



libro de texto

El corcho en la industria aeroespacial: del cultivo a la aplicación

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"

El corcho en la industria aeroespacial: del cultivo a la aplicación

Editores Selim Gürgen
Mehmet Alper Sofuoğlu
Melih 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."

Contenido

| | |
|---|----------|
| Prefacio | i |
| 1. Introducción a la ciencia del corcho: cultivo, recolección y procesamiento del corcho | 1 |
| 1.1 Alcornocal | 1 |
| 1.1.1 Descripción botánica | 4 |
| 1.1.2 Silvicultura/Agroforestería | 7 |
| 1.1.2.1 Regeneración de rodales | 7 |
| 1.1.2.2 Fases juveniles | 8 |
| 1.1.2.3 Fases adultas | 8 |
| 1.1.3 Gestión sostenible | 9 |
| 1.1.4 Amenazas al cultivo | 11 |
| 1.1.4.1 Enfermedades | 11 |
| 1.1.4.2 Cambio climático | 12 |
| 1.2 Extracción de corcho | 13 |
| 1.2.1 Proceso de descorche | 14 |
| 1.2.1.1 Intensidad de descorchado | 17 |
| 1.2.1.2 Efecto sobre el crecimiento de los árboles | 20 |
| 1.2.2 Operaciones posteriores a la saca | 21 |
| 1.2.2.1 Almacenamiento en campo | 21 |
| 1.2.2.2 Variación del contenido de agua | 23 |
| 1.2.2.3 Almacenamiento en patio y preparación para el procesamiento | 23 |
| 1.2.2.4 Tipos de corcho crudo | 25 |
| 1.2.2.5 Requisitos industriales | 28 |
| 1.2.3 Defectos e implicaciones del corcho | 29 |
| 1.2.4 Clasificación de la calidad de las planchas | 32 |
| 1.2.4.1 Clases de calibre | 32 |
| 1.2.4.2 Clasificación de calidad | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 1.2.4.3 Índice de valor integrado del corcho | 34 |
| 1.3 Tratamientos posteriores a la saca | 35 |
| 1.3.1 Hervido de las planchas | 35 |
| 1.3.1.1 Cómo afecta la ebullición al corcho | 37 |
| 1.3.2 Proceso posterior del hervido | 38 |
| 1.3.3 Procesamiento del corcho verde | 39 |
| 1.3.4 Segundo hervido | 39 |
| 2. Sostenibilidad, Huella de Carbono y Productos Potenciales del Corcho | 46 |
| 2.1 Corcho y Sostenibilidad | 47 |
| 2.1.1 Ecosistema de corcho | 47 |
| 2.1.2 Servicios ambientales | 50 |
| 2.1.3 Gestión sostenible | 53 |
| 2.1.4 Efecto del cambio climático en el ecosistema del corcho | 57 |
| 2.2 Huella de Carbono de los Productos de Corcho | 58 |
| 2.2.1 Introducción a la Huella de Carbono | 58 |
| 2.2.2 Fijación de carbono de los bosques | 60 |
| 2.2.3 Ciclo de vida de los productos de corcho | 64 |
| 2.2.4 Valores de Huella de Carbono | 67 |
| 2.3. Usos potenciales del corcho | 68 |
| 2.3.1 Principales Propiedades del Corcho | 68 |
| 2.3.2 Aplicaciones de corcho | 75 |
| 2.3.3 Corcho en la Construcción | 76 |
| 2.3.4 Textil y Movilidad | 79 |
| 2.3.5 Farmacia y Cosmética | 81 |
| 2.3.6 Otros | 82 |

| | |
|---|------------|
| 3. Sectores de productos de corcho, propiedades del corcho y tendencias futuras del corcho | 90 |
| 3.1 Introducción | 90 |
| 3.2 Sectores para la Producción de Corcho | 93 |
| 3.2.1 Aglomerados de corcho para uso general | 95 |
| 3.2.2 Aislamiento Térmico y Acústico | 97 |
| 3.2.3 Caso de aislamiento de sonido | 98 |
| 3.2.4 Estructuras tipo sándwich | 100 |
| 3.2.5 Automotor | 104 |
| 3.2.5.1 Caso de estudio | 105 |
| 3.2.6 Tecnología de absorción de energía | 111 |
| 3.3 Conclusiones | 113 |
| | |
| 4. Fabricación e implementación de compuestos a base de corcho en la aviación | 119 |
| 4.1 Una descripción general de los compuestos estructurados en sándwich a base de corcho | 119 |
| 4.1.1 Definición y tipos de compuestos estructurados en sándwich | 119 |
| 4.1.2 Propiedades, ventajas y desventajas más relevantes en aeronáutica de los composites estructurados en sándwich a base de corcho | 121 |
| 4.1.3 Áreas de aplicación aeronáutica de los compuestos estructurados en sándwich | 124 |
| 4.2 Métodos de fabricación de compuestos estructurados en sándwich a base de corcho | 129 |
| 4.2.1 Métodos de Fabricación de Paneles Sándwich Planos | 129 |
| 4.2.1.1 Fabricación de Paneles Sándwich Planos bajo Compresión Mecánica | 129 |
| 4.2.1.2 Fabricación de Paneles Estructurados en Sándwich bajo Compresión al Vacío | 130 |
| 4.2.2 Proceso de Fabricación de Paneles de Curva Simple o Doble | 132 |
| 4.2.3 Particularidades en el Montaje de Paneles Estructurados Sándwich | 136 |
| 4.2.3.1 Refuerzo de Paneles Estructurados en Sándwich en los Puntos de Anclaje de Otros Elementos Estructurales | 136 |
| 4.2.3.2 Refuerzo de Paneles Estructurados en Sándwich en los Puntos de Montaje de Otros Elementos Estructurales cuando Estos Elementos Están Atornillados | 137 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.4 Características de los cierres de borde de paneles estructurados en sándwich | 138 |
| 4.3 Aplicaciones de composites de corcho para juntas y otros materiales de sellado | 140 |
| 4.3.1 Fluidos más comunes utilizados en la industria aeroespacial | 141 |
| 4.3.2 Tecnologías de sellado de fluidos | 142 |
| 4.3.3 Aplicaciones aeroespaciales probadas en el tiempo | 144 |
| 4.4 Ensayos de Materiales Compuestos Estructurados en Sándwich con Rellenos de Corcho | 145 |
| 4.4.1 Análisis de espectro de materiales compuestos estructurados en sándwich con rellenos de corcho | 145 |
| 4.4.2 Banco de Pruebas y Condiciones de Mediciones | 146 |
| 4.4.3 Conclusión del Primer Análisis | 151 |
| 4.4.4 Conclusión del Segundo Análisis | 152 |
| 4.5. Pruebas de flexión de compuestos estructurados en sándwich a base de corcho | 153 |
| 4.5.1 Muestras | 153 |
| 4.5.2 Realización de pruebas de flexión | 156 |
| 4.5.3 Comparación de los Resultados y Análisis | 158 |
| 4.5.4 Ensayos de tracción | 159 |
| 4.5.5 Resultados de las pruebas de tracción | 159 |
| 5. Aplicaciones aeronáuticas/espaciales de compuestos de corcho | 166 |
| 5.1 Introducción | 166 |
| 5.2 Propiedades generales de los compuestos de corcho | 169 |
| 5.2.1 Propiedades mecánicas/físicas | 170 |
| 5.2.1.1 Cambios relacionados con la temperatura en las propiedades mecánicas | 174 |
| 5.3 Utilizaciones actuales del corcho en aplicaciones aeronáuticas/espaciales | 176 |
| 5.3.1 Componentes Estructurales con Corcho en Aplicaciones Espaciales | 178 |
| 5.3.2 Proyectos sobre el Uso del Corcho en Estructuras Aeroespaciales: Proyecto Aerocork | 183 |
| 5.4 Aplicaciones potenciales de compuestos de corcho en estructuras aeronáuticas/espaciales | 184 |
| 5.4.1 Compuesto de corcho y matriz cerámica en aplicaciones aeronáuticas/espaciales | 184 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.2 Aislamientos del sistema de lanzamiento espacial | 185 |
| 5.4.3 Corcho en la Misión de Marte | 187 |
| 5.5 Conclusiones | 188 |

