneladas de rolhas de cortiça, segundo a ECOEMBES (sociedade sem fins lucrativos que fiscaliza a reciclagem dos resíduos colocados nos caixotes amarelos e azuis). Assim, os sectores da cortiça e do vinho têm um elevado potencial para reciclar rolhas de cortiça e aumentar a sua vida útil através de outras aplicações e assim aumentar o tempo até que o carbono biogénico passe definitivamente para a atmosfera.

Dependendo da categoria de efeito avaliada, muitas soluções de gestão de uso final, como aterro, incineração, produção de energia, compostagem e reciclagem, podem ser selecionadas. Algumas alternativas podem fornecer os melhores resultados ambientais para mudanças climáticas, esgotamento do ozono e acidificação, enquanto outras podem fornecer os melhores resultados ambientais para geração de ozono fotoquímico e esgotamento de recursos minerais e fósseis. Na maioria das categorias de efeito ambiental, a opção de aterro não oferece o desempenho ideal.

No entanto, quando se avalia a emissão de dióxido de carbono biogénico para a categoria das alterações climáticas, a opção de reciclagem revela-se a mais eficiente uma vez que a maior parte do carbono biogénico ficaria quase permanentemente retida nos produtos de cortiça e não seria libertada para a atmosfera. O sequestro de CO<sub>2</sub> em produtos de cortiça para diferentes aplicações é baseado em determinações prévias do teor de carbono de diferentes materiais de cortiça. Conhecer a quantidade de carbono biogénico em diferentes tipos de materiais permite a engenheiros, arquitetos, designers e outros técnicos estimar de forma fácil a quantidade de CO<sub>2</sub> sequestrado nos produtos de cortiça quando os utilizam nas mais diversas aplicações. Por outro lado, e numa perspetiva mais ampla, podemos considerar que os produtos de cortiça, pelas suas características físico-mecânicas, tendem a ser substituídos por materiais plásticos muito mais intensivos em energia no seu fabrico e provenientes de fontes de energia e matéria não-renovável. Estes cálculos são uma questão atual e têm uma importância crescente quando se comparam materiais tendo em conta a necessidade de alcançar a neutralidade carbónica. Um exemplo desses cálculos pode ser encontrado no trabalho de Gil [31] (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 CO<sub>2</sub> em diferentes produtos de cortiça [31].

Product	g CO <sub>2</sub> /product	g CO <sub>2</sub> / g product
Sparkling cork stopper (agglomerated with 2 discs of cork)	16.5	1.90
Still wine cork stopper (natural cork stopper)	10.6	1.89
Agglomerated cork stopper for still wine	9.3	1.90
Micro agglomerated cork stopper for still wine	7.9	1.47
Expanded cork slab (40 mm wide)	-	2.27
Expanded joint (12 mm wide)	-	1.93

As rolhas de cortiça natural são 100 % cortiça; de facto, para uma rolha ser considerada uma “rolha de cortiça” deve conter pelo menos 65 % em massa de cortiça na sua formulação [45]. Outros materiais à base de cortiça também apresentam um teor de carbono considerável, de cerca

de 55 % a cerca de 65 % (w/w), o que corresponde a um elevado sequestro de carbono nestes materiais. Perante este aspeto e devido ao facto de os materiais de cortiça terem vidas úteis bastante longas, que podem ser prolongadas após uma primeira utilização através da reciclagem, são materiais de eleição para aplicações ditas “verdes” e sustentáveis.

#### 2.2.4 Valores da Pegada de Carbono

A indústria da cortiça distingue-se por oferecer uma vasta gama de produtos de cortiça. A Figura 2.12 apresenta os produtos de cortiça mais representativos fabricados a partir dos vários tipos de cortiça: produtos de construção aglomerados pretos e grânulos (de cortiça morta e virgem), produtos de construção e granulados de cortiça branca aglomerada (de madeira morta e cortiça de segunda reprodução), rolhas de cortiça natural e discos, e rolhas de cortiça aglomerada e materiais de construção (de cortiça de reprodução). Estes produtos representam 97.6 % do total de produtos de cortiça vendidos em Portugal [46]. Em Espanha quase 100 % dos produtos de cortiça fabricados são rolhas de cortiça. A restante parte do material de cortiça inclui principalmente matérias-primas e produtos de decoração, compósitos bem como folhas de cortiça utilizadas em produtos de moda e atualmente não existem dados disponíveis sobre as emissões de GEE durante o seu fabrico.

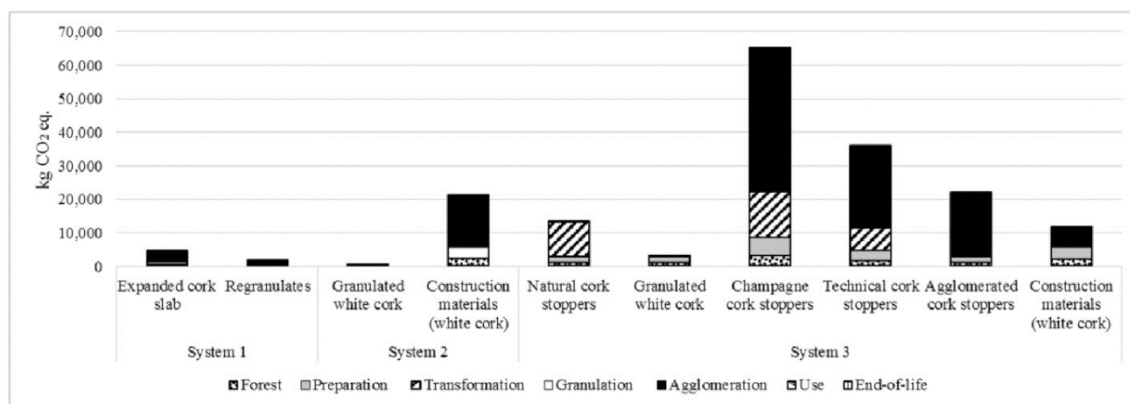


Figura 2.12 Rendimento da pegada de CO<sub>2</sub> do modelo para os produtos finais mais representativos da indústria da cortiça, excluindo o CO<sub>2</sub> biogénico e o sequestro florestal [48].

A pegada de carbono total do setor da cortiça pode ser substancialmente reduzida se tivermos em conta o sequestro de carbono na fase florestal. Sabe-se que 79 % do carbono sequestrado na fase florestal é armazenado na madeira, raízes e folhagem do sobreiro, enquanto os restantes 21 % são conservados na cortiça bruta [48]. Se considerarmos as melhores condições de sequestro de carbono na floresta (14.2 toneladas CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e uma produtividade média de 1.5 toneladas por hectare, temos que -9.5 kg de CO<sub>2</sub> são absorvidos por cada kg de cortiça extraída. Este cálculo da fixação de carbono florestal pode ser valorizado em conjunto com o resultado do cálculo da pegada de CO<sub>2</sub> para melhor compreender o impacto positivo da utilização do material de cortiça.

Obter um valor de sequestro de carbono o mais próximo possível da realidade é importante do ponto de vista do cultivo de carbono. A agricultura de carbono pode ser definida como um modelo de negócios verde que recompensa os administradores de terras por adotarem práticas aprimoradas de gestão de terrenos que aumentam o sequestro de carbono em biomassa viva, matéria orgânica morta e solos, aumentando a captura de carbono e/ou reduzindo a liberação de carbono na atmosfera, enquanto adere a princípios ecológicos que são benéficos para a biodiversidade e o capital natural como um todo. Os incentivos financeiros podem ser provenientes de fontes públicas ou privadas e podem recompensar os gestores de terras pelas suas técnicas de manuseamento que aumentam o sequestro de carbono atmosférico ou pela quantidade de carbono sequestrado. A agricultura de carbono seria uma nova fonte de renda para os administradores de terrenos, que podem, em muitos casos, também colher os benefícios de terras mais férteis e resilientes em geral. Além disso, as abordagens de cultivo de carbono frequentemente geram co-benefícios para a biodiversidade, melhoram os serviços ecossistêmicos e ajudam os gestores de terras a se tornarem mais resilientes às mudanças climáticas.

## **2.3 Potencias Usos da Cortiça**

### ***2.3.1 Principais Propriedades da Cortiça***

A cortiça é uma substância natural extraída da casca exterior do sobreiro. O sobreiro (*Quercus suber* L.) é uma espécie autóctone dos bosques da região mediterrânica ocidental. A cortiça é uma substância peculiar. É leve e repelente à água, tornando-o um material adequado para barcos. É utilizado para vedar garrafas por ser compressível e impermeável a líquidos [34]. A sua condutividade térmica extremamente baixa torna-a um excelente material para isoladores ablativos usados para proteger aeronaves de altas temperaturas, e a sua capacidade de absorção de energia também é utilizada em outras aplicações aeroespaciais. Mas porque é que a cortiça tem estas propriedades?

No século XVII, Robert Hooke cortou um pequeno pedaço de cortiça, colocou-o sob o seu microscópio, focalizou a luz do sol sobre ele com uma lente grossa e observou o espécime através da ocular. Hooke comparou o que observou a um favo de mel. A estrutura da cortiça era composta por inúmeras pequenas câmaras vazias divididas por paredes finas. Os compartimentos foram referidos como "poros ou células". Ele estimou que havia aproximadamente mil e duzentos milhões dessas células por polegada cúbica de cortiça. Hooke acreditava que a estrutura microscópica da cortiça era responsável pelas suas qualidades macroscópicas, o que é verdade, mas desconhecia que havia outro fator que explicava as múltiplas propriedades da cortiça [49].

As qualidades de um material são determinadas pelas propriedades químicas dos seus constituintes, bem como pelas suas quantidades e distribuições relativas (Figura 2.13). Tal como

acontece com outros materiais celulares, os componentes químicos da cortiça estão situados nas faces das células e nas arestas das células, formando uma rede tridimensional de uma matriz sólida que envolve as células vazias cheias de ar. Muitas das características únicas da cortiça estão diretamente relacionadas com a sua composição química, enquanto outras, como o seu comportamento mecânico e interação com fluidos, resultam tanto das características estruturais ao nível celular como da estrutura química da parede celular. Assim, as propriedades físicas e mecânicas da cortiça são resultado da estrutura celular e composição química da parede vegetal (suberina, lignina e polissacarídeos).

Este subcapítulo resume o conhecimento sobre as principais propriedades da cortiça e refere-se também à sua composição química e estrutura.

### Características estruturais

A estrutura celular macroscópica da cortiça está amplamente estabelecida e bem conhecida, mas a sua estrutura microscópica permanece pouco compreendida. Após o crescimento, as células da cortiça são desprovidas de citoplasma e tornam-se vazias. É geralmente reconhecido que a parede celular é uma estrutura convoluta feita de parede primária, que é formada principalmente de celulose, a parede secundária, que é montada a partir de deposições lamelares de suberina e, até certo ponto, lignina, e a parede terciária, que consiste em polissacarídeos. A estrutura resultante é composta por uma coleção de células ocas. A cortiça é uma substância com anisotropia. A seção transversal da direção radial (superfície perpendicular à direção do crescimento da casca) assemelha-se a um favo de mel com células poligonais com quatro a nove lados [1]. As seções transversais tangencial e axial são morfologicamente comparáveis, e a estrutura assemelha-se a de uma parede de tijolos (células prismáticas) [2].

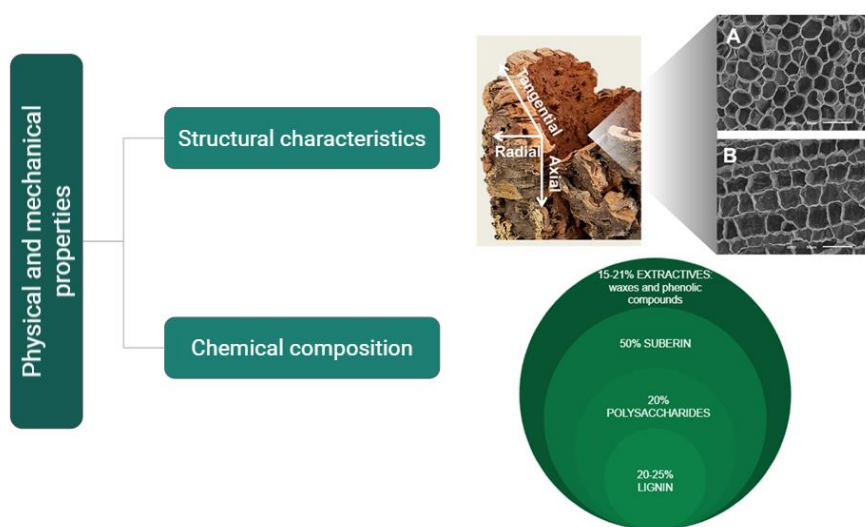


Figura 2.13 Representação esquemática das propriedades físicas e mecânicas da cortiça: características estruturais e composição química. Micrografias SEM tiradas de um pequeno cubo de cortiça (a) secção tangencial e (b) secção radial [50].

A cortiça compreende um número notável de propriedades que são únicas em materiais naturais. Estima-se que em 1 cm<sup>3</sup> de cortiça existam 15 a 40 milhões de células. Cada célula mede em média cerca de 40 µm, dos quais 10 µm correspondem à parede celular.

#### Composição química

A composição química da cortiça começou a ser estudada por Brugnatelli em 1787. A suberina é o principal composto da cortiça, tendo sido identificada por Cheureul em 1807. Desde então até hoje continua a ser estudada a composição da cortiça e a sua estrutura macromolecular, ainda não havendo modelos claros.

A composição química da cortiça é dominada pela presença de suberina como principal componente estrutural da parede celular e pela sua estrita associação com outros componentes, principalmente lignina e aromáticos não ligninos. A composição química da cortiça é substancialmente diferente das outras partes do tecido da árvore. A sua especificidade resulta em algumas lacunas no conhecimento da estrutura da composição química da cortiça. Para além da sua composição e das propriedades químicas dos seus constituintes, uma compreensão química mais aprofundada da cortiça passa pelo conhecimento da sua distribuição na parede celular, designada por topoquímica da parede celular, e da sua eventual interação.

A metodologia utilizada na determinação da composição química, bem como outros aspetos, como a origem, o estado fisiológico ou o número de exemplares, podem condicionar os resultados. Por isso, quando se fala da composição química da cortiça é dada a classificação de cada família de compostos. Os componentes estruturais da parede celular são, por ordem de importância relativa, suberina (50 % aproximadamente), lignina (20-25 %) e polissacarídeos (cerca de 20 %), que incluem celulose e hemiceluloses, os extrativos (14-18 %), que incluem substâncias lipídicas e fenólicas e componentes inorgânicos (1-2 %) [1] (Figura 2.13).

- A suberina é um polímero composto por ácidos gordos, álcoois e glicerol, ou seja, cadeias alifáticas de cadeia longa conectadas por ligações éster e principalmente sítios de ancoragem glicerídea. A suberina é o principal componente estrutural da parede celular da cortiça (constituindo mais de cinquenta por cento da sua massa sólida) [34,51];
- A lignina é um polímero aromático reticulado que contribui para a rigidez estrutural e resistência à compressão das células. A lignina é composta por três monómeros de fenilproeno: p-hidroxifenil (H), guaiacol (G) e siringil (S) [34,52];
- No desenvolvimento da parede celular da cortiça, os polissacarídeos desempenham um papel menor. Os polissacarídeos estruturais das paredes celulares vegetais consistem em celulose e hemiceluloses [34];

- Os extrativos são moléculas de baixo ou médio peso molecular que podem ser extraídas das células sem alterar a estrutura celular do material ou suas propriedades mecânicas [14];
- Os componentes inorgânicos dos materiais lignocelulósicos são geralmente o teor de cinzas, que representa o resíduo sólido após a combustão total.

Na parede celular, as frações de suberina, lignina e hemicelulose formam um conjunto espacialmente estável e quimicamente resistente, tornando seu fracionamento muito desafiador, independentemente da técnica empregada. Pereira [34] representou esquematicamente a construção da parede celular da cortiça (Figura 2.14). A matriz de lignina da lamela média une as células e reforça a estrutura como um todo. As camadas de lignina e aromáticos entre as lamelas de suberina também conferem solidez estrutural às paredes celulares, servindo como uma espécie de andaime para o componente alifático flexível. O lado do lúmen da célula é revestido com a parede celulósica terciária.

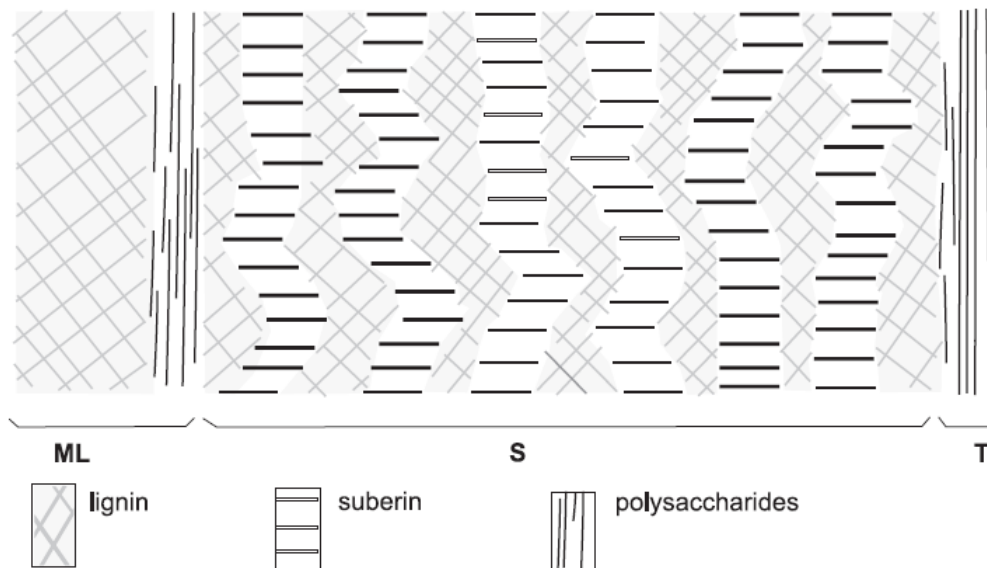


Figura 2.14 Representação esquemática de paredes celulares de cortiça (*Quercus suber*) mostrando a localização dos componentes estruturais [34].

### Propriedades da cortiça

A cortiça possui uma notável combinação de qualidades, incluindo baixa densidade, baixíssima permeabilidade a líquidos e gases, baixa condutividade, estabilidade química, durabilidade, alta compressibilidade com boa recuperação e baixa condutividade elétrica. Conforme referido anteriormente, as características da estrutura celular da cortiça (disposição das células, tamanho das células e ondulações da parede celular) e a composição química das paredes celulares explicam estas qualidades. Muitas qualidades da cortiça são influenciadas pelo seu teor de água e os tratamentos de aquecimento alteram o tamanho das células e o conteúdo químico. A própria massa de cortiça parece uniforme e desprovida de distinção de tipo celular. A única característica

macroscópica distintiva da cortiça é a presença natural de canais lenticulares. Os canais lenticulares atravessam as camadas de cortiça do exterior para o tecido interior do felogénio e são preenchidos por material não suberificado de tonalidade mais profunda [34].

A elevada quantidade de gás, o baixo poder de adsorção de água e a medição celular, entre outras características, fazem com que a cortiça tenha uma grande versatilidade e que possa ser utilizada para múltiplos fins. As propriedades físicas, mecânicas e térmicas da cortiça podem ser resumidas em dez pontos ou no decálogo da cortiça [89].

#### 1. Baixa densidade e leveza [1]

A cortiça é um material leve que flutua na água. Isso é resultado da sua estrutura celular formada por células vazias e fechadas com uma pequena fração sólida que se concentra em paredes celulares delgadas, sem canais de comunicação intercelular. A densidade do tecido de cortiça seca ao ar é baixa, em média na ordem dos 150-160 kg/m<sup>3</sup>, mas com valores que podem ir de menos de 120 a mais de 200 kg/m<sup>3</sup>. A densidade da cortiça irá variar devido às seguintes características estruturais: o tamanho das células, a proporção de cortiça precoce (células formadas no primeiro período de crescimento) e cortiça tardia (as células formadas no final da estação de crescimento), a ondulação de células, a extensão da porosidade derivada dos canais lenticulares e a presença de inclusões lenhosas. Este recurso tem sido amplamente utilizado em todos os elementos de flutuação.

#### 2. Impermeabilidade e impermeabilização [1]

Como as células da cortiça são cerca de 90% ocupadas por ar, pode-se pensar que um líquido pode preencher esse espaço vazio. O comportamento hidrofóbico da cortiça em contacto com o vapor de água e com a água líquida resulta da sua estrutura com células ocas sem comunicação intercelular e uma parede celular contendo suberina como principal componente químico. A presença de suberina, lignina e ceras na parede celular tornam a cortiça um material impermeável a líquidos, o que evita a sua deterioração. No entanto, a sua impermeabilidade a gases não é absoluta, pois permite uma difusão lenta de gases. As rolhas de cortiça são estanques e apresentam uma taxa de transferência de oxigénio de 0.004 a 0.14 mg/dia após um ano de engarrafamento [54-56]. O alto teor de gás tem baixa condutividade, o tamanho pequeno das células elimina a convecção do gás, a baixa fração de sólidos e o baixo poder de adsorção devido às numerosas paredes celulares fazem com que a cortiça tenha uma baixa transmissão de calor. As ondas de calor dissipam-se e espalham-se pela sua superfície e tornam a cortiça um bom isolante térmico. Ao mesmo tempo, é respirável e não inflamável, o que a torna um regulador climático único. A condutividade térmica ( $\lambda$ ) e a difusividade térmica ( $\alpha$ ) da cortiça com densidade 140-170 kg/m<sup>3</sup> é 0.040-0.045 W/m·K,  $1 \times 10^{-7}$ - $1.5 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> respetivamente. Quando a cortiça é aquecida, ocorrem alterações químicas e físicas que afetam a massa da parede celular, a sua composição e



as dimensões celulares. Estas alterações influenciam as propriedades, nomeadamente as propriedades mecânicas, numa medida que dependem da temperatura e do tempo de tratamento. A perda de massa da cortiça é relativamente pequena (cerca de 6 % da massa inicial) até aos 200°C, mas aumenta depois até à completa carbonização a cerca de 450°C.

### 3. Baixa transmissão sonora e isolamento acústico [57-59]

A cortiça apresenta um coeficiente de Poisson próximo de zero (cerca de 0.2) para NR/NR [57], baixa densidade e elevada porosidade. As propriedades da cortiça aproveitam ao máximo as ondas sonoras que são absorvidas e transformadas em energia térmica. A impedância acústica da cortiça é de  $1.2 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  para uma cortiça natural de 120-200  $\text{kg}/\text{m}^3$  [58]. A cortiça é muito absorvente de som para frequências baixas e médias e apresenta uma boa propriedade isolante para percussão acústica; por este motivo, pode ser utilizado em pisos laminados [59].

### 4. Alta resistência ao movimento e alto coeficiente de atrito [34,58]

A estrutura celular da cortiça causa efeitos de sucção. A resistência ao movimento oferecida pela cortiça contra uma superfície é uma propriedade que interessa especialmente em dois casos: a extração de rolhas de garrafas onde a rolha se move contra uma superfície de vidro e a utilização de produtos de cortiça como materiais de revestimento, por vezes com objetivos antiderrapantes [34]. Esta propriedade é muito importante nas rolhas de cortiça para assegurar a correta vedação das garrafas e a sua manutenção ao longo do tempo. O coeficiente de fricção é de 0.35-0.76 para contacto entre vidro e cortiça [58].

### 5. Capacidade de amortecimento e capacidade de absorção de energia de impacto (amortecimento).

A estrutura celular permite a deformação por flexão das paredes celulares, já que nos casos anteriores, a propagação de ondas mecânicas pode-se dissipar na superfície. A tensão de colapso das células da cortiça é baixa, de modo que o pico de tensão durante o impacto é limitado enquanto grandes deformações compressivas são possíveis, absorvendo uma grande quantidade de energia à medida que as células colapsam progressivamente. A energia total de compressão para uma deformação de 83% é de aproximadamente  $3.4 \times 10^6 \text{ J}/\text{m}^3$  e  $2.2 \times 10^6 \text{ J}/\text{m}^3$ , respetivamente para as direções radial e não radial. A parte correspondente à deformação até o final do patamar de colapso representa cerca de  $1.5 \times 10^6 \text{ J}/\text{m}^3$  [34]. Esta propriedade é muito importante para algumas aplicações como a capacidade de amortecimento em juntas "sísmicas", solas de calçados da indústria automobilística ou tapetes.

### 6. Compressibilidade, elasticidade e flexibilidade [1,60]

O elevado teor de ar das células e o seu coeficiente de Poisson quase nulo permitem que a rolha seja comprimida até quase metade sem perder a flexibilidade, e recupere a sua forma e volume

quando já não é comprimida. A cortiça não fratura sob compressão, quer através das células quer através das paredes das células. A recuperação dimensional após o descarregamento é considerável e a deformação residual é pequena mesmo das deformações iniciais na região de colapso e nas regiões de densificação. A cortiça só fratura sob tensão de tração (também no lado da tensão na flexão) e sob forças de cisalhamento. Os poros têm um efeito dominante na resistência à tração da cortiça e a fratura inicia-se sempre na vizinhança de um poro. A cortiça é um material celular aproximadamente elástico que combina um interessante conjunto de propriedades mecânicas. No comportamento mecânico da cortiça, duas características têm uma função importante: a capacidade das paredes celulares de dobrar e fortemente colapsar sem fratura da parede celular e a presença de canais lenticulares. O módulo de elasticidade da cortiça é um intervalo de valores entre os 10 MPa e os 20 MPa reportados nos vários estudos para a compressão da cortiça nas diferentes direções. Na cortiça a reversibilidade dimensional não é total devido à componente viscosa da deformação. A cortiça apenas se assemelha a um comportamento elástico, sendo na realidade um material viscoelástico [60]. Estas características estão totalmente relacionadas com a capacidade de absorção de energia da cortiça.

#### 7. Desgaste e estabilidade [34,50,59]

A lignina e os polissacarídeos na parede celular da cortiça fornecem rigidez. Estes componentes também conferem à rolha resistência à passagem do tempo. A cortiça é um tecido morto. Além disso, a cortiça não é tóxica nem alergénica e não produz reações indesejáveis em contacto com a pele ou outros tecidos. A cortiça é um material resistente ao desgaste superficial que resiste sem fraturas ou abrasões significativas à fricção repetida de objetos contra ela [34]. A cortiça apresenta resistência à maioria dos solventes, incluindo soluções ligeiramente ácidas e básicas [50]. Não enferruja pela ação do ar ou humidade [59]. São estas as razões pelas quais os produtos à base de cortiça, maioritariamente aglomerados de cortiça, são utilizados em pavimentos de zonas de utilização intensa, como hospitais, escolas ou aeroportos.

#### 8. Higroscópico e bioabsorção [61-69]

A cortiça é hidratada em função das condições ambientais. A cortiça incha quando absorve água. Devido à sua anisotropia estrutural, a variação dimensional não é a mesma nas três direções. A ondulação da parede celular, enquanto aspeto estrutural, tem de ser tida em consideração para compreender a variação dimensional da cortiça. No interior, o endireitamento das paredes celulares pode-se sobrepor ao inchaço devido à adsorção de água nas paredes celulares. A absorção de água pela rolha parece decorrer por dois mecanismos: a difusão das moléculas de água ao longo das paredes celulares e a penetração no lúmen celular. A captação de água pela cortiça depende, portanto, de dois aspetos: a composição química do material e a presença de canais lenticulares. O teor de humidade de equilíbrio da cortiça após secagem ao ar e equilíbrio

em condições interiores é em média de 7 %, variando entre cerca de 5 e 10 % com humidade relativa do ar muito baixa ou condições húmidas, respetivamente. Por exemplo, a madeira de sobreiro tem um teor de humidade de equilíbrio de aproximadamente 20 % para uma humidade relativa (HR) de 80 %. O teor máximo de humidade que pode existir em um material depende de sua densidade. Por exemplo, o teor máximo de humidade de uma rolha com uma densidade de 160 kg/m<sup>3</sup> seria de 545 %, enquanto para uma densidade de 190 kg/m<sup>3</sup> seria de 446% [34]. Além disso, vários investigadores têm demonstrado o potencial da cortiça na remoção de poluentes emergentes como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos [61-63], fenantreno [64], alaranjado de metila [65], ofloxacina [66], bifentrin [67], ibuprofeno, carbamazepina e ácido clofibrico [68] ou metais pesados [69].

#### 9. Natural, reciclável e renovável

A cortiça é um material natural porque é a casca exterior de um carvalho. O sobreiro pode regenerar a casca de cortiça após cada colheita. Permite um equilíbrio entre o manuseamento agroflorestal e a atividade humana. Pode ser facilmente incorporado numa economia circular. Como material natural, pode ser reciclável na lixeira compostável. Além disso, pode ser reutilizado, ou seja, as rolhas usadas podem ser recolhidas e/ou trituradas. A cortiça destas rolhas pode formar novos produtos (mas não novas rolhas).

#### 10. Isolador elétrico [69,70]

Outra aplicação importante da cortiça é como isolante elétrico, uma vez que é um material dielétrico. A cortiça apresenta um padrão complexo de mecanismos de polarização onde se distinguem três processos de relaxação diferentes, embora se encontrem fundidos ou parcialmente sobrepostos. O fator de perda da cortiça foi relatado em cerca de 0-1 com uma fraca dependência da frequência na faixa de 10<sup>-2</sup>-10 kHz, mas aumentando para quase 0.3 para altas amplitudes de deformação [69, 70]. Esta é uma perda alta (a borracha tem um coeficiente de perda de 0.08) e confere à cortiça boas propriedades de amortecimento e absorção de som e um alto coeficiente de atrito, como já discutido.

### ***2.3.2 Aplicações da Cortiça***

Devido à sua combinação única de propriedades físicas valiosas, a cortiça tem uma vasta gama de aplicações tradicionais. As rolhas de cortiça têm o maior valor acrescentado e a maior quota de mercado, principalmente para vinhos e espumantes [59]. De acordo com o Anuário APCOR 2018-2019 [46], o principal produto da indústria da cortiça é a rolha (72 %) destinada à indústria do vinho. A produção anual de cortiça é de aproximadamente 201 mil toneladas. No entanto, apenas 25 % da produção anual de cortiça é adequada para o fabrico de rolhas naturais (rolhas feitas com uma única peça de cortiça). Isto significa que 75 % da cortiça extraída é imprópria para esta aplicação, pelo que é transformada em rolhas de cortiça aglomerada ou outros produtos

excedentes feitos deste material. As rolhas de cortiça natural são extraídas diretamente da casca de cortiça da melhor qualidade, a cortiça de reprodução. Outras rolhas de cortiça, como as rolhas aglomeradas com ou sem discos, microaglomeradas ou rolhas técnicas para vinhos e espumantes, são produzidas como subprodutos do fabrico da cortiça natural. O fabrico de rolhas de cortiça aglomerada também apresenta alguns resíduos como odores defeituosos, tábuas ou pó. Existe alguma cortiça que nunca entrou no processo de fabrico de rolhas, como a cortiça virgem (cortiça de primeira colheita), as pranchas de cortiça com alterações ou os resíduos florestais de cortiça. A cortiça utilizada nas restantes aplicações é a chamada cortiça de baixa qualidade: cortiça imparável, subproduto da cortiça ou desperdício de cortiça (Figura 2.15).

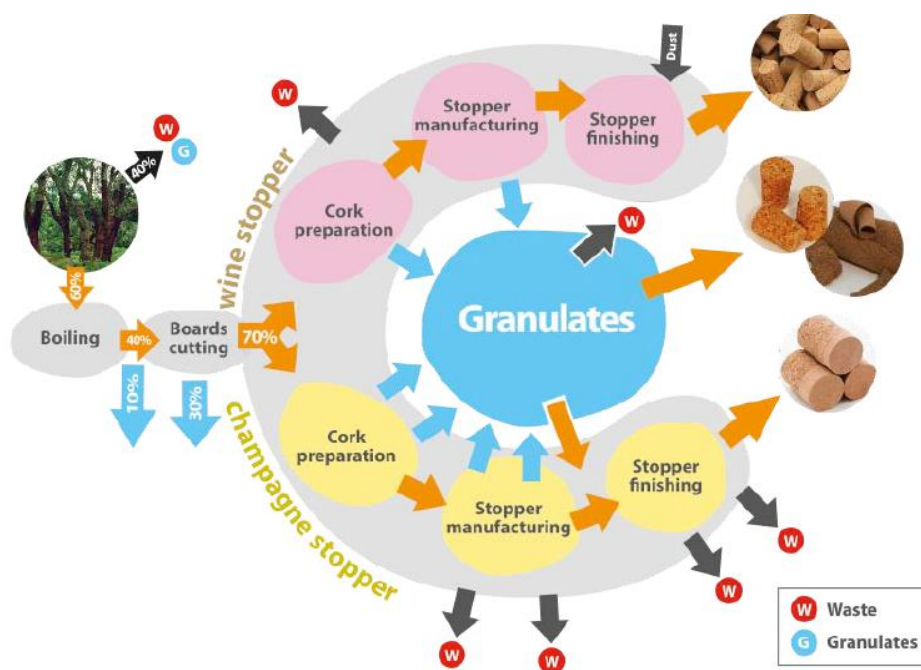


Figura 2.15 Diagrama dos fluxos de cortiça no fabrico de rolhas de vinhos e espumantes [59].

### 2.3.3 Cortiça na Construção

As soluções de construção em cortiça são a segunda aplicação por ordem de importância no setor. Os produtos de cortiça são usados principalmente na construção para isolamento térmico e absorção de energia, mas também desempenham um papel importante na decoração e pavimentos leves. Pisos, juntas de dilatação, câmaras de ar e revestimentos externos são usos comuns da cortiça em edifícios. Pode até ser usado em mistura com concreto para calçadas ou pavimentos externos. Assim, a cortiça permite um leque de aplicações baseadas nas capacidades antivibratórias, térmicas e acústicas (Tabela 2.4).

Um dos principais produtos nesta área é o aglomerado de cortiça ou painéis de cortiça aglomerada. Os aglomerados são produzidos pelo processo de aglutinação de grânulos de cortiça com granulometria específica e/ou densidade pré-determinada através de uma ação específica de compressão, temperatura e agente aglutinante, dando origem a diferentes tipos de aglomerados.

Desta forma, o tipo de cortiça (tamanho e densidade das partículas), o tipo e proporção de cola e as condições de aglutinação (temperatura, tempo e/ou pressão) são fatores que influenciam o resultado do produto aglomerado final. Cada uma das combinações das condições anteriores dará origem a diferentes produtos aglomerados de cortiça. Assim, cada processo aglomerado fornece um produto aglomerado com características diferentes. Cada produtor tem processos de produção padronizados definidos nas diferentes fichas técnicas.

Tabela 2.4 Produtos de cortiça usados em aplicações de construção e suas propriedades subjacentes [72].

Uses	Products	Examples	Required properties
Covering (floors, walls and ceilings)	Agglomerated cork composites	Cork tiles for flooring	Wear resistance and resilience
	Cork in emulsion projected	Roofs, facades and floors	Wear resistance and non-moisture absorption
	Rubber – cork composites	Underlay for flooring	Wear resistance and non-moisture absorption
	Expanded cork agglomerates	Underlay for ceilings and interior wall and roof panels	Shock absorption and non-moisture absorption
Thermal and acoustic insulation	Agglomerated cork composites	Cork-epoxy agglomerates	Low thermal conductivity coefficient
	Cork in emulsion projected	Roofs, facades, walls and floors	Acoustic and thermal resistance
	Expanded cork agglomerates	Roof panels and interior wall	Adequate mechanical resistance and non-moisture absorption
	Granulated cork	Fillings material for empty spaces between double walls and floors	Durability, vibration shock absorption and fire resistance
Vibration insulation	Agglomerated cork composites	Sandwich-type structures	Shock absorption
	Expanded cork agglomerates	Expanded corkboards with high density	Vibration absorption
	<i>Rubbercork</i>	Structural joints	Bumping absorption
Expansion joints	Agglomerated cork composites	Structural joints	High compressibility
	<i>Rubbercork</i>	Expanded corkboards	High recovery

Os aglomerados ou pranchas de cortiça são os muitos produtos de cortiça utilizados na contração (Figura 2.16). Os aglomerados de cortiça podem ser agrupados e divididos de várias formas. É amplamente aceite a divisão dos produtos aglomerados (sem rolhas aglomeradas) consoante sejam ou não utilizados ligantes e aditivos no fabrico:

- **Aglomerado expandido ou aglomerado termo expandido de cortiça.** O aglomerado expandido é um aglomerado de cortiça sem qualquer aditivo. É constituído por grânulos de cortiça crua aglutinada ou de muito baixa qualidade. É usado o poder de ligação da própria suberina, que tem a capacidade de se ligar a altas pressões e temperaturas. Este processo fornece placas de diferentes espessuras e formatos, dependendo do molde utilizado. Normalmente o processo termina com correções dimensionais e de forma. Este produto é natural e de origem vegetal, pois não são utilizados agentes sintéticos (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 Propriedades do aglomerado de cortiça expandida [59].

Properties	Values
Density	105 a 130 kg m <sup>-3</sup>
Thermal conductivity	0.040 W m <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>
Acoustic absorption (500, 1000 and 4000 Hz)	0.33, 0.49, 0.98
Compressive strength (MOR)	0.14 a 0.20 MPa
Usage temperatures	-180 a +140 °C
Fire resistance category	Euroclass E

- **Compósitos.** Um compósito de cortiça é um painel de cortiça com aditivos. É constituído por grânulos de cortiça aglutinados com resinas naturais ou sintéticas. Este produto pode ser fabricado com diferentes propriedades e formas. O material resultante é um composto de cortiça e outros materiais que dão origem a um novo composto diferente com as propriedades e características de ambos os produtos. Dependendo da sua função, podem distinguir-se diferentes compósitos: antivibráticos, acústicos, amortecedores, etc. (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 Propriedades de um tipo de compósito de cortiça (borracha-cortiça) [72].

Properties	Waterproofing	Acoustics
Density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	>900	550-650
Thermal conductivity ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	0.018	0.075
Thermal resistance ( $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$ )	0.019	0.027
Compressive strength (MPa)	>1.3	>0.6



Figura 2.16 Placas de cortiça aglomerada. A segunda placa, começando de cima, é uma placa de cortiça termoexpandida. Os outros são exemplos de compósitos de cortiça.

Atualmente, a cortiça começa também a ser utilizada no planeamento urbano. Os compósitos de cortiça são utilizados no fabrico de mobiliário urbano (barreiras acústicas e revestimentos de edifícios) e pavimentos de pistas e parques infantis. Paralelamente, a inovação na indústria aproxima a utilização da cortiça do fabrico de pavimentos onde o peso é determinante, como nas carruagens ou na aeronáutica.

#### **2.3.4 Têxtil e Mobilidade**

A cortiça é utilizada na indústria têxtil e da moda há séculos. Um dos produtos de referência nesta área são as solas de cortiça, tanto de cortiça natural como de aglomerado ou sanduíche. Atualmente, a cortiça como solução têxtil pode ser encontrada na forma de cortiça natural,

aglomerados ou em combinação com outras fibras naturais. A cortiça preenche um nicho de mercado muito amplo: calçados, marroquinaria, móveis, estofados, confeções, tapetes para prática de desportos e encadernação de caixas (Figs. 2.17 - 2.18).

Diferentes opções podem ser distinguidas entre elas: cortiça têxtil (folhas senoidais de cortiça natural ou aglomerado de cortiça, cortiça com algodão, poliéster ou poliuretano gelificado para calçado, revestimento de paredes, marroquinaria, brindes e novidades), e papel de cortiça (revestimento de paredes e candeeiros).

Tal como a pele ou a camurça, a cortiça confere um aspeto sofisticado e um toque luxuoso. A cortiça é fácil de limpar (basta passar um pano húmido) e é altamente resistente à água e às manchas. Pode ser uma solução ecológica para tecidos. Como detalhe, Lady Gaga (cantora) usou um vestido de cortiça em 2014 depois de um concerto em Lisboa, e Cristiano Ronaldo (futebolista) apareceu na imprensa com tênis Nike feitos de cortiça em 2018.



Figura 2.17 Exemplo de produtos de cortiça utilizados em diferentes aplicações têxteis (<http://www.articor.com/es/>).



Figura 2.18 Peugeot 208 Natural com compósito de cortiça no tejadilho [81].

Devido ao seu potencial de absorção de energia de impacto, este material tem sido utilizado em uma ampla variedade de aplicações, incluindo capacetes de estrada [73-75], mecanismos de segurança passiva [76-78] e outros tipos de armaduras sujeitas a cargas compressivas dinâmicas. A cortiça e as suas variantes aglomeradas são encaradas como uma alternativa expressiva às



espumas poliméricas [73-75,79,80] pelas suas propriedades já referidas. Existem alguns exemplos de cortiça na mobilidade no mercado automóvel, como o Peugeot “208 Natural”. Neste carro, um compósito de cortiça é usado para o teto.

A cortiça tem sido utilizada na exploração espacial. Além disso, a cortiça tem sido utilizada pela NASA em naves espaciais. O papel da cortiça na indústria aeroespacial pode ser como isolante ablativo na cobertura de veículos espaciais. Esses sistemas de isolamento térmico são essenciais para o lançamento e operação de todas as naves espaciais, tripuladas ou não tripuladas.

Existem vários exemplos de utilização de ablatores que contêm cortiça. A aeronave Júpiter C demonstrou a eficácia da ablação como método de proteção térmica em 1957. Scout, o primeiro veículo de lançamento de combustível sólido, usou escudos térmicos de cortiça/fibra de vidro e alhetas isoladas com cortiça para lançar o primeiro satélite americano Discover I. Pathfinder utilizou um escudo térmico com um favo de mel fenólico preenchido com epóxi de cortiça e esferas de sílica para sua entrada em Marte em 1997. O vaivém espacial incorpora cortiça em vários dos seus componentes, incluindo os propulsores sólidos do foguete e o isolamento do tanque externo. Acidentes envolvendo o vaivém espacial exigiram um reexame de seus componentes, incluindo seu complexo sistema de isolamento térmico; um dos componentes, um ablator feito de resinas de silicone e cortiça, foi mantido. Em uma descrição de patente, tal ablator é descrito como tendo uma composição de massa de 7.22-7.98% de cortiça moída. O foguete Atlas V que lança a sonda New Horizons para a missão da NASA a Plutão está envolto em uma carenagem de cortiça. A superfície cônica do ARD (*Atmospheric Reentry Demonstrator*) europeu é revestida com pó de cortiça e compósito de resina fenólica [34].

Reclusa [83] examinou o ablator de cortiça/resina fenólica vendido sob a marca Norcoat\*-liège a temperaturas tão elevadas como 2500 °C. O Norcoat\*-liège HPK F1 Space Grade contém cerca de cinquenta por cento de partículas de cortiça, trinta por cento de resina fenólica e vinte por cento de fungicida e agente mineral à prova de fogo. O ponto fundamental é que a estrutura celular original do compósito seja preservada após o tratamento térmico.

