

## 7. Valorização da Cortiça Orientada para a Inovação e Sustentabilidade

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.206.7>

*Emanuel M. Fernandes*

Instituto de Investigação em Biomateriais, Biodegradáveis e Biomiméticos

<https://orcid.org/0000-0002-4296-2529>

*Ana R. Araújo*

Instituto de Investigação em Biomateriais, Biodegradáveis e Biomiméticos

<https://orcid.org/0000-0003-2033-4262>

*Ricardo A. Pires*

Instituto de Investigação em Biomateriais, Biodegradáveis e Biomiméticos

<https://orcid.org/0000-0001-6300-6379>

*Rui L. Reis*

Instituto de Investigação em Biomateriais, Biodegradáveis e Biomiméticos

<https://orcid.org/0000-0002-4295-6129>

### Resumo

Num mundo em rápida transformação, onde os desafios de mitigação do impacto ambiental e a gestão eficiente dos subprodutos aumentam, observa-se um crescente interesse pelo desenvolvimento de produtos de base natural. É neste contexto que a cortiça ganha destaque pela sua capacidade de ser, simultaneamente, um recurso natural, renovável e essencial para a promoção da economia circular. A sua produção responsável contribui ainda para a conservação da biodiversidade e fortalece as comunidades locais. Este capítulo, procura dar a conhecer as propriedades únicas deste recurso natural e o seu papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono. Aliar tradição, tecnologia e criatividade, revela-se essencial para

a valorização da cortiça e os seus componentes naturais, proporcionando oportunidades estratégicas para a criação de materiais mais sustentáveis, para diferentes aplicações. A cortiça representa um verdadeiro paradigma de sustentabilidade, onde os vetores natureza, economia e sociedade devem interagir de forma equilibrada, representando um modelo inspirador de como a inovação pode nascer da valorização dos recursos naturais.

## 7.1 Introdução

A cortiça é o tecido vegetal extraído da casca de uma árvore da família do carvalho (*Quercus Suber*), chamada sobreiro. Esta espécie é uma quercínea de folha persistente, membro da ordem *Fagales* e da família *Fagaceae*. Este carvalho mediterrânico distingue-se pelo seu espesso revestimento suberoso – a cortiça – cuja exploração sustentável representa uma importante mais-valia económica, ecológica e social (Fortes et al., 2004).

Endémico de regiões com clima mediterrânico e influência atlântica, o sobreiro encontra-se principalmente na Península Ibérica, Sul de França, Itália e Norte de África, sendo Portugal o maior produtor e transformador mundial de cortiça. A Península Ibérica concentra cerca de 56% da área global de montado de sobreiro, confirmando a centralidade da região na preservação e valorização desta matéria-prima natural (APCOR, 2023; Fortes et al., 2004).

O sobreiro adapta-se a uma ampla variedade de solos com preferência por substratos graníticos, porfíricos, feldspáticos e xistosos, conseguindo tirar partido de solos arenosos e descalcificados, muito ingratos, em condições desfavoráveis a quase todas as outras espécies arbóreas do País. No entanto, não se desenvolve adequadamente em solos argilosos, mal drenados ou excessivamente húmidos (Pereira et al., 2004). Em Portugal, as maiores manchas de sobreiros localizam-se nas bacias hidrográficas do Tejo e do Sado, muitas vezes em terrenos de baixa fertilidade, onde esta espécie contribui para a conservação dos solos e para a regulação hídrica (Fortes et al., 2004).

A cortiça é extraída do tronco e ramos do sobreiro, sob a forma de pranchas semicirculares, normalmente no Verão quando o crescimento é maior. A casca do sobreiro é renovável, pela própria natureza durante o período de vida do sobreiro, e demora 25 anos para chegar à primeira fase produtiva da extração para produção de rolhas e as demais ocorrem com a periodicidade mínima de 9 anos. Este processo, realizado manualmente, não causa qualquer dano à árvore nem compromete o equilíbrio do ecossistema. Pelo

contrário, o descortiçamento estimula a regeneração natural da casca, permitindo que a árvore continue a crescer e a capturar carbono ao longo de uma vida que pode atingir entre 150 e 200 anos. Cada sobreiro pode ser descortiado, em média, 16 vezes, com intervalos mínimos de nove anos entre colheitas, tornando a cortiça um recurso exemplar de sustentabilidade.

O primeiro descortiçamento, designado por “desboia”, produz uma qualidade representada por cortiça virgem, com uma superfície exterior bastante irregular. Trata-se de uma cortiça de qualidade inferior e é transformada em granulado para fins de isolamento, *memoboards* e decorativos. Os descortiçamentos sucessivos dão origem à cortiça com uma superfície exterior mais uniforme, designada por cortiça de reprodução ou amadia, utilizada na produção de rolhas. A primeira cortiça de reprodução ainda apresenta algumas irregularidades e tem o nome de secundeira, pelo que o seu destino será semelhante ao da cortiça virgem (Fortes et al., 2004; Silva et al., 2005).

Segundo o relatório de sustentabilidade emitido pela Associação Portuguesa da Cortiça (APCOR), a vegetação do montado desempenha um papel fundamental no sequestro de carbono, ao capturar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera e armazená-lo na biomassa e no solo. Estima-se que as florestas de sobreiro do Mediterrâneo possam fixar até 14 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2$  por ano, e isso pode ser potencializado com a certificação FSC, sendo símbolo de sustentabilidade, acesso a novos mercados e de melhoria na gestão florestal. Após a extração da cortiça, a atividade biológica do sobreiro aumenta e a sua absorção de  $\text{CO}_2$  multiplica-se entre 3 a 5 vezes. Esse processo faz do sobreiro um reservatório de carbono exemplar e um grande aliado na mitigação das alterações climáticas, ao reduzir a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Os sobreiros, em particular, também oferecem sombra e ajudam a moderar a temperatura ambiente, colaborando na regulação climática local (APCOR, 2023).

A cortiça, por sua vez, é um material 100% natural, reutilizável e reciclável, com um impacto positivo tanto ambiental quanto social. A sua produção sustentável promove a conservação da biodiversidade, fortalece as economias das comunidades locais e constitui um claro modelo de economia circular, que alia tradição e inovação em harmonia com a natureza. Nas próximas secções, procura-se dar a conhecer as propriedades únicas deste recurso natural e do seu contributo para a sustentabilidade e para um desenvolvimento sustentável.