Prefacio

Este libro de texto se produce dentro de un proyecto financiado por la Unión Europea en el marco del Programa Erasmus+ KA203: *Strategic Partnerships for Higher Education*.. El proyecto titulado *EcoCork: Desarrollo educativo para compuestos de corcho sostenibles y ecológicos en aplicaciones aeroespaciales* (#2020-1-TR01-KA203-092763) se ha desarrollado mediante un consorcio de seis socios; Universidad Eskişehir Osmangazi (Turquía), Universidad de Aveiro (Portugal), Amorim Cork Composites (Portugal), Fundació Institut Català del Suro (España), Universidad de Ciencia y Tecnología de Wrocław (Polonia) y Universidad Técnica de Vilnius Gediminas (Lituania).

El corcho se encuentra principalmente en Europa, especialmente Portugal y España. Por esta razón, los productos a base de corcho se han convertido en un valor común compartido en Europa y, por lo tanto, lideran la ciencia del corcho y disponen de tecnología de vanguardia en este campo. Como material natural, el corcho proporciona varias ventajas para diferentes aplicaciones de ingeniería. La sostenibilidad y las propiedades ecológicas son las ventajas más importantes para el futuro de nuestro planeta. Dado que la industria aeroespacial es uno de los sectores líderes en el mundo, el proyecto *EcoCork* ha investigado desde la perspectiva aeroespacial el corcho.

Este libro de texto proporciona un conocimiento detallado sobre la ciencia del corcho desde el cultivo hasta las aplicaciones. El capítulo 1 trata sobre el cultivo, la saca o recolección y el procesamiento del corcho. El capítulo 2 se centra en la sostenibilidad y las propiedades ecológicas del corcho. El capítulo 3 ofrece una discusión sobre los productos de corcho, las propiedades del corcho y las tendencias futuras del corcho. El capítulo 4 analiza la fabricación y las implementaciones de productos a base de corcho. El capítulo 5 repasa las aplicaciones aeronáuticas y espaciales con productos de corcho.

Editores

Selim Gürgen

Mehmet Alper Sofuoğlu

Melih Cemal Kuşhan

CAPÍTULO 1

Introducción a la ciencia del corcho: cultivo, recolección y procesamiento del corcho

GF Serra, FAO Fernandes, GJA Sousa, RJ Alves de Sousa, AB Pereira*

Departamento de Ingeniería Mecánica, Campus Universitário de Santiago, Universidad de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

*Contacto: fabiofernandes@ua.pt

Resumen

Este capítulo ofrece una visión general de los principales aspectos de la ciencia del corcho. Describe los pasos esenciales, comenzando por las especificidades del mantenimiento, cultivo de alcornocal y saca del corcho, y finalmente, los pasos necesarios para transformar la corteza exterior del alcornoque (el corcho) en una materia prima adecuada para desarrollar productos de ingeniería. En este ámbito, también se abordará la contribución de las materias primas a base de corcho a algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, (ciudades más seguras e inclusivas, fabricación sostenible, y otros). El capítulo empieza abordando los desafíos del cultivo y mantenimiento de los alcornocales: los diferentes tipos de alcornoques y bosques, el cultivo planificado para mantener la disponibilidad de material y las principales amenazas. A continuación, se abordan las técnicas y cuidados de extracción del corcho - herramientas, la calificación humana, el tiempo entre sacas y los diferentes tipos y calidades del corcho extraído. Por último, se trata la utilización del corcho como materia prima y su elaboración, abordando los diferentes tratamientos y transformaciones necesarias para convertirlo en una materia prima apta para estructuras o productos.

Palabras clave: corcho, bosque, materia prima, producto de ingeniería.

1.1. Alcornocal

El alcornoque, o *Quercus suber* L. – su nombre científico – es una encina de hoja perenne con una llamativa corteza gruesa y rugosa que contiene una capa continua de corcho en su parte exterior.

El alcornoque ha adquirido importancia económica por las propiedades, la estética y la sostenibilidad de su corteza. Los alcornoques se pueden dividir en dos sistemas agroforestales distintos:

- Los bosques de alcornoques consisten en un bosque relativamente ralo, asociado a cultivos o pastos para el pastoreo de ganado, con una pequeña cantidad de árboles por hectárea (alrededor de 50 a 150 árboles por ha). Este sistema, representado en la Figura 1.1, se denomina montado en Portugal y dehesa en España;
- Los alcornocales, una masa más densa en las regiones montañosas, no permiten la agricultura debajo de los alcornoques.

Los alcornoques actuales, en su estado adulto, han sido en su mayor parte resultado de la gestión por parte de los propietarios de rodales regenerados de forma natural. Sin embargo, en algunos casos, se han originado de siembras artificiales complementadas con regeneración natural. Por lo tanto, la mayoría de los rodales tienen una distribución espacial heterogénea y no tienen la misma edad.



Figura 1.1 Paisaje típico de una dehesa/montado (Fuente: APCOR© [1]).

El alcornoque se extiende por las zonas mediterráneas occidentales del sur de Europa y el norte de África, integrando mayoritariamente los dos tipos de sistemas agroforestales –bosques de alcornoque y alcornocales– y siendo normalmente utilizado para la caza y el pastoreo del ganado, además de la producción de corcho.

Esta especie semitolerante se adapta bien a climas suaves como el mediterráneo -inviernos suaves y veranos cálidos y secos- y suelos de baja fertilidad. Los bosques de alcornoques desempeñan un papel ecológico fundamental en la contención de la desertificación y la erosión del suelo, además de contribuir al mantenimiento de la biodiversidad. Los bosques de alcornoques sostienen una ecología única y frágil, constituyendo un hábitat para especies raras y amenazadas como el águila imperial (*Aquila adalberti*), en peligro de extinción. Junto a la Amazonía, Borneo y la sabana africana, los alcornocales son uno de los 36 ecosistemas más importantes del mundo para la conservación de la biodiversidad, albergando más de 200 especies animales y 135 especies vegetales [2].