### **2.3.5 Farmácia e Cosmética**

A cortiça e seus subprodutos podem ser uma importante fonte de múltiplos compostos bioativos, como ácido fenólico, terpenoides e taninos [84]. Esses bioativos possuem uma variedade de propriedades relevantes: atividade antioxidante, anti-inflamatória, antienvelhecimento, purificadora ou de captura de radicais livres. Desta forma, a cortiça pode ser utilizada como um ingrediente promissor na indústria cosmética. De facto, já existem alguns exemplos de utilização da cortiça como tensor de alisamento (SUBERLIFT), como óleo ativo (DIAM OLÉOACTIF), ou como agente de descamação (ACTISCRUB). Recentemente a empresa Biogründel desenvolveu

o SUBERCHEM, e a Quimivita acaba de lançar no mercado um novo agente *peeling* fabricado pela corticeira EXFOBREEZE com a colaboração da *Catalan Cork Institute Foundation*. SUBERCHEM é um extrato de cortiça rico em polifenóis e obtido através de extrações Green. Os compostos fenólicos são substâncias com interesse crescente devido às suas propriedades antioxidantes, antimicrobianas, antibacterianas, antialérgicas, anticancerígenas e anti-inflamatórias, e até mesmo algumas propriedades antissecretoras e antiulcerogênicas [84]. Neste sentido, alguns estudos demonstram a elevada atividade antibacteriana que a cortiça apresenta, reduzindo a atividade de bactérias como *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* em 96.93 % e 36 %, respetivamente [85], e afirma-se ainda que a cortiça tem um potencial antitumoral obtido por diferentes métodos de extração em células de leucemia promielocítica humana [86].

Como foi dito ao longo deste capítulo, a cortiça possui múltiplas propriedades, pelo que pode ter as mais diversas aplicações. A maioria delas perdura há séculos e são praticamente as mesmas de séculos atrás, mas todos os anos surgem novos campos de aplicação da cortiça.

### **2.3.6 Outras Aplicações**

Atualmente, a consciência verde das pessoas e os ODS voltaram a colocar a cortiça em destaque. A cortiça é um material natural, amigo do ambiente, podendo ser um bom candidato a fazer parte de um novo material de base biológica para reduzir o plástico, por exemplo.

Em 2017, a 3DSpider Print e a *Catalan Cork Institute Foundation* desenvolveram uma moeda de cortiça dupla. O objetivo do estudo foi desenvolver um novo produto aditivo à base de cortiça adequado para impressão, extrusão, injeção e outros processos de fabricação. Este item é uma mistura de grânulos de cortiça e biopolímero plástico (utilizado na impressão 3D). O novo material, 3DCORK, é ecossustentável porque é à base de PLA (ácido polilático) e contém mais de 20 % de cortiça [89].

A cortiça é também um bom candidato para o tratamento e purificação de águas residuais. Como já explicou, a cortiça é um bom biossorvente de pesticidas, metais pesados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) e produtos recalcitrantes. Existem vários exemplos de tratamentos de águas residuais com cortiça: zonas húmidas (LIFE ECOCORK e [90]), paredes molhadas [87], paredes verdes [88 e 91] ou purificação de água por fotobiorreactores (LIFE SPOT). Muitas coisas podem ser feitas com cortiça, só que alguém tem de as descobrir.

### **Referências**

- [1] Pereira, H. (2011). *Cork: Biology, production and uses*. Elsevier.
- [2] Campos, P., Daly-Hassen, H., Oviedo, J. L., Ovando, P., & Chebil, A. (2008). Accounting for single and aggregated forest incomes: Application to public cork oak forests in Jerez [Spain] and Itimnia (Tunisia). *Ecological Economics*, 65 (1), 76–86.

- [3] Loisel, R. (1976). Place et rôle des espèces du genre *Pinus* dans la végétation du Sud-Est Méditerranéen Français. *Ecologia Mediterranea*, 2(1), 131–152.
- [4] WWF, 2006. WWF report. Available online [www.panda.org/mediterranean](http://www.panda.org/mediterranean)
- [5] Kim, H. N., Jin, H. Y., Kwak, M. J., Khaine, I., You, H. N., Lee, T. Y., Ahn, T. H., & Woo, S. Y. (2017). Why does *Quercus suber* species decline in Mediterranean areas? *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 10 (3), 337–341.
- [6] Joffre, R., & Rambal, S. (2001). *Mediterranean ecosystems*. ELS.
- [7] Plieninger, T. (2006). Habitat loss, Fragmentation, and Alteration – Quantifying the Impact of Land-use Changes on a Spanish Dehesa Landscape by Use of Aerial Photography and GIS. *Landscape Ecology*, 21 (1), 91–105.
- [8] Seixas, J. (2000). Assessing heterogeneity from remote sensing images: The case of desertification in southern Portugal. *International Journal of Remote Sensing*, 21(13–14), 2645–2663.
- [9] Urbieto, I. R., Zavala, M. A., & Marañón, T. (2008). Human and non-human determinants of forest composition in southern Spain: Evidence of shifts towards cork oak dominance as a result of management over the past century. *Journal of Biogeography*, 35(9), 1688–1700.
- [10] Blondel, J. (2006). The ‘Design’ of Mediterranean landscapes: A millennial story of humans and ecological systems during the historic period. *Human Ecology*, 34(5), 713–729.
- [11] Bugalho, M. N., Caldeira, M. C., Pereira, J. S., Aronson, J., & Pausas, J. G. (2011a). Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(5), 278–286.
- [12] Pinto-Correia, T., Ribeiro, N., & Sá-Sousa, P. (2011). Introducing the montado, the cork and holm oak agroforestry system of Southern Portugal. *Agroforestry Systems*, 82(2), 99–104.
- [13] Oliveira, G., & Costa, A. (2012). How resilient is *Quercus suber* L. to cork harvesting? A review and identification of knowledge gaps. *Forest Ecology and Management*, 270, 257–272.
- [14] Silva, J. S., & Catry, F. (2006). Forest fires in cork oak (*Quercus suber*L.) stands in Portugal. *International Journal of Environmental Studies*, 63(3), 235–257.
- [15] Acácio, V., Holmgren, M., Rego, F., Moreira, F., & Mohren, G. M. J. (2008). Are drought and wildfires turning Mediterranean cork oak forests into persistent shrublands? In *Agroforestry for Commodity Production: Ecological and Social Dimensions*. Springer Netherlands.
- [16] Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., & Montes, C. (2010). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 69(6), 1209–1218

- [17] Muradian, R., Arsel, M., Pellegrini, L., Adaman, F., Aguilar, B., Agarwal, B. et al. (2013). Payments for ecosystem services and the fatal attraction of win-win solutions. *Conservation letters*, 6(4), 274-279.
- [18] Rives, J., Martínez, C., Sánchez, S., Barriocanal, C. (2013). El valor de los servicios ambientales de los alcornocales en Cataluña Evaluación de los servicios ambientales del ecosistema.
- [19] Sánchez-González, M., Tomé, M., & Montero, G. (2005). Modeling height and diameter growth of dominant cork oak trees in Spain. *Annals of Forest Science*, 62(7), 633–643.
- [20] Costa, A., Nunes, L. C., Spiecker, H., & Graça, J. (2015). Insights into the Responsiveness of Cork Oak (*Quercus suber* L.) to Bark Harvesting. *Economic Botany*, 69(2), 171–184.
- [21] Gil, L. (2014). Cork. In *Materials for Construction and Civil Engineering*. Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3\\_13](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_13)
- [22] Costa, A., Pereira, H., & Madeira, M. (2009). Landscape dynamics in endangered cork oak woodlands in Southwestern Portugal (1958–2005). *Agroforestry Systems*, 77(2), 83–96.
- [23] Rodriguez-Molina, M. C., Blanco-Santos, A., Palo-Nuñez, E. J., Torres-Vila, L. M., Torres-Alvarez, E., & Suarez-de-la-Camara, M. A. (2005). Seasonal and spatial mortality patterns of holm oak seedlings in a reforested soil infected with *Phytophthora cinnamomi*. *Forest Pathology*, 35(6), 411–422. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2005.00423.x>
- [24] Brasier, C. M., & Scott, J. K. (1994). European oak declines and global warming: A theoretical assessment with special reference to the activity of *Phytophthora cinnamomi*. *EPPO Bulletin*, 24(1), 221–232.
- [25] Moreira, A. C., & Martins, J. M. S. (2005). Influence of site factors on the impact of *Phytophthora cinnamomi* in cork oak stands in Portugal. *Forest Pathology*, 35(3), 145–162.
- [26] Brasier, C. (1996). *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Annales Des Sciences Forestières*, 53(2–3), 347–358. <https://doi.org/10.1051/forest:19960217>
- [27] Montoya, J. M. (1988). *Los Alcornocales*. Ministerio de Agricultura.
- [28] Elena-Roselló, J. A., & Cabrera, E. (1996). Isozyme variation in natural populations of cork-oak (*Quercus suber* L.). *Silvae Genetica*, 45(4), 229.
- [29] Pulido, F. J., Díaz, M., & Hidalgo de Trucios, S. J. (2001). Size structure and regeneration of Spanish holm oak *Quercus ilex* forests and dehesas: Effects of agroforestry use on their long-term sustainability. *Forest Ecology and Management*, 146(1–3), 1–13.
- [30] Gil, L. (2015) *Cork as a Building Material*. Technical Manual. APCOR.

- [31] Gil, L. (2016) Sequestro de CO<sub>2</sub> em produtos de cortiça para diferentes aplicações.
- [32] Rives, J., Fernandez-Rodriguez, I., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe [Catalonia–Spain]. *Journal of cleaner production*, 19(2-3), 259-271.
- [33] Demertzi, M., Dias, A. C., Matos, A., & Arroja, L. M. (2015). Evaluation of different end-of-life management alternatives for used natural cork stoppers through life cycle assessment. *Waste Management*, 46, 668-680.
- [34] Pereira, H. (2007). *Cork* (pp. 55-99). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- [35] Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles (Vol. 13, p. 270). Madrid: INIA-Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- [36] Gracia, C. "Biocombustibles: energia o aliment?." *Omnis Cellula* 25 (2010): 21-27.
- [37] Costa-e-Silva, F., Correia, A. C., Piayda, A., Dubbert, M., Rebmann, C., Cuntz, M. et al. (2015). Effects of an extremely dry winter on net ecosystem carbon exchange and tree phenology at a cork oak woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 204, 48-57.
- [38] Spampinato, G., Sciandrello, S., del Galdo, G., Puglisi, M., Tomaselli, V., Cannavò, S., & Musarella, C. M. (2019). Contribution to the knowledge of Mediterranean wetland biodiversity: Plant communities of the Aquila Lake (Calabria, Southern Italy). *Plant Sociol*, 56, 53-68.
- [39] Gil L. (1998). *Cortiça — Produção, Tecnologia e Aplicação*, Ed INETI, Lisboa
- [40] Gil, L. (2014). Cork: a strategic material. *Frontiers in chemistry*, 2, 16.
- [41] Dias, A. C., Boschmonart-Rives, J., González-García, S., Demertzi, M., Gabarrell, X., & Arroja, L. (2014). Analysis of raw cork production in Portugal and Catalonia using life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(12). 1985-2000.
- [42] Mundet, R., Baiges, T., Beltrán, M., & Torrell, A. (2018). Guia de recomanacions i mesures d'adaptació al canvi climàtic en la gestió de *Quercus suber*. Life+ SUBER. CFC, CPF, CTFC, FCSA, AFSA.
- [43] Giacomoni, J., & Andrighetto, N. *Innovation Networks of Cork, Resins and Edibles in the Mediterranean basin-INCREDBLE*.
- [44] Rives, J., Fernandez-Rodriguez, I., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe (Catalonia–Spain). *Journal of cleaner production*, 19(2-3), 259-271.
- [45] ISO 633:2019 *Cork – Vocabulary*.

- [46] APCOR's Cork Yearbook 2020. Available: [https://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2021/08/Cork\\_BoletimEstatistico\\_APCOR\\_2020.pdf](https://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2021/08/Cork_BoletimEstatistico_APCOR_2020.pdf)
- [47] Demertzi, M., Sierra-Pérez, J., Paulo, J. A., Arroja, L., & Dias, A. C. (2017). Environmental performance of expanded cork slab and granules through life cycle assessment. *Journal of cleaner production*, 145, 294-302.
- [48] Demertzi, M., Paulo, J. A., Arroja, L., & Dias, A. C. (2016). A carbon footprint simulation model for the cork oak sector. *Science of the Total Environment*, 566, 499-511.
- [49] Quora (2016) What did Robert Hooke see in the cork cell? <https://www.quora.com/What-did-Robert-Hooke-see-in-the-cork-cell>
- [50] Aroso, I. M., Araujo, A. R., Pires, R. A., & Reis, R. L. (2017). Cork: current technological developments and future perspectives for this natural, renewable, and sustainable material. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(12), 11130-11146.
- [51] Graça, J., & Pereira, H. (2004). The periderm development in *Quercus suber*. *Iawa Journal*, 25(3), 325-335.
- [52] Marques, A. V., & Pereira, H. (2013). Lignin monomeric composition of corks from the barks of *Betula pendula*, *Quercus suber* and *Quercus cerris* determined by Py-GC-MS/FID. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100, 88-94.
- [53] Pereira H (2013) Variability of the chemical composition of cork. *BioResources* 8(2):2246–2256
- [54] Chevalier, V., Pons, A., & Loisel, C. (2019). Impacto del cierre en el envejecimiento de los vinos en botella. *La Semana vitivinícola*, (3557), 2038-2043.
- [55] Godden, P., FRANCIS, L., FIELD, J., GISHEN, M., COULTER, A., VALENTE, P., ... & ROBINSON, E. (2001). Wine bottle closures: physical characteristics and effect on composition and sensory properties of a Semillon wine 1. Performance up to 20 months post-bottling. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 7(2), 64-105
- [56] Lopes, P., Saucier, C., & Glories, Y. (2005). Nondestructive colorimetric method to determine the oxygen diffusion rate through closures used in winemaking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(18), 6967-6973.
- [57] Vaz, M. F., & Fortes, M. A. (1998). Friction properties of cork. *Journal of materials science*, 33(8), 2087-2093.
- [58] Jové Martín, P. (2016). Caracterització del suro i subproductes de la indústria surera. Valoració d'aquests com a biosorbents d'hidrocarburs aromàtics policíclics en aigües d'escorrentia (Doctoral dissertation, Universitat de Girona).

- [59] Sierra Pérez, J. (2016). The introduction of eco-design for promoting the use of eco-materials: the cork as building material. Universitat Autònoma de Barcelona.
- [60] Mano, J. F. (2002). The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, 37(2), 257-263.
- [61] Olivella, M. À., Jové, P., & Oliveras, A. (2011). The use of cork waste as a biosorbent for persistent organic pollutants—Study of adsorption/desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(8), 824-832.
- [62] Olivella, M. À., Jové, P., Şen, A., Pereira, H., Villaescusa, I., & Fiol, N. (2011). Sorption performance of *Quercus cerris* cork with polycyclic aromatic hydrocarbons and toxicity testing. *BioResources*, 6(3), 3363-3375.
- [63] Olivella Costa, À., Fernández-Rodríguez, I., Cano, L., Jové Martín, P., & Oliveras Rovira, À. (2013). Role of Chemical Components of cork on Sorption of Aqueous Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. © *International Journal of Environmental Research*, 7(1), 225-234.
- [64] Olivella, M. À., Jové, P., Bianchi, A., Bazzicalupi, C., & Cano, L. (2013). An integrated approach to understanding the sorption mechanism of phenanthrene by cork. *Chemosphere*, 90(6), 1939-1944.
- [65] Krika, F., & Benlahbib, O. E. F. (2015). Removal of methyl orange from aqueous solution via adsorption on cork as a natural and low-cost adsorbent: equilibrium, kinetic and thermodynamic study of removal process. *Desalination and Water Treatment*, 53(13), 3711-3723.
- [66] Crespo-Alonso, M., Nurchi, V. M., Biesuz, R., Alberti, G., Spano, N., Pilo, M. I., & Sanna, G. (2013). Biomass against emerging pollution in wastewater: ability of cork for the removal of ofloxacin from aqueous solutions at different pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 1199-1204.
- [67] Domingues, V., Alves, A., Cabral, M., & Delerue-Matos, C. (2005). Sorption behaviour of bifenthrin on cork. *Journal of Chromatography A*, 1069(1), 127-132.
- [68] Dordio, A. V., Gonçalves, P., Teixeira, D., Candeias, A. J., Castanheiro, J. E., Pinto, A. P., & Carvalho, A. P. (2011). Pharmaceuticals sorption behaviour in granulated cork for the selection of a support matrix for a constructed wetlands system. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, 91(7-8), 615-631.
- [69] Pintor, A. M., Ferreira, C. I., Pereira, J. C., Correia, P., Silva, S. P., Vilar, V. J. et al. (2012). Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: A review. *Water research*, 46(10), 3152-3166.

- [70] Fernandes, F. A. O., Pascoal, R. J. S., & De Sousa, R. A. (2014). Modelling impact response of agglomerated cork. *Materials & Design*, 58, 499-507.
- [71] Pritz, T. (1996). Analysis of four-parameter fractional derivative models of real solid materials. *Journal of Sound and Vibration*, 195(1), 103-115.
- [72] Knapic, S., Oliveira, V., Machado, J. S., & Pereira, H. (2016). Cork as a building material: a review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(6), 775-791.
- [73] Fernandes, F. A., Alves de Sousa, R. J., Ptak, M., & Migueis, G. (2019). Helmet design based on the optimization of biocomposite energy-absorbing liners under multi-impact loading. *Applied Sciences*, 9(4), 735.
- [74] Coelho, R. M., de Sousa, R. A., Fernandes, F. A. O., & Teixeira-Dias, F. M. V. H. (2013). New composite liners for energy absorption purposes. *Materials & Design*, 43, 384-392.
- [75] Alves de Sousa, R. J., Gonçalves, D. F. S., Coelho, R. M., & Teixeira-Dias, F. M. V. H. (2012). Assessing the effectiveness of the use of a natural cellular material as safety padding in motorcycle helmet. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 88(5), 579-590.
- [76] Costas, M., Díaz, J., Romera, L. E., Hernández, S., & Tielas, A. (2013). Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers. *International Journal of Impact Engineering*, 62, 166-181.
- [77] Tay, Y. Y., Lim, C. S., & Lankarani, H. M. (2014). A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents. *International Journal of Crashworthiness*, 19(3), 288-300.
- [78] Paulino, M., & Teixeira-Dias, F. (2011). An energy absorption performance index for cellular materials—development of a side-impact cork padding. *International Journal of Crashworthiness*, 16(2), 135-153.
- [79] Fernandes, F. A. O., Jardim, R. T., Pereira, A. B., & De Sousa, R. A. (2015). Comparing the mechanical performance of synthetic and natural cellular materials. *Materials & Design*, 82, 335-341.
- [80] Sánchez-Sáez, S., García-Castillo, S. K., Barbero, E., & Cirne, J. (2015). Dynamic crushing behaviour of agglomerated cork. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 743-748.
- [81] Stone Ideas (2015) Peugeot 208 Natural“: ultra-thin natural stone for the rear spoiler. Available online: <https://www.stone-ideas.com/38728/peugeot-208-natural-ultra-thin-natural-stone-rear-spoiler/>



- [82] Gracia, C., 2010. Balanç de carboni: els embornals a Catalunya. Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Capítol 5: Embornals. Generalitat de Catalunya, Barcelona. Available online: [https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/segon-informe-sobre-canvi-climatic-catalunya/1part/05\\_embornals.pdf](https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/segon-informe-sobre-canvi-climatic-catalunya/1part/05_embornals.pdf)
- [83] Reculosa, S., Trinquencoste, M., Dariol, L. Delhaès P. (2006) Thermal degradation of a cork-based composite. *Carbon* 44(7):1316-1320. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.051
- [84] Bejarano, I., Godoy-Cancho, B., Franco, L., Martínez-Cañas, M. A., & Tormo, M. A. (2015). *Quercus Suber L. Cork Extracts Induce Apoptosis in Human Myeloid Leukaemia HL-60 Cells. Phytotherapy Research*, 29(8), 1180-1187.
- [85] Carriço, C., Ribeiro, H. M., & Marto, J. (2018). Converting cork by-products to ecofriendly cork bioactive ingredients: Novel pharmaceutical and cosmetics applications. *Industrial Crops and Products*, 125, 72-84.
- [86] Goncalves, F., Correia, P., Silva, S. P., & Almeida-Aguiar, C. (2016). Evaluation of antimicrobial properties of cork. *FEMS Microbiology Letters*, 363(3), fnv231.
- [87] Castellar, J. A. C., Formosa, J., Fernández, A. I., Jové, P., Bosch, M. G., Morató, J. et al. (2019). Cork as a sustainable carbon source for nature-based solutions treating hydroponic wastewaters—Preliminary batch studies. *Science of the total environment*, 650, 267-276.
- [88] Verdum, M., Prades C., González adrados, J. R., Bejarano, M., Lezcano G. and Sánchez M. (2020) *Miniguia de Nuevas Aplicaciones del Corcho*. Grupo Operativo GO SUBER. Fundació Institut Català del Suro.
- [89] Verdum M., Sánchez C., Castro J., Lladó J., Jové P. (2017) Revaluation of Catalan Low Quality Cork as Feedstock for the Additive 3D Printing Technology, *CSA2017 Materials Research Proceedings* 3. 11-18.
- [90] Jové P., Fiol N., Vilaescusa I., Verdum M., Aguilar L. Bosch C., Morató J. (2017) The use of cork waste as a sorbent for pesticides and heavy metals generated during the wine manufacturing process *CSA2017 Materials Research Proceedings* 3. 75-83
- [91] Garcia Moreno A. M., Sánchez Cuesta R., Prades López C. Verdum Virgos M., Jové P., Bejarano M. y Abellanas B. (2020) El corcho como sustrato de cubiertas verdes (Proyecto GO SUBER). *Tecnogarden* 219 38-53

## CAPÍTULO 3

### Sectores de Produtos de Cortiça, Propriedades da Cortiça e Tendências Futuras da Cortiça

*Mariusz Ptak\*, Marek Sawicki, Mateusz Dymek*

Wrocklaw University of Science and Technology, Department of Machine Design and Research, Lukaszewicza 7(9), 50-371 Wrocklaw, Poland

\*Correspondência: mariusz.ptak@pwr.edu.pl

#### Resumo

A cortiça é um material versátil e sustentável, com uma vasta gama de aplicações em muitas indústrias. É naturalmente à prova de água, um retardador de fogo e ecológica. Ao longo dos anos, a sua utilização tem crescido exponencialmente à medida que os produtos de cortiça se têm tornado cada vez mais populares nos mercados doméstico, comercial e industrial de consumo. Existem vários sectores que utilizam este material, incluindo a construção, pavimentos, isolamento e soluções de vedação. À medida que as preferências dos consumidores se deslocou para produtos mais sustentáveis, a procura por cortiça disparou, e espera-se que o sector continue a expandir-se num futuro próximo.

**Palavras-chave:** Cortiça; produtos de cortiça; propriedades da cortiça; automóvel; aeroespacial, aviação, isolamento.

#### 3.1. Introdução

A cortiça natural, o principal produto do ecossistema florestal, único no mundo, dos sobreiros, é um material com propriedades únicas que pode ser reutilizado sob qualquer forma, não tóxico, durável e resistente ao desgaste. A cortiça absorve eficazmente o dióxido de carbono atmosférico, o que é essencial, especialmente no que diz respeito ao aquecimento global. O mundo da ciência e dos negócios valoriza a cortiça pelas suas extraordinárias propriedades físicas e mecânicas que podem ser utilizadas sinergicamente para o desenvolvimento sustentável da economia e da indústria. Outro artigo [1] aborda o cultivo da cortiça e a sua micro e macroestrutura.

A cortiça é um dos materiais naturais mais versáteis. Tem uma vasta gama de aplicações, desde simples rolhas de garrafas a escudos térmicos especializados de aviação. É leve, compressível, elástica, durável, quimicamente e biologicamente resistente, não tóxica, ignífuga, praticamente impermeável a gases e líquidos, apresenta um bom isolamento térmico e acústico, e é também um excelente isolante elétrico e de vibrações. As propriedades únicas da cortiça resultam da sua estrutura celular tipo favo de mel [1]. A baixa densidade da cortiça resulta do sistema celular e dos canais lenticulares localizados nele. As dimensões mencionadas das células variam ligeiramente dependendo da idade da casca do sobreiro e do

período da sua recolha [1]. O valor da densidade da cortiça, assim determinada, situa-se na gama de 120 - 240 kg/m<sup>3</sup>, e a densidade média de uma cortiça seca é assumida como sendo de 150 - 160 kg/m<sup>3</sup> [2]. Devido à baixa densidade, a fração mássica de cortiça influencia significativamente a redução do peso das estruturas que a contêm. A estrutura celular assegura uma distribuição específica das tensões que atuam sobre as células de cortiça sob carga, evitando assim fissuras no material. A cortiça mantém as suas propriedades, independentemente da humidade e temperatura do ambiente. É sempre macia, mas elástica, agradável ao toque, e resistente ao desgaste [3].

A cortiça distingue-se por muitas propriedades excitantes, tais como flexibilidade, alta estabilidade física, compressibilidade, resistência a ciclos de carga a longo prazo, e isolamento térmico, eléctrico e acústico [2]. O elevado isolamento térmico é determinado reduzido coeficiente de condutividade térmica da cortiça natural  $\lambda = 0.040 - 0.045 \text{ W / (m}^\circ\text{C)}$  [2], e isolamento acústico -  $1.2 \times 10^5 \text{ kg / (m}^2\text{s)}$  [2], permitindo a redução da intensidade sonora em 31 - 36 dB, dependendo da espessura do material [4]. Por outro lado, o isolamento eléctrico depende fortemente tanto do teor de humidade do material como da temperatura. Este coeficiente a 25°C com um teor de água de 3.5% é igual a  $1.2 \times 10^{-14} \text{ S/m}$ , enquanto para uma rolha completamente seca à mesma temperatura, é de  $2.9 \times 10^{-10} \text{ S/m}$ . No entanto, a redução radical da capacidade de isolamento deste material dieléctrico é principalmente causada pelo aumento da temperatura - a condutividade eléctrica da rolha, por exemplo, na gama de 25 - 100°C, aumenta em três ordens de magnitude. O conteúdo de ligante no material aglomerado de cortiça aumenta a condutividade até quatro ordens de grandeza [2]. É de salientar que a utilização de materiais de origem natural (por exemplo, cortiça, lã) em vez de materiais de isolamento altamente processados, tais como poliestireno expandido ou poliuretano, eliminados por incineração, reduz significativamente (em 98%) o impacto negativo sobre o ambiente. A cortiça não é susceptível a alterações de volume, mesmo devido a mudanças bruscas de temperatura. É também retardador de chama - não queima com uma chama, mas com uma brasa. Apresenta propriedades antiderrapantes e alta resistência ao desgaste superficial [2], [5] (não se deteriora devido à fricção repetida no gargalo da garrafa, apesar do coeficiente de atrito relativamente elevado de 0.5) [6], [7]. A cortiça natural é quimicamente inerte, é uma barreira aos líquidos e gases e, em contacto com eles, não absorve odores [2], [3], [8].

Devido ao elevado teor de suberina, a cortiça apresenta propriedades antibacterianas e antifúngicas, impedindo assim a penetração destes microrganismos, por exemplo, numa garrafa bloqueada com ela [9]-[12]. A cortiça é um material hidrofóbico com uma energia superficial de 18 mN/m, e uma baixa força de adesão distingue-a de outros materiais [2], [4]. A natureza hidrofóbica da cortiça pode ser alterada devido à modificação do plasma da superfície sob pressão atmosférica (Tocha de Plasma de Pressão Atmosférica - *APPT*) ou em condições de baixa pressão (Câmara de Plasma de Baixa Pressão - *LPPT*) [13]. O tratamento com plasma só pode afetar a superfície exterior da cortiça sem alterar as suas propriedades. Os grupos reativos formados devido a estes tratamentos na superfície da cortiça permitem a sua ligação mais permanente com outros materiais [14], [15]. As propriedades adesivas da superfície da cortiça são também reforçadas pelo processo de silanização [16]. Uma das características mais

críticas que distingue a cortiça de outros materiais naturais e permite a sua ampla gama de aplicações é a sua elevada capacidade de absorver energia, mesmo sob tensões relativamente baixas. O valor médio da energia absorvida durante a compressão da rolha ao nível de 83% do volume inicial na direção radial ou não radial é de  $3.4 - 106 \text{ J/m}^3$  e  $2.2 - 106 \text{ J/m}^3$ , respetivamente [2]. A já mencionada capacidade de retardar a chama e a capacidade de abrandar a propagação do fogo são características significativas da cortiça. A cortiça queima sem chamas e, muito importante, não emite gases tóxicos [2]. A cortiça é um material celular flexível, anisotrópico com propriedades mecânicas específicas, principalmente devido à sua suscetibilidade à flexão gradual, deformação das suas paredes celulares sob carga [3].



Figura 3.1 Amostras de cortiça em teste de compressão.

O comportamento da cortiça sob compressão quase-estática é ilustrado por uma curva linear tensão-deformação com um extenso planalto que termina quando a estrutura celular da cortiça é totalmente comprimida e densificada (Figura 3.1) [2]. A inclinação da curva na região do planalto determina os valores do módulo de elasticidade da rolha (preparada de forma específica) dentro da gama de 6 - 20 MPa, dependendo da direção da carga. No caso de cargas na direção radial, estes valores são superiores aos das cargas nas direções axial e tangencial [2], [17]. O aquecimento da cortiça a 100 - 150°C durante 24 horas priva-a de humidade e aumenta significativamente a sua resistência à compressão. No entanto, um aquecimento mais prolongado, superior a 24 horas, reduz a sua resistência devido à degradação térmica da estrutura [17]. A extraordinária flexibilidade da cortiça é evidenciada pelo seu comportamento no teste de compressão. Após comprimir a rolha NL10 (densidade  $135 \text{ kg/m}^3$ ) a 80% da sua espessura original, regressa após 0.5 min, após descarga, sem sintomas de encurvadura, a aproximadamente 80% do seu tamanho original. As propriedades mecânicas da cortiça não podem ser caracterizadas por um valor da razão de Poisson [18], [19] ou do módulo de Young [30], porque as suas qualidades diferem, especialmente em densidade, dimensões celulares, e porosidade [2].

### 3.2 Sectores para a Produção de Cortiça

Nos últimos anos, a indústria da cortiça expandiu as suas aplicações. A cortiça como material tem propriedades fascinantes que podem melhorar significativamente os designs atuais. Os campos de aplicação vão desde:

- Rolhas para vinhos tranquilos e espumantes e bebidas espirituosas.
- Automóvel, ferrovias, Micromobilidade e Aeroespacial;
- Energia;
- Desporto;
- Arquitetura e aplicações de design, incluindo pavimentos e revestimentos de parede;
- Construção e Infraestruturas;
- Juntas de dilatação e isolamentos de cortiça;
- Moda.

Neste ponto, é de notar que a introdução bem-sucedida de material de cortiça em produtos existentes só poderia ser considerada pela sua presença no mercado. Protótipos ou soluções personalizadas que não se encontram na produção em massa não podem ser considerados como aplicações válidas dos materiais de cortiça, porque são programas de investigação públicos ou privados financiados ou produtos altamente personalizados e pagos em excesso. Por conseguinte, a discussão dos materiais de cortiça atualmente introduzidos está limitada aos produtos oferecidos no mercado. Neste parágrafo, o material de cortiça é considerado como cortiça em bruto e materiais derivados de cortiça, tais como aglomerado de cortiça à base de poliuretano, etc.

Na maioria dos casos, a aplicação de material de cortiça está fortemente ligada às suas propriedades específicas excecionais. O material de cortiça como material a granel é relativamente caro. Esta é a principal razão pela qual os designers só escolhem estes materiais quando requisitos especiais devem ser satisfeitos. É por isso que as aplicações da cortiça são únicas e não óbvias. Não é comum que o material de cortiça seja o material primário para equipamento de engenharia. A utilização da cortiça é um material secundário, que outros materiais não podem substituir em aplicações particulares.

As propriedades de isolamento da cortiça são piores ou melhores o suficiente para comparar pelo custo com as espumas de polímero normalmente utilizadas, tais como poliestireno, ABS, ou espumas de polímero XPS. As propriedades de resistência ao fogo das pranchas de cortiça em bruto não resistem a quaisquer normas de proteção contra incêndios. Apenas os aglomerados com aditivos autoextinguíveis ao fogo podem ser considerados um material resistente ao fogo. As propriedades de supressão de ruídos são relativamente elevadas em relação a outros materiais. Para algumas propriedades, tais como propriedades mecânicas, é difícil comparar materiais de cortiça com materiais diferentes. Os diagramas Ashby caracterizam os materiais de cortiça em relação a outros. Neste ponto, deve ser mencionado que

a cortiça tem algumas propriedades únicas que são muito importantes para a sua escolha em várias aplicações. A maioria dos utilizadores de materiais naturais tem bons sentimentos quando os dispositivos de toque são cobertos com cortiça. Além disso, a absorção de humidade e suor pelos materiais de cortiça são altamente recomendados para o manuseamento de dispositivos de longa duração. Propriedades excecionais na atenuação de ondas eletromagnéticas ou boa ablação de reentrada atmosférica provam que o material de cortiça não tem vantagem sobre o composto polimérico de materiais à base de metal na engenharia. No entanto, algumas propriedades muito específicas permitem a utilização de cortiça em aplicações específicas e exigentes.

Na indústria aeroespacial, a introdução da cortiça, ocupada por outros materiais normalmente baseados em polímeros, é difícil de conseguir. Um dos resultados mais triviais das alterações na indústria aeroespacial é o custo de certificação e recertificação de qualquer novo design. A substituição dos materiais atualmente utilizados neste momento não é uma prioridade para os fabricantes e operadores de aviões. Além disso, a estabilidade da cadeia de fornecimento na produção aeroespacial é um dos fatores mais importantes na produção de veículos voadores. A cortiça, como material natural, é extraída na floresta de cortiça. Cada ano a produção de cortiça e o seu preço pode variar significativamente.

Como mencionado anteriormente, os materiais de cortiça exibem uma excelente atenuação das ondas eletromagnéticas. Esta propriedade é utilizada para reduzir as leituras de rádio de objetos voadores, principalmente aviões, para evitar a deteção por sistemas de defesa aérea inimigos. Esta propriedade está fortemente relacionada com a microestrutura da cortiça. Lignina e suberina são canais alongados que prendem ondas de rádio magnéticas e que não refletem ondas de rádio para a fonte de radiação (sistemas de radar).

Uma das tendências futuras do material de cortiça na indústria aeroespacial está relacionada com os sistemas de isolamento acústico na propulsão. Os atuais sistemas de propulsão geram ruídos desagradáveis, que requerem sistemas adicionais de supressão de som. Para motores a jato, as nacelas dos motores são moldadas para reduzir o ruído. Redesenhar nacelas de motores a jato com materiais isoladores acústicos, tais como a cortiça, pode ser considerada como a próxima aplicação de cortiça.

Uma propriedade não trivial do material de cortiça é o baixo impacto ambiental da erosão dos painéis de cortiça. Qualquer escape de gases não inflamáveis, quentes, ou frios com quaisquer partículas que possam corroer o material pode ser coberto por material de cortiça. Tem boas propriedades de isolamento térmico, capaz de sofrer erosão com pequenas quantidades de material. Obviamente, após um determinado período de tempo, estas coberturas devem ser substituídas.

A cortiça é assumida como material de proteção contra o calor para uma missão de teste, onde as naves espaciais reentrarão na atmosfera terrestre. Durante a reentrada, cada nave espacial experimenta elevadas cargas térmicas devido à fricção do ar contra a estrutura da nave espacial. Durante a era do vaivém espacial, os vaivéns espaciais eram cobertos com painéis cerâmicos. Uma das hipóteses é que o material de cortiça possa ser utilizado para a proteção de reentrada. Baixa regressão de queimaduras e

elevadas propriedades de isolamento térmico a altas temperaturas têm grande potencial para a fabricação de escudos térmicos baratos e não complicados para a reentrada.

O material de cortiça, reconhecido como um material verde e sustentável, é amplamente utilizado na indústria da moda. Neste campo, as tendências desempenham papéis significativos, e é por isso que a quantidade de aplicações variará nos anos seguintes. Os campos de aplicação na indústria da moda são o tecido decorativo de cortiça, forros, material de confecção de calçado. Neste sector onde as empresas transformadoras fazem fortes declarações sobre ecologia e utilização de materiais sustentáveis, espera-se que o material de cortiça com outros materiais de base natural esteja mais presente.

A utilização da cortiça na arquitetura é generalizada. Devido à sua estrutura atrativa e experiência positiva para as mãos humanas, a cortiça é muito comum em qualquer tipo de arquitetura, desde acessórios domésticos a grandes funções decorativas em grandes edifícios e instalações artísticas. Ao longo das aplicações arquitetónicas, grandes quantidades de materiais de cortiça são utilizadas para painéis de pavimentos e paredes. Estes dois produtos consomem a mais alta qualidade de material de cortiça na arquitetura. Nesta aplicação, a cortiça é cara e tem características de alto padrão.

Uma das potenciais aplicações da cortiça é a absorção química do ar. A cortiça, devido à sua microestrutura interna, pode absorver substâncias químicas. Muitas substâncias orgânicas são muito tóxicas para os seres humanos. A fonte de substâncias nocivas à base de carbono provém da utilização de carvão em lareiras privadas, gasolina e gases de escape de motores diesel, incluindo veículos, e outros tipos de dispositivos tais como geradores de energia, cortadores de relva, e outras ferramentas de jardinagem doméstica com motores de combustão. Uma fonte adicional de substâncias orgânicas nocivas provém da agricultura intensiva, aterros sanitários e grandes quantidades de composto de resíduos orgânicos com processos de decomposição.

Em ambientes abertos, não é possível a utilização de sistemas de filtração, razão pela qual os granéis de cortiça podem ser utilizados para a retenção de substâncias nocivas. Além disso, neste caso, a cortiça pode vir da reciclagem, mas requer que as células de cortiça reais não sejam cobertas por qualquer camada aglutinante e sejam expostas à atmosfera circundante.

Os materiais à base de cortiça, sendo naturais, renováveis e recicláveis apresentam propriedades relevantes, encontrando diversas aplicações. Cerca de 70% da cortiça obtida é utilizada como rolhas de garrafa. Ainda assim, é cada vez mais utilizada na produção de materiais compósitos destinados principalmente à indústria da construção (cerca de 22%) [3], [4], [20]. Espera-se que venha a expandir a sua utilização em outras áreas da economia no futuro.

### ***3.2.1 Aglomerados de Cortiça para Utilização Geral***

Os compósitos de cortiça são preparados a partir de várias granulações, geralmente com granulometria de 0.5-30 mm. Os grânulos utilizados são normalmente resíduos da produção de rolhas. Os grânulos são misturados com um pré-polímero reativo e prensados à temperatura ambiente ou misturados com um ligante de polímero e prensados a uma temperatura elevada sob pressão para produzir compósitos de

cortiça [4]. As propriedades pretendidas do produto acabado dependem das dimensões dos grânulos, da sua fração de massa no compósito (até 90% em massa), do tipo de ligante (poliuretanos, resinas de fenol-formaldeído, etc.), e da densidade dos aglomerados utilizados no processo de produção.

Os blocos de aglomerados de cortiça produzidos são laminados, moldados de acordo com as dimensões planeadas, e alisados (Figura 3.2). São utilizados para obter painéis, tábuas, inserções de sapatos, etc. [2], [4]. Os aglomerados para revestimentos de paredes [4] e pavimentos são produzidos de forma semelhante, mas com um ligante adequado ou pressão variável no processo de prensagem. O material obtido é mais durável e inodoro. A sua resistência à abrasão pode ser aumentada aplicando uma ou mais vezes uma camada protetora de polímero em produtos multicamadas. Um grupo separado e importante de compósitos de cortiça é a chamada cortiça-borracha, uma mistura de grânulos de cortiça e borracha. Os ingredientes da composição são misturados (compostos), e o produto final é moldado e polido. Os compósitos produzidos são utilizados como material para juntas em automóveis e glândulas para tanques de petróleo porque são impermeáveis a líquidos e não sofrem expansão transversal devido ao baixo valor do coeficiente de Poisson [3], [19].

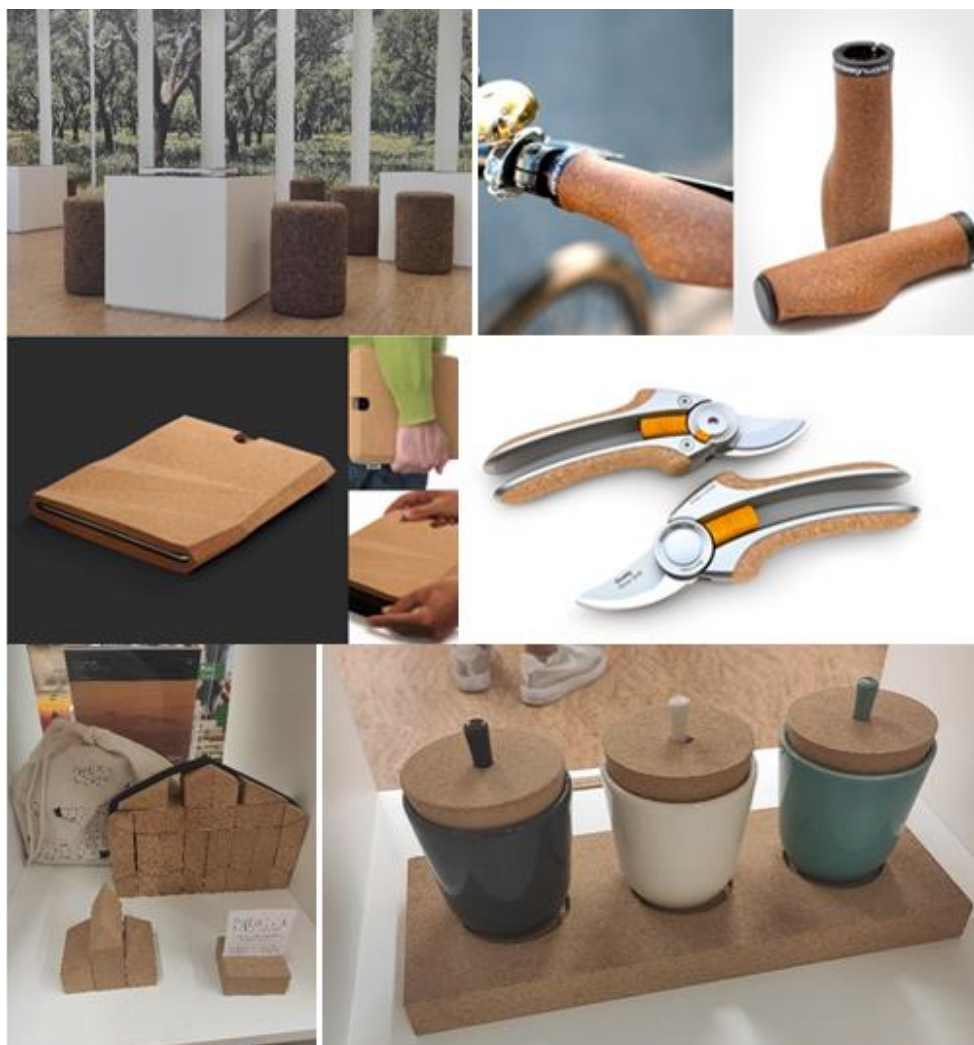


Figura 3.2 Bancos de Cortiça, Pegas de Guiador de Bicicleta, Capa da iPad, Tesouras de Jardinagem, Blocos de Brincar, Porta-Copos e Rolhas [21]-[24].