## 7.2. Morfologia da cortiça

A cortiça ocupa um lugar especial na história da microscopia e da anatomia da planta. Quando por volta de 1660 Robert Hooke completou o seu microscópio, um dos primeiros materiais a ser examinado foi a cortiça. No ano de 1664, o que Robert Hooke observou conduziu-o a identificar a unidade básica da planta e a estrutura biológica, a qual designou de “célula” (Fortes et al., 2004; Gibson et al., 1997), palavra derivada do latim “cella”, que significa pequeno compartimento. A comunicação entre as células é assegurada por microcanais que atravessam a parede celular e são designados por plasmodesmos, que podem estar uniformemente distribuídos ou em grupos e contêm diâmetros com cerca de 30 – 60 nm. Quando esta comunicação deixa de existir, as células morrem (Fortes et al., 2004).

A estrutura celular da cortiça é descrita através da nomenclatura utilizada para designar as direções e as secções deste material, a qual é adotada na Botânica. Como referência, definem-se três direções e três secções perpendiculares a estas, e encontram-se relacionadas com o tronco da árvore. Assim, as direções segundo o raio e o eixo do tronco da árvore designam-se por radial e axial, por outro lado a direção tangente à circunferência do tronco designa-se por tangencial.

A estrutura celular da cortiça encontra-se devidamente estudada (Gibson et al., 1997; Pereira et al., 1987). O tecido suberoso é constituído por microcélulas mortas de forma aproximadamente prismáticas e estas encontram-se dispostas em camadas sucessivas, sem espaços e segundo a direção radial da árvore, onde existem aproximadamente 20 000 a 40 000 de células por  $\text{mm}^3$ . A espessura de 1mm corresponde a cerca de 30 camadas de células (Gil et al., 2002). Dentro destas células fechadas ou alvéolos está contida uma mistura similar ao ar (Silva et al., 2005).

Segundo a secção tangencial, as células apresentam-se como polígonos, num rearranjo do tipo favo de mel. Na secção radial, as células encontram-se organizadas em filas paralelas à direção radial da árvore (Carriço, 1997). A cortiça apresenta uma estrutura anisotrópica (Pereira et al., 1987), sendo que as ondulações das paredes celulares desempenham um papel bastante importante ao nível das propriedades mecânicas, que são atenuadas durante o processo de cozedura e, em geral, com o aquecimento.

A célula típica da cortiça pode ser representada como um poliedro de secção hexagonal, variando o contorno poligonal usualmente entre quatro e nove lados, mas normalmente ocorre apresentando cinco a sete lados e as

suas dimensões médias são entre 30 a 40µm de largura por 35 a 45 µm de altura (Gibson et al., 1997; Pereira et al., 1987).

Morfológicamente, um aspeto de extrema importância é a porosidade deste material, estando esta estritamente relacionada com a sua qualidade. A porosidade advém da cortiça possuir canais lenticulares que atravessam a direção radial e permitem as trocas gasosas entre o tronco da árvore e o exterior (Pereira et al., 2004; Silva et al., 2005). Estes canais lenticulares têm origem nas lentículas, que são pequenas regiões do felogénio onde não há produção de células de cortiça (Carriço, 1997). Na cortiça virgem os canais lenticulares são em maior número por unidade de área comparativamente com a cortiça amadia (Liese et al., 1983). De uma forma geral, quanto menor a porosidade que a cortiça apresente segundo a direção radial mais nobre tenderá a ser a sua aplicação.

As características macroscópicas da cortiça revelam-na como um material de baixa densidade, impermeável a líquidos e gases, um material elástico e compressível, resistente à água e a produtos químicos e inócuo em relação à contaminação com alimentos, além de ser uma matéria-prima 100% reciclável e reutilizável (Silva et al., 2005). Dessa forma, a cortiça contribui para a mitigação das alterações climáticas e para a regeneração dos ecossistemas.

### 7.3. Composição química

A composição química da cortiça tem sido intensamente estudada ao longo das últimas décadas, e reportada em vários trabalhos científicos (Aroso et al., 2017a; Bernards, 2002; Gil et al., 2002; Pereira, 1988; Silva et al., 2005). A sua composição é significativamente dependente de diversos fatores, como, por exemplo, a origem geográfica, o clima, as condições do solo, origem da própria árvore, as suas dimensões, a idade, as suas condições de crescimento e o tipo de exploração florestal (Natividade, 1990; Silva et al., 2005). Um fator que afeta a determinação da composição química da cortiça é a variabilidade provocada pelos diferentes métodos de processamento utilizados durante a sua valorização industrial, assim como a evolução das tecnologias de avaliação ou deteção dos componentes finais presentes neste material (Caldas et al., 1986; Pereira, 1981b, 1984).

Estudos da composição química da cortiça do sobreiro realizados por vários autores indicam uma composição química em termos médios constituída maioritariamente por suberina (30-50%), lenhina (19-22%), polissacarídeos

(12-20%), extratáveis (13-16%) e cinzas (1-3%) (Cordeiro, 1998; Gil et al., 2002; Pereira, 1988).

A constituição química das paredes celulares, analogamente ao que se passa com as células de outros materiais de origem vegetal, pode ser dividida em dois tipos de componentes: estruturais (suberina, lenhina e polissacarídeos), e não estruturais (extratáveis e cinzas). Os componentes estruturais ou principais são macromoléculas, de natureza polimérica, insolúveis, que conferem às células a sua forma bem como grande parte das propriedades físicas e químicas (Fortes et al., 2004).

A remoção dos componentes principais apenas é possível recorrendo a tratamentos químicos ou mecânicos agressivos de forma a promover a sua destruição parcial ou total (Bernards, 2002; Gibson et al., 1981; Rosa et al., 1991). Por exemplo, no caso da suberina, a sua remoção pode ser efetuada através de: i) metanólise alcalina (clivagem das ligações éster da suberina, libertando os componentes ácidos sob a forma de ésteres metílicos, cuja acidificação leva à sua precipitação, sendo depois filtrados); ii) hidrólise alcalina (saponificação), onde a acidificação precipita os ácidos suberínicos livres (Santos et al., 2014); e, iii) hidrólise supercrítica com água, onde se dá a eliminação dos polissacarídeos (até 94,7%) e se enriquece a suberina no resíduo sólido (Mission et al., 2022).