El alcornoque demuestra una gran plasticidad ecológica. Tiene la capacidad de adaptar su fenología y actividad fisiológica a condiciones ambientales cambiantes como altas temperaturas e incluso escenarios de sequía. Crece óptimamente desde el nivel del mar hasta los 600 m de altitud; sin embargo, es posible hasta 2000 m. En cuanto a la distribución estacional de las lluvias, se adapta a mayores precipitaciones de octubre a marzo (otoño-invierno) y muy poca o ninguna lluvia en verano.

La precipitación media anual ideal es de 600-800 mm, pero el mínimo para un desarrollo equilibrado del árbol debe ser de 500 mm. No obstante, todavía sobrevive en años de baja precipitación, por ejemplo, por debajo de 400 mm. Por otro lado, aunque son admisibles precipitaciones de hasta 1700 mm, el alcornoque es susceptible al encharcamiento.

La temperatura media anual ideal oscila entre 13 °C y 16 °C. La temperatura mínima absoluta para la supervivencia es de -12 °C, y la temperatura media mínima durante el invierno es de 4-5 °C. Las temperaturas típicas de verano en el Mediterráneo pueden alcanzar más de 40 °C. Sin embargo, un aspecto importante es la buena respuesta del alcornoque al aumento de temperatura y la temperatura óptima de 33-34 °C en plántulas de alcornoque [3]. En general, las temperaturas alrededor de -5 °C y 40 °C pueden considerarse los límites mínimo y máximo. La especie también es muy tolerante con los suelos; las únicas excepciones son los sustratos calcáreos y calizos. Admite un rango de pH entre 4,8 y 7,0 y crece preferentemente en suelos silíceos y arenosos bien drenados. Sin embargo, es posible el crecimiento en suelos pobres y poco profundos, bajos en nitrógeno y pobres en materia orgánica todavía. Además, los alcornoques son capaces de prevenir la degradación del suelo y generar altos niveles de biodiversidad. Los alcornoques potencian la materia orgánica de los suelos buscando nutrientes en el subsuelo y devolviéndolos al suelo mediante la caída de hojas y ramas, haciéndolos más productivos.

Los alcornocales se extienden por la cuenca mediterránea occidental (más de 2 millones de hectáreas). Más concretamente, en el sur de la Península Ibérica y el norte de África. Una representación geográfica de los alcornoques se puede ver en la Figura 1.2. Los alcornoques también están presentes en Francia e Italia. Según Helena Pereira [4], en la década de 1990: Portugal tenía unas 713 000 ha, España unas 475 000 ha, Francia 68 000 ha, Italia 65 000 ha, Marruecos 348 000, Túnez 90 000 ha y Argelia, normalmente denominada al tener 440 000 ha, probablemente ha tenido una disminución a unas 230 000 ha.

Se identificaron dos grupos de poblaciones de alcornoques con genética distinta en dos regiones diferentes: uno en la Península Ibérica y las zonas francesas cercanas y otro en el norte de África, Provenza (Francia) e islas del Mediterráneo (Sicilia, Cerdeña y Córcega). El primer grupo mostró mayor diversidad genética dentro de su población y menor diferenciación entre poblaciones que el segundo.



Figura 1.2 Distribución geográfica de los alcornoques: Las regiones verdes representan el rango nativo; las cruces indican poblaciones aisladas, y los triángulos indican áreas donde el *Quercus suber* ha sido introducido y naturalizado [5].

Portugal y España tienen los bosques de alcornoques más grandes, siendo también los principales productores de productos de corcho. Portugal tiene la mayor superficie de montado y actualmente lidera las exportaciones de productos de corcho, siendo el mayor fabricante. Anualmente, se estima una producción de aproximadamente 374 000 toneladas de productos de corcho, la mayor parte procedente de Portugal y España, que son responsables del 74% del total (51% y 23%, respectivamente) [6]. La producción anual puede variar debido a eventos climáticos o desastres naturales, como por ejemplo, en Portugal, los incendios forestales de 2003 o la grave sequía de 2004.

Además del *Quercus suber*, existen otros alcornoques, como el *Quercus cerris* y el *Quercus variabilis*. Este último se adapta a los climas orientales y se conoce comúnmente como alcornoque chino [7]. La microestructura del corcho de *Quercus variabilis* es similar a la de *Quercus suber*, pero las células son mucho más corrugadas y colapsadas. Las celdas suelen ser más pequeñas y están presentes en mayor número por unidad de volumen, lo que da como resultado un tipo de corcho más denso. Alrededor de 1,2 millones de hectáreas de bosque están compuestas por *Quercus variabilis* y de él resultan alrededor de 50-100 kilotoneladas de corcho procesado. Sin embargo, la diferencia de calidad es significativa. El corcho de *Quercus suber* L. presenta una materia prima de mucha más calidad. Además, presenta niveles de homogeneidad mucho más altos, lo que resulta en planchas de mayor dimensión y regularidad. [8].

1.1.1. Descripción botánica

La especie a la que pertenece el alcornoque -el orden de *las Fagales* y la familia de las *Fagaceae*- contiene más de 40 variedades y finalmente se divide en cuatro grupos: *subcrinita* , *macrocarpa* , *genuina* y *occidentalis* [9] . También se producen híbridos naturales entre variaciones con sistemas de reproducción similares, como el cruce de *Q. ilex* con *Q. suber* [10,11]. Muestran diferentes formas botánicas y pueden variar en el período de floración, la forma y el tamaño de las hojas (incluidas las flores y los frutos) y la forma del árbol en sí. La gran diversidad en términos de morfología y fenotipo se debe, en gran medida, a la transferencia de material genético del *pool* genético de una especie otra, también conocida como hibridación introgresiva. La calidad del corcho y la descendencia de un árbol pueden mostrar una gran variación dentro de la misma población de árboles.

Los alcornoques son árboles de tallo corto y ramas gruesas que alcanzan alturas máximas de 16 m. Sin embargo, los árboles que crecen en rodales menos densos pueden tener mayores dimensiones especialmente los árboles adultos de 150 a 200 años pueden presentar grandes diámetros nomiales y dimensiones de copa (que pueden alcanzar unos 500 m² de proyección de copa). En rodales densos, los árboles suelen tener copas más estrechas y tallos más altos, dado que los otros árboles circundantes influyen en sus dimensiones. La Figura 1.3 y la Figura 1.4 muestran ejemplos de alcornoques aislados y una zona densamente arbolada. Muchos alcornoques actuales en la dehesa gestionada tienen formas diferentes como consecuencia de la poda en edad temprana y su continuidad. Estos suelen tener un tallo bifurcado. La bifurcación comienza a poca altura, seguida de dos o tres ramas principales dispuestas con ángulos abiertos en relación con el tallo y una copa circular con la parte superior aplanada.