### 3.2.2 Isolamento Térmico e Sonoro

Aglomerados de cortiça para isolamento térmico e acústico na construção (Figura 3.3). A cortiça é caracterizada por uma pequena condutividade térmica, velocidade de propagação do som, e impedância acústica, tornando-a adequada para utilização como material para isolamento térmico e sonoro. Os compósitos de cortiça utilizados desta forma contêm 90 - 95% do peso da cortiça numa matriz de poliuretano. Os componentes misturados são normalmente aquecidos a cerca de 100°C durante um tempo específico para os aglomerar. Este tipo de material é amplamente utilizado na construção de isolamento térmico e acústico. É também utilizado pelas agências espaciais da NASA e ESA como escudos térmicos e anti vibração para componentes de foguetes [2]. Segundo a Associação Portuguesa da Cortiça, a Peugeot 208 Natural, apresentada em 2014 em São Paulo, teve a cortiça implementada no telhado e painel de instrumentos. O material assegurava um melhor isolamento térmico e acústico.



Figura 3.3 Isolamento de uma casa criado a partir de cortiça expandida.

A indústria da construção é a segunda maior área onde a cortiça natural é utilizada em paredes insonorizadas, tetos suspensos, papel de parede, plintos, revestimentos de chão em edifícios, e isolamento em câmaras frigoríficas industriais (Figura 3.4). Os compósitos anteriormente utilizados com um núcleo de espuma sintética e reforço de carbono revestido têm um isolamento acústico relativamente baixo. Em resposta à crescente necessidade de reduzir o ruído, foi desenvolvido um composto inovador com uma estrutura em camadas, constituído por um espaçador de cortiça natural e fibra de carbono. Este composto mostra a sinergia das vantagens dos materiais constituintes. Mantém as suas propriedades de resistência e baixo peso, suprime o ruído de forma mais eficaz do que os materiais de isolamento tradicionais (em 250 %), e é muito mais durável [3], [25]. Os chamados aglomerados negros são feitos de grânulos de cortiça natural sem aglutinante numa autoclave fechada a alta temperatura (aproximadamente 300 °C) e alta pressão (aproximadamente 540 kPa) [26], [27]. Como resultado da degradação termoquímica das paredes das células de cortiça, é libertada suberina (atuando como aglutinante natural). Os resíduos da degradação são aglomerados, e o produto intermediário utilizado para produzir placas de cortiça é formado [3], [28], [29]. É um material reutilizável e, ao mesmo tempo, completamente natural, sem aditivos químicos. A cortiça, graças à sua densidade muito baixa (0.24 g/cm<sup>3</sup>) e bom isolamento, é frequentemente utilizada pela indústria de meios de transporte como material para componentes de veículos motorizados e vários tipos de material rolante.



Figura 3.4 Indústria de pavimentos com cortiça aglomerada implementada.

### 3.2.3 Caso de Isolamento Sonoro

Como mencionado anteriormente, a cortiça é produzida a partir da casca de um sobreiro. É uma matéria-prima natural com propriedades únicas tais como baixa densidade, impermeável a líquidos e gases, flexível, compressível, e bom isolamento térmico e acústico. Na sua forma natural, a cortiça é também um excelente retardador de fogo, embora o pó de cortiça seja altamente inflamável (porque a estrutura celular foi quebrada). Além disso, é completamente biodegradável, renovável, e fácil de reciclar. O caso de estudo por Kłusak e Grygny [30] apresenta a aplicação de um espaçador rígido do tipo cortiça para fazer um compósito de cortiça e a sua aplicação em veículos de combate a incêndios.

Foram utilizados os seguintes métodos de fabrico para produzir compósitos e comparação da massa das amostras:

- Laminação manual (*HLU – Hand Lay Up*), Saco de vácuo (*VB – Vacuum Bagging*), Laminação manual com utilização de vácuo;
- Pulverização de fibra descontínua e resina SU (*Spray-UP*);
- Infusão por vácuo (*VI – Vacuum Infusion*);
- Injeção de resina sob diafragma de silicone reutilizável (*CCBM – Closed Cavity Bad Molding*);
- Moldação por transferência de resina (*LRTM – Light Resin Transfer Molding*).

O material SORIC tem sido utilizado até agora na produção de compósitos de 10 mm de espessura. O estudo visa construir um composto que será mais leve do que um composto com espaçador SORIC e não irá criar problemas tecnológicos durante o processamento. Durante os testes, foi decidido fazer um compósito com um núcleo de cortiça e um espaçador do tipo *SBC (Styrene Butadiene Block Copolymer)* para comparação. O compósito feito com o espaçador *SBC* (Borracha de Butadieno Estireno) revelou-se muito instável em termos de dimensão, porque foram obtidos grandes desvios de espessura em diferentes secções transversais das amostras. Tornou-se tecnologicamente difícil de processar e foi omitido em trabalhos posteriores [30].

Como parte das tentativas de produzir um compósito de cortiça por vários métodos, verificou-se que 1 m<sup>2</sup> do material feito com um espaçador de cortiça pesava 6.2 kg e era 1.3 kg mais leve do que um

compósito com uma camada intermédia de poliéster não-tecido do tipo SORIC. Como resultado da substituição do espaçador sintético SORIC por um espaçador de cortiça durante a produção de elementos para a nova construção composta, foi possível reduzir o peso da estrutura fabricada [30].

Para os testes experimentais, as amostras foram produzidas com um espaçador de cortiça, um espaçador de espuma de *PVC* (Policloreto de Vinila), e um espaçador Soric, bem como estruturas laminadas sólidas. Os materiais compósitos testados foram utilizados para construir carroçarias únicas, incluindo compartimentos de tripulação para transporte de pessoal e serviço. Foram efetuados testes abrangentes a compósitos, seguindo os requisitos R1 do PN-EN 45545-2: 2013 e incluindo as seguintes características [30]:

- Ensaio de reação ao fogo – propagação do fogo de acordo com a norma ISO 5658-2;
- Resposta à prova de fogo. Teste de intensidade de calor, fumo e taxa de combustão em massa de acordo a norma ISO 5660-1: 50 kW/m<sup>2</sup>;
- Testes de produção de fumo dos materiais e toxicidade dos seus produtos de combustão de acordo com a ISO 5659-2: 50 kW/m<sup>2</sup> PN-EN-45545-2: 2013 Anexo C.

Os testes foram realizados em materiais compostos produzidos por várias tecnologias, incluindo compostos tipo sanduíche. Os testes realizados como parte do parecer dos peritos abrangeram a inflamabilidade horizontal (seguindo a ECE-R 118 Anexo 6), fusibilidade dos materiais (seguindo a ECE-R 118 Anexo 7), e inflamabilidade vertical (seguindo a ECE-R 118 Anexo 8). Os testes foram realizados para as cinco estruturas seguintes [30], [31]:

- Estrutura nº 1: compósito feito por infusão constituído por tecidos de quatro vias com 600 g/m<sup>2</sup>, espaçador de cortiça de 6 mm, e resina de éster de vinilo retardador de chama.
- Estrutura nº 2: compósito feito por infusão constituído por tecidos de 4 vias com 600 g/m<sup>2</sup>, espaçador sintético de Soric de 6 mm, e resina de éster de vinilo retardador de chama.
- Estrutura nº 3: compósito feito por infusão constituído por 9 camadas de um tecido de quatro vias com 600 g/m<sup>2</sup> e resina de éster de vinilo retardador de chama.
- Estrutura nº 4: compósito feito por laminação manual constituído por tecidos de 4 vias com 600 g/m<sup>2</sup>, espaçador de cortiça de 6 mm, e resina de éster de vinilo retardador de chama.
- Estrutura nº 5: compósito feito por laminação manual constituído por tecidos de 4 vias com 600 g/m<sup>2</sup>, espaçador sintético de Soric de 6 mm, e resina de éster de vinilo retardador de chama.

Em conclusão, todas as amostras cumpriram os requisitos dos regulamentos, o que dá uma excelente oportunidade de selecionar a estrutura apropriada em função da resistência mecânica necessária [32]-[35]. De acordo com a norma PN-EN ISO 527-4, amostras feitas com um espaçador de cortiça com uma espessura de 30 mm obtiveram um valor mais baixo do perfil de deformação à tensão máxima do que

com espuma de PVC [34]. A estrutura utilizando cortiça como material espaçador mostrou maior rigidez (mais de 35%) em comparação com o espaçador de espuma [30].

A utilização de cabines plug-in e estruturas de combate a incêndios justifica-se por várias razões. A cortiça permite uma redução significativa do peso dos elementos fabricados, o que se traduz num menor consumo de combustível nos camiões de combate a incêndios em funcionamento. A diminuição do peso permite também o transporte de equipamento de salvamento mais especializado sem o risco de exceder as cargas admissíveis por eixo do carro. As cabines dos carros foram insonorizadas com tapetes especialmente instalados e fixados com uma camada de endurecimento. Foi decidido substituir outros materiais espaçadores usados utilizando métodos de processamento de cortiça e, numa operação, pelo método de infusão, para fazer uma cabine de automóvel. Tal cabine com um espaçador de cortiça revelou-se mais leve, mantendo a resistência mecânica necessária. A cabine obteve um maior isolamento acústico sem realizar quaisquer operações adicionais, o que reduziu o número de mão de obra necessárias para a insonorização da cabine. A cabine foi também feita com uma disposição e materiais que cumpram os requisitos de resistência ao fogo de acordo com os regulamentos ECE R 118 [30], [31].

### ***3.2.4 Estruturas tipo Sanduíche***

As estruturas leves de painel são uma boa escolha para rearranjos rápidos do espaço de passageiros do veículo. Pode ser utilizado para paredes temporárias, pavimentos e tetos. Estes tipos de painéis são geralmente estruturas em forma de sanduíche. Os painéis exteriores são feitos de material que garantem rigidez e transporte da maioria das cargas, enquanto no interior, o material do núcleo é leve. O material do núcleo colado aos painéis exteriores evita o encurvamento. Neste ponto, deve notar-se que nem os painéis exteriores nem o material do núcleo podem suportar mesmo uma pequena porção de cargas que o material sanduíche devidamente colado pode, principalmente devido à perda de estabilidade, geralmente referida como encurvadura.

A Figura 3.5 mostra painéis exteriores de alumínio com diferentes espessuras gerais e materiais do núcleo. Atualmente, os materiais do núcleo estão divididos em materiais naturais ou sintéticos, tais como madeira, contraplacado, cânhamo, palha ou cortiça. O painel inferior esquerdo (Figura 3.5) é criado com material de núcleo de madeira de balsa na direção perpendicular do grão à superfície do painel. Dois outros painéis são criados com núcleos sintéticos que têm núcleos de alumínio alveolar e de espuma. O resto dos painéis tem núcleos de cortiça. É essencial mencionar que nas estruturas em sanduíche o volume do material do núcleo pode ser até 95% do material. Assim, é crucial assegurar um elevado grau de utilização de materiais ecológicos e sustentáveis para núcleos. Os painéis exteriores, geralmente feitos de alumínio, têm um baixo impacto ecológico devido à sua elevada capacidade de reciclagem. A utilização de materiais naturais para este fim torna possível a criação de estruturas de alto desempenho, leves e com uma baixa pegada de carbono.

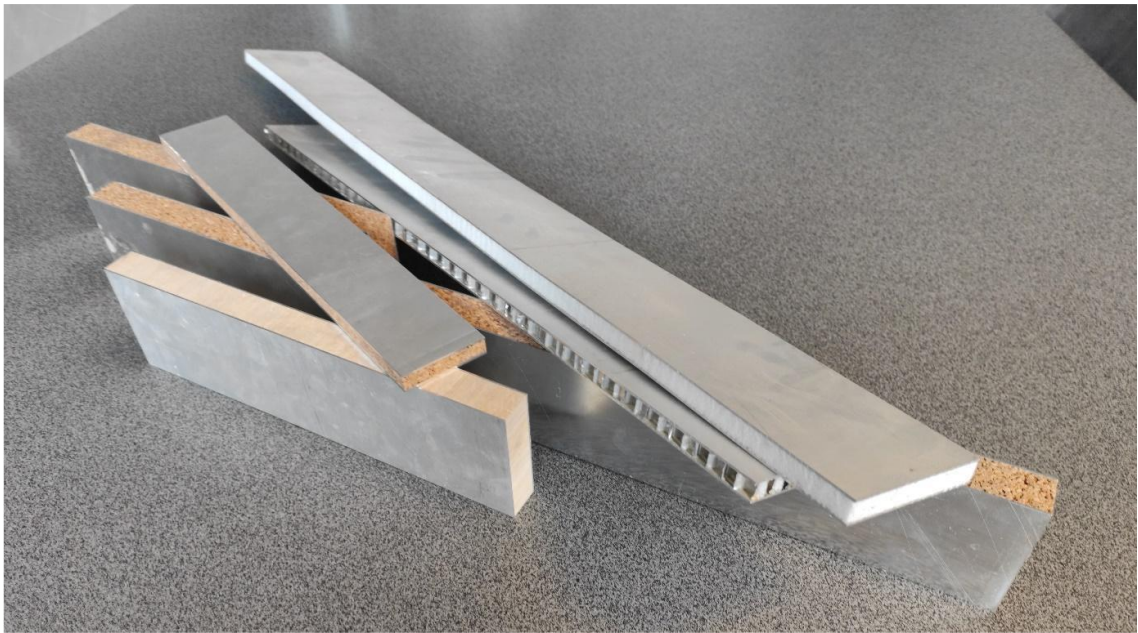


Figura 3.5 Painéis sandwich com madeira de balsa, cortiça, espuma de alumínio e espuma sintética como material de núcleo.

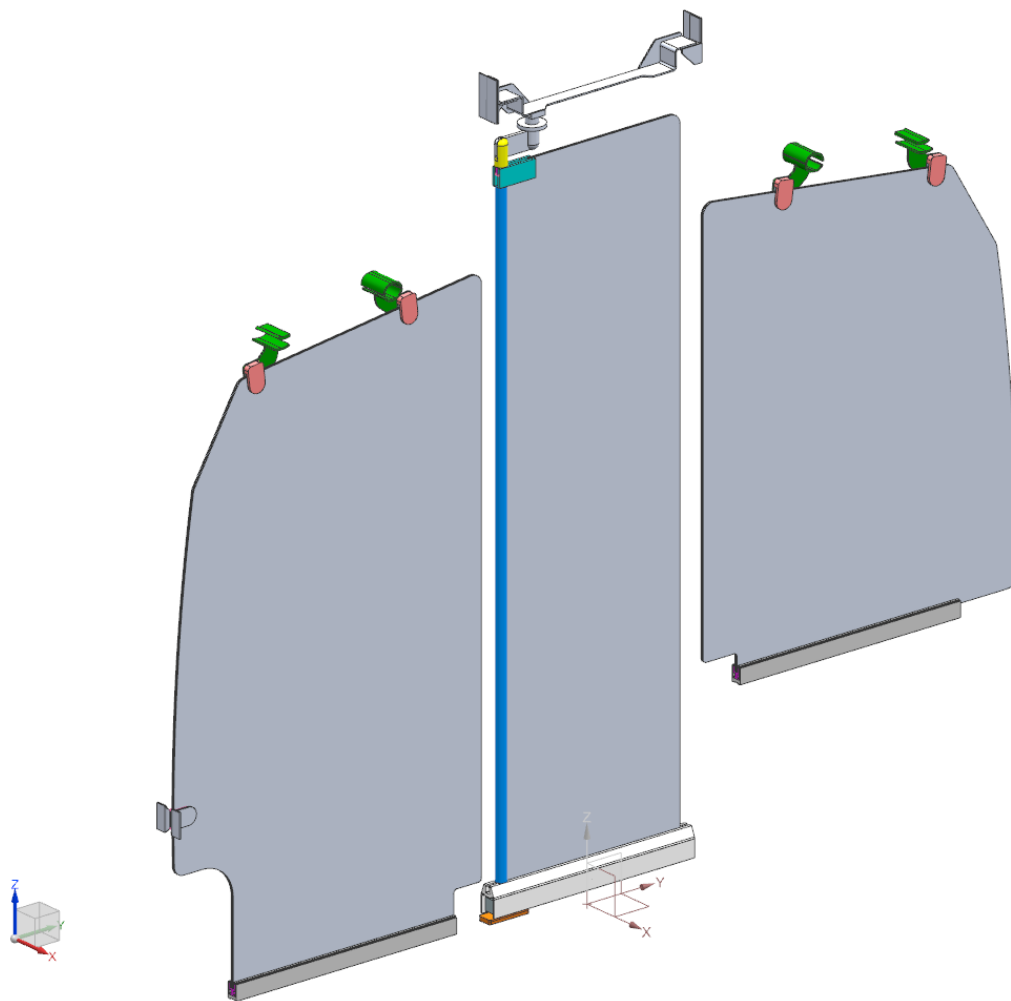


Figura 3.6 Modelo de paredes temporárias de comboio.

Entre os sectores onde podem ser utilizados painéis com cortiça, é necessário discutir e rever os requisitos gerais e as boas práticas num sector específico. Na indústria ferroviária, onde os requisitos de segurança são transferidos para o serviço de longa durabilidade, as instalações temporárias para rearranjo interior são práticas comuns. Os requisitos para aviões de passageiros de corpo largo são muito exigentes, e devido à elevada concentração de passageiros e ao curto tempo de evacuação, é impossível utilizar paredes móveis e temporárias. Para o sector automóvel, os rearranjos temporários do interior são muito raros e são soluções muito personalizadas. Na indústria naval, os navios e iates são concebidos apenas para um fim, e apenas pequenas alterações são introduzidas.

No caso apresentado, é mostrada uma parede temporária de comboio para rearranjos interiores (Figura 3.6). Este tipo de parede pode ser desmontado e colocado numa nova posição durante a preparação do comboio de viagem, alterando a distribuição de passageiros no interior. O conceito original considerou dois materiais para estas paredes: contraplacado altamente modificado com pintura de superfície brilhante e vidro colado de dupla camada. Após consideração, assume-se que uma mudança de materiais para material sanduíche de núcleo de cortiça é uma escolha possível.

Uma das vantagens da cortiça como material do núcleo de materiais sanduíche é a sua elevada propriedade de amortecimento de som. É muito melhor do que contraplacado altamente modificado ou vidro de dupla camada colado, principalmente devido à utilização de dois materiais combinados com alterações significativas de densidade que funcionam como filtro de passagem de banda. Com um cenário de massa semelhante, os painéis sanduíche têm uma rigidez significativamente mais elevada do que os materiais anteriormente mencionados com maior espessura. A desvantagem das estruturas de painéis sanduíche é a montagem complexa, que requer a utilização de insertos para lidar com as forças de compressão provenientes das uniões por parafuso/porca. A elevada resistência ao fogo foi considerada ao mesmo nível que o contraplacado, enquanto o painel de vidro tem excelentes propriedades de resistência ao fogo.

A Análise por Elementos Finitos (*FEA*) permite determinar a tensão no material e a deformação da geometria examinada contra as cargas aplicadas. Normalmente, a *FEA* requer as seguintes etapas: limpeza da geometria original através da remoção de características desnecessárias da geometria, preparação de modelo discreto (converter a geometria em elementos discretos), aplicação de mecanismos de interação tais como contactos ou ligações de colagem, utilização de condições e forças-limite, parâmetros de simulação de configuração. A Figura 3.7, em cima à esquerda, mostra um modelo discreto preparado com condições de contorno e força ocultas, enquanto os outros exemplos da Figura 3.7 mostram resultados de cenários de casos estáticos, que assumem uma forte colisão contra outros veículos ferroviários. A Figura 3.7, superior direita e inferior esquerda, são parcelas de deformação, que ocorrerão sob cargas presumidas. Deve-se notar que a escala está em milímetros, e a escala de deformação é ampliada dez vezes para melhor visualização das direções de deformação. A figura 3.7, inferior direita, apresenta a tensão principal máxima (MPa) em partes que são sujeitas às cargas acima

mencionadas. Sem considerações e explicações mais amplas, que estão fora do âmbito deste livro, os resultados apresentados devem ser tratados como qualitativos e não quantitativos.

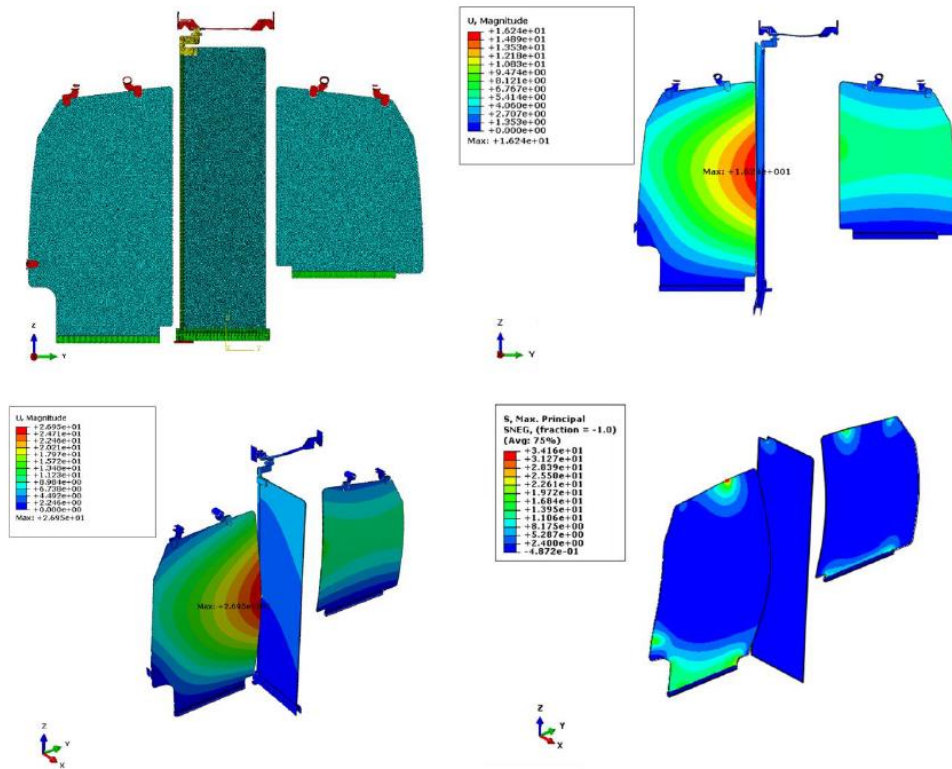


Figura 3.7 Superior esquerdo - Modelo discreto de paredes temporárias do comboio; superior direito - Vista frontal de deformação das paredes temporárias do comboio sob a direção do movimento em um cenário de carga de impacto [mm]; Inferior esquerdo - Vista isométrica da deformação das paredes temporárias do comboio sob a direção do movimento em um cenário de carga de impacto [mm]; Inferior direito – Vista isométrica das tensões principais nas paredes temporárias em movimento em um cenário de carga de impacto [MPa].

Uma propriedade interessante do material de cortiça em estruturas sanduíche é o excelente papel de suporte dos painéis exteriores que suportam a maioria das cargas. Em testes de flexão de 4 pontos no meio da amostra, está presente o estado de tensão de flexão pura. Os investigadores devem determinar a resistência global da estrutura e avaliar o mecanismo de dano numa determinada combinação de painel e material do núcleo relativamente às espessuras e película de aderência utilizada. Como mostrado na Figura 3.8, os resultados dos testes mostram boas propriedades da cortiça contra as cargas aplicadas. O primeiro painel de espuma (topo) sofreu danos locais devido a uma sobrecarga local do núcleo, que colapsou e permitiu uma deformação excessiva do painel exterior. Em contraste, o segundo painel de espuma sofreu forças de cisalhamento na zona de aderência entre a espuma e o painel exterior. No caso da cortiça, onde os resultados requerem uma consideração muito mais profunda, pode dizer-se que a cortiça tem boas propriedades de aderência com vários materiais de painéis exteriores e boas capacidades de suporte de painéis exteriores que evitam danos locais. Na maioria dos casos, toda a estrutura tem uma vasta gama de influência.

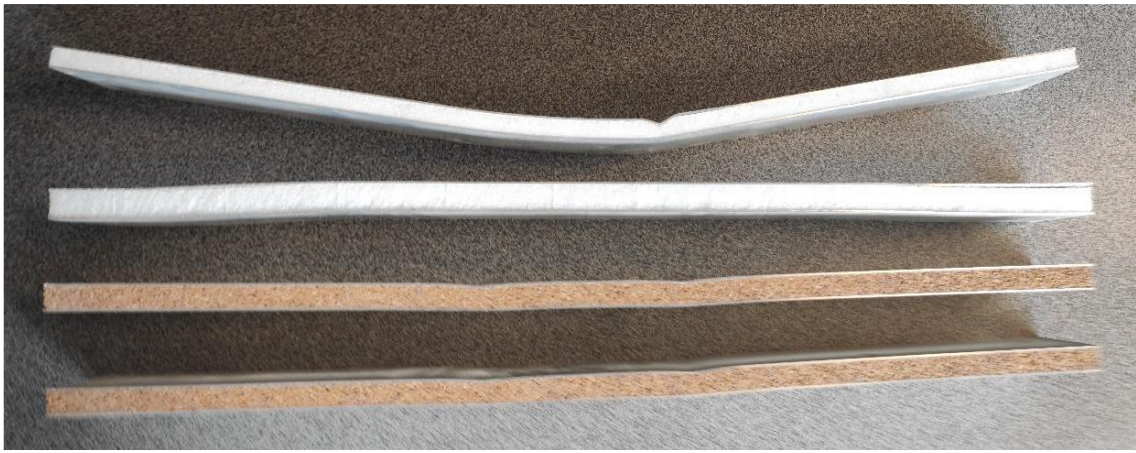


Figura 3.8 Análise pós-experiência do modo de dano e mecanismos de falha para painéis sanduíche com cortiça e materiais sintéticos como materiais de núcleo.

O exemplo dos painéis exteriores é um dos casos mais interessantes, económicos e estruturalmente justificados de utilização avançada de cortiça. A combinação de materiais de painéis exteriores de alta resistência e rigidez, tais como alumínio ou à base de compósitos de matriz epóxi/poliéster, compostos em pequeno volume com um grande volume de material de núcleo, que pode ser, por exemplo, cortiça, permite fabricar estruturas sanduíche de alta qualidade. Isto permite a conceção de estruturas inteligentes, leves e de alta resistência com uma baixa pegada de CO<sub>2</sub>, pronto a ser comercializado.

### **3.2.5 Automóvel**

A cortiça é utilizada para fazer vários vedantes, especialmente em automóveis, e para o acabamento interior de cabines de veículos. A sua flexibilidade, resistência ao calor e aos impactos, e textura de toque agradável são pontos fortes [5], [36]. A indústria dos transportes apresenta uma procura crescente por materiais com uma elevada relação resistência-peso [37]. Devido à sua baixa densidade, alta resistência, independência ao teor de humidade e mudanças de temperatura, a cortiça é utilizada como material principal em estruturas sanduíche. Nestas estruturas, o material do núcleo é aglomerado de cortiça, e os revestimentos finos multicamadas são feitos de materiais altamente rígidos, tais como aço, ligas de alumínio, polímeros, ou vários compósitos de fibra [3], [27], [38], [39]. A investigação sobre os compósitos de alumínio-cortiça produzidos em condições industriais (*Carbon Fox*) revelou potencial utilização para paredes e pavimentos na indústria ferroviária. A Figura 3.9 mostra um exemplo de um produto fabricado utilizando a tecnologia de produção de compósitos a partir de pré-impregnados na empresa acima mencionada.



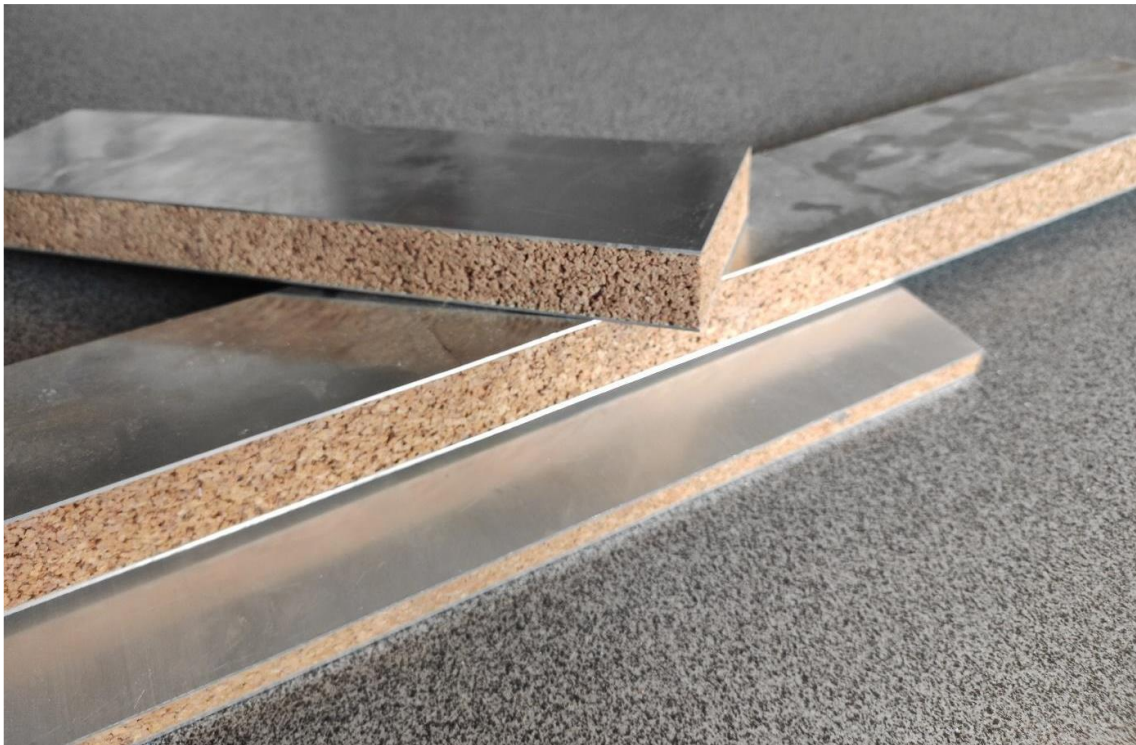


Figura 3.9 Vista detalhada do painel exterior de alumínio e cortiça no núcleo, com várias espessuras.

O elemento da carroçaria do carro, o painel de balanço de um carro de rali, é composto por fibras de carbono e aramida numa matriz de resina epóxi, com um núcleo de espaçador de cortiça (solução baseada no pedido de patente P-413342). O espaçador de cortiça foi utilizado para aumentar a rigidez do produto, mantendo ao mesmo tempo o peso necessário, a resistência ao impacto, a absorção de energia, a vida útil e a redução dos custos de produção. A utilização única da cortiça na indústria de veículos espaciais deve ser mencionada. A qualidade dos materiais isolantes desempenha um papel essencial nos motores de foguetes porque a estrutura dos seus componentes está sujeita a temperaturas elevadas, criando o risco de uma explosão de gás durante o lançamento e o regresso dos foguetes à Terra. Devido às suas propriedades, a cortiça é normalmente utilizada para obter bocais e escudos térmicos críticos para a segurança dos foguetões.

#### **3.2.5.1 Caso de estudo**

Este capítulo introduz ao leitor um estudo de caso, no qual os autores apresentam a abordagem para a utilização do compósito de cortiça no sector automóvel. A investigação visou melhorar a segurança dos utilizadores vulneráveis da via (*VRU – Vulnerable Road Users*) através do desenvolvimento e implementação de um sistema de proteção frontal (*FPS – Frontal Protection System*), que atenua as lesões durante um acidente com um veículo.

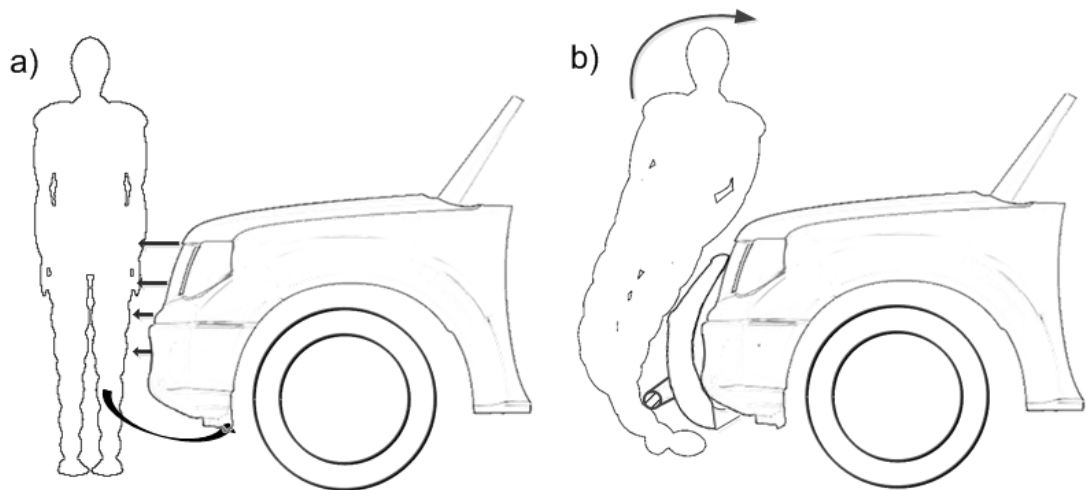


Figura 3.10 Diagrama esquemático da cinemática de um peão após colisão com um SUV: a) sem um sistema de proteção frontal seguro; b) com um sistema de proteção frontal seguro montado no veículo - com base na patente do autor [40].

Devido à tendência para a compra de SUVs na Europa e à sua participação mais frequente em acidentes envolvendo peões e ciclistas (os SUV são normalmente utilizados nas cidades), os autores identificaram a necessidade de um sistema de proteção frontal seguro (Figura 3.10) [41]-[43]. O *FPS* concebido fornece aos peões e ciclistas uma cinemática adequada, apoiada por testes numéricos, após colisão com um veículo, enquanto contribui para a redução de lesões através da utilização de materiais de absorção de energia apropriados, ou seja, materiais naturais (cortiça) e compósitos (fibra de carbono). Como parte da investigação, foram criados e testados modelos numéricos multivariados e um protótipo físico. Esta implementação da combinação da cortiça com fibras de carbono permitiu aos autores substituir o aço e as ligas de alumínio no *FPS*. É de salientar que o desenvolvimento do novo *FPS* não só aumentou a segurança dos utilizadores vulneráveis como melhorou o desenho do *front-end* do veículo (Figura 3.11).



Figura 3.11 O design proposto para o sistema de proteção frontal.

Como fase subsequente, foi realizada uma varredura minuciosa em 3D, utilizando um scanner Leica P20, do veículo com a correia frontal removida, a fim de reconhecer os elementos de montagem para o sistema de proteção frontal. As medições foram efetuadas a partir de duas posições de scanner e combinadas no software Leica Cyclon [44]. O registo - ou seja, o efeito do procedimento de fusão do

scanner - está representado na Figura 3.12 (com a intensidade de reflexão marcada). A qualidade da nuvem de pontos obtida no caso dos métodos óticos depende, entre outros, da refletividade da superfície do objeto. Os elementos estruturais digitalizados são relativamente negros, o que resulta em pontos em falta na nuvem de pontos que representam a geometria do corpo. A influência desta propriedade é especialmente visível quando se comparam janelas transparentes ou faróis com a estrutura frontal mais absorvente de luz.

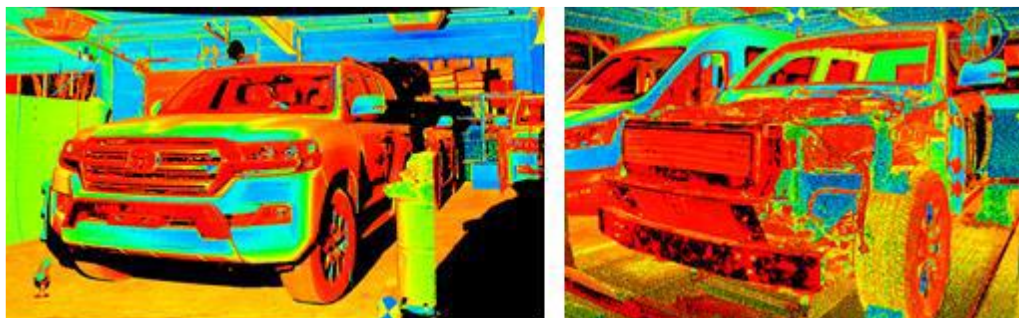


Figura 3.12 Nuvem de pontos do veículo Toyota Land Cruiser com a correia dianteira desmontado (com intensidade de sombra marcada).

O resultado final das medições é a nuvem de pontos combinada de todas as varreduras, que é a base para recriar a geometria frontal do veículo. A tolerância de varrimento obtida após a combinação da nuvem de pontos foi de aproximadamente 1 mm. Uma visão exemplar da nuvem de pontos obtida a partir do varrimento é mostrada na Figura 3.13. É a base de desenho para modelar o sistema de proteção frontal. Outros trabalhos de desenho foram realizados no software CATIA v5.



Figura 3.13 Nuvem de pontos do Toyota Land Cruiser com sistemas de proteção frontal (esquerda) e sistema de proteção frontal renderizado (direita).

Foram testados vários tipos de cortiça, ou seja, cortiça natural, aglomerado de cortiça com poliuretano, e cortiça impreganada com líquido não newtoniano [45]. Devido à minimização das lesões da cabeça durante os múltiplos impactos (especialmente nos motociclistas), foram também investigadas diferentes configurações da disposição dos diferentes tipos de cortiça ligados com cola (compósitos de cortiça). Finalmente, foi também desenvolvido um modelo de material (*FEM*), que será validado durante os testes experimentais. Em nome das propriedades de segurança do *FPS*, a utilização de material de cortiça para enchimento de *FPS* de absorção de energia foi a escolha mais razoável. No entanto, foram considerados

dois tipos de reforço (cobrindo o material de cortiça): fibras de carbono e de vidro. O carbono é composto por estruturas quase quimicamente semelhantes à grafite. Caracterizam-se por uma elevada resistência a altas temperaturas e por uma boa condutividade térmica e elétrica. Além disso, as vantagens das fibras de carbono incluem baixa densidade, alta resistência, e a capacidade de amortecer vibrações.

Além disso, o que é importante no contexto do mercado automóvel, a fibra de carbono tem uma aparência atrativa (Figura 3.14). A tecnologia de fibra de vidro S-2 / SC-15 também foi considerada [46]. As propriedades das fibras de vidro diferem das do material de vidro puro porque se caracterizam por uma elevada resistência à tração e flexibilidade, graças à qual não se quebram em ângulos de flexão elevados. No entanto, as propriedades dos compósitos com fibras de vidro são inferiores às dos materiais reforçados com fibras de carbono. Portanto, decidiu-se finalmente utilizar fibras de carbono no protótipo de *FPS*. As desvantagens dos polímeros reforçados com fibras de carbono (*CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymers*) incluem o elevado preço do material e um processo de produção mais complicado do que o reforço com fibras de vidro [47].

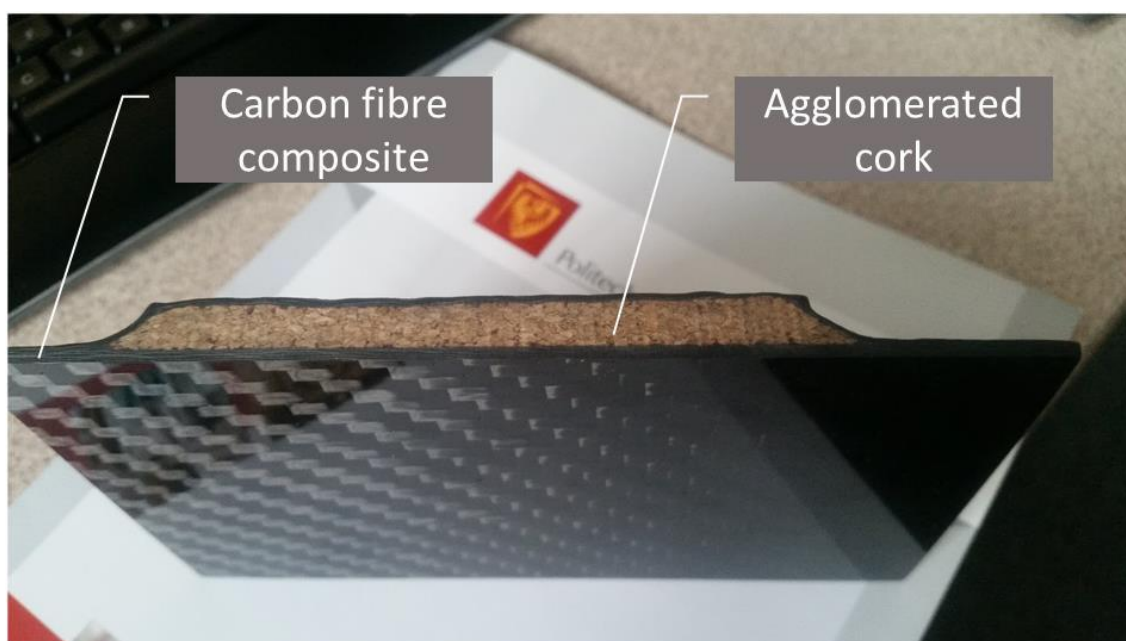


Figura 3.14 A seção transversal do sistema de proteção frontal feito de cortiça aglomerado como núcleo e um tecido de fibra de carbono.

A procura do mercado exige não só um produto com características de segurança adequadas, mas também um design atrativo. Assim, os autores escolheram a estrutura de tecelagem em sarja, que é o tipo de tecelagem mais comum para peças de fibra de carbono - por vezes referida como uma tecelagem 2 x 2 [48]. O padrão passa por duas urdiduras intercetantes para criar um tecido com um padrão diagonal (Figura 3.5).

Os ensaios de homologação exigidos para o *SPF*, ou seja, o Regulamento (CE) 78/2009 [49] baseado em pêndulos, não incluem a cinemática completa do impacto do veículo com um peão. Assim, a nossa abordagem envolveu uma análise cinemática do impacto de um peão por um veículo equipado com um sistema de proteção frontal composto. Utilizámos um boneco elipsoidal de peões da biblioteca

MADYMO v7.5. Numerosas instituições independentes confirmaram que este manequim é amplamente utilizado em testes de segurança para peões e a sua biofidelidade. Com base nos resultados dos testes [50], [51], o ponto de contacto entre a manequim e o solo foi definido como 0.55. Ao longo de toda a simulação, o manequim esteve no sujeito a uma aceleração da gravidade igual a  $9.81 \text{ m/s}^2$ . A velocidade inicial do veículo era de 40 km/h sem desaceleração de travagem aplicada.

As condições limite que definem o constrangimento da parte dianteira do veículo foram consideradas o pior caso computacional [52]. As ligações aparafusadas foram mapeadas utilizando elementos de feixe e conjuntos de nós que estão disponíveis em código LS-DYNA. Toda a configuração numérica está representada na Figura 3.15.



Figura 3.15 Modelo discreto da parte dianteira do veículo com o sistema de proteção frontal montado e modelo do *dummy* masculino de percentil 50th do MADYMO.