A suberina, assim como outros componentes estruturais, tem potencial para ser utilizada em embalagens de produtos alimentares e farmacêuticos pelas suas propriedades hidrofóbicas e de barreira. Esses componentes podem também ser incorporados em plásticos e compósitos de base biológica, como uma alternativa sustentável aos petroquímicos, ou, ainda, como revestimento para implantes, estruturas de engenharia de tecidos e sistemas de libertação de medicamentos, devido à sua biocompatibilidade (Graça, 2015).

Os componentes não estruturais da cortiça encontram-se classificados como elementos extratáveis e componentes inorgânicos (Fortes et al., 2004), onde os extratáveis são compostos de massa molecular pequena, solúveis em diferentes solventes, e podem ser retirados das células da cortiça recorrendo à sua solubilização em solventes compatíveis com as características químicas de cada componente (Pereira, 1981a; Pereira et al., 1979). Estes componentes extratáveis são usualmente classificados em dois tipos principais: os taninos e as ceras.

Existem várias formas de proceder à extração destes compostos. De uma forma mais convencional, podem ser recolhidos através do tratamento da

cortiça com solventes orgânicos de polaridade crescente, como o dicloro-metano (DCM), o etanol e a água. A cortiça é inicialmente triturada e sujeita a extração por Soxhlet ou a extração acelerada por solventes (ASE), utilizando temperaturas e pressões mais elevadas. Regra geral, a extração de todos os extratáveis começa com um tratamento utilizando DCM para remover os compostos lipofílicos, seguido de etanol e água para remover os componentes mais polares.

De referir que na última década, foram desenvolvidas tecnologias verdes mais sustentáveis (Ramos et al., 2020; Rocha et al., 2023) utilizando solventes eutéticos naturais (NADES) sob alta temperatura e pressão, levando ao maior rendimento de extração, permitindo rendimentos significativamente mais elevados (até 5 vezes) do que as metodologias tradicionais. Por outro lado, os componentes extratáveis também podem ser recolhidos utilizando a tecnologia de fluídos supercríticos, como o CO<sub>2</sub>, supercrítico na presença ou ausência de co-solventes (ex. etanol ou metanol), utilizando diferentes pressões e temperaturas. Esta tecnologia permite ainda a remoção seletiva dos componentes orgânicos, enquanto os principais polímeros da cortiça (suberina, lenhina, celulose) permanecem praticamente intactos.

Os compostos estruturais da cortiça, juntamente com os seus extratáveis, podem desempenhar um papel significativo na promoção dos princípios da economia circular na indústria da cortiça, transformando o que anteriormente era considerado resíduo (pó de cortiça, restos de granulado, etc.) em recursos de valor acrescentado para sectores de elevado valor, especialmente os cosméticos e os produtos farmacêuticos (Araújo et al., 2020a; Carriço et al., 2023).

## 7.4. Propriedades físicas e mecânicas

Globalmente, a cortiça reúne uma série de qualidades ímpares, como sendo um material natural, reciclável, apresenta baixa densidade, é impermeável a líquidos e a gases, elástico e compressível, possui bom isolamento térmico e acústico, incombustível e muito resistente ao atrito (Silva et al., 2005), bem como apresenta propriedades antimicrobianas (Garcia et al., 2014; Gonçalves et al., 2016). Relativamente às propriedades físicas da cortiça e no que concerne à sua densidade, esta apresenta uma baixa densidade, entre os 120 – 170 kg/m<sup>3</sup>, dependendo de fatores como a região, a qualidade da árvore, o tipo de cortiça (amadia ou virgem) e o grau de humidade (Gibson et al., 1997; Gil et al., 2002). Em termos de densidade de parede de célula do material, este valor é próximo de 1150Kg/m<sup>3</sup> (Gibson et al., 1981).

Alguns tratamentos como a cozedura a que a cortiça é sujeita antes de ser processada industrialmente também provocam alterações na densidade deste material (Fortes et al., 2004).

A cortiça apresenta um elevado coeficiente de atrito 0,2 – 0,4 (Gil et al., 2002), propriedade que confere à cortiça aplicações como, por exemplo, na indústria do calçado. A condutividade térmica da cortiça é baixa (0,045 W/mK) (Silva et al., 2005).

A compressão numa direção origina variação das dimensões transversais. Esta característica designa-se por coeficiente de Poisson. Uma das principais aplicações da cortiça é como vedante, onde o seu coeficiente de Poisson é praticamente nulo (0,15-0,22) (Gil et al., 2002; Silva et al., 2005), permitindo que seja comprimida e tracionada sem expansão ou retração nas suas dimensões transversais quando sujeitas à ação mecânica.

A cortiça é um material viscoelástico que permite grandes deformações sob compressão, sem fratura e com recuperação dimensional substancial quando a tensão é aliviada, contribuindo para outra importante característica que é a sua grande elasticidade (Knapic et al., 2016). Quando a cortiça é rapidamente comprimida sob circunstâncias elásticas retoma imediatamente cerca de 85% do seu volume inicial, e em 24 horas cerca de 95% da sua dimensão inicial é atingida (Gil et al., 2002). O calibre da cortiça possui uma influência direta na variação do módulo de elasticidade. No contexto de esforços de compressão, quanto maior o calibre (espessura da prancha) menor será o valor da deformação e do módulo de elasticidade. Ainda, relativamente às situações em que a cortiça possa estar sujeita a condições de compressão, por exemplo, a inserção de uma rolha na garrafa, a situação mais simples acontece quando a compressão se dá segundo uma única direção, designada por compressão uniaxial. Apesar da cortiça apresentar uma elevada resistência mecânica à compressão, existem diversas situações em que está sujeita a torção ou tensões de tração que podem conduzir à sua fratura.