Figura 1.3 Alcornoque aislado con mayor diámetro de copa (Fuente APCOR© [1]).



Figura 1.4 Alcornoques en zona densamente arbolada (Fuente APCOR© [1]).

El sistema radicular de la especie es dimórfico, con una raíz primaria fuerte y larga y ramas laterales gruesas, que pueden exhibir una gran expansión horizontal con numerosas raíces superficiales en árboles de crecimiento abierto. La raíz principal puede alcanzar varios metros de penetración en el suelo. Esto demuestra la capacidad de los alcornoques para llegar a acuíferos profundos en el verano, lo que les permite mantener una alta hidratación de las hojas y así mantener su desarrollo durante los períodos de alta demanda de agua y radiación [12]. El sistema radicular se asocia frecuentemente con varias micorrizas.

Las yemas son de color púrpura oscuro, ovoides y diminutos, de aproximadamente dos milímetros de largo. Las hojas son de color verde oscuro con una densa pubescencia blanca en la cara inferior y una densa red de estomas con células protectoras que se extienden desde el plano epidérmico [13]. La forma de la hoja varía entre ovoides y oblongas con un borde arrugado u ondulado. El largo y el ancho de la hoja oscilan entre 4 y 7 cm y 2 a 3 cm, respectivamente. La forma y el tamaño de las hojas varían considerablemente entre los árboles y el dosel. La figura 1.5 muestra las hojas típicas de las especies del género *Quercus*.



Figura 1.5 Formas típicas de las hojas (imagen cortesía de APCOR© [1]).

La actividad fisiológica se inicia alrededor de febrero/marzo con el desarrollo de las yemas. Su elongación y generación de nuevas hojas se inicia a principios de primavera hasta junio. Las hojas sobreviven hasta alrededor de 14 meses, con un rango de 11 a 18 meses [14,15]. Por lo tanto, las hojas tienden a caer en primavera (a menos que ocurran fuertes lluvias invernales, lo que provoca una defoliación más rápida). Debido a la estacionalidad de la caída de las hojas, durante la primavera, la copa del árbol todavía está dominada por el color descolorido de las hojas del año anterior, en contraste con otras especies que muestran las hojas recién emergidas. Cuando el alcornoque tiene unos 15 a 20 años comienza la fructificación y floración (desde abril hasta finales de mayo). La polinización ocurre durante la primavera y puede ocurrir con polen del mismo árbol o de los árboles vecinos. Como resultado, la descendencia puede diferir significativamente entre sí.

Los frutos del alcornoque y las bellotas, que se pueden ver en la Figura 1.6, tienen diferentes formas y tamaños, desde menos de 2 cm hasta más de 5 cm de longitud. La maduración de las bellotas puede ocurrir en ciclos anuales y bienales [16]. En el primer caso, el período de crecimiento de la bellota se produce a finales de verano y otoño, alcanzando la maduración completa en noviembre [17]. En cuanto a las bienales, estas tienen un período vegetativo de mínimo crecimiento, seguido de un período de crecimiento intenso en la primavera de su segundo año. La frecuencia de estos últimos está influenciada por la duración del período vegetativo, es decir, el acortamiento provocado por intensas y prolongadas sequías estivales. Por década, un árbol típicamente tiene de 2 a 3 años de alta producción de bellotas. El clima frío durante el período de floración puede provocar daños y contribuir a la variabilidad interanual sustancial de la producción de bellotas [18].

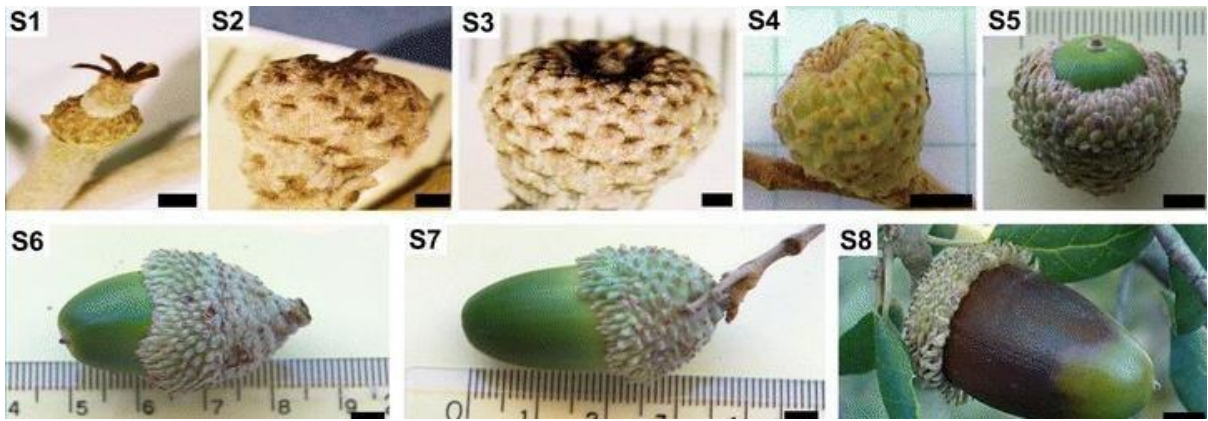


Figura 1.6 Etapas del desarrollo de las bellotas de *Quercus suber* hasta la maduración (adaptado de [19]).

1.1.2. Silvicultura/Agroforestería

1.1.2.1. Regeneración de rodales

La mayoría de los alcornoques resultan de la regeneración espontánea de la brotación de bellotas. La regeneración artificial de rodales de alcornoque es una práctica relativamente nueva, que avanzó sustancialmente en la década de 1990 como resultado de las políticas de la UE y los incentivos para la forestación de tierras agrícolas apartadas. En los últimos quince años, se han establecido varios miles de hectáreas de alcornoques en Portugal y España, ya sea mediante plantación o siembra directa. Sin embargo, la tasa de mortalidad en los primeros años suele ser alta. Las razones generalmente están relacionadas con la falta de suelo adecuado o preparación del mismo para establecer un sistema radicular eficiente que es crítico para el verano; la sensibilidad de la planta al estrés hídrico en su corta edad; y las bellotas y las plantas jóvenes son muy apetecibles para las ratas pequeñas y el ganado, respectivamente [20–22].

La preparación del sitio implica el deshierbe, a menudo realizado con una rastra de discos, y la mejora de las propiedades del suelo para facilitar el desarrollo del sistema de raíces. Las técnicas de preparación pueden implicar la roturación o el subsolado a una profundidad de alrededor de 60 y 80 cm, especialmente en suelos de roca dura, o el arado y la formación de montículos a lo largo de los contornos, seguidos de un arado profundo y/o una rastra de discos. Puede abarcar toda el área o limitarse a la línea de plantación. Por lo general, se aplica un fertilizante a base de nitrógeno, fósforo y potasio a razón de 40 a 100 g por planta.