Analisando o curso da simulação apresentada abaixo, pode-se observar uma melhoria significativa dos parâmetros cinemáticos e biomecânicos do manequim em relação ao veículo não equipado com *FPS* (Figura 3.16). As maiores deformações no joelho foram significativamente reduzidas, o que é também confirmado pelos testes de critérios biomecânicos. A cabeça e a parte superior do corpo permanecem paradas durante um certo momento sob a força da inércia, mas a rotação dada permite projetar a cabeça sobre a capota do veículo. Podemos observar uma deflexão reduzida das vértebras cervicais do boneco, o que reduz a probabilidade de lesões graves [53]. O curso da cinemática do manequim torna possível utilizar outros sistemas que melhoram a segurança dos peões - incluindo uma máscara de elevação com um amortecimento adicional de gás, como um *airbag* para proteger a cabeça. A rotação dada ao peão também faz com que o peão não experimente a aceleração máxima de todo o corpo num curto espaço de tempo. Além disso, a aceleração da cabeça não excede o parâmetro padrão, entre outros HIC (valor crítico 1000 - na simulação  $<100$ ) [54], [55].

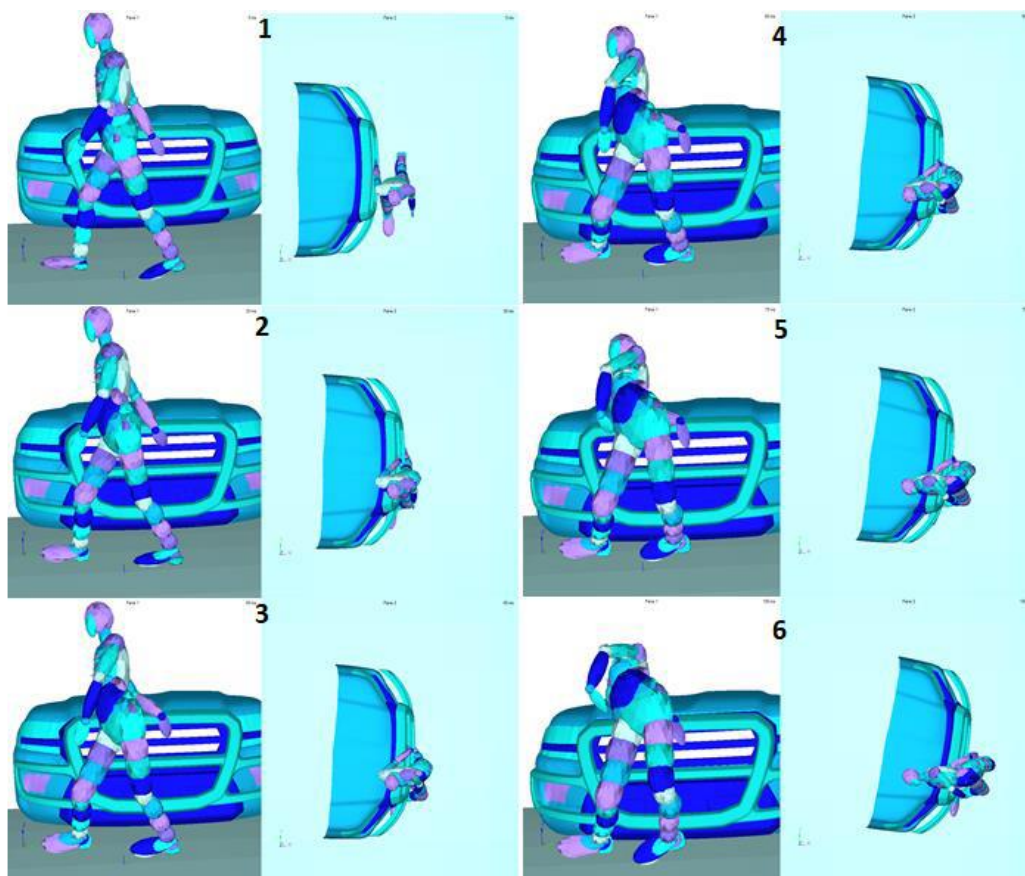


Figura 3.16 Simulação numérica LS-DYNA e MADYMO do impacto com peão a 40 km/h – *prints* de 0 - 100 ms em intervalos de 15 ms.

A avaliação da eficácia do *FPS* em assegurar a proteção dos peões incluiu uma validação cinemática positiva. Uma avaliação da trajetória pós-impacto do peão foi suficiente na fase de conceção do sistema de proteção frontal. A fase seguinte do trabalho envolveu o critério de otimização para que o *FPS* cumprisse os requisitos de homologação estabelecidos no Regulamento (CE) 78/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho Europeu para o ensaio do pêndulo que simula uma perna ao sistema de proteção frontal, tal como descrito em [56]. O desenho final do *FPS* montado num veículo Toyota Land Cruiser e Ford Transit é apresentado abaixo (Figura 3.17).

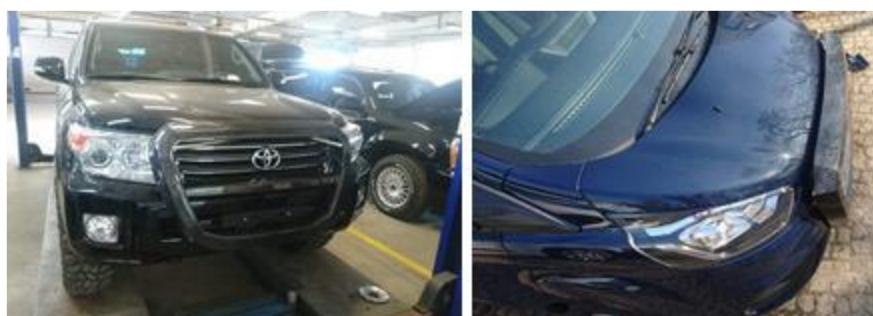


Figura 3.17 Sistema de proteção frontal feito de cortiça e CFRP montado no Toyota Land Cruiser (esquerda) e no Ford Transit (direita).

### **Observações**

O estudo visava melhorar a segurança de peões e ciclistas através do desenvolvimento e implementação de sistemas baseados em materiais naturais que absorvem energia. Neste caso de estudo, foi concebido e testado numericamente um *FPS* cortiça-fibra de carbono. O compósito de fibra de carbono é cada vez mais utilizado na indústria automóvel devido à sua baixa densidade e elevada resistência. Graças a isso, o *FPS* feito de fibra de carbono pode proteger eficazmente os elementos frontais do veículo. Além disso, as capacidades de absorção de energia do núcleo de cortiça podem reduzir as lesões sofridas por um peão durante um acidente. A combinação de material de cortiça e fibra de carbono é uma boa solução ao seleccionar o material para os elementos a proteger o automóvel e o peão. Assim, ficou provado que a combinação de cortiça e fibra de carbono é uma solução perfeita na escolha do material para os elementos de proteção tanto do automóvel como do peão - a cortiça assegura a absorção de energia mecânica, graças à qual as lesões sofridas pelos seres humanos são relativamente pequenas. Em contraste, a fibra de carbono, devido à sua resistência, protege a parte dianteira do veículo.

### ***3.2.6 Tecnologia de Absorção de Energia***

As tendências atuais na procura contínua de materiais ecológicos e rentáveis levaram a numerosos estudos de vários grupos de investigação [3], [57]-[65]. Atualmente, a maioria dos equipamentos de segurança pessoal utiliza revestimentos de absorção de energia que são feitos de materiais celulares sintéticos tais como poliestireno expandido (*EPS*) e polipropileno expandido (*EPP*) com a combinação de diferentes densidades dentro de diferentes blocos, absorvendo energia de impacto através de deformação permanente. Sob carga compressiva, os materiais celulares podem sofrer grandes deformações o seu baixo nível de tensão quase constante até à densificação [66]. No trabalho de Fernandes et al. [67], é utilizado como referência um capacete de motocicleta comercialmente disponível, baseado em *EPS* certificado pela norma europeia R22.05 [68] (Figura 3.18). A ideia era comparar os resultados da validação do capacete com o *EPS* com a cortiça aglomerada. Os testes foram conduzidos com aglomerados de cortiça AC199, AC216 e EC159 (AC - aglomerado de cortiça, EC - cortiça expandida).

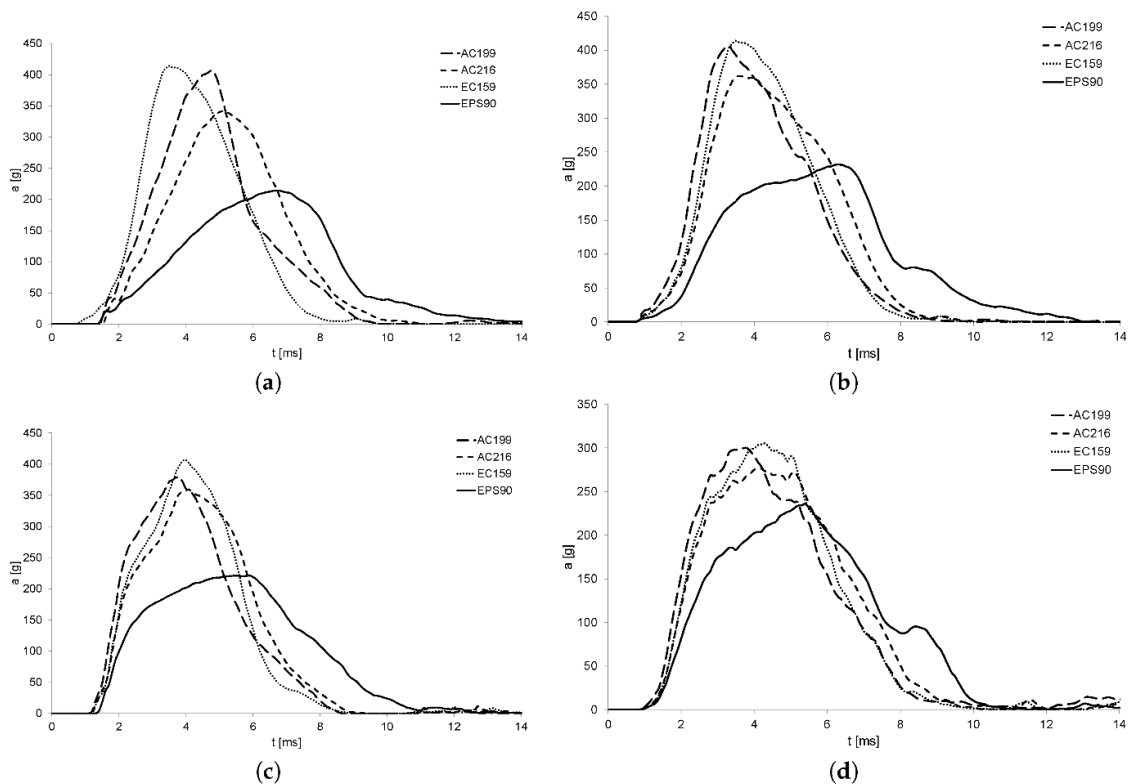


Figura 3.18 Aceleração medida no COG da cabeça - ECE 22.05 condições de ensaio: (a) ponto de impacto B. (b) ponto de impacto P. (c) ponto de impacto R. (d) ponto impacto X (adaptado de [67]).

Nota-se que o aglomerado de cortiça AC216 se destacou das outras configurações propostas. Para as curvas investigadas de aceleração-tempo, a característica da curva é mais ampla e tem picos de aceleração mais baixos. Além disso, o AC216 foi o melhor material relativamente à resposta a um segundo impacto, ainda melhor do que o EPS90. Além disso, o AC216 tem uma maior capacidade para resistir à energia de impacto. Assim, acredita-se que o capacete utilizado nesta análise absorve a energia a uma espessura superior à necessária para o AC216. O passo seguinte da investigação foi modificar a geometria do forro. De acordo com os autores, o melhor caso era um forro AC216 de 40 mm de espessura com furos de 15 mm num padrão circular caracterizado por um ângulo de 30°, e um espaçamento de 45 mm. Isto ajudou a reduzir 0.907 kg da estrutura. A pesquisa foi resumida colaborando com a CMS, uma empresa portuguesa de capacetes. O produto foi enriquecido com um revestimento de cortiça responsável pela absorção de energia (Figura 3.19).

### 3.3 Conclusões

A cortiça é uma notável matéria-prima natural com uma combinação única de propriedades sinérgicas de reforço. É adequada para várias aplicações, desde rolhas típicas de garrafas a sofisticados escudos de isolamento térmico para motores e tanques de foguetes. O objetivo do capítulo era apresentar de forma tecnicamente credível como as várias propriedades do material de cortiça criam e impulsionam o sector da produção de cortiça. No módulo, foi apresentado o conhecimento sobre a combinação característica



das propriedades da cortiça, o que levou a determinadas aplicações do material de cortiça. Começando pela caracterização do material de cortiça em relação a outros materiais e sublinhando as suas vantagens/desvantagens, o leitor deve ter conhecimentos sobre a correta aplicação do material de cortiça de acordo com as exigências do mundo real e particularmente um caso de estudo - um sistema original de proteção frontal baseado em cortiça para um SUV. A capacidade de absorção de energia do núcleo de cortiça pode reduzir as lesões sofridas por um peão durante um acidente. Neste módulo, introduzimos o leitor a um conjunto de propriedades que tornam a cortiça um material único e excepcional. Além disso, o caminho foi transformado numa explicação baseada em exemplos de porque é que a cortiça é a escolha certa no processo de seleção do material para a aplicação apresentada.

O conhecimento em engenharia moderna de materiais permite a expansão contínua da área de aplicação da cortiça e dos seus compósitos, e a investigação sobre aplicações inovadoras da cortiça é também continuada. A cortiça é um material precioso da natureza que deve ser tratado com respeito e utilizado o mais amplamente possível, de forma sustentável, e ecológica.

## Referências

- [1] Urbaniak, M., Gołuch-Goreczna, R., Bledzki, A.K., Gajdzinski, S.. Natural cork. Part I. Cork oak tree culture, macro-and micromorphology of cork. *Polimery*, 62(05):388-393.
- [2]Pereira, H. (2007). *Cork: Biology, Production and Uses*.
- [3]Urbaniak, M., Goluch-Goreczna, R., Bledzki, A.K., Gajdzinski, S. (2017). Natural cork. Part II. Properties and applications. *Polimery*, 62(06):472-480.
- [4]Silva, S.P., Sabino, M.A., Fernandes, E.M., Correlo, V.M., Boesel, L.F., Reis, R.L. (2005). Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, 50(6):345–365.
- [5]Sanchez-Saez, S., García-Castillo, S.K., Barbero, E., Cirne, J. (2015). Dynamic crushing behaviour of agglomerated cork. *Materials & Design (1980-2015)*, 65:743–748.
- [6] Mano, J.F. (2002). The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, 37(2):257–263.
- [7]Vaz, M. F., Fortes, M. A. (1998). Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, 33: 2087-2093.
- [8]Gil, L. (2015). New Cork-Based Materials and Applications. *Materials*, 8(2):625–637.
- [9] Biggs, A.R. (1988). Association of Suberin Formation in Uninoculated Wounds with Susceptibility to *Leucostoma cincta* and *L. personii* in Various Peach Cultivars. *Phytopathology*, 78(8):1070-1074.
- [10]Kolattukudy, P.E. (1984). Biochemistry and function of cutin and suberin. *Canadian Journal of Botany*, 62(12):2918–2933.

- [11] Thomas, R., Fang, X., Ranathunge, K., Anderson, T.R., Peterson, C.A., Bernards, M.A. (2007). Soybean Root Suberin: Anatomical Distribution, Chemical Composition, and Relationship to Partial Resistance to *Phytophthora sojae*. *Plant Physiol*, 144(1):299–311.
- [12] Schreiber, L., Werner Breiner, H., Riederer, M., Düggelin, M., Guggenheim, R. (1994). The Casparian Strip of *Clivia miniata* Reg. Roots: Isolation, Fine Structure and Chemical Nature\*. *Botanica Acta*, 107(5):353–361.
- [13] Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc*, 61(1):2–30.
- [14] Abenojar, J., Torregrosa-Coque, R., Martínez, M.A., Martín-Martínez, J.M. (2009). Surface modifications of polycarbonate (PC) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer by treatment with atmospheric plasma. *Surf Coat Technol*, 203(16):2173–2180.
- [15] Encinas, N., Díaz-Benito, B., Abenojar, J., Martínez, M.A. (2010). Extreme durability of wettability changes on polyolefin surfaces by atmospheric pressure plasma torch. *Surf Coat Technol*, 205(2):396–402.
- [16] van Ooij et al., W.J. (2005). Corrosion protection properties of organofunctional silanes — An overview. *Tsinghua Sci Technol*, 10(6):639–664.
- [17] Rosa M.E., Pereira, H. (1994). The Effect of Long Term Treatment at 100°C–150°C on Structure, Chemical Composition and Compression Behaviour of Cork. *hfsg*, 48(3):226–232.
- [18] Gibson, L.J., Easterling, K.E., Ashby, M.F.A. (1981). STRUCTURE AND MECHANICS OF CORK. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, 377(1769).
- [19] Fortes, M.A., Teresa Nogueira, M. (1989). The poison effect in cork. *Materials Science and Engineering: A*, 122(2):227–232.
- [20] Gil, L. (2014). Cork: a strategic material. *Front Chem*, 2.
- [21] Fiskars Garden Shears. Available: <http://lumberjac.com/2012/10/fiskars-quantum-garden-shears/>
- [22] Vitra Cork Stool (2014) . Available: <https://www.vitra.com/en-us/about-vitra/sustainability/materials/cork>
- [23] Cork Chop Grips. Available: <https://ridepdw.com/collections/grips-and-bells/products/cork-chop-grips?variant=24672749313>
- [24] Icork case. Available: [http://www.pomm.pt/\\_icorkcase#](http://www.pomm.pt/_icorkcase#)
- [25] Sargianis, J., Kim, H., Suhr, J. (2012). Natural Cork Agglomerate Employed as an Environmentally Friendly Solution for Quiet Sandwich Composites. *Sci Rep*, 2(1):403

- [26]Pereira, H., Ferreira, E. (1989). Scanning electron microscopy observations of insulation cork agglomerates. *Materials Science and Engineering: A*, 111:217–225.
- [27]Baptista A.P.M., do Carmo Vaz, M. (1993). Comparative wear testing of flooring materials. *Wear*, 162–164:990–995.
- [28]Pereira, H. (1992). The thermochemical degradation of cork. *Wood Sci Technol*, 26(4):259-269.
- [29]Rosa M.E., Fortes, M.A. (1988). Temperature-induced alterations of the structure and mechanical properties of cork. *Materials Science and Engineering*, 100:69–78.
- [30]Kłusak M., Grygny, S. (2017). The Application of Composite With Cork Core For Cabs and Superstructures of Firefighting Vehicles. *Modelowanie Inżynierskie*, G3:9.
- [31]ECE-R 118 Regulations.
- [32]PN-EN ISO 2818-Tworzywa sztuczne Przygotowanie próbek do badań metodą obróbki mechanicznej.
- [33]PN-EN ISO 20753-Tworzywa sztuczne Kształtki do badań.
- [34]PN-EN ISO 527-4-Tworzywa sztuczne Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami.
- [35]PN-EN ISO 14125- Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem oznaczanie właściwości przy zginaniu.
- [36]Frag, M.M. (2008). Quantitative methods of materials substitution: Application to automotive components. *Mater Des*, 29(2):374–380.
- [37]Zenkert, D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction*. Sheffield: EMAS Publishing.
- [38]Castro, O., Silva, J.M., Devezas, T., Silva, A., Gil, L. (2010). Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Mater Des*, 31(1):425–432.
- [39]Santos Silva, J., Dias Rodrigues, J., Moreira, R.A.S., Application of Cork Compounds in Sandwich Structures for Vibration Damping. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 12(4):495–515.
- [40]Ptak, M., Rusiński, E., Karliński, J. (2012). Frontal Protection System for pedestrian safety. Patent 399762 PL, Wrocław, Poland.
- [41]Ptak, M., Fernandes, F.A.O., Dymek, M., Welter, C., Brodziński, K., Chybowski, L. (2022). Analysis of electric scooter user kinematics after a crash against SUV. *PLoS One*, 17(1):e0262682.
- [42]Wilhelm J., Ptak, M. (2018). Influences of SUV front-ends on accidents with two-person bicycles. *Interdyscyplinarność badań naukowych [Dokument elektroniczny] : praca zbiorowa / pod red.*

Jarosława Szreka. Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1:128–133. Available: [http://ko-oper.pwr.wroc.pl/files/Interdyscyplarnosc\\_badan\\_naukowych\\_2018\\_JS.pdf](http://ko-oper.pwr.wroc.pl/files/Interdyscyplarnosc_badan_naukowych_2018_JS.pdf)

[43] Ptak, M., Rusiński, E., Karliński, J., Dragan, S. (2012). Evaluation of kinematics of SUV to pedestrian impact—Lower leg impactor and dummy approach. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(1):68–73.

[44] James, D.W., Belblidia, F., Eckermann, J.E., Sienz, J. (2017). An innovative photogrammetry color segmentation based technique as an alternative approach to 3D scanning for reverse engineering design. *Comput Aided Des Appl*, 14(1):1–16.

[45] Gürgen, S., Fernandes, F.A.O., de Sousa, R.J.A., Kuşhan, M.C. (2021). Development of Eco-friendly Shock-absorbing Cork Composites Enhanced by a Non-Newtonian Fluid. *Applied Composite Materials*. 1–15.

[46] Ptak, M., Blicharski, P., Rusiński, E., Karliński, J. (2017). Numerical Simulations of Composite Frontal Protection System According to EC 78/2009. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Part F10:423–429

[47] Iluk, A., Rusiński, E., Ptak, M. (2012). Wstępna analiza przebiecia ceramiczno-kompozytowych osłon balistycznych. *Systems : journal of transdisciplinary systems science*, 16(1):219–226, 2012, Available: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPW8-0024-0033>

[48] Liu, Q., Ma, J., He, Z., Hu, Z., Hui, D. (2017). Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes. *Compos B Eng*, 121:134–144

[49] European Parliament and Council, Regulation (EC) no 78/2009 (2009) of The European Parliament and of the Council.

[50] Stevenson, T. (2006). Simulation of Vehicle-Pedestrian Interaction. Doctoral thesis, University of Canterbury.

[51] Fricke, L.B. (1990). Traffic Accident Reconstruction. *Traffic Accident Investigation*, (2).

[52] Ptak M., Karliński, J. (2012). Pedestrian passive safety during the SUV impact: regulations vs. reality. IRCOBI Conference Dublin, Ireland. 103–113.

[53] Ptak, M. (2019). Pedestrian safety: a new method to assess pedestrian kinematics. *Transport*, 34(1):41–51.

[54] Chybowski, L., Przetakiewicz, W. (2020). Estimation of the Probability of Head Injury at a Given Abbreviated Injury Scale Level by Means of a Function of Head Injury Criterion. *System Safety: Human-Technical Facility - Environment*, 2(1):91–99.

- [55]Jamroziak et al., K. (2019). Ballistic Head Protection in the Light of Injury Criteria in the Case of the Wz.93 Combat Helmet. *Applied Sciences*, 9(13):2702.
- [56]Ptak, M. (2019). Method to Assess and Enhance Vulnerable Road User Safety during Impact Loading. *Applied Sciences*, 9(5):1000.
- [57]Blanco, D.H., Cernicchi, A., Galvanetto, U. (2014). Design of an innovative optimized motorcycle helmet. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P Journal of Sports Engineering and Technology*, 228(2):95-110.
- [58]Caserta, G.D., Iannucci, L., Galvanetto, U. (2011). Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner. *Compos Struct*, 93(11).
- [59]Coelho, R.M., Alves de Sousa, R.J., Fernandes, F.A.O., Teixeira-Dias, F. (2013). New composite liners for energy absorption purposes. *Mater Des*, 43:384–392.
- [60]Fernandes, F.A.O., Jardim, R.T., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2015). Comparing the mechanical performance of synthetic and natural cellular materials. *Mater Des*, 82:335-341.
- [61]Fernandes, F.A.O., Tavares, J.P., Alves de Sousa, R.J., Pereira, A.B., Esteves, J.L. (2017). Manufacturing and testing composites based on natural materials. *Procedia Manufacturing*, 13:227-234.
- [62]Ptak, M., Kaczynski, P., Fernandes, F.A.O., de Sousa, R.J.A. (2017). Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material. *International Journal of Impact Engineering*, 106.
- [63]Ptak et al., M. (2019). Graphene-enriched agglomerated cork material and its behaviour under quasi-static and dynamic loading. *Materials*, 12(1).
- [64]Santos, P.T., Pinto, S., Marques, P.A.A.P., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2017). Agglomerated cork: A way to tailor its mechanical properties. *Compos Struct*, 178.
- [65]Shuaeib, F.M., Hamouda, A.M.S., Wong, S.V., Umar, R.S.R., Ahmed, M.M.H.M. (2007). A new motorcycle helmet liner material: The finite element simulation and design of experiment optimization. *Mater Des*, 28(1):182–195.
- [66]Gibson, L.J., Ashby, M.F. (1989). *Cellular Solids: Structure & Properties*. *Advances in Polymer Technology*, 9(2).
- [67]Fernandes, F.A.O., de Sousa, R.J.A., Ptak, M., Migueis, G. (2019). Helmet design based on the optimization of biocomposite energy-absorbing liners under multi-impact loading. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(4).

[68]ECE Regulations 22.05 (2002). Uniform Provision Concerning the Approval of Protective Helmets and Their Visors for Driver and Passengers of Motor Cycles and Mopeds. United Nations. Available: [www.unece.org](http://www.unece.org)

[69]Cork motorcycle helmet (2015). Available: <http://lumberjac.com/2015/02/nexx-x60-cork-motorcycle-helmet/>

## CAPÍTULO 4

### Fabrico e aplicação de compósitos à base de cortiça na aviação

Bronius Merkys<sup>1</sup>, Justas Nugaras<sup>2</sup>, Mykola Karpenko<sup>3</sup>, Andrius Dubovas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Antanas Gustaitis' Aviation Institute, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

<sup>2</sup>Faculty of Creative Industries, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

<sup>3</sup>Faculty of Transport Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

\*Correspondence: justas.nugaras@vilniustech.lt

#### Resumo

É vital examinar as propriedades positivas e negativas mais significativas dos compósitos à base de cortiça para determinar a utilização de compósitos naturais à base de cortiça na aviação e a sua implementação racional nos elementos estruturais. Esta investigação fornece uma abordagem mais ampla aos processos de fabrico de materiais de cortiça e às áreas de aplicação de compósitos de estrutura em sanduíche à base de cortiça na aeronáutica. As aplicações de compósitos de cortiça para juntas e outros materiais de vedação são apresentadas neste capítulo. Para compreender melhor as características do material, foram efetuadas duas abordagens principais de ensaio: vibração e flexão. Os resultados dos ensaios de vibração efetuados sugerem a possibilidade de substituir a espuma de polimetacrilimida por um material renovável à base de cortiça em estruturas compósitas laminadas. O ensaio foi efetuado recorrendo à análise modal, comparando assim as características de amortecimento de vibrações do material. Como se pode verificar pelos resultados obtidos no ensaio de flexão, o material com a taxa de resistência mais elevada era composto pelos maiores grânulos de cortiça. A força de resistência foi 3x superior à do material compósito com núcleo de espuma de polimetacrilimida. A integração de materiais renováveis como a cortiça nos em estruturas sanduíche permite implementar e procurar o nível mais elevado de sustentabilidade na indústria da aviação.

**Keywords:** cortiça, compósitos sanduíche, materiais de vedação, ensaios de vibração e flexão.

#### 4.1 Uma visão geral dos compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça

##### 4.1.1 A definição e os tipos de compósitos estruturados em sanduíche

Os compósitos estruturados em sanduíche, fabricados a partir de várias camadas de diferentes materiais ligados, são amplamente utilizados na aeronáutica, onde são necessárias estruturas leves e rígidas [1]. Os compósitos estruturados em sanduíche, nos quais duas folhas de face estão ligadas ao núcleo, são mais vulgarmente utilizados na aeronáutica [2] (Fig. 4.1).

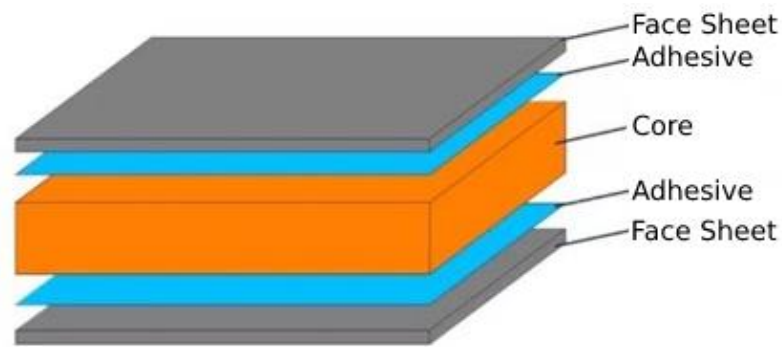


Figura 4.1 Compósito com estrutura em sanduíche [3].

Esta estrutura permite obter características como elevada rigidez e em simultâneo uma massa reduzida. Os compósitos com estrutura em sanduíche podem ser fabricados a partir de múltiplas camadas, com duas ou mais camadas de núcleo entre as quais são colocadas as folhas de revestimento [4]. Por exemplo, os painéis sanduíche multicamadas utilizados na construção são constituídos por duas camadas de revestimento (Fig. 4.2). Estas camadas são separadas por uma camada dupla de núcleo separada por uma camada adicional.



Figura 4.2 Um painel de construção com várias camadas fabricado a partir de três folhas-de-flandres metálicas [5]. Duas camadas de núcleo são ensanduichadas entre camadas de folha-de-flandres.

Estas estruturas multicamadas com um núcleo à base de cortiça e materiais compósitos, madeira ou camadas metálicas podem ser utilizadas como painéis decorativos com propriedades ecológicas e de bom isolamento acústico. Embora uma estrutura multicamadas seja, até certo ponto, diferente de uma estrutura em sanduíche, as suas propriedades de fabrico e aplicação são idênticas. Por conseguinte, se necessário, o documento centrar-se-á apenas nos compósitos com estrutura em sanduíche, assinalando as diferenças tecnológicas ou estruturais das estruturas multicamadas.



#### ***4.1.2 Propriedades, vantagens e desvantagens dos compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça mais importantes para a aeronáutica***

Para definir os compósitos naturais à base de cortiça utilizados na aeronáutica e os elementos estruturais mais racionalmente utilizados, é indispensável analisar as propriedades positivas/negativas mais significativas destes compósitos. As vantagens dos compósitos naturais à base de cortiça:

- A. A vantagem mais atraente deste compósito é o facto de ser amigo do ambiente e facilmente reciclável [6]. Trata-se de uma enorme qualidade, especialmente nos dias de hoje, em que se dá mais atenção aos materiais que podem ser utilizados sem poluir o ambiente, ou melhor ainda, que podem ser reciclados ou reutilizados. Trata-se de uma característica importante para a aeronáutica, uma vez que a maior parte dos materiais compósitos atualmente utilizados neste domínio são difíceis de eliminar ou de reciclar.
- B. Devido à sua grande suavidade e elasticidade, os compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça têm boas propriedades de atenuação do ruído e das vibrações [7].
- C. Não obstante a natureza orgânica dos materiais de estruturas em sanduíche à base de cortiça, um elevado nível de resistência ao fogo é outra propriedade digna de menção [8]. Assim, são adequados para o acabamento interior de cockpits/cabinas de aviões e planadores.
- D. Os compósitos à base de cortiça têm propriedades estéticas - são agradáveis ao tacto. Esta propriedade é tida em conta quando se aplicam como acabamentos interiores [9]. Além disso, estes materiais podem ser decorados com vários padrões através de tecnologias modernas (por exemplo, gravação a laser).



Figura 4.3 Painéis de cortiça decorados a laser [10].

Ao aplicar a técnica de corte a laser, os painéis compostos à base de cortiça podem ser cortados com os padrões. Esses elementos cortados podem ser utilizados para a decoração do cockpit/cabina do avião (Figs. 4.3 e 4.4).

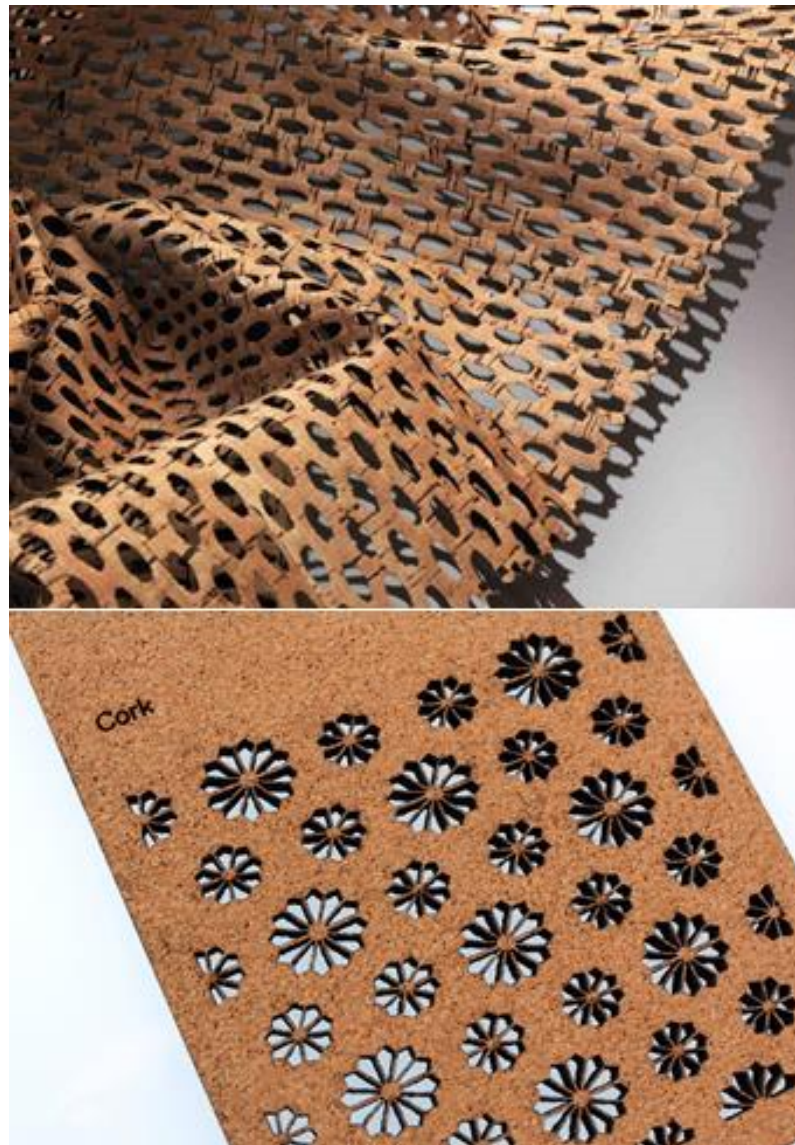


Figura 4.4 Um corte a laser através de painéis compostos à base de cortiça [11], [12].

- E. Estes compostos são resistentes à humidade e não absorvem água.
- F. Os compostos à base de cortiça têm boas propriedades de isolamento térmico [13].
- G. Os compostos à base de cortiça são bem tratados por métodos de maquinaria convencionais no processo de fabrico de maquinaria geral (Figura 4.5).



Figura 4.5 Fresagem de cortiça com uma fresa de topo [14].

Desvantagens dos materiais compósitos à base de cortiça:

- A. Tal como a maioria dos outros materiais naturais, os compósitos à base de cortiça têm propriedades mecânicas sensíveis. Estas dependem do tipo de sobreiro, das condições de crescimento, do clima e até do local onde a casca foi extraída. A parte exterior da casca do sobreiro é frágil e lenhosa e caracteriza-se por uma elevada densidade. A densidade da casca diminui à medida que se aproxima do tronco e ganha elasticidade. Por conseguinte, a densidade da casca varia entre  $60 \text{ kg/m}^3$  e  $250 \text{ kg/m}^3$  - a elasticidade e a dureza da casca alteram-se em conformidade [15].

É um obstáculo formidável para a aplicação destes materiais em estruturas aeronáuticas, uma vez que a estabilidade da resistência mecânica é uma condição essencial para assegurar a resistência estática, a resistência à fadiga e propriedades tecnológicas estáveis. Este obstáculo pode ser ultrapassado triturando a cortiça em grânulos minúsculos e misturando-os.

- B. A natureza orgânica dos materiais compósitos à base de cortiça determina a sua baixa resistência ao bolor e a outros danos causados por fungos [16]. Existe o risco de poderem ser um meio de alimentação e reprodução de insectos.
- C. Na aeronáutica são utilizados muitos tipos de solventes, produtos de limpeza e outros produtos químicos. O seu efeito nos materiais compósitos à base de cortiça ainda não foi suficientemente analisado.

#### 4.1.3 As áreas de aplicação dos compósitos sanduíche à base de cortiça na aeronáutica

De acordo com as vantagens e desvantagens definidas para os materiais compósitos à base de cortiça natural, é possível estimar quais os elementos estruturais da aeronave que podem ser fabricados utilizando compósitos com estrutura em sanduíche ou multicamadas.

Pequenas cargas aerodinâmicas e cargas inerciais maciças afetam as pontas das asas, carenagens e poços das rodas do trem de aterragem de ultraleves e planadores ligeiros [17]. Estes elementos estruturais não têm um efeito decisivo na resistência ou nas características de fadiga cíclica destas aeronaves. São normalmente constituídos por várias camadas ou por uma estrutura em sanduíche.



Figura 4.6 A parte da asa do planador com quatro tipos de *winglets* [18].

Ao projetar tais elementos estruturais, é suficiente analisar se os núcleos de favo de mel ou de espuma podem ser substituídos por materiais à base de cortiça. Provavelmente, a aplicação destes materiais não terá um efeito adverso na massa da estrutura. No entanto, reduzirá consideravelmente a poluição quando estes elementos estruturais deixarem de ser adequados para utilização e se destinarem a ser eliminados. Por exemplo, as pontas das asas de planadores facilmente removíveis e substituíveis (*winglets*) danificam frequentemente os planadores quando aterram em áreas exteriores. Além disso, o mercado oferece vários *winglets* adaptados especificamente para várias condições de voo [19]. Assim, os planadores utilizam vários tipos de *winglets* (Fig. 4.6) ou são obrigados a substituí-los em caso de infração. Estes elementos são complexos de utilizar de forma ecológica. A aplicação de materiais à base de cortiça constituiria uma solução parcial para este problema.



Figura 4.7: Um planador a motor [20]. Na parte superior da fuselagem pode ver-se um compartimento aberto para o motor, enquanto na parte inferior da fuselagem se pode observar um poço para as rodas do trem de aterragem. Estes elementos estruturais podem ser fabricados com compósitos sanduíche à base de cortiça.

O núcleo à base de cortiça é um bom material para o fabrico de aeromodelos ou de pequenos UAV. Estes são afetados por cargas ligeiras e as boas propriedades de elasticidade podem evitar os danos típicos destas aeronaves quando aterram.

Seria suficiente fabricar poços de roda do chassis com estrutura em sanduíche ou portas do compartimento do motor recolhidas a partir de duas camadas de folhas de liga de alumínio, preenchendo o espaço entre elas com material à base de cortiça (Figura 4.7). Deste modo, é possível obter uma estrutura leve e resistente e todos os componentes (chapas de alumínio e materiais à base de cortiça) podem ser reciclados.

As anteparas são normalmente instaladas no interior das fuselagens dos aviões de classe executiva, separando a cabina de passageiros do cockpit e assegurando a separação de espaços isolados. Estas anteparas são normalmente decoradas com madeira (Figura 4.8).



Figura 4.8 A fuselagem de um avião de classe executiva [21]. Pode ver-se uma antepara decorada com madeira na parte de trás do avião. No lado direito, está instalada uma mesa dobrável entre as cadeiras.

Estas anteparas devem ser leves, resistentes ao fogo e ter propriedades de redução do ruído e de isolamento térmico. É suficiente fabricar estas anteparas utilizando painéis de madeira em sanduíche, em que o núcleo interior é fabricado com material à base de cortiça (Fig. 4.9).



Figura 4.9. Um painel estruturado em sanduíche é preenchido com material de cortiça e as camadas de madeira são coladas em ambos os lados exteriores [22].

O exterior das anteparas pode ser revestido com chapas de metal ou de plástico. A camada de madeira pode ser aplicada apenas num dos lados. Assim, a anteparas pode ser rapidamente adaptada à conceção do interior da cabina e aos requisitos específicos dos compartimentos separados da aeronave. Por exemplo, se houver um compartimento logo atrás da cabina de passageiros, um dos lados da anteparas pode ser feito de madeira, enquanto o outro pode ser revestido de chapas metálicas ou de plástico específico (figura 4.10). O lado de madeira da anteparas acrescenta luxo, enquanto o lado de metal virado para a cozinha é fácil de limpar e é resistente a danos mecânicos.

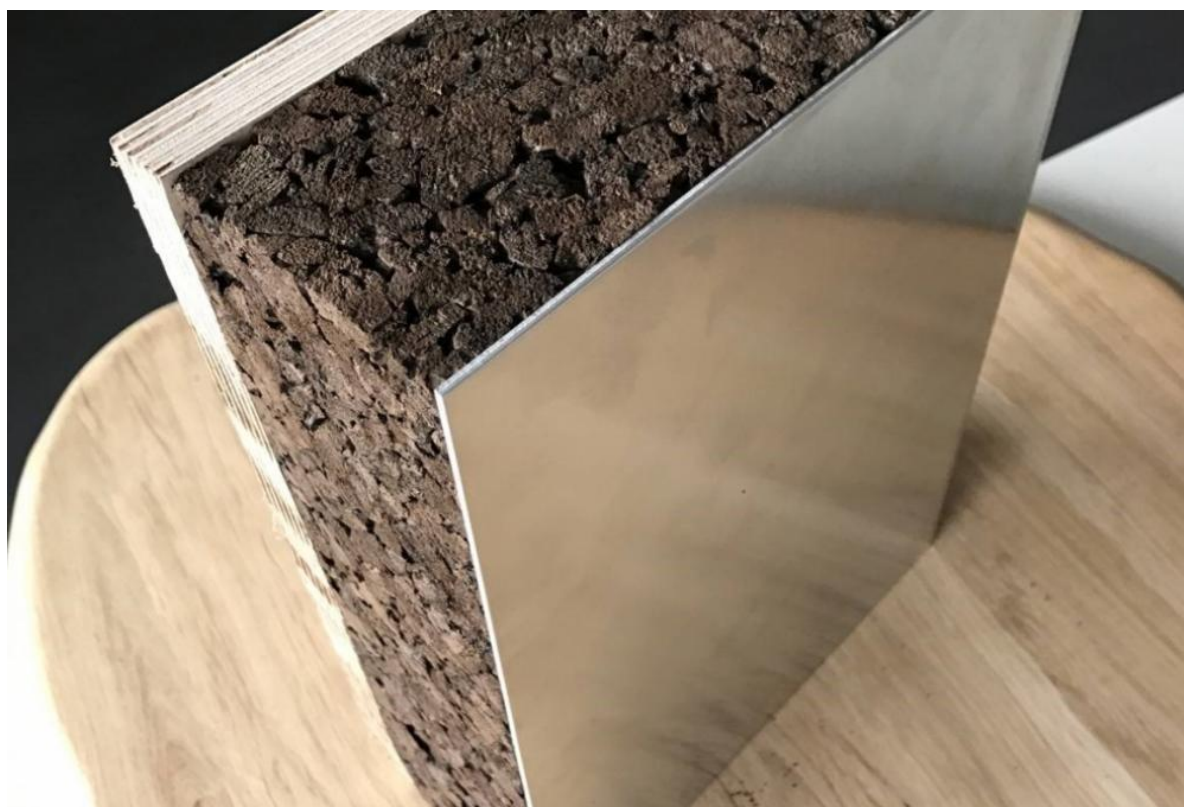


Figura 4.10 Um painel sanduíche [23]. Um dos lados é coberto com contraplacado e o outro com uma chapa metálica. O núcleo interior é produzido a partir de material de cortiça granulada.