### **7.5. Cortiça em ação: sustentabilidade e inovação para além das rolhas**

A sustentabilidade visa uma integração equilibrada entre as três dimensões seguintes: desempenho económico, inclusão social e resiliência ambiental. Isso será benéfico quer para as gerações presentes quer para as gerações futuras (Geissdoerfer et al., 2017). Atualmente, a projeção é de que a população



global atinja os 9,7 bilhões até 2050. Assim, para suportar os atuais níveis de consumo de recursos, o uso de energia e a produção de resíduos, seriam necessários cerca de 2,3 planetas Terra (Bell, 2016). Perante este cenário, reduzir a pegada ecológica torna-se essencial. Além disso, é crucial investir na produção de conhecimento e na disseminação eficaz dessas informações para toda a sociedade, com especial atenção nos mais jovens, garantindo a sua implementação prática.

Neste contexto, a educação e as instituições do ensino superior, no âmbito da sua missão e atividades, têm uma importante responsabilidade a desempenhar na transformação das sociedades, em particular, em termos de contribuição para o desenvolvimento de uma sociedade mais justa e na salvaguarda de gerações futuras mais sustentáveis (Žalėnienė et al., 2021). As dinâmicas do tecido empresarial devem igualmente integrar modelos de negócio orientados para uma economia circular, em detrimento de uma economia linear, e que contribuam para a sustentabilidade na criação dos seus produtos, os quais requerem uma abordagem estratégica que combine capacidade de inovação, compromisso ambiental e viabilidade económica (Pieroni et al., 2019).

Em linha com a Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, torna-se cada vez mais urgente a adoção de práticas produtivas ambientalmente responsáveis e com menor impacto poluente. O uso de recursos naturais renováveis, como a cortiça, desempenham um papel essencial na construção de um futuro mais sustentável, ao aliar funcionalidade, baixo impacto ambiental e preservação dos ecossistemas. A cortiça é um dos materiais naturais mais atraentes, possuidor de uma estrutura complexa, tornando-a num material versátil e distinto de outros materiais lenhocelulósicos.

Atualmente, as aplicações da cortiça são imensas, como, por exemplo, o produto mais conhecido, as rolhas para garrafas de vinho, que tiveram início do século XVII, por ação do monge beneditino Dom Pérignon, que as usou para vedar as garrafas de seu famoso champanhe, Dom Pérignon. Em 1729, as rolhas de cortiça foram adotadas pela Ruinart e mais tarde, em 1743, pela Moët et Chandon, que as utilizam até aos dias de hoje. A cortiça é ainda usada como isolante térmico, acústico ou antivibrático em diversas indústrias, como a construção civil, em máquinas, no setor do calçado, aeronáutica, automóvel, ou ainda na indústria têxtil, em brinquedos, em pacotes, peças decorativas entre outros (Duarte et al., 2015; Teixeira, 2022), tendo-se verificado vários exemplos de inovação.

A sustentabilidade da cortiça está cada vez mais assente na ciência e na inovação. Por outro lado, o setor industrial corticeiro não só se apoia numa matéria-prima renovável como tem conseguido manter elevados níveis de sustentabilidade associados ao aproveitamento eficiente dos sub-produtos originados na fabricação de rolhas de cortiça.

Neste contexto, e decorrente dos vários processos produtivos, um dos sub-produtos da sua transformação é o pó de cortiça, resultante principalmente dos processos de trituração e corte, que corresponde a 25% em peso do material de cortiça original extraído da árvore. Longe de ser um resíduo descartável, este pó é valorizado como recurso energético e matéria-prima em diversas aplicações industriais. É frequentemente utilizado como biomassa para produção de energia térmica nas próprias unidades fabris, contribuindo para a autossuficiência energética e para a redução de emissões de gases com efeito de estufa. Este aproveitamento integral da cortiça reforça o caráter sustentável da fileira corticeira, onde quase nada se perde e tudo se transforma em benefício do ambiente e de uma economia circular.

Uma questão de particular interesse é a valorização da biomassa como o pó de cortiça e alguns granulados em aplicações de maior valor acrescentado e em substituição de soluções à base de materiais de origem fóssil, nomeadamente na tecnologia ambiental como material adsorvente à base de cortiça. Neste sentido, os carvões ativados são extensivamente explorados numa ampla variedade de processos de adsorção devido à sua resistência química e adaptabilidade de forma. Eles são tipicamente preparados a partir de carvão vegetal e, portanto, às vezes também são designados por carvão ativado. No entanto, o uso de fontes naturais de carbono, como biomassa, representa uma alternativa promissora para a obtenção de carvões de baixo custo (Aroso et al., 2017b; Gil, 2015).

Nas últimas décadas, têm sido investigados novos carvões ativados e bio-carvões, em múltiplas aplicações, tendo sido produzidos utilizando cortiça como matéria-prima, revelando a capacidade de adsorção desses materiais para diferentes compostos, nomeadamente na remoção de metais pesados (iões metálicos), compostos orgânicos e poluentes gasosos (Jesus et al., 2023; Mestre et al., 2014; Silva et al., 2005), contribuindo para a descontaminação da água e do ar, bem como para uma economia mais circular, produzindo adsorventes que auxiliam na redução de múltiplos tipos de poluição.

Atualmente, no mercado identifica-se o produto Corksorb (CORKSORB, 2025), um adsorvente sustentável e 100% natural à base de grânulos de

cortiça com uma forte afinidade com óleos e solventes para contenção de derrames em vários setores da indústria, oficinas, barragens e marinas. Este produto (granulado de cortiça) é descrito como tendo uma capacidade de absorção muito maior (9,43 L/kg), em comparação com os absorventes minerais (Gil, 2015).

A indústria da cortiça ainda é um setor tradicional, sendo os materiais compósitos de cortiça um dos campos mais promissores e modelos de inovação da tecnologia desta indústria. As combinações da cortiça com as propriedades de engenharia das matrizes poliméricas através de tecnologias de fusão trazem valor acrescentado ao material à base de cortiça e potencia novas aplicações, tendo sido inicialmente designada numa parceria com a indústria por “cork-polymer composite (CPC)” (Fernandes et al., 2010), resultando em diferentes soluções de protótipos (Fernandes, 2013; Fernandes et al., 2017).