Es posible plantar en primavera u otoño con plántulas cultivadas en un vivero y/o sembrar. Un diagrama con las operaciones anuales se representa en la Figura 1.7. El número de árboles plantados por hectárea es menor que el de otras especies productoras de madera. Se recomiendan espacios de alrededor de cuatro metros cuadrados para equilibrar la densidad y los costos de instalación. No obstante, también se emplean distancias más anchas (8 m x 4 m) y más densas (4 m x 2 m).

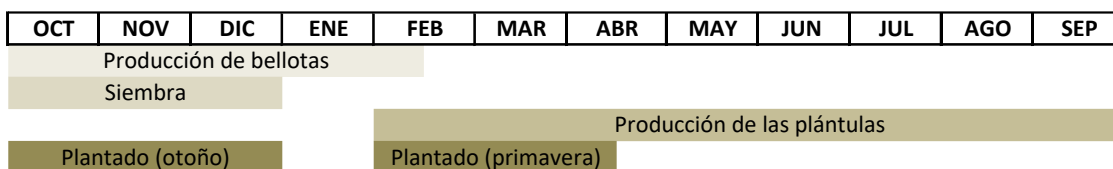


Figura 1.7 Eventos anuales relacionados con la forestación (adaptado de [23]).

Debido a la alta tasa de mortalidad en los años iniciales, la planta se considera establecida una vez que alcanza una edad de 8 a 10 años. Si bien se cree que proteger las plántulas jóvenes con protectores individuales y estimula el crecimiento inicial en altura, esta técnica ha resultado en mayores tasas de mortalidad y plantas jóvenes con tallos más delgados y subdesarrollados en regiones con sequía severa y altas temperaturas [24]. Cuando las precipitaciones de primavera y verano son insuficientes, el riego debe aplicarse dos o tres veces durante los períodos de mayor estrés. También se sugiere deshierbar durante los primeros años después de la siembra, ya sea alrededor de plántulas individuales o en toda el área.

1.1.2.2. Fases juveniles

Este período va desde el establecimiento del árbol hasta la primera extracción de corcho, que suele ocurrir entre los 25 y los 40 años de edad. Normalmente, 25 años son suficientes en países como Portugal y el sur de España. Los períodos más largos son necesarios para rodales densos y estresados ambientalmente.

Los árboles jóvenes tienen ramificaciones extensas y con frecuencia carecen de un brote principal. Como resultado, la ejecución de la poda es fundamental para obtener un tallo limpio de al menos 2,5 a 3 metros de altura. Habitualmente se realizan tres podas: la primera entre los tres y los seis años para quitar todas las ramas de los primeros 2/3 del tallo, seguida de otra poda entre los doce y los quince años, y por último la poda siguiente el primer extracción. Debido a la alta susceptibilidad de los alcornoques a la competencia durante sus primeros años, el deshierbe debe realizarse no más tarde de los 4-5 años y posteriormente cada 3-4 años hasta alcanzar los 10-15 años.

1.1.2.3. Fases adultas

En rodales adultos, las actividades silvícolas más críticas son el aclareo y el descorche. El aclarado se realiza para lograr un factor de espaciado predeterminado. El factor de espaciado se define como el producto de la distancia media entre los árboles y el diámetro medio de la copa del árbol.

Aunque esta regla empírica no está confirmada experimentalmente debido a la falta de datos sustanciales, generalmente se supone que la competencia excesiva entre árboles reduce la producción de corcho. Por lo tanto, se recomienda un factor de espaciado para tener el espacio disponible

necesario para el desarrollo sin restricciones de la corona. Si bien algunos gestores forestales exploran la aplicación de fertilizantes entre los períodos de descorchado, con el objetivo de aumentar la producción de corcho, la escasa literatura sobre este tema indica que tiene poca influencia en el crecimiento o la calidad del corcho.

Dado que las bellotas eran un cultivo económicamente importante, los alcornoques se podaban para mejorar la producción de frutos. Esta práctica todavía se emplea para mejorar la vitalidad de los árboles y el rendimiento del corcho, aunque no se ha probado experimentalmente. También se puede realizar la gestión de las malas hierbas, dependiendo del tipo de cultivo. Es fundamental que el deshierbe mecánico, como otros, no sea perjudicial para la estructura radicular superficial de los alcornoques.

Los alcornoques pueden vivir entre 250 y 350 años. Sin embargo, su actividad felógena y el grosor de su corteza disminuyen a medida que envejecen. La gestión del alcornoque para la producción de corcho de calidad apto para la industria termina entre los 150 y los 200 años. Por lo tanto, el alcornoque es una especie protegida con unas normas bien definidas sobre operaciones selvícolas, descorchado, aclarado y fin de vida.

1.1.3. *Gestión sostenible*

Desde el bosque hasta el cliente, toda la cadena del corcho depende de una producción de corcho consistente y sostenible, por tanto, de una gestión adecuada de los bosques de alcornoques. Especialmente teniendo en cuenta la distribución geográfica general y la extensión del alcornoque. Según el Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wide Fund for Nature, WWF), casi 100.000 personas en el sur de Europa y el norte de África dependen de estos bosques directa o indirectamente.

Estos bosques son un modelo de equilibrio entre la conservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible: el hecho de que no se talle ningún árbol durante el proceso de descorchado es una novedad en términos de sostenibilidad. La agricultura del alcornoque proporciona una amplia gama de actividades forestales, agrícolas, ganaderas, cinegéticas y económicas. El sector del corcho está a la vanguardia de este crecimiento sostenible, sustentando miles de puestos de trabajo y permitiendo que las familias permanezcan en sus tierras. Los bosques de alcornoques se diferencian de otros sistemas forestales en que el producto no es la madera (tallo) que lleva al final de la vida del árbol, sino la corteza externa que se puede extraer varias veces sin comprometer el árbol.

El crecimiento del corcho, elemento crítico para los propietarios forestales y factor de gestión primordial, define los atributos de la materia prima para el procesamiento industrial. El corcho está destinado mayoritariamente a la elaboración de tapones de vino, practica que requieren un espesor mínimo de las planchas de corcho. Los rendimientos de la producción de corcho dependen de: el crecimiento del corcho, los árboles y las variables de gestión como la intensidad de la extracción de corcho, es decir, el área descorchada y el intervalo entre descorches. En consecuencia, el inventario de los alcornoques requiere información complementaria sobre otras especies arbóreas. Hace tiempo que se usan los modelos de predicción de la producción de corcho, pero la modelización del crecimiento y la producción del alcornoque en la gestión de rodales se ha desarrollado recientemente.

La sostenibilidad de los bosques de alcornoques y la cadena del corcho es un tema de preocupación generalizada, considerando su importancia crítica en la protección ambiental contra la erosión del suelo y la desertificación, así como en los marcos sociales y económicos de las poblaciones y áreas afectadas. El corcho también tiene un importante impacto y legado social y cultural que se extiende mucho más allá de sus áreas de crecimiento. La planificación y certificación de la gestión sostenible del alcornoque ha cobrado protagonismo recientemente en este contexto.