Estas anteparas asseguram um bom isolamento acústico e caracterizam-se por uma massa reduzida. É suficiente utilizar estas chapas para fabricar mobiliário para aviões de classe executiva. (Por exemplo, a superfície da mesa é mostrada na Fig. 4.8). Para dar uma impressão de luxo, são produzidas em massa. A utilização de painéis estruturados em sanduíche à base de cortiça permite o fabrico de mobiliário de aspecto maciço e de massa reduzida.

As superfícies das anteparas e dos móveis podem ser revestidas com camadas de material à base de cortiça especificamente decoradas. Uma vez que os materiais à base de cortiça são fáceis de tratar através da aplicação de vários métodos, é possível obter superfícies que dão brilho ao interior.



Figura 4.11 Superfície da porta do roupeiro coberta com material à base de cortiça com padrões [24].

A Fig. 4.11 mostra uma porta de roupeiro decorada com uma camada à base de cortiça com padrões geométricos. As formas contemporâneas de tratamento de materiais oferecem uma vasta gama de opções de decoração de superfícies. Podem ser utilizadas nos interiores de aviões de classe executiva.

Com o objetivo de melhorar as propriedades de isolamento acústico, é suficiente aplicar núcleos multicamadas à base de cortiça, cujas camadas podem ser fabricadas a partir de vários materiais densos à base de cortiça [25]. Essas folhas suprimem eficazmente o som numa vasta gama de frequências. A redução do ruído na cabina da aeronave de classe executiva pode ser conseguida através da cobertura das superfícies decorativas da cabina com painéis de material à base de cortiça. Estes painéis podem ser suficientemente finos e constituídos por várias camadas de materiais à base de cortiça de diferentes densidades. Assim, a massa dos painéis decorativos aumentaria; no entanto, o ruído gerado pelo ar que entra na aeronave e pelo sistema de ventilação da cabina seria reduzido.

Os materiais à base de cortiça, macios, agradáveis ao toque e "quentes", são adequados para o fabrico das alavancas manuais do painel de controlo da aeronave (Figura 4.12).



Figura 4.12 Alavancas de mão fabricadas a partir de material à base de cortiça

A - Uma alavanca de mão fabricada a partir de granulado de cortiça [26]

B - Uma alavanca de mão feita de cortiça inteiriça.



Estas alavancas manuais são utilizadas há muito tempo nos aviões ligeiros. Podem ser fabricadas a partir de grânulos de cortiça prensados a quente (Fig. 4.12 A) ou através do processamento mecânico de material inteiriço à base de cortiça (Fig. 4.12 B).

Combinando materiais à base de cortiça com camadas de borracha de várias elasticidades, obtêm-se placas de amortecimento anti-vibração eficazes (Figura 4.13). As chapas podem ser de tipo folha ou de dupla curvatura. São eficazes na fixação dos assentos do piloto e do passageiro em aviões ligeiros ou noutros elementos estruturais da cabina, reduzindo assim as vibrações causadas pelos motores e hélices que lhes são transmitidas.



Figura 4.13 Uma placa anti-vibração com um núcleo à base de cortiça coberto com uma borracha porosa em ambos os lados [27].

## **4.2 Métodos de fabrico de compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça**

Ao analisar os métodos de fabrico de compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça, é importante ter em conta as propriedades geométricas dessas estruturas. É vital distinguir entre painéis sanduíche planos e elementos sanduíche de superfícies simples ou duplamente curvas.

### ***4.2.1 Métodos de fabrico de painéis sanduíche planos***

#### ***4.2.1.1 Fabrico de painéis sanduíche planos sob compressão mecânica***

Ao aplicar a compressão mecânica nos painéis estruturados em sanduíche, os painéis planos com chapas de face constituídas por chapas pré-fabricadas de metal, madeira, plástico ou outros materiais são a melhor opção (Figura 4.14). As folhas compósitas de vidro, carbono ou plástico polimerizado reforçadas com outras fibras também podem ser utilizadas com sucesso para este efeito. Para o processo de fabrico, é necessária uma superfície lisa e sólida com dimensões suficientes e a capacidade de comprimir o painel.

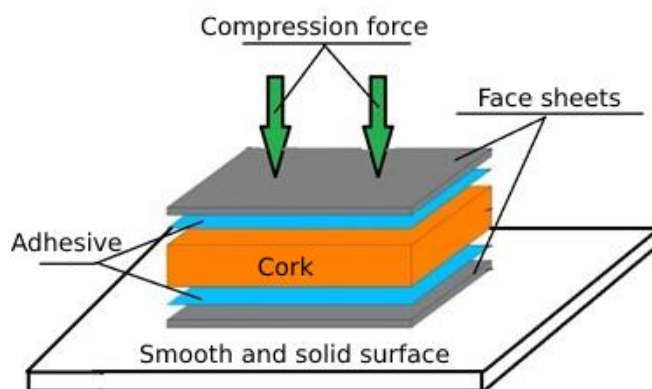


Figura 4.14 Diagrama esquemático de um processo de fabricação de painéis sanduíche planos.

Uma folha de revestimento com uma camada adesiva é colocada sobre a superfície. De seguida, é colocado um núcleo de cortiça, o adesivo é aplicado e a estrutura é coberta com outra folha de revestimento. O painel é comprimido e, após o adesivo ter endurecido ou polimerizado, obtém-se um painel plano com estrutura sanduíche, que tem de ser cortado de acordo com o contorno pretendido.

Para comprimir o painel, pode ser utilizado qualquer equipamento de compressão mecânica (prensa, compressor especializado, etc.). Os painéis pequenos podem ser comprimidos com objetos pesados. Para distribuir uniformemente a força de compressão, são utilizados sacos cheios de areia ou de qualquer outro material solto e relativamente pesado. A aplicação da força de compressão a partir de cima com outra placa de aplicação de força lisa e sólida é altamente recomendada para uma compressão do painel distribuída uniformemente. É muito conveniente utilizar película adesiva para fabricar estes painéis. Não só simplifica o processo de fabrico, como também o torna mais cómodo e "limpo". É crucial assegurar que não se formam bolhas de ar no revestimento adesivo quando se aplica o adesivo líquido, uma vez que pode danificar o aspecto exterior do painel ou até mesmo causar um descolamento parcial das camadas resultantes da mudança de temperatura. É também necessário assegurar que não há compressão excessiva localizada, o que se evita ao aplicar-se uma força de compressão ao painel com placas de aplicação de força em ambos os lados. O material de núcleo à base de cortiça não é duro nem sólido. Por isso, é essencial controlar a força de compressão, especialmente quando se fabricam painéis de pequenas dimensões.

#### ***4.2.1.2 Fabrico de painéis estruturados tipo sanduíche por compressão a vácuo***

É conveniente utilizar vácuo para a compressão no processo de fabrico de painéis estruturados em sanduíche à base de cortiça. Assim, é possível obter uma compressão uniformemente distribuída e não excessiva, e é também mais fácil evitar a formação de bolhas de ar nas camadas adesivas. O processo de fabrico destes painéis é apresentado na Fig. 4.15.

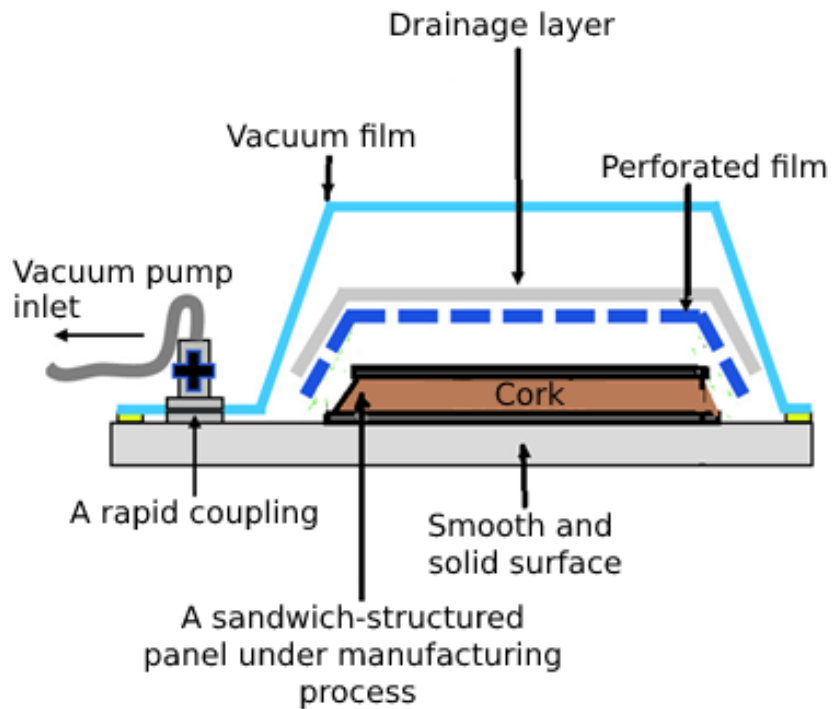


Figura 4.15 Um diagrama esquemático do processo de fabricação de painéis planos estruturados em sanduíche com um núcleo à base de cortiça sob compressão a vácuo.

Portanto, os painéis são fabricados da seguinte forma:

1. Uma folha de revestimento é colocada numa superfície sólida, suficientemente lisa e de dimensões suficientes. Suponha-se que é utilizada uma cola líquida no processo de fabrico de um painel estruturado em sanduíche. Nesse caso, é obrigatório cobrir previamente o painel com uma camada anti-adesiva (geralmente com compostos/pasta à base de silicone) para evitar que a libertação de cola adira à placa do processo de fabrico.
2. A folha de revestimento é coberta com adesivo e o núcleo à base de cortiça é colocado.
3. A folha de revestimento superior é coberta com adesivo.
4. Sobre a camada adesiva, é colocada outra folha de revestimento.
5. Tudo é revestido com uma película perfurada especializada. A película perfurada é aplicada apenas quando as camadas do painel são coladas com adesivo. Se for utilizada a película adesiva, não é obrigatório aplicar a película perfurada. Por conseguinte, a camada de película adesiva não é espessa e não sobressai dos bordos do painel quando comprimida.

6. A película perfurada é revestida com um material permeável ao ar de espessura única. Trata-se de uma camada de drenagem que impede a formação de bolhas de ar internas entre a película de vácuo e a superfície do painel fabricado.
7. A uma distância de cerca de 50÷150 mm dos bordos do painel na placa do processo de fabrico, é colada uma fita adesiva especial à volta de todo o painel fabricado e tudo é coberto com uma película de vácuo. A película de vácuo deve aderir bem à fita adesiva, pois isso determinará se haverá vácuo suficiente quando a bomba de vácuo for ligada.
8. Na película de vácuo são feitas ranhuras padrão para o acoplamento rápido com o encaixe da bomba de vácuo e o acoplamento é feito.
9. Após verificação, o saco é ligado à linha de vácuo (bomba) através de um acoplamento rápido.
10. O vácuo é ligado. Nesta fase, é essencial produzir lentamente vácuo sob a película de vácuo, controlando o aperto e a formação de dobras ao longo do perímetro do painel fabricado.
11. O vácuo é mantido ativado até que o adesivo seque ou polimerize.
12. Quando o adesivo tiver endurecido, o vácuo é desligado e a película de vácuo e a camada de drenagem são removidas. O painel é retirado da placa do processo de fabrico e é cortado de acordo com as dimensões pretendidas.

Desta forma, são fabricados painéis à base de cortiça com estrutura em sanduíche de alta qualidade sem aplicar compressão mecânica. No entanto, é necessária uma bomba de vácuo e vários materiais auxiliares para este processo.

#### ***4.2.2 O processo de fabrico de painéis de curvatura simples ou dupla***

A maior parte dos painéis com estrutura em sanduíche utilizados na aeronáutica são fabricados a partir de superfícies com uma ou duas curvas [28]. Estes artigos são fabricados utilizando uma tecnologia ligeiramente diferente da dos painéis planos. Esta tecnologia é também utilizada no processo de fabrico de artigos planos estruturados em sanduíche quando as chapas de revestimento são feitas de materiais compósitos reforçados com fibras, que são formados durante o processo de fabrico de produtos estruturados em sanduíche [29]. Para o fabrico destes produtos, é necessário um molde que será utilizado como superfície de contacto para que se forme a área de trabalho. Normalmente, estes painéis são fabricados em duas fases. A primeira fase é mostrada na Fig. 4.16.

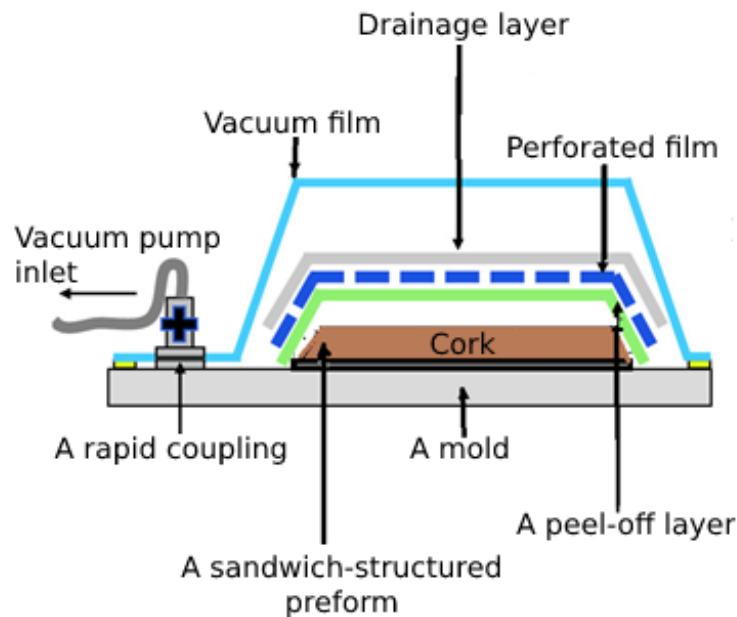


Figura 4.16 Diagrama esquemático da primeira fase do processo de fabricação de um painel estruturado em sanduíche quando este é formado utilizando materiais compósitos.

Analisemos o processo de fabricação desta fase:

1. Antes do processo de fabricação da primeira fase, é fundamental efetuar uma inspeção visual do molde, prestando especial atenção às superfícies sobre as quais será formada a chapa de qualidade. Se necessário, os pequenos riscos do molde são polidos. Em caso de danos graves, o molde é revestido e depois polido.
2. A área de trabalho do molde é coberta com uma camada anti-adesiva e depois polida. Estas ações são realizadas de acordo com as instruções tecnológicas fornecidas pelo fabricante da camada.
3. Se o produto for pintado, a área de trabalho do molde é coberta com uma camada decorativa específica (Gelkaut).
4. Uma fita adesiva especializada é aplicada à volta de todo o perímetro do modelo para selar a película de vácuo.
5. Depois de o Gelkaut secar até ficar ligeiramente pegajoso, são colocadas as placas de revestimento do compósito, embebendo cada uma delas com resina. Ao colocar as camadas de compósito, é vital manter a direção do reforço especificada na documentação de construção e tecnológica.
6. O material do núcleo é colocado (material à base de cortiça) à medida que as camadas são formadas. Ao colocar o material do núcleo (por vezes o núcleo é constituído por várias folhas, pelo que é

necessário falar de folhas) e depois succionar, é essencial garantir que a folha deste material ocupe a posição correta no molde e não se mova durante o processo de sucção. Este processo requer certas habilidades e uma compreensão de como a superfície se deforma depois de aplicar o vácuo e começar a absorver o ar da película de sucção. É de salientar que, ao fabricar as superfícies duplamente curvas no molde, o raio da alteração da superfície é relativamente pequeno.

7. Numa superfície formada, é colocada uma camada especializada de descolagem. Esta ajuda a absorver o excesso de resina e simplifica a preparação das superfícies para a fase de moldagem seguinte.

8. Tudo é coberto com uma película perfurada única.

9. Sobre uma película perfurada, é aplicada uma camada de drenagem. Esta evita a formação de bolhas de ar internas entre a película de vácuo e a superfície do painel fabricado. Absorve o excesso de resina que inevitavelmente ocorre com esta tecnologia de fabrico.

10. Um painel moldado é coberto com uma película de vácuo. A película de vácuo deve aderir bem à fita adesiva, uma vez que isso determinará se será obtido um vácuo suficiente quando a bomba de vácuo for ligada.

11. Na película de vácuo são feitas ranhuras normalizadas para um acoplamento rápido com o encaixe da bomba de vácuo, e o acoplamento é inserido.

12. Após verificação, o saco é ligado à linha de vácuo (bomba) através de um acoplamento rápido.

13. O vácuo é ativado. Nesta fase, é essencial produzir lentamente um vácuo sob a película de sucção, controlando o aperto e a formação de dobras ao longo do perímetro do painel fabricado.

14. O vácuo é mantido ativado até à polimerização do adesivo.

15. Quando o adesivo tiver endurecido, o vácuo é desligado e a película de vácuo, a camada de drenagem, a película perfurada e a camada de descolagem são removidas.

Após uma inspeção visual e a garantia de que o produto cumpre os requisitos, pode ser implementada a segunda fase de fabrico.

A segunda fase do processo de fabrico envolve a moldagem de outra folha de uma estrutura em sanduíche. A sequência das ações desta fase é ligeiramente diferente das tomadas na primeira fase. O diagrama esquemático da segunda fase é apresentado na Fig. 4.17. Um processo tecnológico da segunda fase é analisado em maior pormenor abaixo.

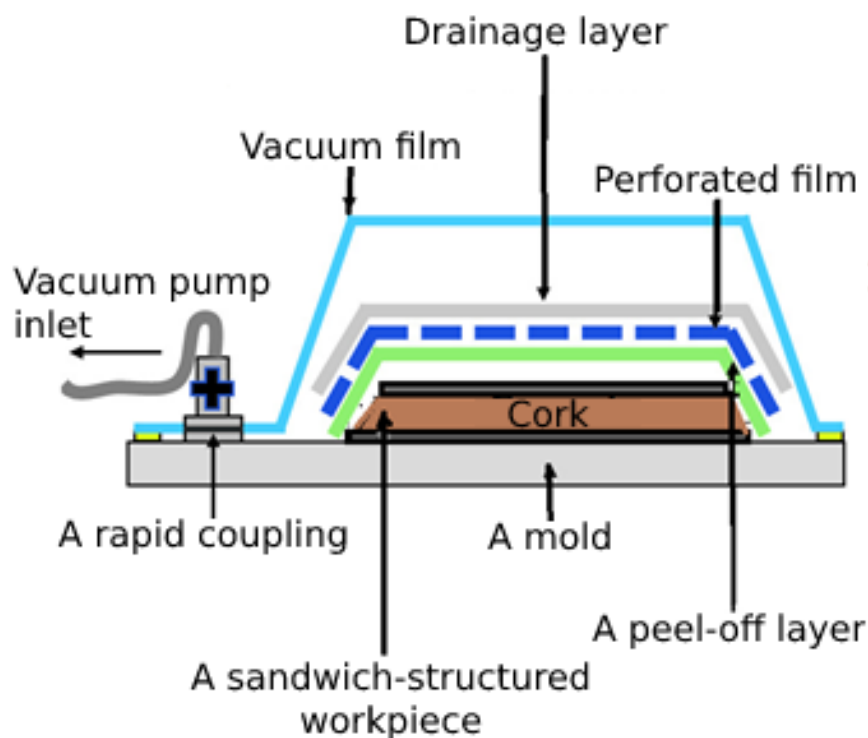


Figura 4.17. Diagrama esquemático da segunda fase do processo de fabricação de um painel estruturado em sanduíche, quando este é formado utilizando materiais compósitos.

Antes da execução da segunda fase do processo de fabricação dos compósitos estruturados em sanduíche, as suas superfícies, após a remoção da camada de descolagem, são ligeiramente lixadas com uma lixa de grão 100, no mínimo. São efetuados os seguintes passos:

1. As camadas que cobrem o núcleo do compósito são colocadas. Cada camada é embebida em resina. Durante a primeira fase, ao formar as camadas de compósito, é essencial manter a direção do reforço das camadas especificada na documentação de construção e tecnológica.
2. Numa superfície formada, é colocada uma camada destacável especializada. A camada de descolagem tem a mesma função que na primeira fase.
3. Os passos seguintes são idênticos aos passos 8-12 efetuados na primeira fase.
4. A superfície fabricada é retirada do molde. A sua qualidade é verificada.
5. A superfície é cortada de acordo com as dimensões indicadas no desenho e, após verificação, está pronta a ser utilizada.

#### ***4.2.3 Peculiaridades do ponto de montagem dos painéis estruturados tipo sanduíche***

Os painéis estruturados em sanduíche à base de cortiça têm várias particularidades de construção. Uma delas é a estrutura complicada dos pontos de montagem. Esta particularidade é comum a todos os materiais estruturados em sanduíche com núcleo leve. Os materiais do núcleo são muito leves e têm uma tensão de contacto muito baixa. Os materiais da camada de revestimento são normalmente caracterizados por terem boas propriedades mecânicas (bem como uma tensão de contacto relativamente elevada). No entanto, estes materiais são muito finos. É comum fixar vários conjuntos a elementos estruturados em sanduíche. Por conseguinte, a receção de cargas locais em tais estruturas é normalmente muito complicada e requer soluções estruturais únicas. Podem existir várias opções de montagem. Cada uma delas utiliza um método de montagem específico.

##### ***4.2.3.1 O reforço de painéis tipo sanduíche nos pontos de montagem de outros elementos estruturais***

Se um elemento estrutural for exposto a uma carga mais elevada, tem de ser ligado à superfície de um painel sanduíche ou a qualquer outra superfície estruturada em sanduíche. Neste caso, é necessária uma substituição do material do núcleo por um material mais pesado com melhores propriedades mecânicas no ponto de montagem local. A Fig. 4.18 apresenta uma ranhura de uma estrutura em sanduíche com uma inserção deste tipo.

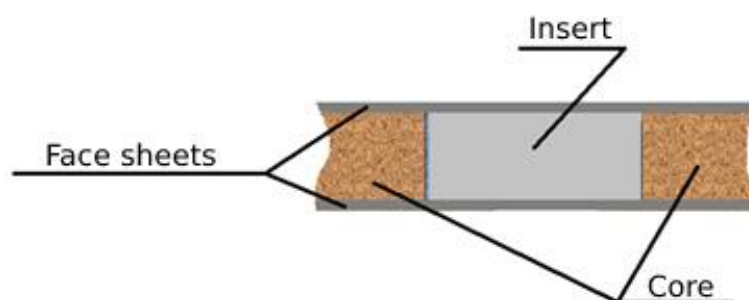


Figura 4.18 Uma ranhura de inserção num painel estruturado em sanduíche com um núcleo de cortiça.

Esta estrutura é fabricada como uma superfície normal plana ou com uma ou duas curvas. Nos pontos de montagem locais, o material do núcleo é removido e são inseridas dimensões suficientes do núcleo. O inserto é fabricado a partir de um material com melhores propriedades mecânicas. Para simplificar o processo de fabrico, o inserto pode ser moldado num recesso com a forma pretendida, feito no núcleo, através do núcleo de resina misturada com um material de núcleo (fibra de carbono cortada, outros materiais de núcleo de resina especiais) que melhora as propriedades mecânicas.



Quando outro elemento estrutural sujeito a cargas extremamente baixas é colado a um painel estruturado em sanduíche, pode ser suficiente aumentar a espessura da camada de revestimento à qual está colado, aplicando mais camadas de material de reforço localmente ou simplesmente colando-o com um remendo de reforço maior a partir do exterior. O diagrama esquemático que representa esse reforço é apresentado na Fig. 4.19.

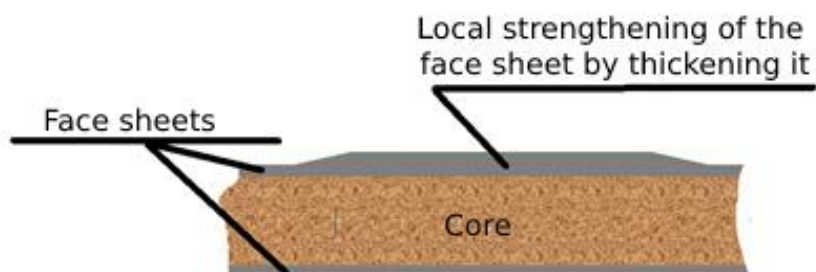


Figura 4.19 Um diagrama de ranhuras do reforço externo local do painel estruturado em sanduíche.

#### ***4.2.3.2 Reforço dos painéis estruturados tipo sanduíche nos pontos de montagem de outros elementos estruturais quando estes elementos são aparafusados***

Normalmente, os painéis com estrutura em sanduíche ou outros painéis são fixados a outros conjuntos, que têm de ser removidos de tempos em tempos. A melhor opção para esse efeito são as ligações roscadas. No entanto, nesta altura, podem ser encontrados dois desafios:

- A. Com as ligações aparafusadas, é relativamente fácil sobrecarregar o material do núcleo quando se aperta a porca do parafuso. Este problema torna-se proeminente quando o material é à base de cortiça. Este tipo de núcleo tem uma elevada taxa de elasticidade e é facilmente deformável. Por conseguinte, quando se aperta o parafuso, é fácil fazer com que o núcleo se desfaça, danificando as camadas de revestimento.
- B. Sob cargas mais pesadas, um material de núcleo não reforçado nos pontos de montagem pode ser arrancado pelos parafusos.

A solução para este problema consiste em colocar os insertos nos locais dos parafusos, como mostra a Fig. 4.18, e em fazer furos nessas cavidades. O diagrama esquemático de uma montagem deste tipo é apresentado na Fig. 4.20.

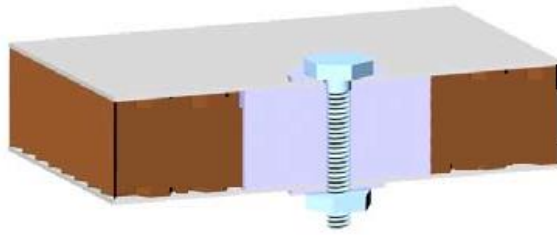


Figura 4.20. Uma ranhura na inserção do painel estruturado em sanduíche para a ligação roscada [30].

No entanto, esta decisão só por vezes é suficiente. É relativamente comum que os pontos de montagem sejam afetados por cargas pesadas. A ligação roscada tem de ser facilmente desmontada e remontada devido a requisitos operacionais entre outros [31]. Por vezes, há também requisitos para assegurar a hermeticidade de tal ligação. Como é típico das estruturas aeronáuticas fechadas, o parafuso tem de ser apertado de um lado sem utilizar uma porca.

Nestes casos, uma inserção de maiores dimensões é colada com adesivo no núcleo e, após a perfuração de um orifício, uma bucha especial é colada com adesivo. O esquema de uma ligação deste tipo é apresentado na Fig. 4.21. Os casquilhos certificados fabricados por medida para aeronaves são utilizados principalmente na aeronáutica (Figura 4.22). Os casquilhos podem ser concebidos e fabricados por medida para pontos de ligação específicos, se necessário.

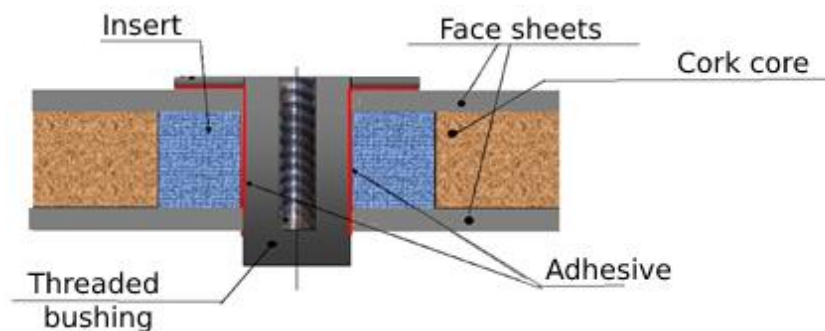


Figura 4.21 Um casquilho roscado colado com adesivo numa estrutura do tipo sanduíche [32].



Figura 4.22 Amostras de casquilhos normalizados de painéis estruturados em sanduíche [33].

#### 4.2.4 Características dos fechos dos bordos dos painéis estruturados em sanduíche

Os bordos de painéis estruturados em sanduíche ou multicamadas têm de ser selados de formas únicas. Isto tem de ser feito para isolar o núcleo nos bordos. Além disso, os bordos dos painéis estão normalmente ligados a outros elementos estruturais. No entanto, neste caso, os métodos de montagem acima mencionados não podem ser utilizados.

Quando os elementos estruturais são fabricados para serem utilizados nas estruturas afetadas pela carga, a ligação requer normalmente uma borda onde as chapas de revestimento são unidas, e não há material de núcleo entre elas. A transição tem de ser suave, sem quaisquer alterações súbitas de rigidez. Por isso, são criadas as inclinações laterais do núcleo. O ângulo da inclinação lateral deve ser o mais pequeno possível. Normalmente, é de 30 graus ou até menos (Figura 4.23).

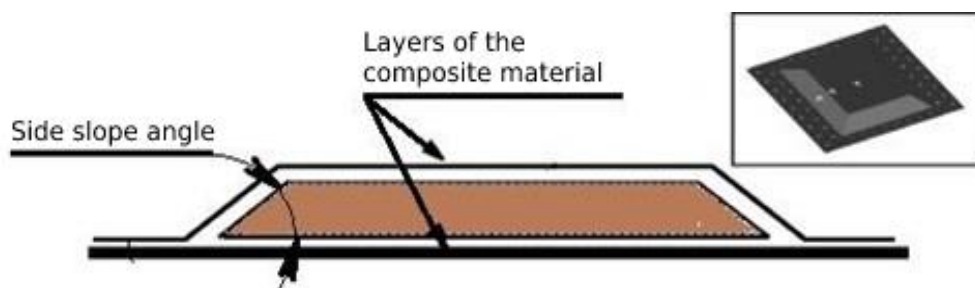


Figura 4.23. Fecho das bordas do painel sanduíche através de inclinações laterais no núcleo [34].

Quanto mais pequeno for o ângulo de inclinação, mais suave será a alteração da rigidez nos bordos do painel. É desejável um ângulo de inclinação mais pequeno quando se fabricam os painéis utilizando os métodos de vácuo acima referidos. No caso de um ângulo de inclinação maior (próximo de 90 graus) durante a sucção do painel na extremidade do núcleo, formam-se inevitavelmente zonas onde o vácuo não comprime o painel compósito. Consequentemente, aparecem defeitos estéticos na superfície e a resistência dos pontos de carga deteriora-se significativamente.

Por vezes, um painel estruturado em sanduíche com um núcleo à base de cortiça tem de ser selado através de um corte acentuado. Neste caso, o núcleo também pode ser mantido intacto. Por conseguinte, os painéis são selados através do fabrico de várias anteparas para a cabina do avião. Nestes casos, são utilizados os métodos de selagem do núcleo do painel com vários perfis. O diagrama esquemático destes métodos é apresentado na Fig. 4.24.

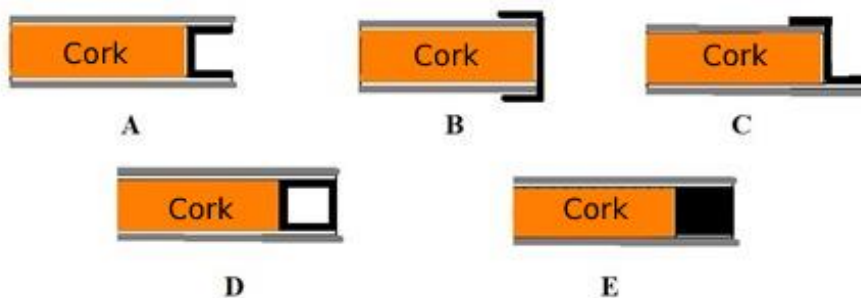


Figura 4.24 Métodos de vedação do painel sanduíche com núcleo de cortiça, quando é necessário cortá-los. A perfil "U" no interior das folhas de rosto; B perfil "U" no exterior das folhas de rosto; C perfil em forma de "Z"; D perfil oco fechado; E barra quadrada/retangular sólida.

Em todos estes casos de selagem de um painel sanduíche, os elementos de selagem (perfis e varetas) são colados por meio de adesivo às camadas de revestimento e ao núcleo. As ligações com parafusos ou rebites são menos comuns. Se os elementos de vedação tiverem de ser invisíveis do exterior, utiliza-se a vedação com um perfil em forma de "U" no interior das camadas de revestimento (Fig. 4.24 A) ou com um perfil oco ou sólido fechado (como se mostra nas Figs. 4.24 D e E).

Por vezes, um painel sanduíche precisa de ser "enquadrado" em zonas específicas ao longo do perímetro. Isto é frequentemente feito por razões estéticas, menos frequente por características estruturais. Nestes casos, a melhor opção é utilizar os métodos apresentados na Fig. 4.24 B e C.

Analisemos o processo de fabrico da vedação apresentado na Fig. 4.24 A. Em primeiro lugar, o material do núcleo é removido mecanicamente da zona onde o perfil de vedação está planeado para ser colado por adesivo. Ao completar este passo, é importante evitar danificar as folhas frontais do painel e não deixar resíduos de núcleo nas áreas removidas. As superfícies interiores das folhas de rosto são lixadas e revestidas com cola. O perfil a ser colado é limpo e preparado para a colagem com adesivo de acordo com a tecnologia apropriada para o material do perfil. O perfil é inserido, o excesso de adesivo é removido e, após a compressão, o produto é deixado até que o adesivo endureça. Assim que o adesivo endurece, a compressão é aliviada e o excesso de adesivo é removido.

Ao trabalhar no interior da cabina do avião, a ligação de painéis sanduíche com cortes acentuados é normalmente vital. Para a vedação dos bordos, é sensato utilizar estas ligações, uma vez que simplificam os perfis mais complexos.

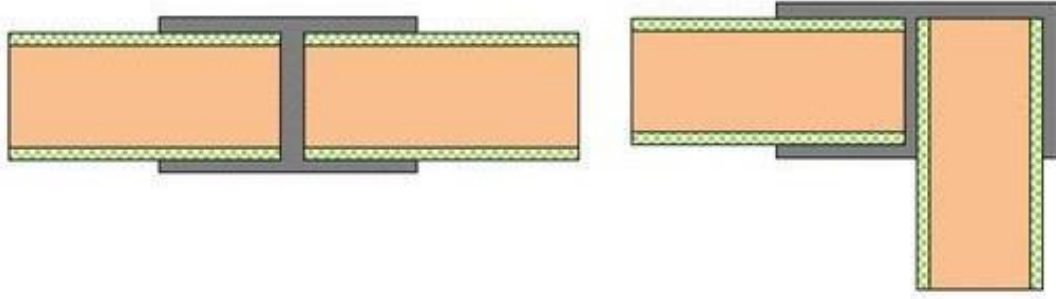


Figura 4.25 Uma ligação de painéis planos através de perfis que selam os seus bordos.

A Fig. 4.25 mostra os meios para ligar dois painéis planos com perfis e opções para selar e ligar elementos dos bordos do painel. Assim, a massa do conjunto é reduzida, a ligação é mais económica e obtém-se uma imagem estética.

### 4.3 Aplicações de compósitos de cortiça para vedações

As vedações estão entre as aplicações mais comuns e comprovadas do compósito de cortiça com borracha. A aplicação de compósitos de cortiça pelas suas propriedades de vedação na aviação é generalizada e comprovadamente prática. As vedações feitas de compósito de cortiça com borracha podem ser utilizadas com vários fluidos e gases em diferentes sistemas de aeronaves [35].

#### 4.3.1 Fluidos mais comuns utilizados na indústria aeroespacial

##### 1. Gasolina (AVGAS 100LL):

O AVGAS 100LL é o combustível padrão utilizado na maioria dos motores de pistão de aviões a hélice e helicópteros. A Avgas é uma gasolina convencional utilizada na indústria automóvel, apenas com a adição de chumbo tetraetilo (TEL), que aumenta o índice de octanas da gasolina para 100. Além disso, o número de TEL adicionado é reduzido em comparação com o AVGAS 100, daí o nome - "Avgas 100LL (Low Lead) [36].

##### 2. Querosene (combustível para motores a jacto):

O JET A-1 é o tipo de querosene mais utilizado, principalmente nos motores a jacto de aviões e helicópteros [37]. Existem diferenças fundamentais quando se compara o querosene com a gasolina ou o diesel, principalmente o ponto de ignição, a densidade energética e a composição química. Os motores a jacto podem geralmente funcionar com uma maior variedade de combustíveis, o que

constitui uma das razões fundamentais para a utilização de um combustível mais barato à base de querosene.

### 3. Óleo do motor:

São utilizados vários óleos de motor consoante o tipo de motor e as suas características. Os óleos mais utilizados nos motores de pistão a quatro tempos das aeronaves a hélice são os óleos minerais descritos na norma SAE J-1966, como o Aeroshell 80 (para temperaturas entre -17°C e 21°C), e os óleos semi-sintéticos descritos na norma SAE J-1899, como o Aeroshell W15W50 e equivalentes.

Os motores a jato utilizam normalmente óleos mais finos devido à maior rotação do motor. A norma mais comumente utilizada - MIL-PRF-23699F, Eastman Turbo Oil 2380 é um dos exemplos.

### 4. Fluido hidráulico:

O principal objetivo deste tipo de fluido é transferir energia (sob a forma de pressão) de um local para outro. Por este motivo, o fluido não é normalmente consumido na operação. No entanto, os requisitos para as propriedades do fluido hidráulico são incrivelmente elevados. Por exemplo, a pressão padrão de funcionamento para sistemas hidráulicos é de 3000 Psi (206,8 Bar) [38]. Outra característica essencial é o fluxo, que pode atingir até 3 litros por segundo em alguns sistemas de aeronaves. Isto exige que o fluido hidráulico funcione a pressões e fluxos elevados ao mesmo tempo em que se mantém líquido, de preferência mantendo o fluxo laminar, sem evaporar e sem alterar as suas propriedades sob grande tensão, como indicado na norma SAE AS1241.

Todas estas propriedades são obtidas através da mistura de óleo mineral e de diferentes elementos químicos, normalmente não divulgados por razões comerciais. No entanto, numa entidade habitual de manutenção e reparação de aeronaves, o fluido hidráulico é considerado o fluido mais erosivo e quimicamente agressivo utilizado na aviação (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Pressões e temperaturas de funcionamento normais dos fluidos de aviação.

Tipo de fluido	Temperatura de funcionamento padrão	Pressão de funcionamento padrão
Gasolina (AVGAS 100 LL)	-58°C a 60°C	≤ 1000 Psi
Querosene (JET-A1)	-47°C a 80°C	≤ 1500 Psi
Óleo de motor (motor pistão)	-17°C a 82°C	≤ 65 Psi
Óleo de motor (motor a jato)	-40°C a 350°C	≤ 45 Psi
Fluido hidráulico	-40°C a 100°C	≤ 3000 Psi

### 4.3.2 Tecnologias de vedação de fluidos

Devido às diferentes propriedades químicas e mecânicas exigidas pelos materiais de vedação utilizados nas aplicações aeroespaciais, foram desenvolvidas várias soluções. As soluções mais comuns são as vedações em chapa, as vedações em material sólido, as vedações em envelope, as vedações de perfil kamm e os o-rings (Figura 4.26). No entanto, as tecnologias de vedação com compósitos de cortiça com borracha só se revelaram eficazes sob a forma de vedantes em chapa [39].



Figura 4.26 Vedantes planos de cortiça com borracha [40].

As propriedades das vedações de cortiça com borracha dependem de alguns fatores, tais como o tamanho do grão da cortiça, a densidade, a composição química e a relação borracha/cortiça (Tabela 4.2). O ajuste destas características permite criar um compósito com os parâmetros necessários para uma aplicação específica. No entanto, não é razoável esperar a possibilidade de criar um compósito "perfeito" que tenha um bom desempenho em todos os cenários encontrados na indústria aeroespacial. Diferentes fluidos, temperaturas e pressões afetarão o compósito de várias formas; por conseguinte, é necessário um design único da vedação de cortiça com borracha para cada sistema.

Os compósitos de cortiça com borracha têm muitas vantagens, tais como a sustentabilidade e a utilização de subprodutos da indústria da cortiça (aparas de cortiça e cortes) para produzir produtos aeroespaciais de alta qualidade. A cortiça tem uma excepcional resistência à temperatura, amortização de vibrações e propriedades de vedação. No entanto, enquanto material, a cortiça poderia funcionar melhor num ambiente de alta pressão. Por isso, geralmente não é utilizada em sistemas hidráulicos onde as pressões de funcionamento são superiores a 3000 Psi [42]. Os materiais mais comuns para a vedação de sistemas hidráulicos continuam a ser puramente sintéticos, como a borracha de etileno-propileno-dieno curada com peróxido (EPDM), fluorocarbono ou silicone [43].

Tabela 4.2 Compósitos de cortiça/borracha e suas propriedades [41].

Material	Descrição	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Dureza (Shore A)	Compressi bilidade% (400 psi)	Resistênci a à tração (Mpa)	Resistência à temperatura (°C)
TS2050 (D205)	Mistura de cortiça/SBR. Adequado para todos os óleos e líquidos de refrigeração de motores e engrenagens.	830*	60-80	15-35	2*	-30°C a 90°C
TS4600 (GT46)	Mistura de cortiça/SBR. Adequado para todos os óleos de motores e engrenagens.	>640	70*	25-45	>1.03*	-30°C a 110°C
TS1521	Mistura de cortiça/SBR. Adequado para a maioria dos fluidos lubrificantes.	550-750	50-70	35-50	>0.8	-30°C a 110°C
TS1400	Mistura de cortiça/NBR. Adequado para combustíveis, biocombustíveis, óleos e líquidos de refrigeração.	1100*	75-90	10-22	>3.5	-30°C a 125°C
TS7100	Mistura de cortiça/NBR. Adequado para combustíveis, biocombustíveis e óleos.	900*	60-75	20-45	2.5*	-30°C a 110°C

#### 4.3.3 Aplicações aeroespaciais testadas pelo tempo

Durante a era inicial da indústria da aviação, as primeiras aeronaves tinham essencialmente motores de pistão com hélices e o material padrão para as vedações do motor e do sistema de combustível era a cortiça (Figura 4.27). A tecnologia de outros materiais sintéticos não era suficientemente avançada



para a substituir. Com o passar do tempo, novos materiais começaram a substituir a cortiça enquanto vedantes. No entanto, à medida que a indústria da era moderna se orientava para a sustentabilidade e o respeito pelo meio ambiente, os engenheiros aeroespaciais voltaram a pensar nos vedantes de cortiça. Desta vez implementando a tecnologia avançada de fabrico de compósitos de cortiça com diferentes materiais, como borracha ou silicone, para produzir vedantes com as propriedades desejadas.