Ao integrar a cortiça nesses materiais, pode ser melhorada a estabilidade dimensional, o desempenho térmico, o isolamento acústico e as propriedades ao toque, contribuindo para reduzir significativamente sua pegada ecológica.

Estudos em CPCs podem ser encontrados combinando a cortiça e seus subprodutos até 50% em massa combinados com poliolefinas, bem como sobre o efeito da adição de agente compatibilizador na melhoria das propriedades mecânicas e a obtenção de materiais com reduzida absorção de água, a modificação química da superfície da cortiça e a utilização dos seus principais constituintes químicos para melhorarem a compatibilidade da cortiça-polímero. Existem estudos que referem o efeito da adição da cortiça como agente de nucleação nos polímeros, sobre compósitos híbridos com cortiça e reforçados com fibras naturais, sobre propriedades únicas da cortiça combinadas com matrizes poliméricas biodegradáveis, designados por biocompósitos e com o objetivo da produção de materiais mais sustentáveis, utilizando tecnologias baseadas na fusão, como os processos de extrusão, moldação injeção, moldação compressão (Fernandes, 2013; Silva, 2021) e através de processos por manufatura aditiva (Daver et al., 2018; Romero-Ocaña et al., 2022).

Considerando o potencial da área dos materiais compósitos com cortiça, e ao nível da inovação, identificam-se soluções de produto na forma de *pellets*, como o Liforcork, onde a cortiça pode ser combinada com poliuretano, borracha ou incorporar agente expensor (Lifocork®, 2025), ou combinada com matrizes termoplásticas (Prospector®, 2023), podendo posteriormente

serem usados nas indústrias de processamento de matérias-primas plásticas para o desenvolvimento de soluções melhoradas, através da incorporação da cortiça e permitindo reduzir a pegada de carbono da solução de produto final para diferentes aplicações, incluindo o exemplo de consola no interior do veículo da marca japonesa Mazda MX-30 (Negócios, 2020). Outros exemplos de inovação são identificados na área da manufatura aditiva (impressão 3D), como o Fibrolon® (FKUR, 2025) ou o colorFabb's (Molitch-Hou, 2015), apresentando soluções de biopolímero com cortiça na forma de filamento para impressão tridimensional (3D), permitindo revolucionar os paradigmas tradicionais para a criação de materiais com cortiça, aumentando assim a sustentabilidade e o desempenho.

Recentemente, identificam-se ainda estudos referentes à valorização do potencial de biocompósitos com cortiça que apresentam propriedades de interesse para a área da embalagem e para o contato alimentar, evidenciando materiais compósitos com cortiça reforçados com micropartículas de quitosano de origem marinha, mostrando propriedades antimicrobianas e evitando a formação de biofilme na superfície dos materiais (Fernandes et al., 2023), ou ainda biocompósitos com capacidade de termoformabilidade (Moutinho et al., 2025).

Nos diferentes setores e em particular na área da construção e das infraestruturas, a adoção de metodologias como o *eco-design*, a avaliação do ciclo de vida (ACV) e o custo do ciclo de vida do produto (CCV), a adoção de materiais ecológicos, bem como a inclusão de elementos reciclados e recuperados, contribuem para a menor necessidade de novos recursos e para a redução de resíduos, enquanto a adoção de materiais que promovem a redução energética visam melhorar o desempenho térmico dos edifícios e reduzir o consumo de energia. Essa tendência levou à integração de painéis solares, materiais de isolamento de alto desempenho e soluções de fachada mais sustentáveis, e que incorporam plantas vivas nos edifícios.

A cortiça na forma de aglomerado com resina, na forma aglomerada expandida, combinada em estrutura *sandwich*, em granulado, ou combinada com cimento ou polímeros tem sido amplamente utilizada para vários fins, tendo sido material de eleição e de durabilidade para diferentes aplicações, como pavimentos, revestimentos, subpavimentos, juntas de dilatação e revestimentos exteriores, bem como combinado com betão e pavimentos rodoviários. Para além disso, podem ver-se exemplos de arquitetura nas portas e portadas de janela em placas de cortiça virgem no Convento dos Capuchos, situado na Serra de Sintra, em Portugal, ou ainda a porta exterior

da capela do Convento da Arrábida (Serra da Arrábida, Portugal) revestida a pranchas de cortiça de reprodução ou amadia.

Modelos de inovação são o exemplo do Pavilhão de Portugal na Expo 2010, Xangai, China, projetado pelo arquiteto Carlos Couto, e o Pavilhão de Portugal na Expo 2000, em Hannover, Alemanha, projetado pelos arquitetos Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura, ambos com fachadas cobertas por painéis aglomerados de cortiça expandida sem qualquer revestimento, tendo a cortiça como símbolo de sustentabilidade (Knapic et al., 2016; Miranda et al., 2024), ou ainda, mais recente, na mesma linha de solução o Ecork hotel, localizado na cidade de Évora, Portugal (Yadav et al., 2024).

Para além disso estudos científicos e aplicações comerciais de compósitos combinando cimento ou betão com cortiça, avaliando propriedades de redução de densidade, o efeito da granulometria, melhoria do isolamento térmico entre outras, também devem ser referidas, embora esta aplicação não seja nova. Por exemplo, um produto comercialmente disponível é uma argamassa leve com incorporação de cortiça denominado ECOCORK (Gil, 2015). Trata-se de uma argamassa com incorporação de cortiça para a execução de camadas de preenchimento e nivelamento em pisos internos, com desempenho térmico e acústico melhorado. Apesar de não serem exemplos únicos, a cortiça tem-se ainda destacado em projetos internacionais, onde atualmente está considerada a produção de casas na zona rural do Alasca, utilizando mistura de betão com cortiça por impressão 3D (FACFOX, 2024).

Na indústria aeroespacial, o que nos leva até ao programa Apolo da NASA, e que colocou doze homens a andar na Lua entre 1969 e 1972, a cortiça foi selecionada pelas suas propriedades de resistência ao fogo para proteger o módulo de comando das missões Apolo onde seguiam os astronautas. Nestas missões, a estrutura está sujeita a elevada amplitude térmica. Após este sucesso, a cortiça portuguesa, integrou diferentes programas, como o Titan, Delta, Mars Rovers e Atlantis, ou ainda em foguetes e cápsulas espaciais, como o SpaceX Dragon, Orion da NASA, e naves da ESA, onde a cortiça ou os seus compósitos têm sido aplicados como escudos térmicos e em sistemas ablativos (Amorim, 2025).