La principal fuente de preocupación para la sostenibilidad de los alcornoques son los sistemas de montado y dehesa, que están experimentando una regeneración insuficiente [25]. La regeneración natural ocurre con poca frecuencia en estos ambientes, y los rodales actuales son mayoritariamente adultos o sobrevenidos. Aunque normalmente en primavera se pueden ver abundantes plántulas cerca de viejos alcornoques como consecuencia de la brotación de las bellotas esparcidas por la comarca, la mayoría morirá al año siguiente. Las plántulas jóvenes requieren protección, por ejemplo, del sol, lo cual no es el caso en ambientes tan abiertos, soleados y caldeados. Lo contrario se verifica en densos bosques de alcornoques, proporcionando las condiciones ideales para la regeneración natural. En ese ambiente, el número de plantas jóvenes es alto a pesar del lento crecimiento debido a la competencia.

No obstante, en estas condiciones, la superficie forestal es estrecha en comparación con la extensión de los sistemas de dehesas y dehesas. Para asegurar la viabilidad a largo plazo de los alcornoques, es necesario considerar la regeneración artificial mediante la siembra o la plantación de plántulas cultivadas en viveros [23]. La forestación de alcornoques ha sido un esfuerzo sustancial en Portugal y España, con la ayuda de los incentivos de la Política Agrícola Común Europea durante las últimas dos décadas. Después de la preparación del suelo, estas iniciativas de forestación plantan una alta densidad de aproximadamente 600 plantas por hectárea. Sin embargo, aunque la supervivencia no siempre es satisfactoria, los primeros 5 a 8 años son críticos para el éxito del establecimiento del árbol.

Otro riesgo para la regeneración natural de los rodales de alcornoque es su carácter multifuncional, en concreto en lo que respecta a la cadena alimentaria. Por ejemplo, las plantas jóvenes que han sobrevivido a las duras condiciones del verano corren peligro en presencia del ganado. En estos casos, debe prohibirse la agricultura en las regiones en regeneración hasta que los árboles jóvenes alcancen la edad de diez años o más.

Europa y el resto del mundo comparten un compromiso con la gestión forestal sostenible. El papel crítico de los bosques en el planeta ha sido reconocido en sucesivas resoluciones internacionales, específicamente sus múltiples funciones (sociales, económicas, ambientales y culturales) que contribuyen al desarrollo sostenible de la sociedad, particularmente en las zonas rurales, produciendo bienes renovables y protegiendo el medio ambiente. El objetivo de la gestión forestal sostenible se ve favorecido por un conjunto de criterios e indicadores que los acompañan y que sirven como pautas de acción. Los criterios abarcan todas las áreas de manejo forestal y sirven para evaluar el desempeño del manejo. Los indicadores son medidas o parámetros cuantitativos, cualitativos o descriptivos que, medidos o controlados periódicamente, revelarán un cambio de criterio. Los criterios e indicadores de la Figura 1.8 son coherentes con los descritos en los acuerdos paneuropeos sobre gestión forestal sostenible. Esta es una prioridad debido a las áreas ambiental y socialmente sensibles donde se encuentran los bosques de alcornoque. Este concepto comienza a germinar y desarrollarse a nivel público y de los grupos de interés. El proceso de certificación de rodales de alcornoque para la gestión forestal sostenible apenas ha comenzado y ya se han completado algunos casos.

| Criterios | Indicadores |
|--|--|
| 1. Recursos y ciclo de carbono | Área forestal Masa forestal Estructura de edad |
| | Distribución diametral Reserva de carbono |
| 2. Salud ecosistémica y viabilidad | Condiciones del suelo Deforestación Daño forestal |
| | Deposición de contaminantes en el aire |
| 3. Funciones productivas | Crecimiento y talas Madera en bruto Productos no madereros |
| | Servicios Bosques bajo planificación forestal |
| 4. Diversidad biológica | Naturalidad Composición de especies arbóreas Regeneración |
| | Especies de árboles introducidas Madera muerta Patrón de paisaje |
| | Recursos genéticos Especies amenazadas Bosque protegido |
| 5. Funciones productivas | Suelo, agua y otros funciones del ecosistema Infraestructuras |
| | Recursos naturales gestionados |
| 6. Otras funciones socio-economicas | Explotaciones forestales Contribución al PIB Ingresos netos |
| | Seguridad y salud en el trabajo Valores culturales y espirituales |
| | Mano de obra forestal Comercio de madera Energía de la madera |
| | Accesibilidad para actividades recreativas Gastos por servicios |

Figura 1.8 Resumen de los criterios existentes e indicadores asociados que establecen un marco del manejo forestal sostenible (adaptado de [4]).

1.1.4. Amenazas al cultivo

1.1.4.1. Enfermedades

Pocas enfermedades graves afectan al alcornoque. En la literatura se han descrito más de 300 especies de hongos y oomicotas de alcornoques. De estos, al menos 100 son patógenos [26]. Afortunadamente, sólo unos pocos son infecciones primarias capaces de atacar árboles sanos. La mayoría son patógenos oportunistas que invaden tejidos de los alcornoques previamente comprometidos por causas abióticas o bióticas [26]. Recientemente, varias especies de hongos oportunistas han despertado un mayor interés debido a su capacidad para colonizar tejidos como endófitos durante un período prolongado de tiempo sin causar signos de enfermedad [27]. Los árboles saludables típicamente manejan estos endófitos [28]. Sin embargo, cuando los factores de estrés ambientales debilitan los árboles, inicialmente los hongos contenidos son capaces de colonizar los tejidos vecinos, lo que resulta en la disminución gradual del árbol y su eventual muerte [29].

La mayor frecuencia y severidad de las sequías y el aumento de las temperaturas favorecen a los patógenos del alcornoque más termotolerantes. Cuando se combinan con el estrés fisiológico inducido por el clima, algunos de estos patógenos hacen que los alcornoques disminuyan y finalmente mueran [30].

El deterioro del alcornoque se refiere, con frecuencia, a una enfermedad multifactorial que involucra varios factores abióticos y bióticos que interactúan (p. ej., sequía, heladas, plagas de insectos y patógenos) que varían en tipo, intensidad, frecuencia e incluso en el sitio/región [31,32]. Sin embargo, se ha demostrado que las enfermedades causadas por los géneros *Diplodia* (hongo) y *Phytophthora* (oomicotas) impactaron significativamente en varios ambientes en términos de disminución y mortalidad de los alcornoques[33,34].