Figura 4.27 Vedante de cortiça (esquerda) e vedante de silicone (direita) [44], [45].

Outro fator que explica por que razão a indústria da aviação utiliza tanta cortiça em vários sistemas é o facto de as alterações e a implementação de novas tecnologias na aviação serem muito mais lentas e conservadoras do que na indústria automóvel. Embora os primeiros motores utilizados em automóveis e aviões utilizassem sobretudo cortiça como vedante, quando surgiram novos materiais, os engenheiros da indústria automóvel foram muito mais rápidos a implementar as alterações. Entretanto, a indústria da aviação leva muito mais tempo a testar e certificar corretamente os novos modelos tecnológicos. Por conseguinte, não havia pressa em substituir algo que estava a funcionar bem. Na altura em que os materiais de vedação sintéticos evoluíram e foram suficientemente testados, a indústria resolveu mudar para soluções sustentáveis. Por conseguinte, as aeronaves continuam a utilizar estas vedações testadas pelo tempo para os sistemas de óleo e combustível.

#### **4.4 Ensaios de materiais compósitos estruturados em sanduíche com núcleo de cortiça**

##### **4.4.1 Análise do espectro de materiais compósitos sanduíche com núcleo de cortiça**

**O objetivo da análise:** Encontrar pontos de ressonância e avaliar/comparar uma propriedade dinâmica (amortecimento) de diferentes materiais de cortiça laminada (comparar adicionalmente com material de espuma de polimetacrilimida laminada).

**Objetos para análise:** Nas análises atuais, foram investigados quatro objetos diferentes (3 tipos de cortiça e 1 tipo de material de espuma de polimetacrilimida) (Figura 4.28):



Figura 4.28 Amostras (1-3 compósito laminado de cortiça; 4 compósito laminado com espuma de polymethacrylimide). Dimensões para amostras 1-3: 30x30x3 mm; 4: 25x30x3mm.

**Tipo de análise:** a análise atual baseia-se na análise modal. A análise modal estuda as propriedades dinâmicas dos objetos no domínio da frequência. A análise modal ajuda a determinar as características de vibração (frequências naturais e modos) de uma estrutura ou componente mecânico, mostrando o movimento de diferentes partes da estrutura sob condições de carga dinâmica, como as devidas à força lateral gerada pelos atuadores electroestáticos [43]. As frequências naturais e modos são parâmetros essenciais no projeto de uma estrutura para condições de carga dinâmica [46].

A análise modal é efetuada através de uma análise do espectro de vibração FFT (Fast Fourier Transform). O objetivo principal desta investigação é encontrar a ressonância e comparar uma propriedade de amortecimento de um objeto investigado. Há vários passos a seguir como diretrizes para ajudar a obter uma análise bem-sucedida. Segue-se uma lista geral desses passos:

1. Recolher dados da medição: velocidade de vibração do objeto sob o impacto do impulso (excluindo vibrações em ambientes de baixa intensidade). Efetuar ensaios adicionais se forem necessários mais dados.
2. Fazer uma análise de espectro FFT para cada objeto para comparação.
3. Analisar os dados espectrais - avaliar os valores globais e as frequências específicas correspondentes ao material do objeto.
4. Relatório dos resultados obtidos e comparação das propriedades de amortecimento.

#### ***4.4.2 Bancada de ensaio e condições de medição***

As presentes medições experimentais foram realizadas para estabelecer os pontos de ressonância dos objetos de investigação e comparar as suas propriedades de amortecimento. As medições foram efetuadas através de um projeto de medição de duas amostras e com base num método estatístico de uma amostra com estimativa da incerteza em medições repetidas de processamento de dados.

A bancada de ensaios para a investigação experimental é apresentada na Fig. 4.29. Inclui uma base metálica com proteção de borracha contra a influência de baixas frequências do ambiente, objetos de investigação e um sistema de aquisição a laser para medir a vibração da superfície do objeto sob o sinal de impacto do martelo de impulso da Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE).

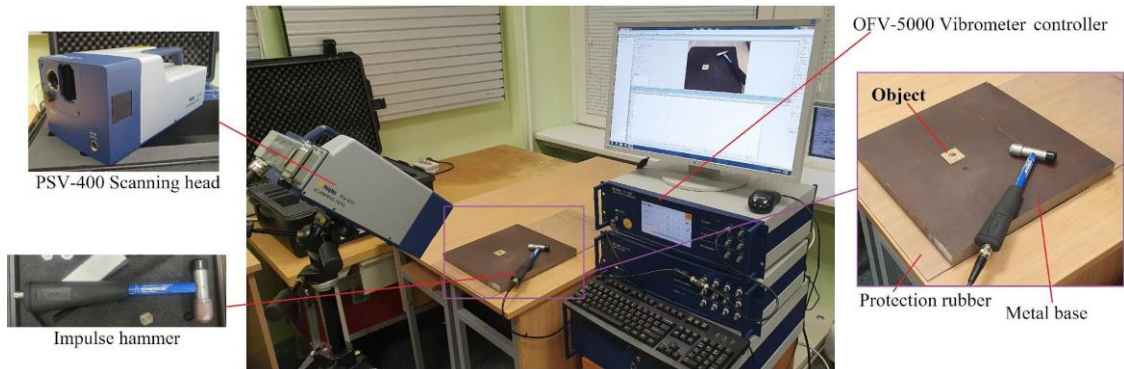
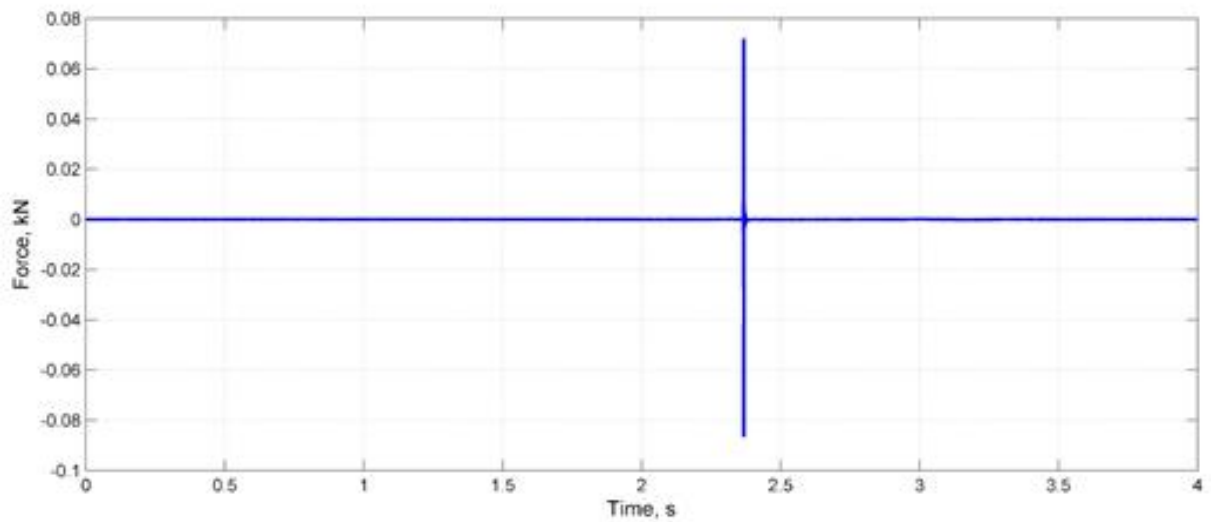
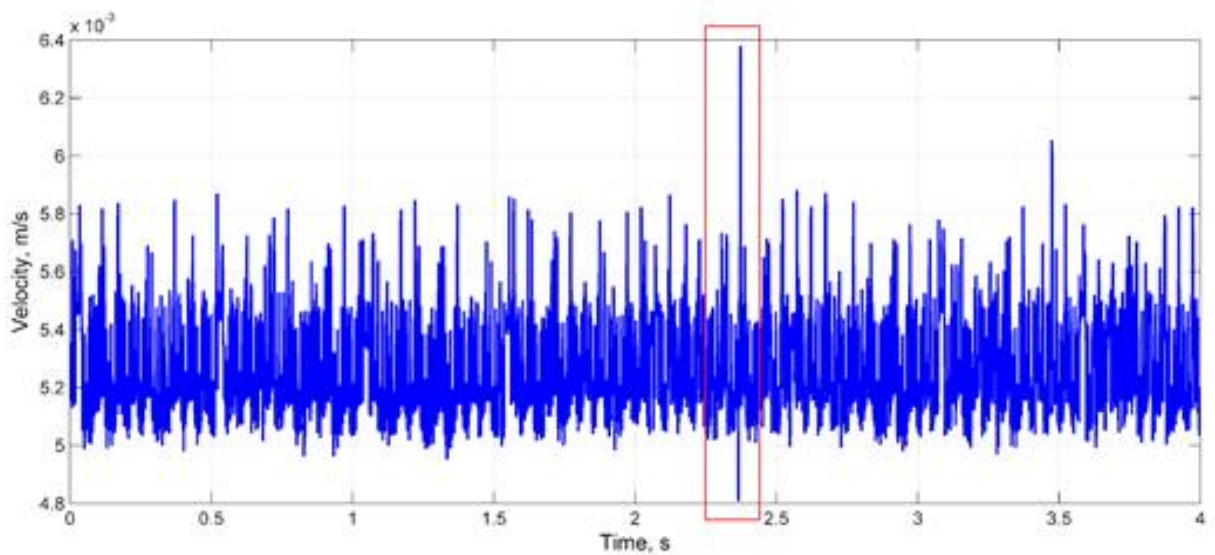


Figura 4.29 A bancada de ensaios para a medição [47].

Os ensaios incluem a medição da vibração e a deformação da superfície exterior (velocidade/deslocamento) dos objetos devido ao impacto com um martelo. O tempo de uma medição efetuada pelo sensor PSV é de 4 segundos. Durante este tempo, o martelo IEPE gera um impulso numa base metálica com a força na Fig. 4.30a, e a velocidade é medida pelo sensor PSV numa base metálica durante os ensaios (Fig. 4.30b).



a)



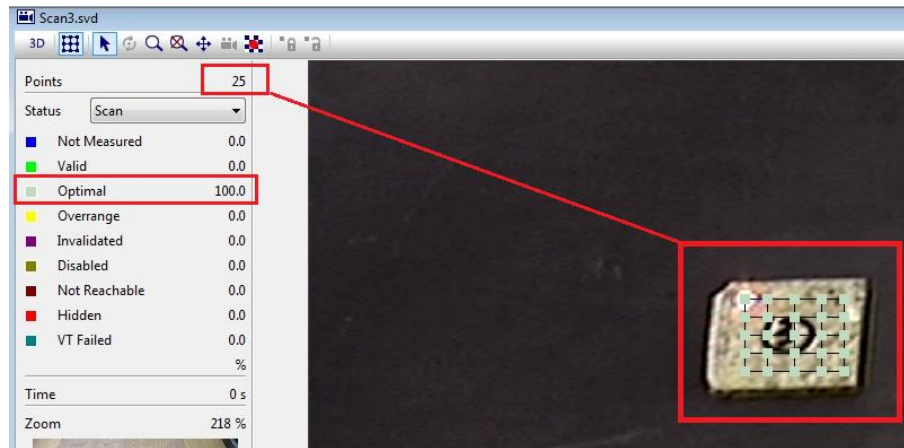
b)

Figura 4.30 Exemplo de medição: a) sinal do martelo de impulso IEPE; b) medição da velocidade do sensor PSV.

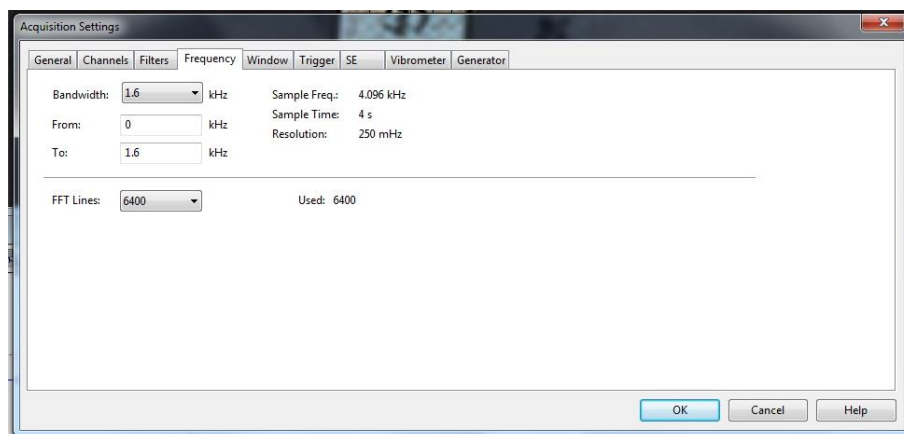
Para a diminuição durante as medições foram aceites e apresentadas as médias de várias medições. O principal resultado obtido a partir dos ensaios é a resposta em frequência dos materiais com base em análises de espectro utilizando o efeito Doppler para estabelecer melhor os pontos de ressonância e comparar a propriedade de amortecimento de um material.

Sobre os objetos estabelecidos foi criada uma grelha com 25 pontos, criando-se assim uma superfície próxima para medição (Fig. 4.31a). Os pontos foram varridos por um laser e, durante a medição, o

estado da varredura esteve sempre em condições ótimas, o que significa que a grelha de pontos e o foco do laser são ótimos para este tipo de material refletor. Além disso, o domínio da frequência inclui uma largura de banda de 1,6 kHz com uma resolução de passo de 0,25Hz (Fig. 4.31b).



a)



b)

Figura 4.31 Configuração da medição: a) ponto de medição; b) condição de frequência.

Isto significa que os resultados obtidos da análise do espectro serão de até 1600Hz e apresentados a cada 0,25Hz (Fig. 4.32).

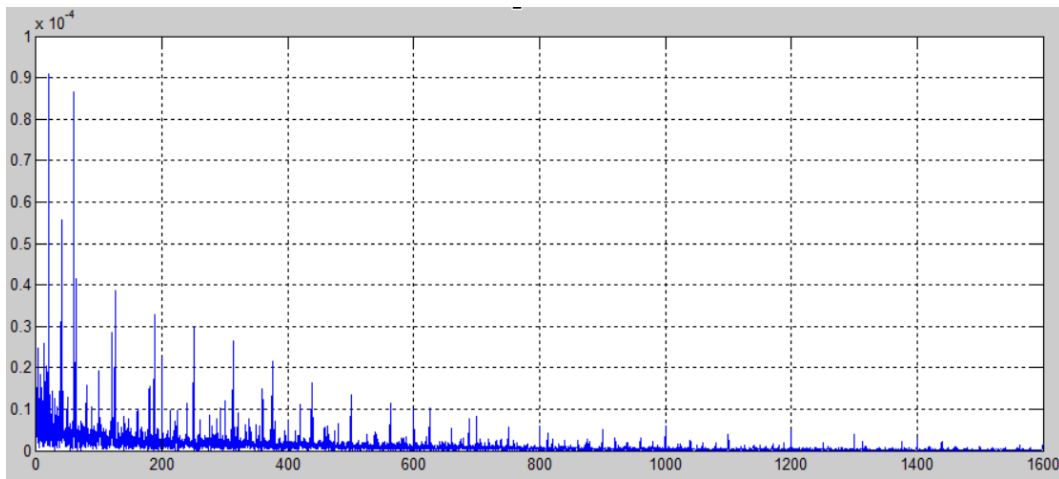


Figura 4.32 Os resultados obtidos da análise do espectro.

Os resultados da medição por análise modal são apresentados de seguida (Figs. 4.33-4.37). No entanto, o principal interesse para análise é a gama de frequências até 500 Hz, uma vez que os principais modos de ressonância foram observados nesta gama de frequências. *\*Nota: Os gráficos de resposta das frequências são apresentados no domínio da velocidade, uma vez que, nesta análise de espectro, os pontos de ressonância são mais visíveis que nos gráficos de aceleração e deslocamento.*

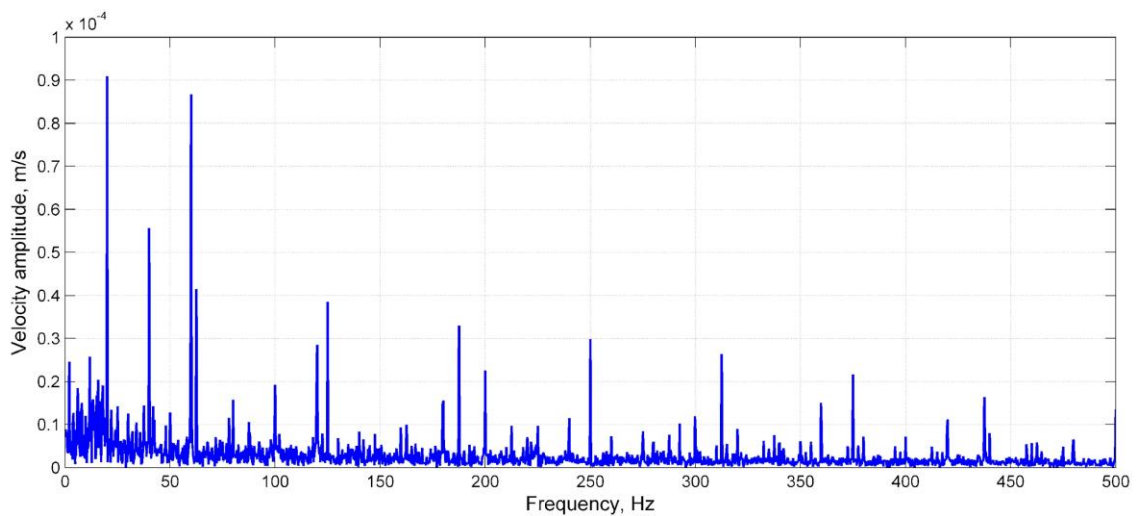


Figura 4.33 Gráficos das análises espectrais - resposta de frequência do primeiro objeto.

*\* Adicionalmente, um vídeo do modo no primeiro ponto de ressonância - 20Hz (+.gif) é apresentado num ficheiro separado*

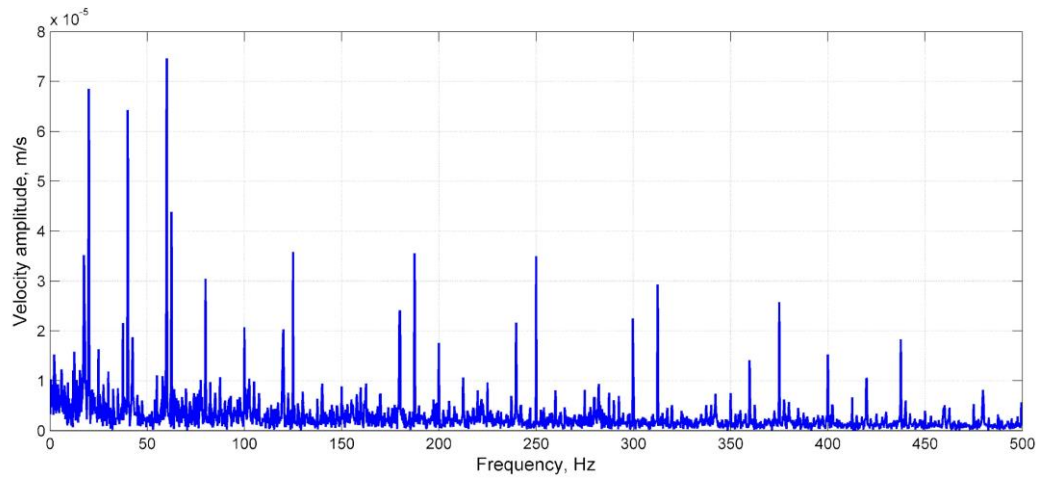


Figura 4.34 Gráficos da análise do espectro - resposta de frequência do segundo objeto.

*\*Adicionalmente, um vídeo do modo no primeiro ponto de ressonância - 20Hz (+.gif) é apresentado num ficheiro separado.*

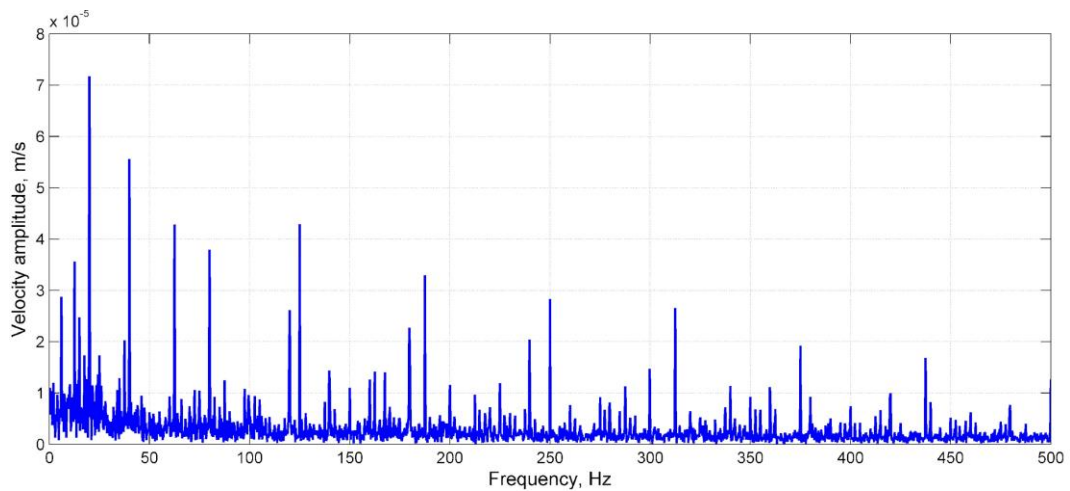


Figura 4.35. Gráficos da análise do espectro - resposta de frequência do terceiro objeto.

*\*Adicionalmente, um vídeo do modo no primeiro ponto de ressonância - 20Hz (+.gif) é apresentado num ficheiro separado.*

#### 4.4.3 Conclusão da primeira análise

A primeira análise compara a resposta de frequência das estruturas com cortiça (Figura 4.36):

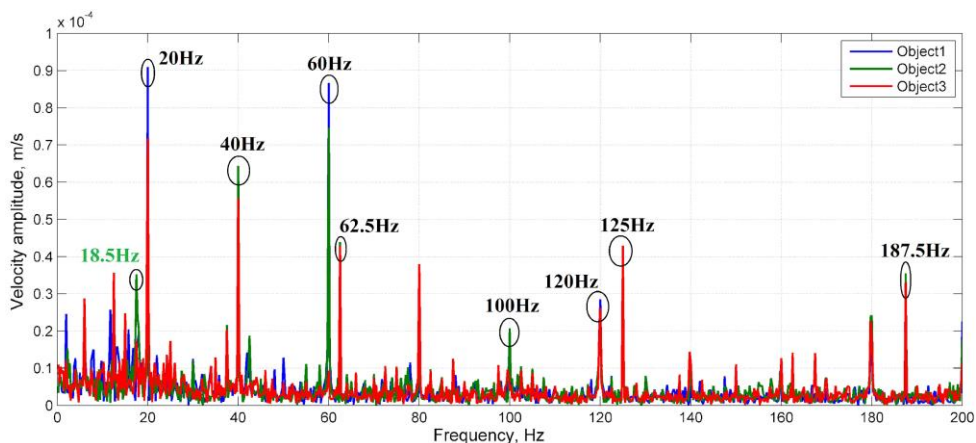


Figura 4.36 Análise comparativa: gráficos de análises espectrais das amostras com cortiça.

Da comparação das análises de frequência (Fig. 4.36) parece que a frequência central de ressonância dos materiais em cortiça laminada se situa na gama de baixa frequência (0 - 200 Hz) e no início da gama de média frequência (200 Hz - 500 Hz). É de notar que nesta gama de frequências se podem observar os principais modos de ressonância. A comparação é apresentada até 200Hz para melhor visualização dos resultados obtidos.

Através da análise de frequência, a principal e primeira frequência de ressonância do material compósito investigado é igual a 20 Hz com harmónicas por cada 20 Hz (20/40...80/100...etc. Hz). Além disso, deve ser a frequência apontada na gama de baixas frequências de 62,5 Hz com o passo harmónico que continua na gama de frequências média (125Hz...187Hz, etc.). A natureza compósita da cortiça laminada explica uma segunda frequência de ressonância.

A comparação das propriedades de amortecimento dos objetos é fornecida no exemplo do primeiro ponto de ressonância 20 Hz:

No ponto atual, o 1º objeto vibrou com uma amplitude de velocidade -  $0,9 \cdot 10^{-4}$  m/s; 2º objeto -  $0,68 \cdot 10^{-5}$  m/s; 3º objeto -  $0,72 \cdot 10^{-5}$  m/s. Isto pode levar à primeira conclusão de que o objeto 2 tem uma melhor propriedade de amortecimento do que os outros dois objetos de cortiça laminada.



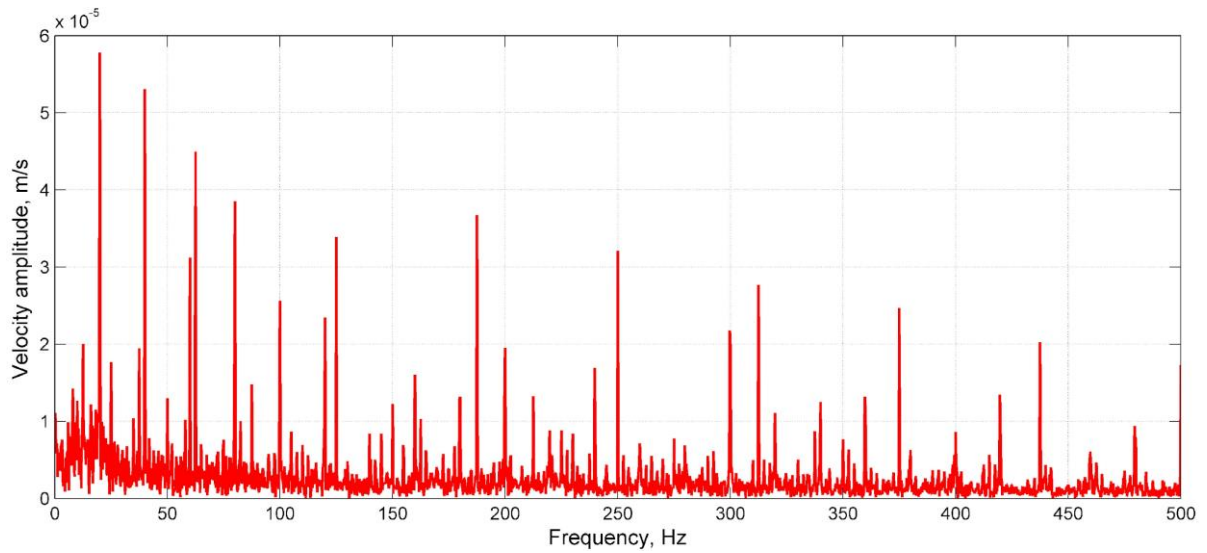


Figura 4.37 Gráficos da análise do espectro - resposta de frequência do quarto objeto.

\*Adicionalmente, um vídeo do modo no primeiro ponto de ressonância - 20Hz (+.gif) é apresentado num ficheiro separado.

#### 4.4.4 Conclusão da segunda análise

A segunda análise inclui uma comparação entre a resposta de frequência da cortiça laminada (objeto 2) e de polimetacrilimida (objeto 4) (o objeto dois foi aceite para comparação por apresentar a melhor propriedade de amortecimento) (Figura 4.38):

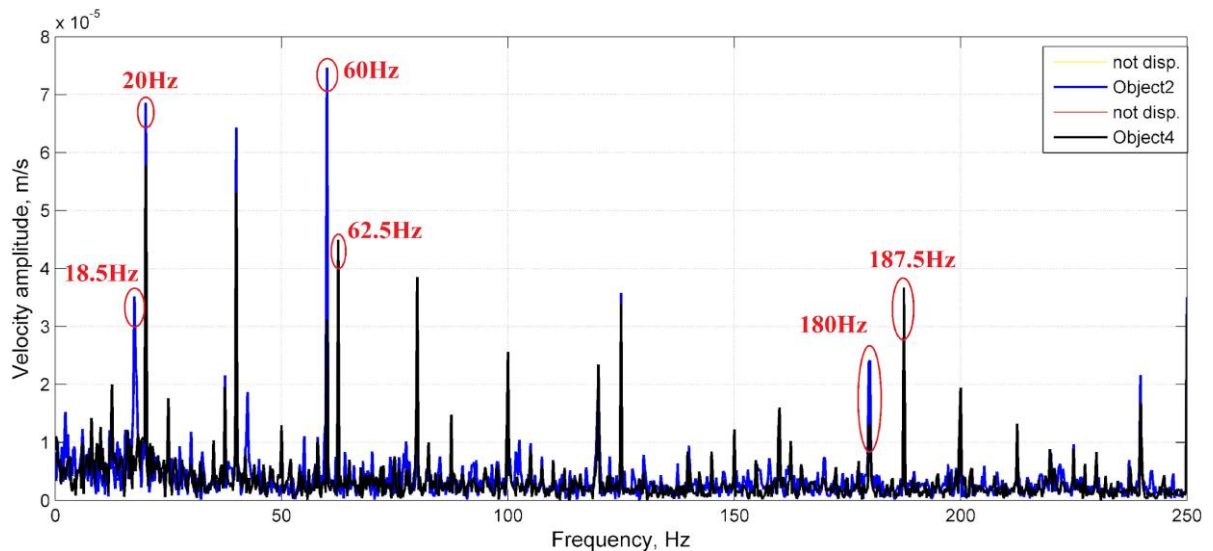


Figura 4.38 Análise comparativa: gráficos do espectro - resposta de frequência da cortiça laminada e do material de espuma de polimetacrilimida.

A partir da comparação da análise de frequência (Fig. 4.38), parece que a frequência de ressonância principal da cortiça laminada e dos materiais de espuma de polimetacrilimida é quase a mesma e situa-se na gama de baixa frequência (0 - 200 Hz) e no início da gama de média frequência (200 Hz - 500 Hz). Através da análise de frequência, a frequência principal e a primeira frequência de ressonância dos materiais compósitos investigados é igual a 20 Hz com harmónicas por cada 20 Hz (20/40...80/100...etc. Hz). Além disso, deve ser a frequência apontada na gama de baixas frequências de 62,5 Hz com o passo harmónico que continua na frequência da gama média (125Hz...187Hz, etc.). A laminação da cortiça e da espuma de polimetacrilimida com o mesmo material pode explicar a correspondência dos pontos de ressonância na mesma frequência. A principal diferença, neste caso, é que o objeto 4 proporciona uma melhor propriedade de amortecimento nos principais pontos de ressonância de ~16% a ~57%, dependendo da frequência.

A comparação das propriedades de amortecimento dos objetos é fornecida no exemplo do primeiro ponto de ressonância de 20 Hz:

No ponto atual, a cortiça laminada vibrou com uma amplitude de velocidade - de  $0,68 \cdot 10^{-5}$  m/s e a espuma de polimetacrilimida laminada -  $0,57 \cdot 10^{-5}$  m/s (a diferença de amortecimento ~ 16%). Além disso, na frequência de 60 Hz: amplitude de velocidade da cortiça laminada -  $0,74 \cdot 10^{-5}$  m/s e espuma de polimetacrilimida laminada -  $0,32 \cdot 10^{-5}$  m/s (a diferença de amortecimento ~ 57%). A amplitude da velocidade de deformação nas frequências de 62,5 Hz, 125 Hz, etc., quase não é amortecida pela espuma de polimetacrilimida (\*nalgum ponto ainda mais elevada). *A diferença na amplitude dos materiais confirmou que a espuma de polimetacrilimida é melhor utilizada para amortecer um impulso de impacto do que a cortiça, uma vez que a rigidez e a deformação dos objetos são diferentes. Ao mesmo tempo, o segundo objeto apresenta características próximas para o amortecimento em alguns pontos de ressonância, o que permite concluir que a cortiça laminada pode ser utilizada em algumas tarefas para além da espuma de polimetacrilimida laminada.*

## **4.5. Ensaios de flexão de compósitos estruturados em sanduíche à base de cortiça**

### **4.5.1 Amostras**

Foram fabricados quatro painéis de teste para comparar as diferentes características de flexão dos painéis estruturados em sanduíche. Três deles utilizaram diferentes núcleos de compósitos à base de cortiça. As principais características são apresentadas na Tabela 4.3. Um deles contém um núcleo de espuma de polimetacrilimida. As suas características são apresentadas na Tabela 4.4. Todos os painéis foram revestidos em ambos os lados com um laminado de vidro-plástico uniforme com uma espessura de 0,135 mm. A fibra de vidro utilizada é a Interglas 91110, o seu peso é de 110 g/m<sup>2</sup> e o tipo de tecelagem é em forma de espinha de peixe. É de salientar que os painéis foram revestidos com

tecelagem no mesmo ângulo em ambos os lados. O tecido de fibra de vidro foi impregnado com uma resina epóxi de dois componentes, "Resina Epóxi L + Endurecedor L", e foi comprimido à superfície dos painéis, colocando-os num saco de vácuo selado, onde foi aplicado um vácuo de 820 mbar. Após 14 horas, a pressão no saco foi igualada à atmosférica, mas os painéis só foram retirados após 24 h. Uma imagem dos painéis laminados é apresentada na Figura 4.39.

Tabela 4.3 Características dos compósitos à base de cortiça.

Número do plano de cortiça	1	2	3
Tamanho dos grânulos de cortiça	2-5 mm	0.5-1 mm	2-5 mm
Aglutinante	Poliuretano	Poliuretano especializado	Poliuretano
Densidade	186.1kg/m <sup>3</sup>	165.3 kg/m <sup>3</sup>	357.7kg/m <sup>3</sup>
Resistência à tração	≥500 kPa	≥400 kPa	≥400 kPa
Compressibilidade	10-25 %	30-50 %	5-25 %
Recuperação	≥70 %	≥75 %	≥70 %

Tabela 4.4 Características da espuma de polimetacrilimida.

Nome do Material	CASCELL 30 RS
Densidade	30 kg/m <sup>3</sup>
Resistência à compressão	400 kPa
Resistência à tração	800 kPa
Módulo de elasticidade	38 MPa
Rigidez à flexão	800 kPa
Resistência ao corte	400 kPa
Módulo de corte	15 MPa
Resistência térmica	≥200 °C

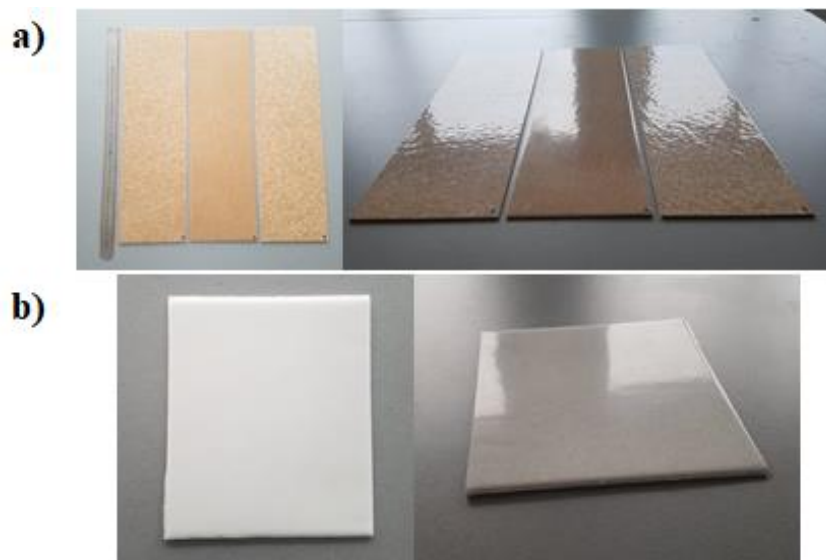


Figura 4.39 a) Painéis sanduíche com diferentes núcleos à base de cortiça; b) Um painel laminado com núcleo de espuma de polimetacrilimida.

As superfícies do painel laminado estruturado em sanduíche com núcleo de compósito à base de cortiça têm uma rugosidade superficial mais elevada do que as superfícies com núcleo de espuma de polimetacrilimida. Vale a pena mencionar que quanto mais pequenos forem os grânulos de um compósito à base de cortiça, mais suave é a superfície.

As amostras são cortadas de cada painel com dimensões 40x75x3mm. Foram fabricados 16 painéis, ou seja, foram obtidas 4 amostras de cada um. Estas foram submetidas a ensaios de flexão. De referir ainda que as amostras foram preparadas rodando a fibra de vidro 0-90° ao longo da direção do lado mais comprido da amostra. A sua imagem é mostrada na Fig. 4.40.

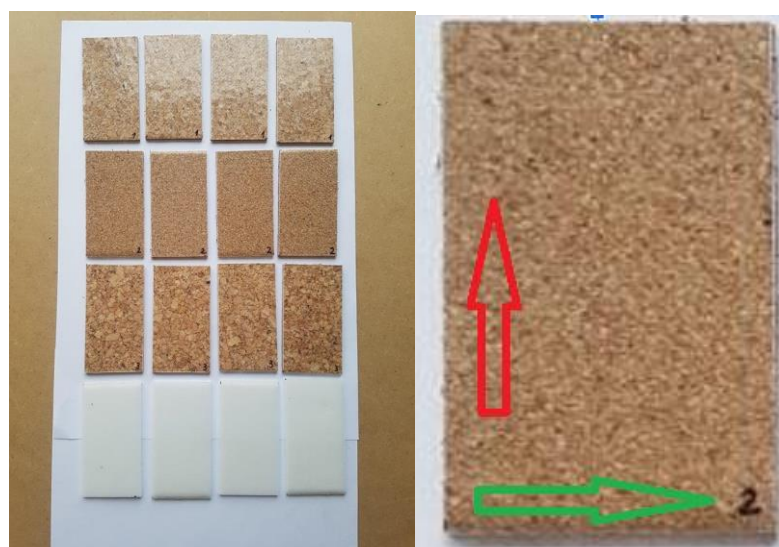


Figura 4.40 Painéis preparados para o ensaio de flexão. A seta vermelha indica 0°, a verde 90°.

#### 4.5.2 Realização de ensaios de flexão

Os ensaios de tração e de flexão foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universal Tira test 2300 com registo digital de dados de ensaio. O software "Catman expresses three" foi utilizado para o registo de dados. Foi utilizado um suporte de flexão de três pontos. A distância entre os rolamentos fixos foi fixada em 50 mm. A velocidade do travessão foi de 2-0,4 mm/min (Fig. 4.41). A espessura e a largura de todas as amostras foram medidas com um paquímetro.



Figura 4.41. O dispositivo de ensaio de flexão.

É essencial preparar o sistema em conformidade para obter resultados exatos nos ensaios práticos. Devido à superfície irregular dos materiais, é necessário fazer uma indentação na amostra durante o ensaio. As amostras são deformadas em 0,3-0,4 mm até começar o carregamento proporcional\*. O gráfico da interdependência entre a deformação e a resistência à tração na amostra 2\_2 é apresentado na Fig. 4.42.

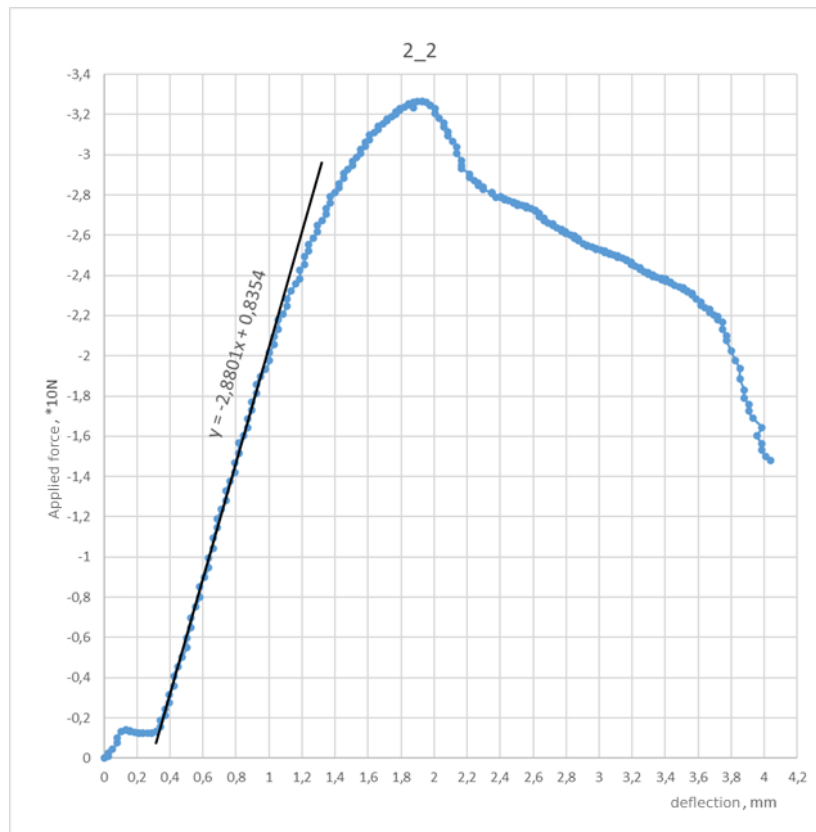


Figura 4.42 A interdependência entre a deformação e a força aplicada na amostra 2\_2.

Dentro dos limites da carga proporcional, foi traçada uma curva aproximada e foram calculados a resistência e o módulo de elasticidade de cada amostra. A tensão ( $\sigma$ ) foi calculada com base na fórmula (Eq.4 .1):

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.1)$$

L - força de flexão; L - distância entre os rolamentos fixos; b - largura da amostra; h - espessura da amostra.

Para o cálculo do módulo de elasticidade, as deformações foram calculadas para os valores de tensão correspondentes  $\epsilon_{f1}=0.0005$  e  $\epsilon_{f2}=0.0025$  (Eq. 4.2).

$$s_i = \frac{\epsilon_i L^2}{6h} \quad (i=1;2) \quad (4.2)$$

$s_i$ - deflexão;  $\epsilon_{fi}$  - valores de tensão dados acima; L - a distância entre os rolamentos fixos; h - espessura da amostra. O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a fórmula (Eq. 4.3):

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (4.3)$$

$\sigma_1$ - tensão no ponto de flexão  $s_1$ ;  $\sigma_2$ - tensão no ponto de flexão  $s_2$ .

### 4.5.3 Comparação dos resultados, análise

A Tabela 4.5 apresenta os dados recolhidos durante os ensaios. Além disso, fornece a  $E_f$  calculada de cada amostra (Figura 4.43).