No setor da moda e do têxtil e resultante da parceria entre academia e a indústria, foi desenvolvido um fio de algodão com incorporação de 20% de cortiça, resultando num produto, denominado CORK-A-TEX, podendo ser combinado com Lyocell (fibra de celulose) ou com poliésteres reciclados, contribuindo para soluções mais sustentáveis. Esta solução com maior conforto térmico abre novas possibilidades à cortiça no sector têxtil, uma vez

que o fio pode ser usado nas máquinas de fição existentes para os tradicionais fios de algodão (Cork-a-Text, 2023).

O desenvolvimento da indústria química e de novas tecnologias possibilitou métodos para o isolamento e purificação dos componentes da cortiça, permitindo conferir-lhes um maior valor acrescentado, dando origem a novas aplicações com potencial para as indústrias farmacêutica e cosmética, na agricultura, na área do papel como aditivo de tintas para impressão, entre outros, onde parte destas aplicações envolvem diretamente macromoléculas ou os oligómeros produzidos pela própria árvore; outras resultam de modificações químicas das substâncias naturais ou dos compostos extraídos da mesma (Aroso et al., 2017b; Carriço et al., 2023; Cordeiro, 1998). Assim, a cortiça e os seus extratos são utilizados como ingredientes bioativos em cosméticos, reivindicando propriedades de antioxidante, esfoliante e antienvelhecimento, resultando em alguns produtos no mercado (Actiscrub™, Suberlift™ e DIAM Oléoactif®), contribuindo para o desenvolvimento sustentável e reduzindo a dependência de químicos sintéticos (Mota et al., 2022). Podem ainda servir como fonte de compostos fenólicos, para aplicações como, por exemplo, conservantes naturais e aditivos para a área biomédica.

Um dos maiores desafios neste processo de requalificação e utilização dos compostos bioativos da cortiça está no fracionamento dos extratos obtidos pelas metodologias previamente descritas de forma a obter compostos refinados e altamente bioativos, como por exemplo a vescalagina e a castalagina (Aroso et al., 2017a). A fração mais eficaz para obter tanto a castalagina como a vescalagina é a fração polifenólica extraída maioritariamente do pó de cortiça utilizando solventes hidroalcoólicos (por exemplo, em água ou etanol), seguida de fracionamento cromatográfico. Estas frações altamente enriquecidas em elagitaninos apresentam uma forte atividade antioxidante, o que as torna importantes para aplicações em cosméticos, produtos farmacêuticos e alimentos funcionais.

Como exemplo, podemos referir a vescalagina, um dos principais elagitaninos entre os compostos fenólicos da cortiça, que apresenta várias características de interesse, nomeadamente o efeito anti-UV: como antioxidante capaz de atuar no meio celular, protegendo as células contra a oxidação, reduzindo o número de espécies reativas de oxigénio (ROS) e limitando o impacto negativo da radiação UV (Araújo et al., 2015). Além disso, apresenta efeito antimicrobiano e bactericida, particularmente contra estirpes resistentes à metilina, como a MRSA (*staphylococcus aureus*, resistente à

meticilina) e a MRSE (*enterococcus faecalis*, resistente à vancomicina). Destabiliza a parede celular bacteriana, tornando-se relevante para o desenvolvimento de biomateriais e revestimentos antibacterianos. Contribui ainda para a inibição do biofilme. Ao interferir com a organização de peptidoglicanos e outros componentes da parede celular, a vescalagina reduz a capacidade de as bactérias formarem e manterem biofilmes, que são estruturas protetoras que contribuem para a resistência bacteriana e a sua persistência (Araújo et al., 2021). Além disso, demonstrou possuir propriedades antiamiloidogénicas, ou seja, inibe a atividade amiloidogénica, a qual está associada à formação de agregados proteicos tóxicos, como por exemplo da amiloide beta 42, um dos principais marcadores patológicos da doença de Alzheimer (Araújo et al., 2020a; Araújo et al., 2020b).

Em modo de reflexão, podemos afirmar que o profundo conhecimento na transformação da cortiça, aliado à crescente necessidade de valorizar esta matéria-prima e os subprodutos resultantes deste processo, constitui uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis. Antevê-se que a próxima década seja marcada por avanços significativos nas aplicações de materiais com cortiça, onde se antecipa uma abordagem, alinhada com o compromisso de proteger os recursos naturais e de reduzir o impacto ambiental, promovendo a criação de soluções inovadoras e ecologicamente responsáveis, e contribuindo para uma economia mais circular e eficiente.