1.1.4.2. Cambio climático

El calentamiento global provoca la pérdida de bosques en todo el mundo [35]. En el Mediterráneo, esto se verifica por el aumento de las temperaturas medias y una disminución general de las precipitaciones anuales, que se distribuyen de forma cada vez más irregular a lo largo de las estaciones, lo que a menudo provoca sequías más prolongadas [36]. El cambio climático puede afectar potencialmente a los alcornocales al alterar el crecimiento y la mortalidad de los árboles, así como la producción y la calidad del corcho [37,38]. Se ha demostrado que la sequía y las altas temperaturas, en particular, inhiben el crecimiento del corcho [39]. La adaptación de las prácticas de gestión forestal, como la optimización de los programas de extracción de corcho, la reducción de las superficies de descorchado y el aumento de la densidad de árboles, podría impulsar la productividad del corcho frente al cambio climático [40]. Debido a la singularidad de los bosques de alcornoques, la promoción de técnicas de gestión sostenible a largo plazo y las intervenciones proactivas basadas en iniciativas de

forestación para preservar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos deben evaluarse a nivel local o regional [41].

Los alcornoques no son lo único afectado por el cambio climático. Muchos de los patógenos del alcornoque, así como la forma en que estos patógenos interactúan con su huésped, también se ven afectados. Por otro lado, el cambio climático puede influir en diversos patógenos de distintas maneras, y la literatura sobre la adaptación de los patógenos al clima aún es limitada [42].

Hay muchos factores que afectan qué un patógeno puede sobrevivir y propagarse. Estos incluyen la temperatura, la lluvia, la humedad relativa, la luz, la humedad de las hojas, la humedad del suelo, la radiación solar, la turbulencia del aire y otros factores. En el sur de la Península Ibérica, donde el oomiceto *Phytophthora cinnamomi* es una causa importante del declive del alcornoque, la combinación de sequías prolongadas y estaciones húmedas, junto con las características del suelo degradado (suelos infértiles con bajos niveles de fósforo, suelos mal drenados) y una enfermedad ambiente favorable (p. ej., rodales ubicados en terreno montañoso orientado al sur) producen condiciones ideales para el patógeno [31].

Dadas las proyecciones actuales de cambio climático, que incluyen el aumento de las temperaturas medias y un aumento en la frecuencia de eventos climáticos extremos (p. ej., sequías, inundaciones y tormentas) en Europa, es probable que proliferen la pudrición de la raíz por *Phytophthora*, aumentando la inestabilidad y la vulnerabilidad de los bosques de robles. ecosistemas [43].

Además, el estrés fisiológico severo reduce la vitalidad de los árboles, haciéndolos más susceptibles a los parásitos. Cuando se combina con la sequedad continua, los endófitos patógenos, como *Brevundimonas mediterranea*, aumentan las tasas de infección y se han relacionado con la pérdida del alcornoque [32]. El impacto ecológico de los hongos xilariáceos en varias especies de árboles forestales ha aumentado en la región mediterránea como resultado de años inusualmente secos [6]. Se necesita más investigación para determinar el efecto del aumento de las temperaturas y la sequía en las características específicas de la especie y la dinámica de la población de algunas enfermedades del alcornoque.

1.2. Extracción de corcho

La extracción del corcho, saca o descorchado, es un proceso antiguo y manual que consiste en cortar la corteza exterior del alcornoque en forma de grandes planchas rectangulares, que se extraen del árbol. Este proceso lejos de ser fácil, requiere manos meticulosas y experimentadas para evitar cualquier daño a la capa madre del árbol (meristema). El procedimiento aprovecha la fragilidad del felogeno y las capas de células de corcho recién desarrolladas para quitar la corteza del árbol sin dañar la corteza interna o el cambium. Por lo tanto, la saca del corcho es un proceso puramente estacional limitado a finales de primavera y principios de verano, lo que requiere que el alcornoque esté fisiológicamente activo. Un alcornoque se puede descorchar de 15 a 18 veces de media a lo largo de su vida con

intervalos aproximados de nueve años, y el primer descorche (corcho bornizo) se produce a partir de los 25 años dependiendo de la zona puede llegar a ser a los 40 años. Al cabo de unos 9 años del primer descorchado se obtiene el corcho secundero, y finalmente, tras unos 9 años más, se obtiene el corcho de reproducción, que contiene las propiedades idóneas para la elaboración de tapones de la mejor calidad.

El proceso de descorche del alcornoque está constituido por cinco etapas:

1. Abrir – La corteza externa (el corcho) se separa con el hacha de la interna cortándola verticalmente a lo largo aprovechando normalmente una ranura de la corteza.
2. Separar- la pana o plancha de corcho se separa torciendo el borde del hacha entre el corcho y la corteza.
3. Trazar- un corte horizontal o un trazado determina el tamaño de la pana de corcho que se extrae del árbol.
4. Extraer- la pana o plancha se retira suavemente del árbol para que no se rompa. (Cuanto más grande es la pana, más valor comercial tiene).
5. Eliminar residuos - en la base del árbol se quedan unos fragmentos de corcho, que se sacan en numerosas ocasiones para erradicar los parásitos que puedan aparecer.

Los requerimientos industriales de la materia prima están determinados por la aplicación específica, que en la actualidad está orientada mayoritariamente a la producción de tapones. Por lo tanto, se requiere un espesor adecuado (es decir, panas de corcho con un espesor mínimo de 27 mm), y no existen fallas significativas tales como discontinuidades severas (es decir, fracturas profundas). Estas son las principales razones por las que el corcho bornizo y el secundero, obtenidos a partir de la primera peridermis y la primera peridermis traumática, respectivamente, no se consideran para la fabricación de tapones de corcho.

1.2.1 Proceso de descorche

La corteza se extrae durante la actividad de la peridermis cuando las células madre felógeno y las células felema recién creadas se hinchan y las paredes celulares son delgadas y débiles. Primero, se corta la corteza, luego se agarra y se saca. Una fuerza suave en la dirección radial es suficiente para separar la corteza al nivel de la zona activa del fenolfgeno. El momento de esta operación es fundamental para evitar daños en el floema y el cámbium subyacentes. Como resultado, la extracción de corcho se limita al período de máxima actividad felógena, que suele ocurrir entre mediados de mayo y principios de agosto. El clima determina el período de descorche, lo que puede causar que las operaciones se retrasen o anticipen. Como se ve en la creación de brotes y hojas, el comienzo del nuevo crecimiento primaveral suele ser un signo de la actividad fisiológica del árbol y una condición necesaria para planificar el inicio del proceso de descorchado. Un enfoque común es evaluar la facilidad con la que se puede extraer el corcho de unos pocos alcornoques. Cuando no se extrae

fácilmente, la corteza no se puede quitar con métodos convencionales; si la fuerza aplicada es excesiva, puede producirse una ruptura a nivel del cambium, lo que provocaría un daño irreversible. Sin embargo, debido a la variabilidad del estado fisiológico de los árboles dentro de un rodal, es posible que algunos árboles no produzcan corcho durante la operación de extracción de corcho, es decir, árboles debilitados o enfermos, o que sea imposible quitar el corcho de algunas partes. El conocimiento de los descorchadores es fundamental para culminar técnicamente con éxito la operación y realizar los juicios necesarios.