Tabela 4.5 Tabela dos dados de ensaio.

	h - total thickness	Laminate thickness	Filler thickness	b- width	l - distance	Fm	$\sigma$	$E_f$
	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa	MPa
01 01	2,96	0,135	2,69	40,3	50	60,88	12,93146	10,32732
01 02	2,9	0,135	2,63	40,1	50	59,52	13,23682	11,70209
01 03	2,91	0,135	2,64	40,3	50	57,95	12,73573	11,34853
01 04	2,91	0,135	2,64	40,2	50	56,99	12,5559	11,20888
02 01	2,91	0,135	2,64	40,3	50	31,65	6,95575	6,153586
02 02	2,87	0,135	2,6	40,1	50	32,65	7,413722	6,539743
02 03	2,97	0,135	2,7	40,6	50	33,01	6,913021	6,104861
02 04	2,9	0,135	2,63	40,4	50	31,57	6,968808	6,295767
03 01	3,28	0,135	3,01	40,4	50	91,65	15,81484	9,001601
03 03	3,22	0,135	2,95	40,2	50	76,95	13,84625	10,24622
03 04	3,37	0,135	3,1	40,9	50	82,25	13,28049	8,753336
03 05	3,2	0,135	2,93	40,8	50	83,13	14,9231	9,717874
04 01	2,82	0,135	2,55	40,2	50	27,43	6,435211	11,04473
04 02	2,89	0,135	2,62	40,2	50	27,47	6,136181	9,911932
04 03	2,65	0,135	2,38	40,1	50	26,18	6,972601	10,8347
04 04	2,73	0,135	2,46	40,1	50	26,06	6,539823	10,39721

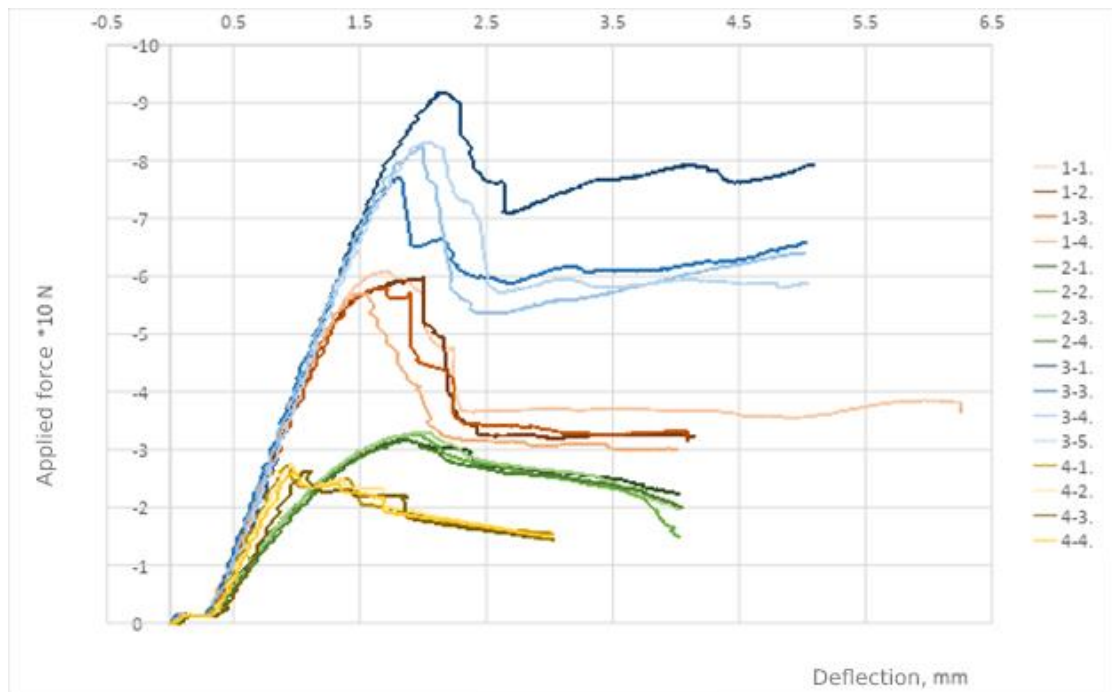


Figura 4.43.  $E_f$  calculado para cada amostra.

Pelos resultados obtidos, o material com a taxa de resistência mais elevada era composto pelos maiores grânulos à base de cortiça. A força de resistência foi 3x superior à do compósito com núcleo de espuma de polimetacrilimida. É de salientar que, à medida que o tamanho dos grânulos à base de cortiça diminuía, a força de flexão suportada também diminuía. A força de flexão das amostras com os grânulos mais pequenos foi 3x inferior à dos compósitos com os grânulos maiores.

#### **4.5.4 Ensaios de tração**

Para os ensaios experimentais, as amostras foram cortadas dos painéis laminados. As dimensões foram selecionadas de acordo com as recomendações dos responsáveis pelos ensaios (Figura 4.44). As formas das amostras foram cortadas dos painéis laminados utilizando uma fresadora (CNC).



Figura 4.44 Fresagem e dimensões da amostra.

O teste foi efetuado fixando as amostras nas amarras. O principal problema durante os testes foi o deslizamento das placas. Devido a este facto, não foram obtidos resultados satisfatórios. Para o segundo ensaio, a fim de evitar o deslizamento das placas, foi colada uma placa de borracha com cola nos pontos de montagem para aumentar a aderência.

#### **4.5.5 Resultados dos ensaios de tração**

Como se pode observar nos resultados apresentados na Tabela 4.6 o material com a taxa de tensão mais elevada foi fabricado a partir de cortiça granulada. A taxa de tensão foi aproximadamente 5% mais elevada do que a do material compósito com núcleo de polimetacrilimida. A taxa de tensão das amostras com os grânulos mais pequenos foi 20 N inferior em comparação com as amostras com os grânulos maiores. No entanto, a resistência da amostra com grânulos médios foi cerca de 10% inferior à da amostra com os grânulos maiores.



Tabela 4.6 Tabela dos dados de ensaio.

	a	b	S <sub>0</sub>	F <sub>m</sub>	R <sub>m</sub>
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	N	MPa
1_1	2.95	10.07	29,7	738,9	2,95
1_2	2.96	10.03	29.7	734.9	2.96
2_1	2.88	10.08	29.0	634.5	2.88
2_2	2.91	10.03	29.2	622.5	2.91
3_1	2.85	10.02	28.6	706.8	2.85
3_2	2.83	10.03	28.4	714.8	2.93
4_1	2.80	10.01	28.0	690.8	2.80
4_2	2.80	10.03	28.1	694.8	2.80

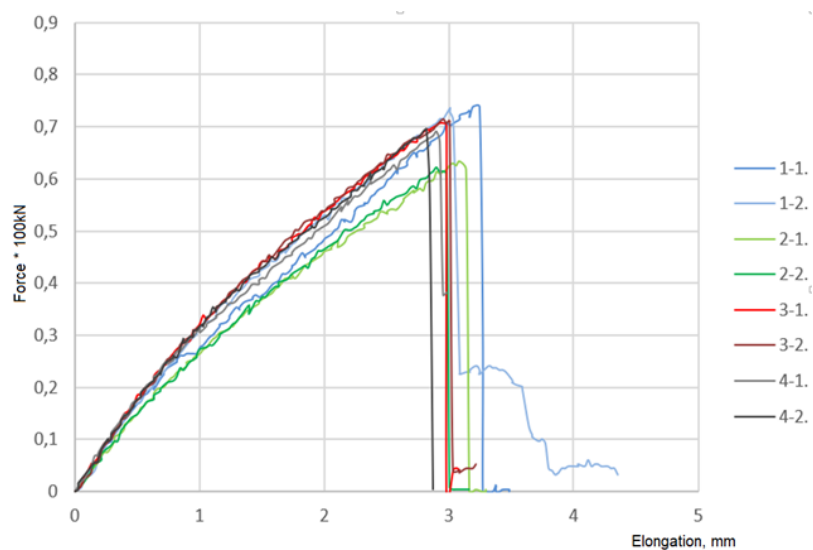


Figura 4.45 A interdependência entre o alongamento e a força aplicada em cada amostra.

Após os resultados de tensão obtidos, foram desenhados os gráficos que mostram a correlação entre o alongamento das amostras e a força de tração (Figura 4.45). Pode ser observado a partir dos gráficos que a força de tração de diferentes amostras é semelhante (os resultados flutuam dentro de limites de 10%), uma vez que depende pouco do material de núcleo de uma estrutura sanduíche.

## Referências

- [1] Fan, J., & Njuguna, J. (2016). An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures. *Lightweight Composite Structures in Transport*, 3–34. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-325-6.00001-3>
- [2] Krzyżak, A., Mazur, M., Gajewski, M., Drozd, K., Komorek, A., & Przybyłek, P. (2016). Sandwich Structured Composites for Aeronautics: Methods of Manufacturing Affecting Some Mechanical Properties. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/7816912>
- [3] Li, Z., & Ma, J. (2020). Experimental Study on Mechanical Properties of the Sandwich Composite Structure Reinforced by Basalt Fiber and Nomex Honeycomb. *Materials*, 13(8), 1870. <https://doi.org/10.3390/ma13081870>.
- [4] Walkowiak, M., Reinicke, U., & Anders, D. (2022). Numerical Investigation of Different Core Topologies in Sandwich-Structured Composites Subjected to Air-Blast Impact. *Applied Sciences*, 12(18), 9012. <https://doi.org/10.3390/app12189012>
- [5] (P6B) - ALU - Panneau sandwich âme en polystyrène expansé by Weiss Chemie | DirectIndustry. (n.d.). <https://www.directindustry.fr/prod/weiss-chemie/product-66508-1338307.html> (accessed Jan. 11, 2023).
- [6] Gil, L. (2015). New Cork-Based Materials and Applications. *Materials*, 8(2), 625–637. <https://doi.org/10.3390/ma8020625>
- [7] Silva, J., Sabatini, R., and Gardi, A.G.M. (2014). Opportunities offered by naturally occurring materials in lightweight aerostructures design, Proceedings of the Practical Responses to Climate Change (PRCC 2014), pp. 1–9.
- [8] Pereira, H. (2015). The Rationale behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry. *BioResources*, 10(3). <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.pereira>
- [9] Gesimondo, N., & James Christopher Postell. (2011). *Materiality and interior construction*. Hoboken, N.J.: John Wiley.

- [10] Utah National Parks Trivet hot Pad Original Text - Etsy. (n.d.). from [www.etsy.com](https://www.etsy.com/listing/573062806/utah-national-parks-trivet-hot-pad?click_key=20412901616b07a04914e36a5a71b3c36f16acc4%3A573062806&click_sum=3bb4c7d7&ref=shop_home_active_9&sts=1) website: [https://www.etsy.com/listing/573062806/utah-national-parks-trivet-hot-pad?click\\_key=20412901616b07a04914e36a5a71b3c36f16acc4%3A573062806&click\\_sum=3bb4c7d7&ref=shop\\_home\\_active\\_9&sts=1](https://www.etsy.com/listing/573062806/utah-national-parks-trivet-hot-pad?click_key=20412901616b07a04914e36a5a71b3c36f16acc4%3A573062806&click_sum=3bb4c7d7&ref=shop_home_active_9&sts=1) (accessed Jan. 11, 2023).
- [11] “Maripaz – 4Spaces.” Maripaz. (n.d.). 4Spaces. <https://www.4spaces.ch/collections/cork-fabrics-and-wallcoverings/products/maripaz> (accessed Jan. 11, 2023).
- [12] Laser Cut Cork – Laser Cut Signs. (n.d.). [https://lasercutsigns.co.uk/dt\\_gallery/laser-cut-cork/](https://lasercutsigns.co.uk/dt_gallery/laser-cut-cork/) (accessed Jan. 11, 2023).
- [13] Silva, J. M., Nunes, C. Z., Franco, N., & Gamboa, P. V. (2011). Damage tolerant cork based composites for aerospace applications. *The Aeronautical Journal*, 115(1171), 567–575. <https://doi.org/10.1017/s0001924000006205>
- [14] About. (2019, July 27). HandBoom. <https://handboom.net/about/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [15] Densities of cork granules - CorkLink - cork products direct from Portugal. <https://www.corklink.com/index.php/densities-of-cork-granules/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [16] Gil, L. (2015b). New Cork-Based Materials and Applications. *Materials*, 8(2), 625–637. <https://doi.org/10.3390/ma8020625>.
- [17] Castanie, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020b). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
- [18] My glider has 4 configurations of wingtips, winglets and wing extensions. Can anyone beat that?! (2020, October 8). Reddit. [https://www.reddit.com/r/aviation/comments/j7atmo/my\\_glider\\_has\\_4\\_configurations\\_of\\_wingtips/](https://www.reddit.com/r/aviation/comments/j7atmo/my_glider_has_4_configurations_of_wingtips/) (accessed Jan. 11, 2023).
- [19] Dimino, I., Gallorini, F., Palmieri, M., & Pispola, G. (2019). Electromechanical Actuation for Morphing Winglets. *Actuators*, 8(2), 42. <https://doi.org/10.3390/act8020042>
- [20] Trabol, J. (2021, December 7). Test: HpH 304 Shark MS. Nordic Gliding. <https://nordicgliding.com/ng-tester-hph-304-shark-ms/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [21] Modern Aviation. (n.d.). 2001 Falcon 2000. <https://modern-aviation.com/product/2001-falcon-2000/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [22] Ramec - Materiali Ecologici da Costruzione. (2017, December 14). Superlight panel - Pannello sandwich, Okoumè, sughero compatto biondo. R.A.M.E.C - Materiali Ecologici E Da

- Costruzione. <https://www.ramec.it/prodotti/superlight-panel-pannello-sandwich-okoume-sughero-compatto-biondo/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [23] Grōwancork - Projetos customizados. (n.d.). <https://www.growancork.com/projetos/projetos-customizados-4/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [24] Kamščio produktu ekspertai! (n.d.). Dekoratyvine kamÂštinė danga NATŪRALUS 3D STRIPE - BESTSELLER! KamČio Produktu Ekspertai! <https://www.kamstiena.lt/parduotuve/139-stripes/571-dekortyvine-kamstine-sienu-danga-fiord-exclusive-3x300x600mm-pakelis-198m22/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [25] Lakreb, N., Knopic, S., Machado, J. S., Bezzazi, B., & Pereira, H. (2017). Properties of multilayered sandwich panels with an agglomerated cork core for interior applications in buildings. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 143–153. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1198-3>
- [26] Griffe Clik Cork. (n.d.). Mcbike. <https://mcbike24.de/Griffe-Clik-Cork/1026771> (accessed Jan. 11, 2023).
- [27] Anti Vibration Mounting Pad. (n.d.). [indiamart.com. https://www.indiamart.com/proddetail/anti-vibration-mounting-pad-15429567862.html](https://www.indiamart.com/proddetail/anti-vibration-mounting-pad-15429567862.html) (accessed Jan. 11, 2023).
- [28] Wingren, N., & Sjoberg, D. (2022). Nondestructive Testing Using mm-Wave Sparse Imaging Verified for Singly Curved Composite Panels. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tap.2022.3211341>
- [29] Kim, B. J., Kim, J., Cha, S. H., Shim, Y. B., Jeong, C., Kim, N., & Park, Y. B. (2021). Interfacial enhancements between a three-dimensionally printed Honeycomb-Truss core and woven carbon fiber/polyamide-6 facesheets in sandwich-structured composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 149, 106534. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106534>.
- [30] Ge Qi, L.M. and Jin-Shui, Y. (2016). Development of the lightweight inserts for composite sandwich panels with pyramidal truss cores Conference: ECCM17-17th European Conference on Composite Materials.
- [31] Yam, K. L. (2009). *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*. Wiley.
- [32] Jadhav, P., Quabili, A., Molligan, D., Andersen, S. and Gillespie Jr., J.W. (2007). Mechanical Characterization of Adhesively Bonded Metallic Insert Joints in Vinyl-Ester Balsa core Sandwich Panels, in American Society for Composites – 22nd Annual Technical Conference, 2007.

- [33] PCC Fasteners - Sandwich Structure Fasteners. (n.d.). <https://www.pccfasteners.com/products/product-categories/specialty-fasteners/fasteners-for-sandwich-structure/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [34] Castanie, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
- [35] Flitney, R. K. (2014). *Seals and Sealing Handbook*. Elsevier.
- [36] Kumar, T., Mohsin, R., Majid, Z. A., Ghafir, M. F. A., & Wash, A. M. (2020). Experimental study of the anti-knock efficiency of high-octane fuels in spark ignited aircraft engine using response surface methodology. *Applied Energy*, 259, 114150. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114150>
- [37] Chuck, C. J., & Donnelly, J. (2014). The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene. *Applied Energy*, 118, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.019>
- [38] Erickson, J., Brewer, P., Friederich, G., & Peltzer, E. (2002). Design and operation of a pressure retaining sampler for sedimentary gases and gas hydrates. MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295). <https://doi.org/10.1109/oceans.2001.968374>.
- [39] Fernandes, E., Pires, R., & Reis, R. (2017). Cork biomass biocomposites. *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials*, 365–385. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100959-8.00017-2>
- [40] Cork Gasket Material | Types & Thicknesses. (2021, November 6). RAM Gasket Solutions. <https://www.ramgaskets.com/gasket-materials/cork-gasket-material/> (accessed Jan. 09, 2023).
- [41] Portugal, F. (n.d.). Automotive industry. Amorim Cork Composites. <https://amorimcorkcomposites.com/en/materials-applications/sealing/industries-applications/automotive/> (accessed Jan. 09, 2023).
- [42] Parr, E. A. (2011). *Hydraulics and pneumatics : a technician's and engineer's guide*. Amsterdam ; Boston: Butterworth-Heinemann..
- [43] Santra, R. N., Roy, S., Tikku, V. K., & Nando, G. B. (1995). In-situ compatibilization of thermoplastic polyurethane and polydimethyl siloxane rubber by using ethylene methyl acrylate copolymer as a reactive polymeric compatibilizer. *Advances in Polymer Technology*, 14(1), 59–66. <https://doi.org/10.1002/adv.1995.060140106>
- [44] Ashton Seals. (n.d.). CORK. <https://www.ashtonseals.co.uk/gaskets-cork> (accessed Jan. 12, 2023).

- [45] Silicone Gaskets - Real Gaskets Tennessee. (2022, August 3). Valve Cover Gasket - Lycoming engines O-235 thru TIO-540. <https://realgaskets.com/product/valve-cover-gasket-6-holes-2/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [46] Woodyard, D. (2009). Theory and General Principles. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines, 1–40. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8984-7.00001-1>
- [47] Karpenko, M., & Nugaras, J. (2022). Vibration damping characteristics of the cork-based composite material in line to frequency analysis. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 593–602. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/152970>

## CAPÍTULO 5

### Aplicações Aeronáuticas/Aeroespaciais dos Compósitos de Cortiça

*Elvin Ragimov<sup>1</sup>, Mehmet Alper Sofuoğlu<sup>2,\*</sup>, Selim Gürgen<sup>3</sup>, Melih Cemal Kuşhan<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, University of Leeds, UK

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir, Turkey

<sup>3</sup>Department of Aeronautical Engineering, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir, Turkey

\*Correspondência: asofuoglu@ogu.edu.tr

#### Resumo

A cortiça é uma matéria-prima natural, renovável e de longa duração que tem sido utilizada há muito tempo. A literatura académica sobre a cortiça é substancial devido a este prolongado interesse. A maioria dos estudos concentra-se na estrutura química da cortiça, nas capacidades mecânicas e físicas, e nos produtos e subprodutos. A começar pelo seu crescimento, histologia e estrutura, as extensas tentativas de caracterizar minuciosamente a cortiça e os novos avanços e desenvolvimento da investigação são abordados (em micro e macro escalas). Em seguida, as qualidades distintivas da cortiça são examinadas e comparadas com outros materiais utilizados em indústrias semelhantes. Tem-se tentado descrever porque é que a cortiça é melhor do que outros materiais em vários aspetos. A resistência à tração, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson são abordados em várias aplicações reais ao mesmo tempo que se abordam as suas características mecânicas nesta investigação. As características mecânicas e térmicas dos compósitos de cortiça e a sua utilização atual em aplicações aeroespaciais são os tópicos desta revisão. Finalmente, é discutida a futura utilização destes compósitos amigos do ambiente.

**Palavras-chave:** Compósitos de cortiça, ambientalmente sustentável, aplicações aeroespaciais.

#### 5.1. Introdução

A procura de melhores materiais naturais com propriedades específicas na engenharia é vital para os investigadores. Em diferentes linhas de engenharia e aplicações de design, um dos materiais naturais mais conhecidos é a cortiça, demonstrando o incrível potencial para alterar os materiais celulares sintéticos. Além disso, o mundo moderno testemunhou a consciência dos consumidores, políticas governamentais, e tendências "amigas do ambiente" que exigem que os fabricantes assegurem variantes recicláveis para as soluções de mercado. No século XVI, Robert Hooke investigou a cortiça e desenhou camadas de observações microscópicas. Os resultados da investigação foram publicados em 1665. Como mencionado na investigação, pequenas estruturas no material de cortiça são denominadas células. A célula vem do latim, e o seu significado é uma pequena sala. Na Figura 5.1, o desenho de Hooke pode ser visto. Durante esse período, este desenho pôde fornecer-nos informações sobre muitas características

topológicas das células de cortiça. A cortiça tem sido utilizada pelo homem há mais de 5000 anos como uma matéria-prima natural, renovável e sustentável. A humanidade utiliza materiais de cortiça para as suas necessidades diárias em todo o mundo, tais como recipientes de selagem, ferramentas de pesca, e sandálias. O uso moderno como rolha de cortiça surge graças ao monge beneditino Dom Perignon, na primeira parte do século XVII. A atualização da investigação em cortiça foi alterada da forma de relação cortiça-vinho para a forma de alta capacidade, pensamento da natureza, aplicação de resíduos da indústria da cortiça, e compósitos. No século XXI, é utilizada para várias implementações, não só como rolha de cortiça, mas também como material aeroespacial, graças aos compósitos utilizados para pavimentos, revestimentos e várias aplicações industriais, esculpindo uma parte significativa de materiais de cortiça. É também um material de construção versátil com propriedades tais como leveza, elasticidade e resiliência, bem como impermeabilidade, isolamento, resistência ao desgaste, qualidades ignífugas, propriedades hipoalergénicas, e durabilidade que o distinguem da madeira e da pedra [1].

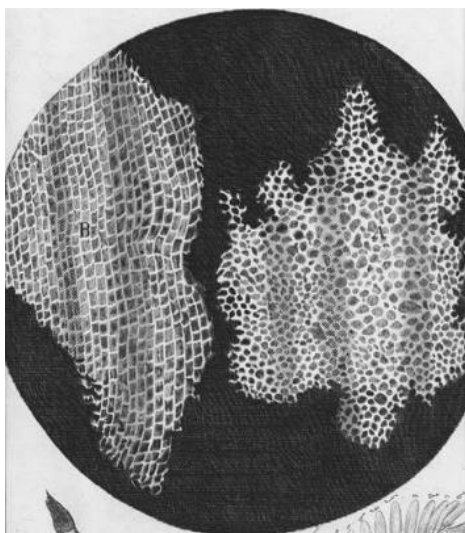


Figura 5.1 Desenho de uma célula de cortiça através de uma perspetiva microscópica [2].

A parte rígida que fornece capacidades cruciais à cortiça está contida nas faces de cada fase prismática. Estas fases prismáticas são chamadas células, e o deslocamento biossintético de um polímero combinam-se. Além disso, a forma dos materiais sólidos da célula não é homogénea. Este tipo de estrutura manifesta-se ao nível infra microscópico devido à composição dos componentes químicos e à disposição desses componentes no espaço, para além do processo de desenvolvimento biológico envolvido. A estrutura celular da cortiça é única. Os plásticos espumados têm células mais pequenas e mais finas do que a cortiça. Uma célula média ideal teria as seguintes dimensões: 40  $\mu\text{m}$  da altura do prisma, 20  $\mu\text{m}$  do bordo de base, 1  $\mu\text{m}$  da espessura da parede celular, duas a três ondulações por face lateral do prisma, um comprimento de onda de 15  $\mu\text{m}$ , e uma amplitude de 5-6  $\mu\text{m}$ . As paredes celulares da cortiça são flexíveis a um grande grau e irão corruçar ou ondular sob compressão a um grau variável. Além disso, em comparação com as primeiras células de cortiça, as células de cortiça tardia de parede espessa e curta são muito mais sólidas e resistentes. Na Figura 5.2, a estrutura da cortiça virgem é demonstrada.



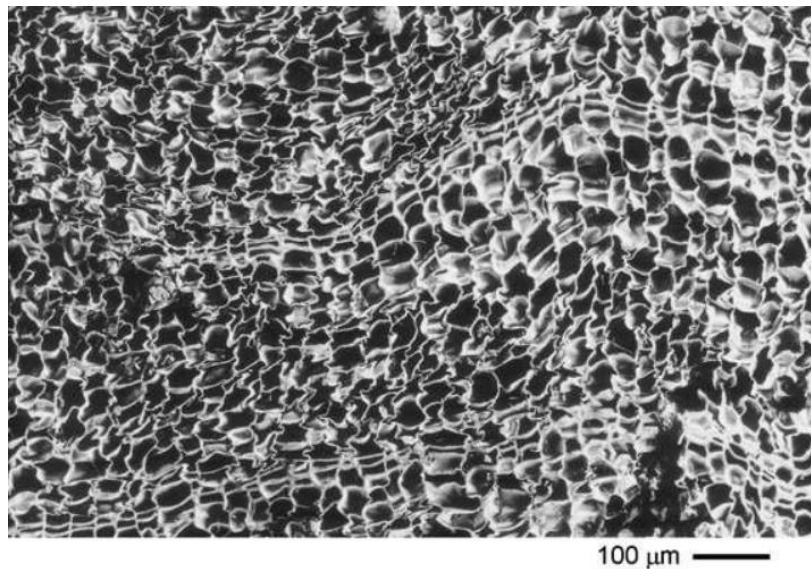


Figura 5.2 A estrutura de cortiça virgem [1].

As várias implementações de materiais de cortiça são investigadas por diferentes investigadores. A resposta mecânica da cortiça aglomerada em diversas situações foi o tema de Jardin et al. [3] e Santos et al. [4]. Além disso, pesquisaram a dependência da densidade, do tipo de ligante, e do tamanho do grão do material de cortiça expandida na caracterização do compósito. Costas et al. [5] analisaram o compósito de cortiça como um componente absorvente de impacto híbrido de automóvel frontal. Para além da produção de absorvedores, a cortiça aglomerada foi utilizada para moldar redutores de impacto lateral em veículos rodoviários para garantir a segurança. A investigação foi conduzida por Tay et al. [6]. Sanchez-Saez et al. [7] estudaram os impactos balísticos das estruturas do núcleo feitas pela cortiça.

A casca de um sobreiro é utilizada para produzir cortiça, que é uma substância à base de árvores. A cortiça é extraída da camada mais externa da casca das árvores, da qual é retirada de forma intacta e isto acontece a cada 9-12 anos quando o produtor tem a certeza de que a camada atinge a largura necessária. A casca é recolhida por pessoal qualificado, permitindo que a árvore cresça outra camada de casca exterior que possa ser recolhida no futuro. Portanto, a cortiça pode ser recolhida 17 vezes durante a vida de um sobreiro, durando 200 anos. A cortiça não é apenas um recurso natural, mas também um material reciclável e renovável. Por outras palavras, é um material totalmente "verde" com uma pegada de carbono negativa devido ao seu período de produção, ou ciclo de vida da árvore. 2.1 milhões de hectares são cobertos com sobreiros na bacia Mediterrânica, sendo Portugal o lar de um terço de todos os sobreiros a nível mundial. A produção de sobreiros em Espanha e Portugal é de aproximadamente 30.5% e 49.6% do total de matérias-primas, respetivamente. Por esta razão, a cortiça é a matéria-prima para as cadeias industriais integradas que são de grande importância económica para estes países.

A proporção do volume sólido de cortiça é de aproximadamente 15% do seu volume total, responsabilidade da sua propriedade de célula fechada. Além disso, a proporção do volume sólido é menor do que o volume de gás. Outro aspeto importante é a produção de cortiça aglomerada. Os grãos de cortiça são misturados com resinas termoendurecíveis de poliuretano para formar a cortiça

aglomerada. A pressão, o calor e o aglutinante desempenham um papel significativo na determinação das propriedades do material. Uma vez aglutinados os grânulos, a mistura é comprimida e aquecida a temperaturas entre 110°C e 150°C. Mudanças extremas na resposta mecânica sob cargas compressivas surgem em função do tipo e quantidade do compósito [4]. É amplamente conhecido que o aglomerado foi testado quanto às suas propriedades mecânicas, térmicas e acústicas na produção de rolhas de cortiça.

A aplicação de material de cortiça a outros sectores continua a expandir-se. A fim de utilizar compósitos à base de cortiça no sector aeroespacial, devem ser consideradas propriedades particulares relativamente ao seu desempenho sob temperaturas extremas [8]. A fraca condutividade térmica da cortiça e a sua elevada resistência à compressão fazem dela um material ideal para isoladores térmicos em foguetes, estúdios de gravação, isolamento acústico em submarinos, motores de combustão, e placas de solo absorventes de energia.

Este capítulo está dividido em quatro secções. As características gerais dos compósitos de cortiça são examinadas na segunda secção deste capítulo. As características mecânicas e térmicas do material de cortiça são explicadas. Em seguida, a terceira secção explica as utilizações atuais dos compósitos de cortiça na indústria aeroespacial com exemplos. Finalmente, as potenciais aplicações de materiais de cortiça são discutidas em termos de aplicações aeroespaciais. A conclusão é dada no final da secção.

## **5.2 Propriedades Gerais dos Compósitos de Cortiça**

Os compósitos de cortiça são obtidos através do processamento do produto de cortiça com vários métodos. Em geral, são estruturalmente semelhantes aos compósitos já utilizados na engenharia. As propriedades da estrutura do compósito dependem da forma como o material compósito é produzido e das propriedades e concentrações das camadas e materiais que compõem o compósito. Neste contexto, os compósitos de cortiça têm propriedades tais como baixa densidade, isolamento térmico e sonoro, e amortecimento de impacto que os materiais de cortiça têm.

Para utilização em diferentes sectores, os compósitos de cortiça são fabricados graças a vários métodos para obter diferentes propriedades físicas e mecânicas. Estes métodos diferem dependendo da forma como o material de cortiça é processado e como a estrutura do compósito é produzida. Os materiais compósitos podem ser mais ou menos diversificados para os seus tipos de produtos e métodos de união de acordo com o uso geral. Em termos do processo de produção, os materiais de cortiça podem ser diversificados como moídos, quebrados e prensados. Além disso, os materiais são nomeados com base nos seus métodos de união, tais como sanduíche, multicamadas, ou aglutinantes.

Uma vez que os compósitos de cortiça são semelhantes às propriedades físicas e mecânicas da cortiça em termos de propriedades gerais, as vantagens de utilizar compósitos de cortiça estão diretamente relacionadas com as propriedades do material de cortiça.

Portanto, as vantagens oferecidas pelos compósitos de cortiça são avaliadas de acordo com a área de aplicação. Nesta secção, as características mecânicas e térmicas dos compósitos de cortiça serão avaliadas e investigadas de diferentes perspectivas [9].

### 5.2.1 Propriedades Mecânicas/Físicas

A cortiça possui propriedades extraordinárias, tais como baixa condutividade, extrema compressibilidade, baixa densidade, permeabilidade relativamente baixa a líquidos e gases, estabilidade química, e durabilidade. Além disso, a cortiça é anisotrópica em termos da orientação das suas células, pelo que as propriedades mostram diferenças entre as medições juntamente com as direções radiais (R, coincidente com o eixo radial do prisma) e não radiais (N.R., plano perpendicular). No entanto, as proporções de anisotropia da forma são pequenas, e as propriedades relacionadas com isso são muito inferiores às de outros materiais. Foram observadas várias propriedades mecânicas no material de cortiça. Na Tabela 5.1, são apresentadas algumas das propriedades cruciais do material de cortiça.

A curva de compressão é representada num gráfico em três porções (Figura 5.3). Cada porção está ligada a um de três mecanismos que controlam as propriedades dos materiais celulares flexíveis [10],[11]. A primeira área, que demonstra a flexão elástica das paredes celulares, ocorre até 7% de deformação. Em segundo lugar, um planalto horizontal cobre cerca de 70% da deformação. Finalmente, devido à flexão gradual das paredes celulares, ao esmagamento das paredes celulares, e à completa decadência das células, a curva começa a subir verticalmente [10],[11].

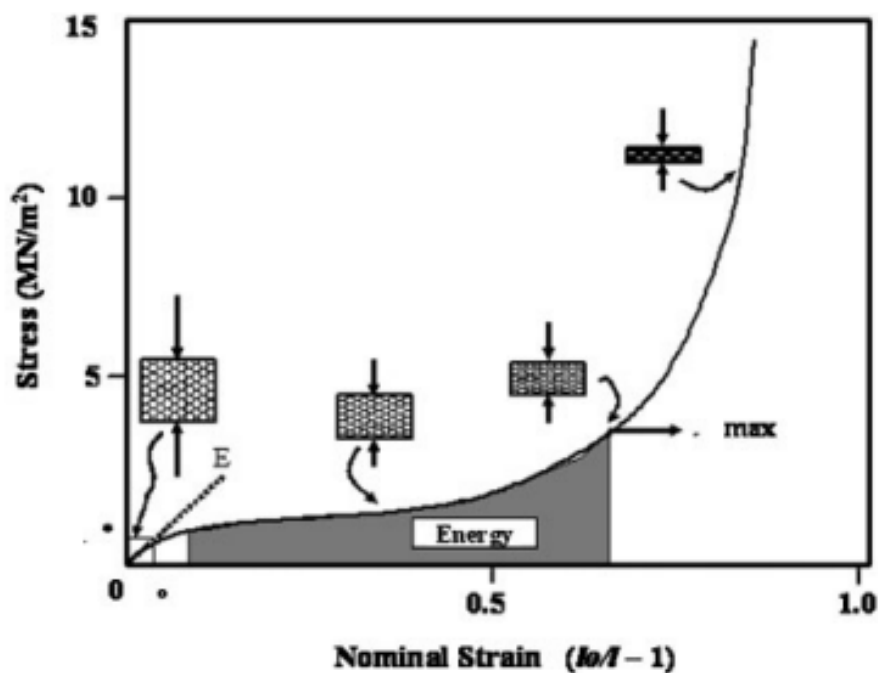


Figura 5.3 Curva tensão-deformação de um compósito de cortiça à compressão [16].

Tabela 5.1 Propriedades mecânicas da cortiça.

Reference	Mechanical Property	Value
Gibson et al. [10]	Fracture strain under tension, %	5 (R) 9 (N.R.)
Gibson et al. [10]	Fracture stress under tension, MPa	1.0 (R) 1.1 (N.R.)
Rosa and Fortes [11]	Fracture toughness, boiled, MPa $m^{1/2}$	60–130
Gibson et al. [10], Fortes and Nogueira [12]	Poisson's ratio, boiled	0–0.097 ( $v_{R/N.R.}$ ) 0–0.064 ( $v_{NR/R}$ ) 0.26–0.5 ( $v_{NR/N.R.}$ )
Rosa et al. [13]	Young's modulus, boiled, MPa	6 (R) 8–9 (N.R.)
Rosa and Pereira [14]	Young's modulus, heat-treated at 150 °C, MPa	15 (R) 14 (N.R.)
Rosa and Fortes [11]	Tensile modulus, boiled, MPa	38 (R) 24–26
Gibson et al. [10]	Collapse (buckling) strain, %	4 (R) 6 (N.R.)
Gibson et al. [10], Vaz and Fortes [15]	Collapse (buckling) stress, boiled, MPa	0.75–0.8 (R) 0.6–0.7 (N.R.)

Quando ocorre um elevado nível de compressão com grandes deformações no material, aliviando a tensão, a recuperação começa substancialmente. É sabido que a densidade tem um impacto significativo nas propriedades de compressão da cortiça. A resistência compressiva da cortiça em várias direções não é muito elevada. No entanto, a resistência mecânica é maior na direção radial [16], [17], [18].

Como foi mencionado anteriormente, a disposição estocástica e aleatória das células, bem como a ondulação que ocorre nas paredes laterais das células, apresentam impacto no coeficiente de Poisson, que pode alterar as propriedades variáveis da cortiça em diversas aplicações da mesma [12], [18]. Quando o material é esmagado no sentido radial, as corrugações forçam as paredes celulares a dobrar e embalar, aumentando a amplitude da corrugação e alinhando as bases celulares no sentido radial. Quando a compressão se alinha na direção N.R., as células laterais dobram, endireitam, e invertem o

padrão de ondulação em deformações altas, resultando em mudanças na direção R e uma relação Poisson negativa para elevadas deformações [12]. Sabe-se que as pranchas de cortiça têm espessuras diferentes devido ao seu ambiente de crescimento. A espessura tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas [19],[20]. Por exemplo, os diâmetros maiores das células reduzem a resistência à compressão e o módulo no processo de prensagem.

A forma celular alveolar da cortiça é semelhante à de um favo de mel. Portanto, as células de cortiça consistem em suberina, celulose e lignina. Devido à sua estrutura celular, os materiais à base de cortiça têm excelentes propriedades mecânicas [21]. Pereira et al. [22] realizaram experiências e forneceram dados sobre as propriedades mecânicas da cortiça natural. A resistência à compressão e o módulo específico da cortiça natural são superiores às espumas poliméricas flexíveis e outras espumas rígidas. Além disso, quando a resistência à compressão e a baixa condutividade térmica são combinadas, o material transforma-se em excelentes formas. Este material ecológico mostra uma capacidade perfeita contra ondas térmicas e cargas compressivas.

A permeabilidade do material de cortiça a gases não condensáveis como o hélio não é elevada [23],[24]. A cortiça tem uma baixa taxa de transferência de calor devido à enorme ocorrência de ar e às pequenas dimensões das células. Várias formas fornecem transferência de calor através do material, tais como convecção de gás, radiação, ou condução através da fração sólida. Nos compósitos de cortiça, a barreira para a convecção do gás é formada por células pequenas e fechadas, e a radiação é esgotada pela absorção nas numerosas células. Para a transmissão do som, a absorção é elevada, uma vez que a resistividade acústica é de  $1.2 \times 10^5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Tabela 5.2) [1],[16].

Esta resistência acústica está relacionada com as características da superfície, embora a cortiça seja um material hidrofóbico com baixa “*wettability*” em relação a líquidos polares como a água. Nomeadamente, para líquidos não polares, demonstra uma alta afinidade com uma energia superficial de  $18 \text{ mN m}^{-1}$ [25].

Na última década, para determinar as propriedades e caracterização da cortiça, vários projetos foram levados a cabo por investigadores. Existem alguns modelos para compreender as propriedades mecânicas da cortiça em termos de mineração de dados e técnicas de “*machine learning*” quando o material está sob carga compressiva [26]. As primeiras e principais experiências foram realizadas no século passado por vários estudos [27]-[31].

Ao comparar a cortiça com outros materiais, por um lado, a cortiça natural tem propriedades mecânicas mais pobres do que vários materiais nucleares como as espumas sintéticas. Por outro lado, devido a algumas características e aplicações específicas, a cortiça pode superar outros materiais. Ao comparar a resistência específica à compressão ( $\sigma/\rho$ ) e o módulo específico ( $E/\rho$ ), a cortiça tem melhor comportamento mecânico do que as espumas de polímeros flexíveis. Além disso, a sua baixa condutividade térmica funde-se com a sua resistência à compressão. Como resultado, um material para

proteção térmica é obtido. Este material poderia também ser apropriado para placas sujeitas a cargas compressivas [32]. Na Tabela 2, é demonstrada a caracterização geral da cortiça.

Tabela 5.2 Propriedades gerais dos materiais de cortiça.

Reference	General properties	Value
Medeiros [33]	Acoustic resistivity ( $\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$ )	$1.2 \times 10^5$
Fortes and Nogueira [12]	Electrical conductivity (S/m)	$1.2 \times 10^{-10}$ (25 °C) $1.6 \times 10^{-13}$ (50 °C)
Vaz and Fortes [15]	Friction coefficient (cork/cork), boiled	0.97 (R) 0.77 (N.R.)

Castro et al. [32] pesquisaram a forma possível de produzir um novo compósito de cortiça aglomerada com diferentes granulometrias e compararam-no com os materiais comercialmente disponíveis. Foram fabricadas três variedades diferentes de cortiça composta a partir de grânulos de diferentes tamanhos e resina epóxi para melhorar a resistência. Os tamanhos dos grânulos são os seguintes: tamanho pequeno (2/3), mistura (mistura de grânulos pequenos e grandes), e tamanho grande (3/4). A principal questão é a dificuldade do método em termos de quantidade de aglomeração e proporção de resina epoxídica. No entanto, quando os ingredientes desejados são combinados, os resultados ideais podem ser alcançados. Consequentemente, após várias tentativas dependendo do número de grânulos, determinou-se que a taxa de resina apropriada se situava entre 24% a 30%. O processo de provisionamento começa com uma combinação de granulado de cortiça, e as taxas de resina estão listadas na Tabela 5.3. A seguir, vários materiais foram moldados e cobertos com chapas de aço antes de serem prensados. A última fase é colocar a mistura moldada num forno a uma temperatura constante de 80°C durante cerca de 2 horas e depois esperar que o nível de cura atinja o valor desejado.

De acordo com Castro et al. [32], um teste de flexão de três pontos demonstrou que o tamanho do grânulo não afeta a resistência à flexão e a tensão de corte. De acordo com o resultado do teste, os compósitos cortiça-epóxi mostram uma tensão de cisalhamento do núcleo crucialmente melhor, diminuindo a área de propagação da fratura. Como resultado desta característica, os aglomerados de cortiça poderiam ser colocados em cima de várias construções de materiais sanduíche. Os resultados dos testes de impacto revelaram que os compósitos de materiais sanduíche de cortiça podiam suportar cargas elevadas. Além disso, a capacidade de recuperação de materiais sanduíches à base de cortiça não é afetada pelo tamanho do grânulo ou pelo método de fabrico. Ao comparar compósitos à base de cortiça com espumas de ultra-desempenho, os compósitos sanduíche à base de aglomerados de cortiça modificados têm uma maior capacidade de absorção e um limiar de dano mais baixo.

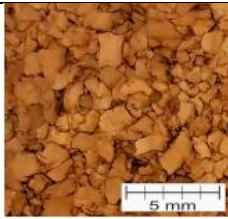
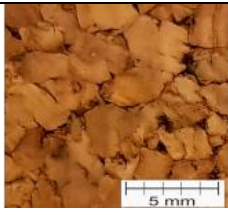
Tabela 5.3 Fatores de preparação dos aglomerados de cortiça.



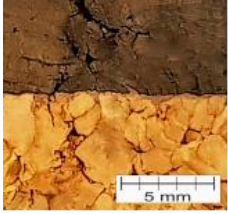
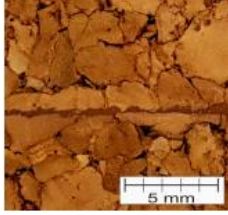
Cork agglomerate type	Resin percentage by weight	Agglomeration pressure [bar]	Cork granule mass [g]	Cure process
Small (2/3)	24%	50	270	2 hours (at 80°C)
Large (3/4)	24%	60	270	2 hours (at 80°C)
Blended (mixed)	30%	15	150	2 hours (at 80°C)

### 5.2.1.1 Alterações das Propriedades Mecânicas em Função da Temperatura

Kaczynski et al. [33] estudaram a alteração das propriedades mecânicas de acordo com as mudanças de temperatura. Vários compósitos de cortiça foram utilizados para examinar as propriedades mecânicas em diferentes condições nestes ensaios (Tabela 5.4). Também foi analisada experimentalmente a dependência do material da temperatura de ajustamento, do forno, e de um conector de arrefecimento de azoto. As peças de cortiça foram aquecidas até 100°C, e com a ajuda do azoto, a temperatura foi reduzida para -30°C. A velocidade inicial de impacto foi de 9.2 m/s, e o Instron Dynatup 9250HV foi utilizado para os testes de queda. Os testes foram realizados utilizando três amostras de cada tipo de cortiça. O diâmetro do impactor é de 50 mm, e o peso total é igual a 11.2 kg. Todas as amostras têm uma secção transversal de 50 mm × 50 mm e 60 mm de altura. Os testes de queda foram registados com uma câmara Phantom V12 que possui uma velocidade de fotogramas de 10 000 fps de 40 µs para temperaturas negativas e 50 µs de acordo com temperaturas elevadas.