## Referências

- Amorim. (2025). *Aeroespacial*. <https://www.amorim.com/pt/negocio/aplicacoes-de-cortica/aeroespacial/39/>
- APCOR. (2023). *Estudo de Sustentabilidade Setorial. Valorização dos serviços dos ecossistemas no setor da cortiça*. [https://apcor.pt/uploads/Media/Estudos/Estudo-sustentabilidade-setorial/4\\_Estudo%20Sustentabilidade%20Setorial.pdf](https://apcor.pt/uploads/Media/Estudos/Estudo-sustentabilidade-setorial/4_Estudo%20Sustentabilidade%20Setorial.pdf)
- Araújo, A.R., Araujo, A.C., Reis, R.L., & Pires, R.A. (2021). Vescalagin and Castalagin Present Bactericidal Activity toward Methicillin-Resistant Bacteria. *ACS Biomater Sci Eng*, 7(3), 1022-1030. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.0c01698>
- Araújo, A.R., Camero, S., Taboada, P., Reis, R.L., & Pires, R.A. (2020a). Vescalagin and castalagin reduce the toxicity of amyloid-beta42 oligomers through the remodelling of its secondary structure. *Chem Commun (Camb)*, 56(21), 3187-3190. <https://doi.org/10.1039/d0cc00192a>
- Araújo, A.R., Pereira, D.M., Aroso, I.M., Santos, T., Batista, M.T., Cerqueira, M.T., . . . Pires, R.A. (2015). Cork extracts reduce UV-mediated DNA fragmentation and cell death. *RSC Advances*, 5(116), 96151-96157. <https://doi.org/10.1039/c5ra15712a>
- Araújo, A.R., Reis, R.L., & Pires, R.A. (2020b). Natural Polyphenols as Modulators of the Fibrillization of Islet Amyloid Polypeptide. *Adv Exp Med Biol*, 1250, 159-176. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3262-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3262-7_11)
- Aroso, I.M., Araújo, A.R., Fernandes, J.P., Santos, T., Batista, M.T., Pires, R.A., . . . Reis, R.L. (2017a). Hydroalcoholic extracts from the bark of *Quercus suber* L. (Cork): optimization of extraction conditions, chemical composition and antioxidant potential. *Wood Science and Technology*, 51(4), 855-872. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0904-y>
- Aroso, I.M., Araújo, A.R., Pires, R.A., & Reis, R.L. (2017b). Cork: Current Technological Developments and Future Perspectives for this Natural, Renewable, and Sustainable Material. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(12), 11130-11146. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00751>
- Bell, D.V.J. (2016). Twenty-first Century Education: Transformative Education for Sustainability and Responsible Citizenship. *Journal of Teacher Education for Sustainability*, 18(1), 48-56. <https://doi.org/10.1515/jtes-2016-0004>
- Bernards, M.A. (2002). Demystifying suberin. *Canadian Journal of Botany*, 80, 227-240. <https://doi.org/10.1139/b02-017>
- Caldas, M.M., Ferreira, J.L., & Borges, M. (1986). Ceroides da cortiça. *Boletim do Instituto dos Produtos Florestais - Cortiça*, Dec(578-86), 339-342.
- Carriço, C.M., Tiritan, M.E., Cidade, H., Afonso, C., Silva, J.R., & Almeida, I.F. (2023). Added-Value Compounds in Cork By-Products: Methods for Extraction, Identification, and Quantification of Compounds with Pharmaceutical and Cosmetic Interest. *Molecules*, 28(8), 3465. <https://doi.org/10.3390/molecules28083465>



Carriço, S.M.R.S. (1997). *Estudo da composição química da estrutura celular e dos componentes voláteis da cortiça de Quercus suber L.* [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro.

Cordeiro, N.M.A. (1998). *Fraccionamento da cortiça e caracterização dos seus componentes. Estudo de possibilidades de valorização da suberina.* [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro.

Cork-a-Tex. (2023). *Portugal têxtil: Cork-a-Tex em novos mercados.* <https://portugaltexil.com/cork-a-tex-em-novos-mercados/>

CORKSORB. (2025). *Corksorb.* <https://www.corksorb.com>

Daver, F., Lee, K.P.M., Brandt, M., & Shanks, R. (2018). Cork-PLA composite filaments for fused deposition modelling. *Composites Science and Technology*, 168, 230-237. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.10.008>

Duarte, A.P., & Bordado, J.C. (2015). Cork – A Renewable Raw Material: Forecast of Industrial Potential and Development Priorities. *Frontiers in Materials*, 2, 1-8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00002>

FACFOX. (2024). *UTA explores 3D printing homes with cork and concrete Construction 3D Printing.* <https://facfox.com/news/uta-explores-3d-printing-homes-with-cork-and-concrete-construction-3d-printing/>

Fernandes, E. M. (2013). *New functionalization - reinforcement strategies for cork plastics composites: opening a wide range of innovative applications for cork based products.* [Tese de Doutoramento, Universidade do Minho]. Braga. <https://hdl.handle.net/1822/28842>

Fernandes, E.M., Correlo, V.M., Chagas, J.A.M., Mano, J.F., & Reis, R.L. (2010). Cork based composites using polyolefin's as matrix: Morphology and mechanical performance. *Composites Science and Technology*, 70(16), 2310-2318. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.09.010>

Fernandes, E.M., Lobo, F.C.M., Faria, S.I., Gomes, L.C., Silva, T.H., Mergulhão, F.J.M., & Reis, R.L. (2023). Development of Cork Biocomposites Enriched with Chitosan Targeting Antibacterial and Antifouling Properties. *Molecules*, 28(3), 990. <https://doi.org/10.3390/molecules28030990>

Fernandes, E.M., Pires, R.A., & Reis, R.L. (2017). 17 - Cork biomass biocomposites: Lightweight and sustainable materials. In M. Jawaid, P. Md Tahir, & N. Saba (Eds.), *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials* (pp. 365-385). Woodhead Publishing.

FKUR. (2025). *Fibrolon® 3D Cork.* <https://fkur.com/en/bioplastics/fibrolon/fibrolon-3d-cork/>

Fortes, M.A., Rosa, M.E., & Pereira, H. (2004). *A Cortiça.* Instituto Superior Técnico, 260.

Garcia, H., Ferreira, R., Martins, C., Sousa, A.F., Freire, C.S.R., Silvestre, A.J.D., ... Silva Pereira, C. (2014). Ex Situ Reconstitution of the Plant Biopolyester Suberin as a Film. *Biomacromolecules*, 15(5), 1806-1813. <https://doi.org/10.1021/bm500201s>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., & Hultink, E.J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Gibson, L.J., & Ashby, M.F. (1997). *Cellular solids: structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Gibson, L.J., Easterling, K.E., & Ashby, M.F. (1981). The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society of London Serie A - Mathematical and Physical Sciences*, A 377, 99-117.

Gil, L. (2015). New Cork-Based Materials and Applications. *Materials*, 8(2), 625-637. <https://doi.org/10.3390/ma8020625>

Gil, L., & Moiteiro, C. (2002). *Cork*: Jonh Willey. [https://doi.org/10.1002/14356007.f07\\_f01](https://doi.org/10.1002/14356007.f07_f01)

Gonçalves, F., Correia, P., Silva, S.P., & Almeida-Aguiar, C. (2016). Evaluation of antimicrobial properties of cork. *FEMS Microbiol Lett*, 363(3). <https://doi.org/10.1093/femsle/fnv231>

Graça, J. (2015). Suberin: the biopolyester at the frontier of plants. *Front Chem*, 3, 62. <https://doi.org/10.3389/fchem.2015.00062>

Jesus, J., da Silva, R.N., & Pintor, A. (2023). Advances in Cork Use in Adsorption Applications: An Overview of the Last Decade of Research. *Separations*, 10(7), 390. <https://doi.org/10.3390/separations10070390>

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. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1076-4>

Liese, W., Gunzerodt, H., & Parameswaran, N. (1983). Alterações biológicas da qualidade da cortiça que afectam a sua utilização. In *Boletim do Instituto dos Produtos Florestais - Cortiça* (Vol. 541, pp. 277-299).

Lifocork. (2025). Lifocork. <https://www.hexpol.com/tpe/product-brands/lifocork/>

Mestre, A.S., Pires, R.A., Aroso, I., Fernandes, E.M., Pinto, M.L., Reis, R.L., . . . & Carvalho, A.P. (2014). Activated carbons prepared from industrial pre-treated cork: Sustainable adsorbents for pharmaceutical compounds removal. *Chemical Engineering Journal*, 253, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.051>

Miranda, I., & Pereira, H. (2024). Cork Façades as an Innovative and Sustainable Approach in Architecture: A Review of Cork Materials, Properties and Case Studies. *Materials*, 17(17), 4414. <https://doi.org/10.3390/ma17174414>

Mission, E.G., & Cocero, M.J. (2022). Accessing suberin from cork via ultrafast supercritical hydrolysis. *Green Chemistry*, 24(21), 8393-8405. <https://doi.org/10.1039/D2GC02498E>

Molitch-Hou, M. (2015). Cork 3D Printing Filament, Now from colorFabb. <https://3dprintingindustry.com/news/cork-3d-printing-filament-now-from-colorfabb-58766/>

- Mota, S., Pinto, C., Cravo, S., Rocha e Silva, J., Afonso, C., Sousa Lobo, J.M., ...& Almeida, I.F. (2022). *Quercus suber*: A Promising Sustainable Raw Material for Cosmetic Application. *Applied Sciences*, 12(9), 4604. <https://doi.org/10.3390/app12094604>
- Moutinho, L.G., Soares, E., & Oliveira, M. (2025). Thermoforming of bio-based polylactic acid (PLA) sheets reinforced with cork powder. *Materials Today Communications*, 46, 112867. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112867>
- Natividade, J.V. (1990). *Subericultura*: Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação.
- Negócios, J.d. (2020). Cortiça portuguesa utilizada no interior do novo carro elétrico da Mazda. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/transportes/detalhe/cortica-portuguesa-utilizada-no-interior-do-novo-carro-eletrico-da-mazda>
- Pereira, H. (1981a). Química da cortiça. III - Extração da cortiça com solventes orgânicos e água. In *Cortiça* (Vol. 492, pp. 57-59).
- Pereira, H. (1981b). Studies on the chemical composition of virgin and reproduction cork of *Quercus suber* L. *Anais Instituto Superior Agronomia*, 40, 17-25.
- Pereira, H. (1984). Composição química da cortiça virgem e da cortiça de reprodução amadia do *Quercus Suber* L. *Boletim do Instituto dos Produtos Florestais - Cortiça*, 550, 237-240.
- Pereira, H. (1988). Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology*, 22, 211-218. <https://doi.org/10.1007/BF00386015>
- Pereira, H., Ferreira, M.V., & Faria, M.G.P. (1979). *Química da cortiça. I - Estudos de extração com água* (Vol. 485).
- Pereira, H., Rosa, M.E., & Fortes, M.A. (1987). The cellular structure of cork from *Quercus suber* L. *Iawa Bulletin*, 8(3), 213-217. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001048>
- Pereira, H., & Tomé, M. (2004). Cork Oak. In *Non-Wood Product* (pp. 613-620). Elsevier Ltd.
- Pieroni, M.P.P., McAloone, T.C., & Pigosso, D.C.A. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*, 215, 198-216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.036>
- Prospector®. (2023). Cork Polymer Compounds Finding a Variety of End-Use Applications. <https://www.ulprospector.com/knowledge/15520/pe-cork-polymer-compounds-finding-a-variety-of-end-use-applications/>
- Ramos, A., Berzosa, J., Clarens, F., Marin, M., & Rouboa, A. (2020). Environmental and socio-economic assessment of cork waste gasification: Life cycle and cost analysis. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119316>
- Rocha, D., Freitas, D.S., Magalhaes, J., Fernandes, M., Silva, S., Noro, J., ... Silva, C. (2023). NADES-Based Cork Extractives as Green Ingredients for Cosmetics and Textiles. *Processes*, 11(2), 309. <https://doi.org/10.3390/pr11020309>

Romero-Ocaña, I., & Molina, S. (2022). Cork photocurable resin composite for stereolithography (SLA): Influence of cork particle size on mechanical and thermal properties. *Additive Manufacturing*, 51, 102586. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102586>

Rosa, M.E., & Fortes, M.A. (1991). Deformation and fracture of cork in tension. *Journal of Materials Science*, 26, 341 - 348. <https://doi.org/10.1007/BF00576525>

Santos, S.C.P.G.R., & Graça, J.A.R. (2014). WO/2014/092591. *Process for the extraction and purification of long-chain bi-functional suberin acids from cork*.

Silva, S.P., Sabino, M.A., Fernandes, E.M., Correlo, V.M., Boesel, L.F., & Reis, R.L. (2005). Cork: Properties, Capabilities and Application. *International Materials Reviews*, 50(6), 345-365. <https://doi.org/10.1179/174328005X41168>

Silva, S.P.M. (2021). *Cork-polymer composites: a sustainable solution in injection moulding and additive manufacturing*. [Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro]. Aveiro. <http://hdl.handle.net/10773/30895>

Teixeira, R.T. (2022). Cork Development: What Lies Within. *Plants-Basel*, 11(20), 2671. <https://doi.org/10.3390/plants11202671>

Yadav, M., & Singhal, I. (2024). Sustainable construction: the use of cork material in the building industry. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 13(3), 375-383. <https://doi.org/10.1007/s40243-024-00270-x>

Žalėnienė, I., & Pereira, P. (2021). Higher Education for Sustainability: A Global Perspective. *Geography and Sustainability*, 2(2), 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.001>