Tabela 5.4 Caracterização mecânica e valores de energia de impacto de diversos materiais de cortiça em função da temperatura [33].

Cork Name Grain size [mm] Density [ kg/m <sup>3</sup> ]	Impact Energy [J]	Temperature [°C]	Section
AC199A 199 0.5–2	100	24	
AC216 216 2-4	100 500	For 100 J: 24 For 500 J: -30; -15; 0; 24; 100	

EC159_AC199A n.a. n.a.	100	24	
EC159 159 4-10	100 500	For 100 J: 24 For 500 J: -30; -15; 0; 24; 100	
EC159_AC216 n.a. n.a.	100	24	
EC159_AC216 n.a. n.a.	100	24	

Além disso, Kaczynski et al. [33] realizaram um estudo para compreender a interação entre a temperatura, a compressão e as características das células de cortiça. Todos os movimentos de amostras ligados à influência da compressão foram capturados e analisados utilizando a câmara de alta velocidade. Previa-se que as paredes das células de cortiça se curvariam e potencialmente colapsariam durante a fase de compressão. As amostras foram esmagadas a temperaturas que variavam entre  $-30^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ . Durante o processo de teste, foram visíveis fissuras a todos os graus de compressão, exceto  $-30^{\circ}\text{C}$ . De acordo com os resultados dos testes, a resistência à rutura da cortiça depende diretamente da temperatura. Consequentemente, os investigadores alegaram que o aumento da temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  para  $100^{\circ}\text{C}$  reduziu a absorção de energia em menos de 25%. Por conseguinte, os materiais de cortiça em locais seguros ou no sector aeroespacial precisam de ser ajustados às condições ambientais. As propriedades de absorção de energia e de alteração de temperatura dos compósitos de cortiça estão relacionadas de forma linear, permitindo aos fabricantes garantir a segurança através de cálculos de dados adequados. Outro aspeto importante é o impacto do tamanho do grão na energia em diferentes materiais de cortiça. Os resultados mostram que o tamanho do grão tem um efeito substancial na resistência à rutura da cortiça. A razão é a cola de poliuretano, que é uma técnica de ligação. De acordo com os autores, a quantidade de cola muda com a granulometria do grão. À medida que a temperatura é elevada a  $100^{\circ}\text{C}$ , a viscosidade da cortiça aumenta, fazendo com que a substância perca as suas propriedades adesivas. Além disso, a separação do grão ocorre a nível microestrutural devido a isto.



Portanto, se o tamanho do grão for grande, os perigos são dignos de nota à medida que a temperatura aumenta. A temperatura é a variável mais influente que tem um impacto significativo nas características mecânicas da cortiça sob tensão dinâmica. Como resultado, estas descobertas demonstram que avaliar o material de cortiça em várias condições de compressão e temperatura antes de o utilizar no fabrico é uma etapa crítica. Relativamente ao seu comportamento mecânico, há um estudo sobre os impactos da alteração da temperatura nos intervalos energéticos do aglomerado entre 120 J e 850 J a 21 - 50°C [31], [34], [35].

### **5.3 Utilizações Atuais da Cortiça em Aplicações Aeronáuticas/Aeroespaciais**

As propriedades materiais da cortiça e o facto de os compósitos de cortiça poderem ser produzidos com os métodos desejados tornam este grupo de produtos adequado para utilização na aviação e especialmente na indústria aeroespacial. Os compósitos de cortiça são utilizados principalmente em aplicações que estão expostas a cargas relativamente baixas e onde se procuram propriedades como isolamento térmico ou vibratório, amortecimento de impactos, leveza e impermeabilidade. A utilização de material de cortiça nos sectores automóvel e industrial é bem conhecida. A utilização de compósitos de cortiça na indústria aeroespacial tem diversificado ao longo dos anos e evoluirá para áreas mais diferentes com estudos em curso. A utilização mais intensiva de engenharia do grupo de materiais de cortiça é o revestimento da carroçaria e de várias partes de naves espaciais para fins de isolamento térmico. Foram feitos e estão a ser realizados múltiplos projetos para a utilização de materiais de cortiça em corpos de aviões e outras áreas da aviação. Por exemplo, os escudos de proteção térmica de alguns mísseis e naves espaciais são feitos de cortiça. Além disso, em termos da capacidade ignífuga da cortiça, esta é utilizada em navios de guerra e no revestimento interno de submarinos [36].

Os componentes dos sistemas aeroespaciais são normalmente concebidos para baixo peso, alta resistência, e maior tolerância a danos. É possível alcançar estas características escolhendo corretamente os materiais. Avanços recentes colocaram os materiais à base de sanduíche no topo da lista de materiais candidatos para aplicações aeronáuticas. Além disso, os componentes sanduíche, tais como componentes de flexão, compressão e impacto, têm maior rigidez e melhor desempenho sob as condições de carga especificadas. Os compósitos reforçados com fibras à base de polímeros são materiais comuns utilizados para fazer componentes sanduíche, e são acoplados a diferentes tipos de materiais de núcleo de baixa densidade, tipicamente madeira balsa, favos de mel, e espumas poliméricas. Como esperado, os materiais de núcleo são escolhidos principalmente pela sua baixa densidade, alto módulo de elasticidade, resistência maciça perpendicular às faces, e boa capacidade de isolamento térmico e acústico. Neste caso, como material natural, a cortiça preenche estes requisitos devido à sua morfologia celular intrínseca, sugerindo que os aglomerados à base de cortiça podem ser considerados uma opção de material alternativo. Claramente, a resistência de uma célula de cortiça é comparável a algumas espumas sintéticas, e a resistência específica da cortiça é muito mais elevada. Além disso, tem baixa condutividade térmica, bem como uma razoável resistência à compressão, tornando-a uma

excelente escolha para isolamento térmico e para aplicações com cargas de compressão. Além disso, a cortiça tem sido utilizada há muito tempo em componentes sujeitos a cargas dinâmicas, uma vez que as suas excepcionais propriedades amortecedoras a tornam ideal para a supressão de vibrações. Em resumo, relativamente a muitas propriedades, os materiais em sanduíche de cortiça são altamente convenientes para utilização na produção dos sectores aeroespacial e aeronáutico [8].

O material à base de cortiça é um material do núcleo adequado para estruturas leves sanduíche. Este material é utilizado em aplicações aeroespaciais [37]. Ao comparar os compósitos sanduíche com espumas de alto desempenho, os compósitos têm certamente uma maior capacidade de absorção de energia e características superiores de resistência ao choque quando ocorre o carregamento. Além disso, os aglomerados de cortiça apresentam melhores propriedades térmicas, o que é uma forma significativa de conceber estruturas.

À primeira vista, quando comparado com materiais de núcleo alternativos, tais como espumas sintéticas, pode ser demonstrado que a cortiça natural tem um comportamento mecânico fraco. No entanto, a sua condutividade térmica e resistência à compressão fazem dela um material ideal para a retenção de calor. Os painéis sanduíche compósitos ganharam destaque no design aeronáutico devido à sua resistência ao encurvamento, tal como as folhas de liga de alumínio.

Uma patente de parede sanduíche de von Karman e Stock em 1924 é um excelente exemplo de construção de materiais sanduíche aplicada à construção aeronáutica. Em 1934, na fábrica Schneider-Creusot em Le Creusot, França, S. E. Mautner aplicou pela primeira vez estruturas em sanduíche a um avião existente. Em 1938, o mesmo engenheiro projetou um avião mono asa de baixo custo que apresentava uma asa de sanduíche com núcleo de cortiça. Tem havido uma utilização extensiva de compósitos de cortiça na indústria espacial, uma vez que a redução de peso desempenha um papel ainda mais crucial dentro do contexto espacial, o que resulta numa significativa poupança de custos. Além disso, os materiais ablativos são uma das utilizações mais comuns para os aglomerados de cortiça. O material que produz ablação dissipa a energia através da vaporização em vez da absorção de calor. Como resultado, protege as estruturas de fontes de energia térmica elevada.

Materiais compósitos sanduíche em diferentes designs são utilizados para a construção de materiais constituintes, tais como folhas faciais, núcleos e adesivos, para cenários de carga quase-estáticos e dinâmicos. Quando se considera a utilização prioritária de compósitos sanduíche, a sua suscetibilidade a danos por objetos estranhos é a primeira a ser preferida. Em vários casos, o desempenho de secções estruturais em sanduíche sob cargas de impacto tem sido observado. Interações locais com coisas minúsculas mas potencialmente pesadas, tais como quedas de ferramentas, impactos de pássaros, pedras, ou gelo, podem causar danos em aeronaves ou aviões durante o carregamento e descarregamento de mercadorias. Além disso, superfícies horizontais, tais como pisos de aviões, podem ser facilmente danificadas [38],[39].

Existem dois tipos de aglomerados de cortiça: aglomerados de isolamento e aglomerados de composição. O primeiro é produzido sem quaisquer ferramentas ou materiais aglutinantes adicionais; por conseguinte, não poderia ser nomeado material compósito. O segundo é feito de grânulos que foram combinados com vários ligantes sintéticos ou naturais, tais como poliuretano, resinas fenólicas, etc.

Ao fazer uma breve investigação sobre a utilização de compósitos de cortiça no sector aeroespacial, a Amorim Cork Composites (ACC) tem vários produtos. A empresa produziu dois compósitos de cortiça (P45 e P50) que podem ser utilizados como escudos protetores em vários sectores. Diferentes caracterizações destes tipos são fornecidas na Tabela 5.5.

### 5.3.1 Componentes Estruturais com Cortiça em Aplicações Aeroespaciais

O sector aeroespacial faz a utilização mais extensa de materiais e compósitos de cortiça nos corpos e componentes das naves espaciais (Figura 5.4). Os materiais de cortiça têm sido utilizados extensivamente nas naves espaciais desde os primeiros tempos da exploração espacial. Os compósitos de cortiça estão a ser utilizados em sistemas de propulsão a alta temperatura de naves espaciais, bem como em secções tais como tanques de combustível que requerem isolamento térmico. Além de fornecer isolamento térmico, a cortiça é também utilizada como camada protetora no caso de uma mudança brusca de temperatura, porque é menos dispendiosa do que os materiais de alta tecnologia. Como a cortiça queima sem chama ou ignição, será a primeira camada a arder a altas temperaturas, protegendo o corpo principal da nave e partes contra o fogo.

Tabela 5.5 Algumas propriedades dos compósitos de cortiça P45 e P50.

Properties	P45	P50	Units
Elongation	>30	>13	(%)
Specific heat	2.5	2.1	$(\frac{kJ \cdot K}{kg})$
Tensile Strength	>0,86	>1,70	(MPa)
Cork particle size	1/2	0.5/1	(mm)
Sheet dimension	1270 x 760	1270 x 760	(mm)
Thermal Conductivity	0.06	0.07	$(\frac{W}{m \cdot K})$
Density at 20°C	300-350	448-512	$(\frac{kg}{m^3})$

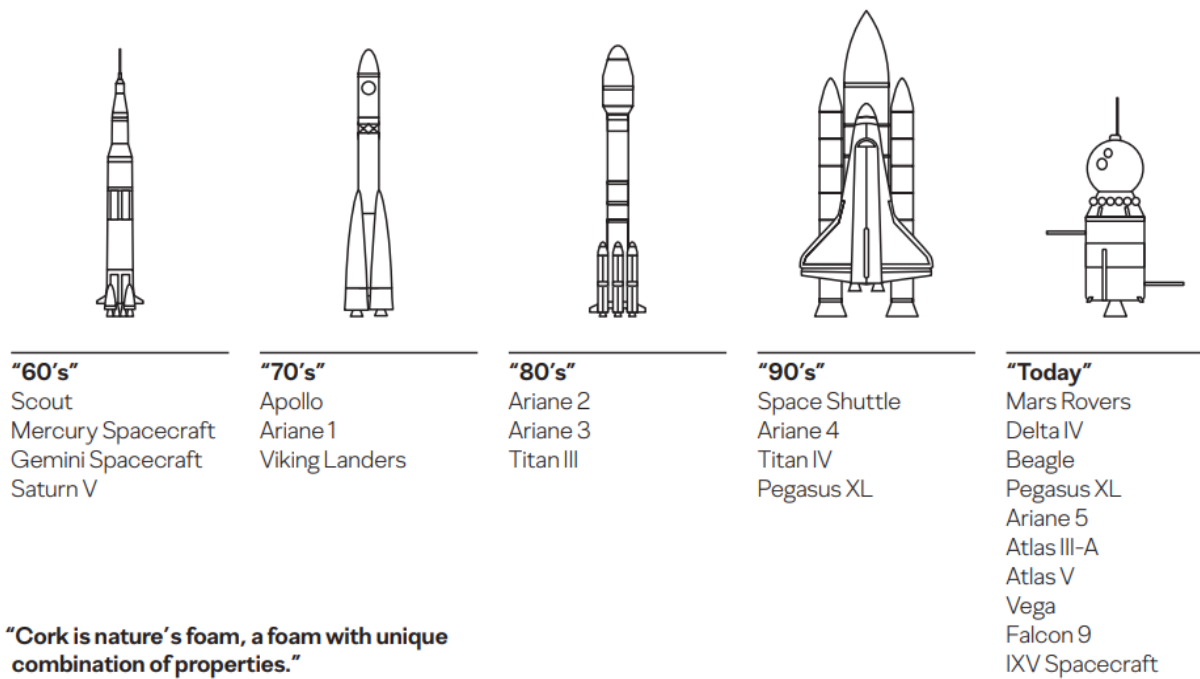


Figura 5.4 Veículos espaciais que utilizam materiais e compósitos de cortiça [40].

Algumas características chaves colocam estes compósitos de cortiça à frente de outros materiais de alta tecnologia. Em primeiro lugar, os compósitos de cortiça são mais amigos do processo do que outros. Os compósitos à base de cortiça são facilmente fixados à maioria dos materiais de substrato, utilizando técnicas adesivas padrão. O corte e maquinagem podem ser efetuados utilizando instalações e máquinas comuns, sem equipamento de proteção especial. Os materiais sanduíche podem ser facilmente incluídos; não são necessários processos de encaixe complicados. Para além disso, estes materiais já se demonstraram como escudos de calor adequados em aplicações de foguetes e isolamento térmico interior em construções aquecidas em várias missões. Na Figura 5.5, a demonstração pertence ao escudo de ogiva do Foguete Vulcan que a United Launch Alliance desenvolveu.



Figura 5.5 Carenagem com solução térmica ablativa Amorim P50 [41].

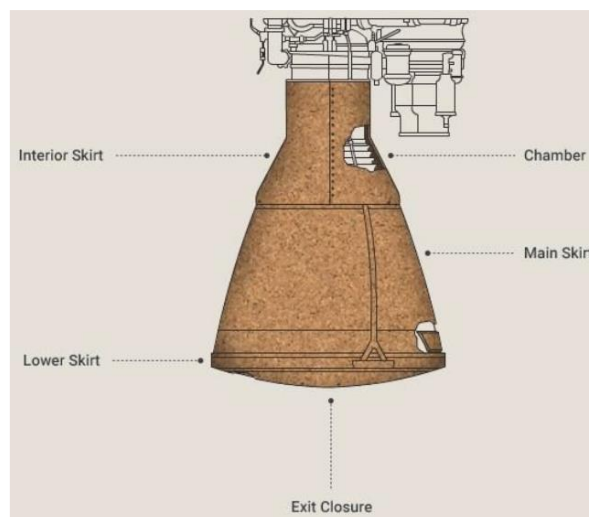


Figura 5.6 Utilização típica de compósitos de cortiça em foguetes [42].

Uma camada de cortiça cobriu a superfície exterior do invólucro cilíndrico. A cortiça, presa à superfície exterior do material sanduíche composto da carenagem, protege-a do calor criado pelo atrito aerodinâmico no exterior da cobertura. Além disso, desde os anos 70, os compósitos de cortiça têm sido utilizados para assegurar sistemas de proteção térmica para os sectores aeronáuticos. A Figura 5.6 mostra como os compósitos de cortiça são normalmente utilizados como absorvedores de calor no espaço. Além disso, os compósitos de cortiça podem ser facilmente moldados.

Além dos veículos de voo orbital e de reentrada, os sistemas de proteção térmica aeroespacial (TPS – *Thermal Protection System*) também formam parte integrante da estrutura primária dos foguetes de sonda. Ao longo das últimas décadas, a Base Móvel de Foguetes Móveis (MORABA) do Centro Aeroespacial Alemão (DLR) tem utilizado revestimentos de dois componentes à base de epóxi para fornecer proteção térmica numa vasta gama de estruturas de veículos de lançamento, incluindo asas, cones de nariz, adaptadores cónicos, e escudos térmicos. É relativamente simples de fabricar e pode ser pulverizado em quase qualquer geometria. Os fatores-chave para o desenvolvimento de um novo sistema de proteção térmica utilizando materiais especiais de cortiça são os seus fumos nocivos, o seu tempo de armazenamento limitado, os requisitos de armazenamento extensivo, e os resíduos que deixa perto dos componentes de carga útil. A estrutura primária de um foguetão sonda - incluindo a barbatana, o cone do nariz, o adaptador cónico e o conjunto de proteção térmica - é concebida para proteger o foguetão da radiação térmica. Pode ser visto obviamente na Figura 5.7. O material do sistema de proteção térmica costumava ser um revestimento ablativo, à base de epóxi, de dois componentes termoendurecíveis da Base Móvel de Foguete (MORABA) do Centro Aeroespacial Alemão (DLR). Elementos de carga útil vizinhos durante a ablação contribuíram para o aumento da procura de um novo sistema de proteção térmica.



Figura 5.7 Veículo Malemute melhorado (IM) com *TPS* à base de cortiça na barbatana [43].

Em termos de seleção de materiais TPS, existem algumas preferências, tais como baixo peso, grau de conformação, ambientalmente sustentável, baixos custos, baixas taxas de manutenção, e nenhuma restrição à exportação. Por conseguinte, a cortiça infiltrada foi escolhida como o material TPS mais utilizável, de acordo com estes requisitos. Em outras partes da nossa investigação, será explicado o NORCOAT LIEGE.

Assim, o NORCOAT LIEGE é a principal preferência do mercado da União Europeia como produto semiacabado. O processo de fabrico de componentes TPS a partir de materiais de cortiça tem várias etapas essenciais: preparação da superfície, implementação da colagem estrutural, aplicação do revestimento TPS, ensacamento a vácuo, e cura. Na Figura 5.8, é demonstrado o processo de preparação da estrutura VSB-30 FNC com NORCOAT LIEGE.

Após o desenvolvimento bem-sucedido do processo de produção de uma superestrutura VSB-30 FNC, esta foi aplicada a estruturas adicionais relacionadas com o TPS, tais como conjuntos de proteção térmica, adaptadores de motor, e barbatanas (Figura 5.9).

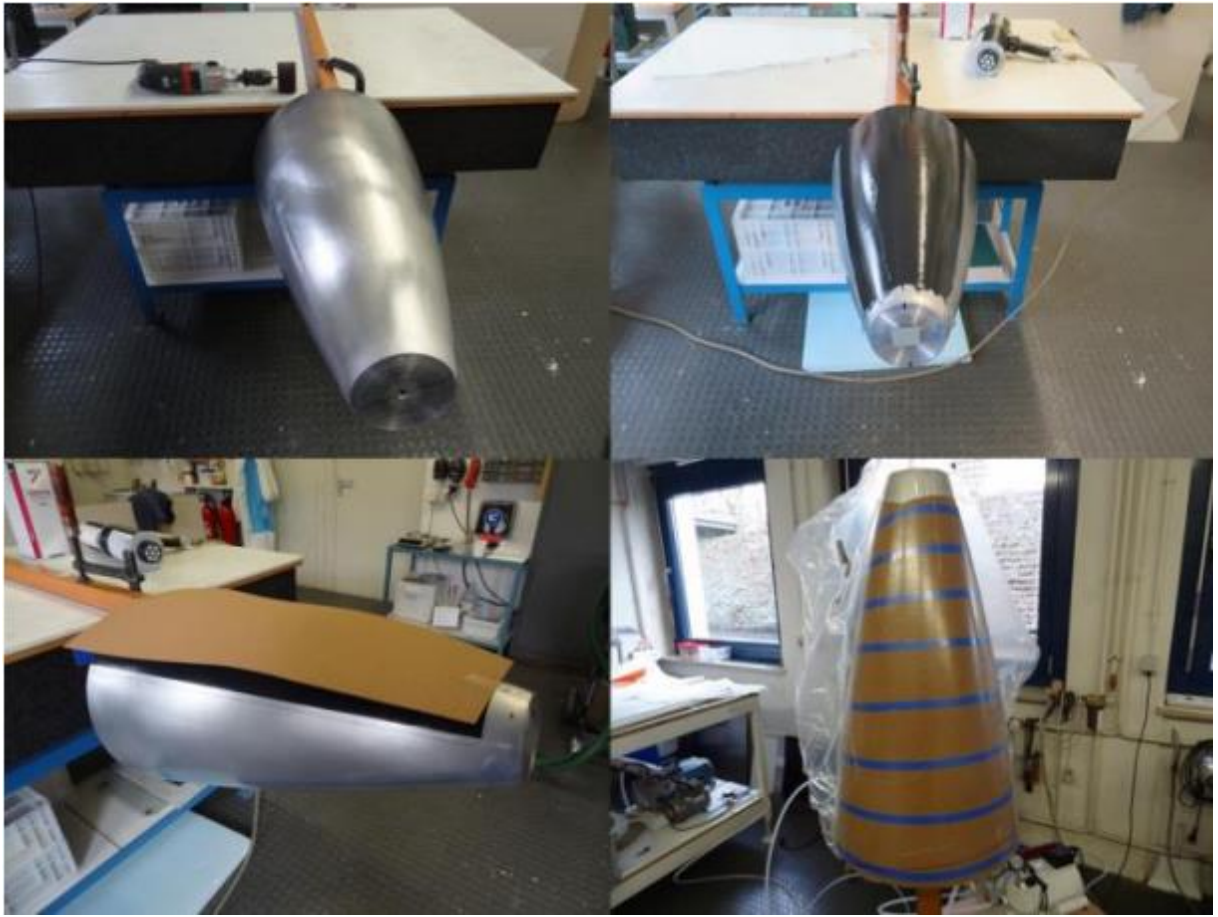


Figura 5.8 Estrutura VSB-30 FNC com NORCOAT LIEGE [43].

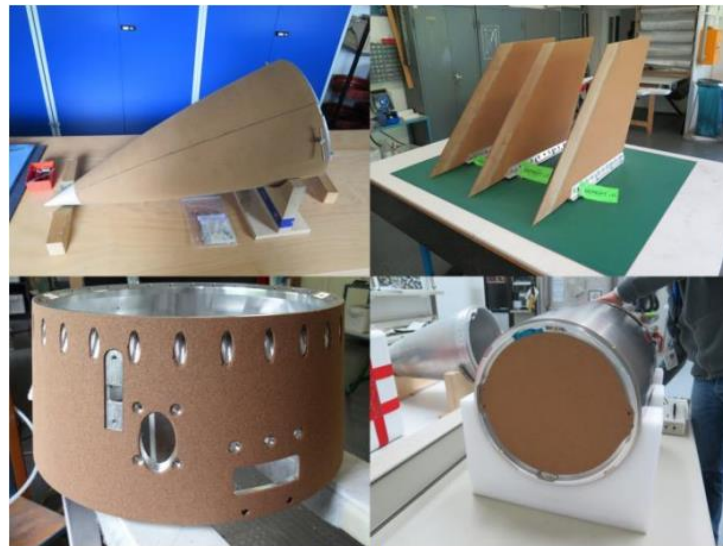


Figura 5.9 Implementação do NORCOAT LIEGE a várias partes estruturais do foguetão [43].

### 5.3.2 Projetos sobre a Utilização da Cortiça em Estruturas Aeroespaciais: Projeto Aerocork

Com o início do século XXI, as indústrias vinícolas tendem a utilizar rolhas de plástico e metal com o impulso tecnológico. Portanto, a utilização de materiais de cortiça cai gradualmente. Por este motivo, os produtores de cortiça iniciaram investigações e estudos para que os materiais e produtos de cortiça possam ser utilizados em áreas alternativas. Em 2008, a Dyn'Aero Industrie (DAI), um fabricante português de aviões ligeiros, solicitou a assistência da indústria e do meio académico para substituir componentes derivados do petróleo por compósitos de cortiça nos seus modelos de aviões. Como resultado, foi criada uma colaboração, e foi autorizada e concedida ao consórcio uma subvenção de I&D QREN no final de 2008. O projeto visa eliminar progressivamente o maior número possível de componentes feitos de substâncias derivadas do petróleo. Os materiais e esferas à base de PVC são exemplos de componentes fabricados a partir do petróleo. A eliminação destes materiais resultaria em poupanças significativas de custos ao longo de todo o processo de fabrico. Os componentes derivados do petróleo estão em risco de se tornarem mais caros à medida que os preços do petróleo aumentam com a procura global.

Havia dois tipos de materiais nos aviões da DAI, núcleo em PVC (sanduíche) e Esfera (micro-sanduíche). Estes materiais são derivados do petróleo, e as suas topologias são folhas de face de carbono. A ACC declarou que a substituição destes materiais por sanduíches à base de cortiça poderia ser possível, pelo que iniciaram experiências para alcançar a sustentabilidade.

Durante a investigação, esperava-se que os materiais e compósitos de cortiça fossem utilizados para criar secções de aviões sujeitas a cargas relativamente modestas e consideradas aceitáveis para relâmpagos. Foram testadas unidades como o assento do piloto, os bordos de ataque das asas, e as estruturas das costelas das asas. As peças produzidas no Projeto AEROCORK estão representadas nas figuras abaixo (Figs. 5.10-5.11).



Figura 5.10 Material compósito à base de cortiça AEROCORK [44].





Figura 5.11 Avião MCR UL da Dyn'Aero [44].

#### 5.4 Aplicações Potenciais de Compósitos de Cortiça em Estruturas Aeronáuticas/Aeroespaciais

O pó de cortiça, compósitos e outros produtos derivados podem ser utilizados em diferentes formas de proteção, resistência térmica e anti impacto na indústria aeroespacial. Ao longo desta secção, serão analisadas várias aplicações possíveis do material de cortiça.

##### 5.4.1 Compósitos de Matriz Cerâmica e Cortiça em Aplicações Aeronáuticas/Aeroespaciais

Em primeiro lugar, a combinação de materiais de cortiça e de matriz cerâmica é um dos principais tópicos de investigação. A cortiça é preferível para aplicações graças à sua elasticidade não linear, resistência à fratura, e capacidades únicas de recuperação dimensional. Atualmente, são realizados vários estudos sobre estruturas laminares coladas a partir de compósito de matriz cerâmica C/C-SiC e de um material ablativo à base de cortiça. É amplamente conhecido que a colagem adesiva é o método mais utilizado para combinar dois tipos diferentes de materiais. Para resistir a tensões cíclicas, tensão de cisalhamento e resistência à fadiga, a colagem adesiva mostra mais vida útil, durabilidade e conforto do que as técnicas de colagem mecânica [45]. O material ablativo para esta combinação é utilizado para programas de reentrada durante o processo de lançamento. NORCOAT LIEGE foi aplicado em 2003 à sonda Beagle 2, que entrou na atmosfera de Marte, e em 1998, o Demonstrador de Reentrada Atmosférica voltou a entrar na Terra [46]. É um material de cortiça ablator que foi testado no espaço. Além disso, o C/C-SiC foi melhorado pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR). Para obter o SiC nesta matriz, precisamos de retirar o produto da reação de carbono residual e silício líquido. Em termos de garantir uma combinação adesiva de C/C-SiC com o NORCOAT LIEGE, três glutinosos inorgânicos comerciais podem ser utilizados para fornecer resistência até à temperatura de 1650°C. Os critérios de seleção para este adesivo baseiam-se nos requisitos de temperatura das superfícies de colagem. Por outras palavras, este material de matriz cerâmica de cortiça pode ser utilizado em aplicações aeroespaciais futuras para assegurar resistência ao calor e absorção de impacto. Antes da sua utilização industrial comum, podem ser efetuados vários tipos de testes para verificar a adaptabilidade das condições. A Figura 5.12 apresenta uma configuração esquemática dos compósitos de cortiça e de matriz cerâmica.



Figura 5.12 Configuração esquemática do compósito de cortiça e matriz cerâmica [47].

#### **5.4.2 Isolamentos para Sistemas de Lançamento Espacial**

O Sistema de Lançamento Espacial, o novo foguetão pesado da NASA, enfrenta tremendas mudanças de temperatura durante as viagens espaciais, variando de -423 graus Fahrenheit a mais de 200 graus Fahrenheit. De acordo com a NASA, novos modelos foram concebidos por cientistas com tecnologia de ponta para proporcionar proteção térmica. As partes destes novos modelos consistiram em materiais amigos do ambiente como a cortiça e peças mais pequenas feitas por uma impressora 3D. Estas peças podem ser combinadas para a nave espacial ORION da NASA, que tem de ser robusta para transportar astronautas para a Lua e Marte.

O isolamento com espuma pulverizada e outros materiais de isolamento clássicos como a cortiça oferecerão proteção térmica para todos os componentes de foguetes. O Sistema de Lançamento Espacial acelera de 0 a 17.400 milhas por hora e voa para mais de 100 milhas acima da Terra em menos de 8 minutos, e o isolamento é suficientemente flexível para se mover com o foguetão, mas suficientemente duro para resistir a tensões aerodinâmicas. O combustível criogénico que impulsiona o foguetão é composto por hidrogénio líquido, e o oxigénio líquido deve permanecer extremamente frio para permanecer líquido. A temperatura do hidrogénio deve permanecer a menos 423 graus Fahrenheit, enquanto a temperatura do oxigénio deve permanecer a menos 298 graus Fahrenheit. O combustível torna-se um gás se as temperaturas aumentarem demasiado [48].

O líder da equipa do sistema de proteção térmica para a fase central do Sistema de Lançamento Espacial da NASA, Michael Alldredge, descreveu que "À medida que o Sistema de Lançamento Espacial voa, ele acumula um calor tremendo. Sem isolamento, o calor do lançamento afetaria a estabilidade dos propulsores criogénicos, e a integridade estrutural do foguetão ficaria comprometida. A NASA pede a este material de espuma único que faça um trabalho incrível de proteção de sistemas de foguetões críticos, que variam desde grandes estruturas a linhas eletrónicas e de combustível, num ambiente de lançamento implacável com temperaturas e pressões extremas".

A NASA decidiu utilizar espuma em vez de cortiça para este revestimento. Uma vez que a espuma é mais facilmente aplicada à mão e fácil de encontrar em todo o lado, utilizaram moldes impressos em 3-D para o posicionamento da aviónica. Embora a cortiça seja mais densa do que a espuma, assegura uma preservação mais retentiva para várias implementações. As folhas de cortiça podem ser utilizadas na secção do motor do estágio central (Figura 5.13).



Figura 5.13 Isolamento térmico por pulverização de espuma no Adaptador de Estágio do Veículo de Lançamento (LVSA) [48].

#### ***5.4.3 Cortiça na Missão a Marte***

A cortiça foi combinada com engenharia inovadora para criar uma nova cápsula de reentrada na Terra para a Agência Espacial Europeia (ESA), para transportar amostras de Marte para a Terra. O consórcio criado pela Critical Materials, ISQ, PIEP, e Amorim Cork Composites criou a cápsula para a NASA. Um conceito de cápsula de reentrada para a Terra, com propriedades termomecânicas ótimas para assegurar a reentrada passiva na atmosfera terrestre, foi o desafio. Não haverá para-quedas ou outro sistema auxiliar de atenuação de impacto quando o recipiente, com amostras de solo de Marte, fizer contacto com a superfície da Terra.

Os revestimentos utilizados para proteger as cápsulas transportadas para o espaço são outra aplicação crítica dos materiais de cortiça. Quando as cápsulas espaciais entram na atmosfera do planeta aquecem rapidamente. As temperaturas podem atingir os 1600°C, especialmente na superfície da cápsula. Os materiais que podem sobreviver a temperaturas elevadas, tais como metal ou cerâmica, serão significativamente mais pesados do que a cortiça. Além disso, estes materiais não apresentam a capacidade de condução de calor necessária. Os materiais de cortiça são adequados para distribuir altas temperaturas por uma superfície e impedir que o calor atinja o corpo.

Uma solução única para integrar vários materiais na concepção e construção da cápsula, juntamente com uma configuração geométrica definida, é aqui utilizada, cumprindo todas as especificações da ESA para o seu programa de exploração de Marte. A solução oferece um sistema multifuncional que pode suportar

as elevadas cargas térmicas e dinâmicas associadas à reentrada na atmosfera terrestre, cumprindo ao mesmo tempo todos os requisitos pré-definidos. Além da redução do peso em relação às condições iniciais da Agência Espacial Europeia, esta nova solução elimina os sistemas auxiliares e reduz os custos de produção. Espera-se que uma cápsula de reentrada chegue à Terra em 2026 para transportar amostras. A cápsula de aterragem revestida por compósito de cortiça é apresentada na Figura 5.14 [49].



Figura 5.14 Cápsula de aterragem de Marte revestida por compósito de cortiça [49].

## 5.5 Conclusões

Este estudo analisa as características mecânicas e térmicas dos compósitos de cortiça e as suas aplicações atuais e futuras nos domínios aeroespacial, militar e outros. A investigação tem demonstrado que os compósitos de cortiça têm sido utilizados em vaivéns espaciais e foguetes como isoladores térmicos para as suas carenagens. Além disso, o trabalho discute as distinções entre materiais de espuma, várias formas de compósitos, e compósitos de cortiça. Embora seja dada prioridade às aplicações aeroespaciais de materiais sanduíche de cortiça, os resultados podem ter influência na indústria automóvel. A falta de informação do estudo sobre as potenciais aplicações deste material na aviação e o conhecimento da atual utilização da cortiça como isolante térmico deve-se provavelmente às políticas de privacidade. Apesar das suas limitações, o estudo contribui para a nossa compreensão das propriedades ambientais favoráveis e sustentáveis da cortiça no fabrico de aviões. Aliada a uma maior investigação sobre o fabrico de compósitos à base de aglomerados de cortiça, devem ser desenvolvidas melhores técnicas que permitem a absorção de força por parte destes materiais compósitos. Estes conhecimentos podem ser utilizados para desenvolver intervenções orientadas para a renovabilidade nas indústrias e estabelecer uma mentalidade ambiental entre os fabricantes, graças aos compósitos de cortiça para um futuro melhor.

## Referências

- [1] Pereira, H. (2007). Cork: Biology, Production and Uses. Elsevier.
- [2] Hooke, R. (1665). *Micrographia, or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon*. London: Printed by J. Martyn and J. Allestry.
- [3] Jardim, R.T., Fernandes, F.A.O., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2015). Static and dynamic mechanical response of different cork agglomerates. *Materials & Design*, 68:121–126.
- [4] Santos, P.T., Pinto, S., Marques, P.A.A.P., Pereira, A.B., Alves de Sousa, R.J. (2017). Agglomerated cork: a way to tailor its mechanical properties. *Composites Structures*, 178:277–287.
- [5] Costas, M., Díaz, J., Romera, L.E., Hernández, S. (2013). Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers. *International Journal of Impact Engineering*, 62:166–81.
- [6] Tay, Y.Y., Lim, C.S., Lankarani, H.M. (2014). A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents. *International Journal of Crashworthiness*, 19:288–300.
- [7] Sanchez-Saez, S., Barbero, E., Cirne, J. (2011). Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts. *Materials Letters*, 65:2152–4.
- [8] Silva, J.M., Devezas, T.C., Silva, A., Gil, L., Nunes, C., Franco, N. (2010). Exploring the use of cork-based composites for aerospace applications. *Materials Science Forum*, 636:260-265.
- [9] Put a Cork in It. Available: <https://www.labmanager.com/news/put-a-cork-in-it-material-now-shows-promise-in-new-applications-includng-aircraft-and-energy-16773/>
- [10] Gibson, L. J., Easterling, K. E., Ashby, M. F. (1981). The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society of London*, A377, 99–117.
- [11] Rosa, M. E and Fortes, M. A. J. (1991). Deformation and fracture of cork in tension. *Materials Sciences*, 26:341–348.
- [12] Fortes, M. A., Nogueira, M.T. (1989). The Poisson effect in cork. *Materials Sciences and Engineering*, A122, 227–232.
- [13] Rosa, M. E., Pereira, H., Fortes, M. A. (1990). Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork. *Wood and Fiber Sciences*, 22: 149 – 164.
- [14] Rosa, M.E., Pereira, H. (1994). The effect of long term treatments at 100 – 150 °C on structure, chemical composition and compression behaviour of cork. *Holzforschung*, 48:226-232.
- [15] Vaz, M. F., Fortes, M. A. (1998). Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, 33: 2087- 2093.

- [16] Silva, S.P., Sabino, M.A., Fernandes, E.M., Correlo, V.M., Boesel, L.F., Reis, R.L. (2005). Cork: properties, capabilities, and applications. *International Materials Reviews*, 50(6):345–365.
- [17] Mano, J.F. (2002). The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, 37(2):257–263.
- [18] Anjos, O., Rodrigues, C., Morais, J., Pereira, H. (2014). Effect of density on the compression behavior of cork. *Materials & Design*, 53:1089–1096.
- [19] Pereira, H., Graca, J., Baptista, C. (1992). The Effect of Growth Rate on the Structure and Compressive Properties of Cork. *IAWA Bulletin*, 13(4):389–396.
- [20] Pereira, H. (1998). The caliber and porosity as parameters of the technological quality of cork in plank. *Revista Florestal*, 2(XI), 46–50.
- [21] Gibson, L.J. (2005). Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics*, 38:377-99.
- [22] Pereira, S.C., Soares, G.A.M., Oliviera, A.C., Rosa, M.E. (2006). Effect of fungal colonization on mechanical performance of cork. *International Biodeterioration and Biodegradation* 57(4): 244-250.
- [23] Faria, D.P., Fonseca, A.L., Pereira, H., Teodoro O.M.N.D. (2011). Permeability of cork to gases. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 59(8):3590–3597.
- [24] Lequin, S., Chassagne, D., Karbowiak, T., Simon, J.M., Paulin, C., Bellat, J.P. (2012). Diffusion of oxygen in cork. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 60(13):3348–3356.
- [25] Abenojar, J., Barbosa, A.Q., Ballesteros, Y., Martinez, M.A. (2014). Effect of surface treatments on natural cork: surface energy, adhesion, and acoustic insulation. *Wood Science and Technology*, 48:207–224.
- [26] Garcia, A., Anjos, A., Iglesias, C., Pereira, H., Martínez, J., Taboada, J. (2015). Prediction of mechanical strength of cork under compression using machine learning techniques. *Materials & Design*, 82:304–11.
- [27] Gameiro, C.P., Cirne, J. (2007). Dynamic axial crushing of short to long circular aluminum tubes with agglomerate cork filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, 49:1029–37.
- [28] Paulino, M., Teixeira-Dias, F. (2011). An energy absorption performance index for cellular materials – development of a side-impact cork padding. *International Journal of Crashworthiness*, 16:135–53.
- [29] Fernandes, F.A.O., Tavares, J.P., Alves de Sousa, R.J., Pereira, A.B., Esteves, J.L. (2014). Manufacturing and testing composites based on natural materials. *Procedia Manufacturing*, 13:227–34.
- [30] Fernandes, F.A.O., Pascoal, R.J.S., Alves de Sousa, R.J. (2014). Modelling impact response of agglomerated cork. *Materials & Design*, 58:499–507.

- [31] Ptak, M., Kaczynski, P., Fernandes, F.A.O. (2017). Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material. *International Journal of Impact Engineering*, 106:238–48.
- [32] Castro, O., Silva, J.M., Tessaleno, D., Silva, A., Gil, L. (2009). Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials & Design*, 31:425–432.
- [33] Kaczynski, P., Ptak, M., Wilhelm, J., Fernandes, F.A.O., Alves de Sousa, R.J. (2019). High-energy impact testing of agglomerated cork at extremely low and high temperatures. *International Journal of Impact Engineering* 126:109-116.
- [34] Moreira, R.A.S., Dias Rodrigues, J.F. (2010). Static and dynamic characterization of composition cork for sandwich beam cores. *Journal of Materials Science*, 45(12):3350–3366.
- [35] Gil, L. (2007). Cork as a building material. Technical manual. Associação Portuguesa da Cortiça.
- [36] Gil, L., Moiteiro, C. (2003). Cork. In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology.
- [37] Hoff, N.J., Mautner, S. E. (1944). Sandwich construction, *Aeronautical Engineering Review*.
- [38] Hildebrand, M. (1996). A comparison of FRP-sandwich penetrating impact test methods. Espoo: VTT publications 281.
- [39] Christopherson, J., Mahinfalah, M., Jazar, G., Aagaah, M. (2005). An investigation on the effect of small mass impact on sandwich composite plates. *Composite Structures*, 67(3):299–306.
- [40] Amorim Cork Composites. Available: [https://amorimcorkcomposites.com/media/1095/brochura-aerospace\\_en\\_digital.pdf](https://amorimcorkcomposites.com/media/1095/brochura-aerospace_en_digital.pdf)
- [41] Amorim Cork Composites. Available: [www.amorimcorkcomposites.com/en-us/about-us/news/ablative-thermal-solution-p50-in-next-generation-launch-rockets/](http://www.amorimcorkcomposites.com/en-us/about-us/news/ablative-thermal-solution-p50-in-next-generation-launch-rockets/)
- [42] Amorim Cork Composites. Available: [www.amorimcorkcomposites.com/en-us/materials-applications/aerospace/](http://www.amorimcorkcomposites.com/en-us/materials-applications/aerospace/)
- [43] Drescher, O., Hörschen-Eggers, M., Pinaud, G., Podeur, M. (2017). Cork based thermal protection system for sounding rocket applications-development and flight testing. 23<sup>rd</sup> ESA Symposium, Sweden.
- [44] New Atlas. Available: <https://newatlas.com/aerocork-sustainable-aircraft-materials/15649/>
- [45] Marques, E.A.S., Silva L.F.M., Banea M.D., Carbas R. (2015). Adhesive joints for low and high temperature use: an overview. *Journal of Adhesion*, 91:556-85.
- [46] Bouilly, J.M., Francine Bonnefond, F., Dariol F., Jullien P., Leleu F. (2006). Ablative thermal protection systems for entry in Mars atmosphere. A presentation of materials solutions and testing capabilities. In: Proceedings of 4<sup>th</sup> international planetary probe workshop, pasadena, California, USA.

[47] Triantou, K., Perez, B., Marinou, A., Florez, S., Mergia, K., Vekinis, G., Barcena, J., Rotarmel, W., Zuber, C., Montburn, A. (2016). Performance of cork and ceramic matrix composite joints for re-entry thermal protection structures. *Composites Part B: Engineering*, 108:270-278.

[48] NASA, Available: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/multimedia/tps-on-lvsa.html>

[49] Amorim Cork Composites. Available: <https://amorimcorkcomposites.com/en/about-us/news/cork-on-mission-to-mars/>