La saca del corcho se realiza manualmente. Por lo general, el equipo de trabajo consta de dos personas por el mismo árbol simultáneamente. La figura 1.9 ilustra el proceso de extracción del corcho. Para separar las panas o planchas de corcho se utiliza un hacha pelacables con una hoja cortante curva y un brazo de madera razonablemente largo con un extremo cincelado. El proceso de descorchado comienza con un corte horizontal a lo largo del perímetro del árbol a la altura del pecho o un poco más arriba, seguido de dos o tres cortes verticales según el perímetro del árbol. El corte se hace equilibrando el hacha y ajustando la fuerza para que atraviese la capa de corcho pero no penetre en la corteza interior. Los golpes de corte subsiguientes siguen una línea recta o alrededor del tallo. La capa de corcho se separa insertando el brazo del hacha en el corte y haciendo palanca. La pana de corcho se extrae a continuación.

Se quita la tira de corcho que está en contacto con el suelo en el extremo inferior del tallo, dejando una superficie limpia y despojada. La técnica se repite de forma similar hacia arriba por el fuste del árbol y las ramas principales hasta alcanzar la capacidad de extracción del corcho. Las escaleras, originalmente hechas de madera pero ahora generalmente hechas de aluminio, se utilizan para acceder a las ramas superiores del árbol. El descorchado es un proceso bastante rápido cuando lo realizan empleados cualificados, y un equipo (2 elementos) consigue aproximadamente una media de 900 kg/día [4]. En el caso de árboles grandes de tallo corto y varias ramas gruesas y extendidas, el descorche lo realizan varios grupos de descorchadores que deben ascender por el árbol de pie sobre las ramas, como se puede observar en la Figura 9c. Estos árboles producen una cantidad considerable de corcho, varios cientos de kilogramos. El árbol Assobiador or Whistler es el alcornoque más grande y antiguo de Portugal, y también es considerado el más grande del mundo por el Libro Guinness de los Récords, con un peso de 102 toneladas, fue descorchado en 2000, produciendo 650 kg de corcho, mientras que la cosecha anterior de corcho en 1991 dio 1,2 toneladas [44].



Figura 1.9 a) Un hacha corta la corteza - líneas horizontales y verticales; b) El brazo del hacha se utiliza para extraer la pna o plancha de corcho; c) Resumen de la operación de desbroce; d) Se requiere el uso de escaleras para el decapado de la parte superior; e) Desnudo de las ramas (imágenes cortesía de APCOR© [1]).



Figura 1.10 Tractor cargado con tablonces de corcho (imagen cortesía de APCOR© [1]).

El descorche lo realiza un amplio grupo de trabajadores, la mayoría especializados en la extracción del corcho, en número aproximado de 100. Además de los descorchadores, estos grupos están compuestos por un encargado y personas que recogen y transportan las planchas a un lugar central, así como quienes las apilan. La figura 1.10 muestra cómo se recogen las tablas del suelo y se cargan en el tractor.

El descorche es un evento espectacular arraigado en el pasado cultural y social de estas regiones. Aparece con frecuencia en artesanías como cerámica y azulejos pintados a mano. Ha habido algunos intentos de automatizar el proceso de descorchado. Aunque se han probado enfoques más complejos, como el uso de un chorro de agua a alta presión o un corte láser, se han descartado debido a limitaciones prácticas o económicas. Además, se han propuesto algunas máquinas de aserrar manuales motorizadas para operaciones de corte y se han probado en el campo [45]. Aunque se limita a la extracción vertical y de tallo corto, los resultados son prometedores en términos de precisión de corte y gastos operativos.

Inmediatamente después de quitar la corteza de corcho, el tallo del alcornoque se ve dorado y suave. Se oscurece durante las siguientes semanas, alcanzando finalmente un color marrón rojizo oscuro a medida que los tejidos externos del floema se secan rápidamente, proporcionando al tallo una textura áspera, como se ve en la *Figura 1.11*.

Después de años de exposición a la intemperie, el tallo se vuelve marrón grisáceo oscuro e incluso más áspero con surcos profundos que varían en profundidad dependiendo de la intensidad de crecimiento de la capa subyacente.

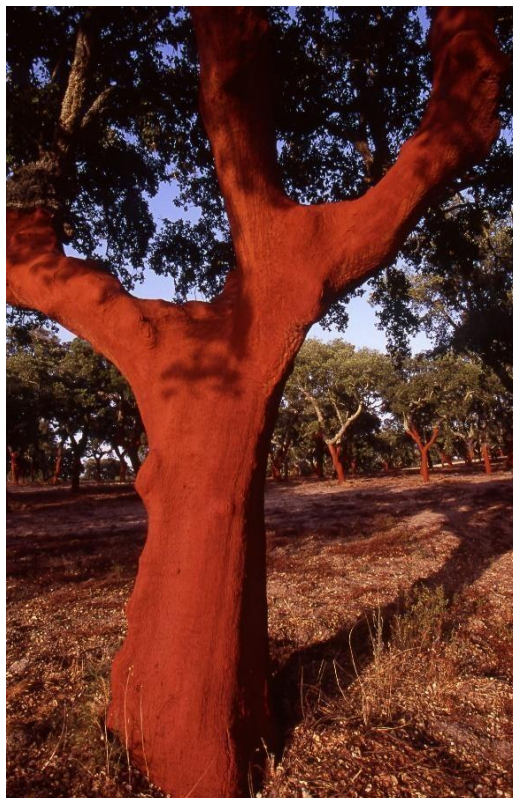


Figura 1.11 Aspecto del fuste de alcornoque tras el descorchado (imagen cedida por APCOR© [1]).

1.2.1.1. *Intensidad de descorchado*

La intensidad de descorche se define como el área de corteza extraída en relación con el tamaño del árbol. El coeficiente de descortezado está definido por la ecuación. 1.1 como la relación entre la altura de descortezado y la circunferencia del alcornoque a la altura del pecho, $DAP_{\text{sobrecorcho}}$ (a 1,3 m de altura) [45]:

$$\text{Coeficiente de descortezado} = \frac{\text{altura de descorche}}{DAP_{\text{sobrecorcho}}} \quad (1.1)$$

La legislación o los procedimientos de buenas prácticas restringen el coeficiente de descortezado. En Portugal, el coeficiente máximo de descortezado está regulado por ley [4]. Depende de la etapa de desarrollo del árbol: 2.0, 2.5 y 3.0 para el primer, segundo y sucesivos descorchos, respectivamente, como se representa en la Figura 1.12. El corcho no se puede extraer hasta que el árbol alcanza una circunferencia de 70 cm (22 cm de diámetro) a la altura del pecho. Este es también el límite para la extracción en ramas. En España, la restricción es de 60 centímetros de circunferencia a la altura del pecho (19 cm de diámetro).

Cuando se quitan las ramas del alcornoque, la altura de descortezado incluye la altura del tallo y la

longitud de la rama medida a lo largo de la rama descortezada más larga. La edad de producción depende del crecimiento radial. Sin embargo, generalmente se acepta que el diámetro requerido se alcanza a los 20 a 25 años en escenarios de cultivo típicos o a los 30 a 40 años en entornos menos favorables.

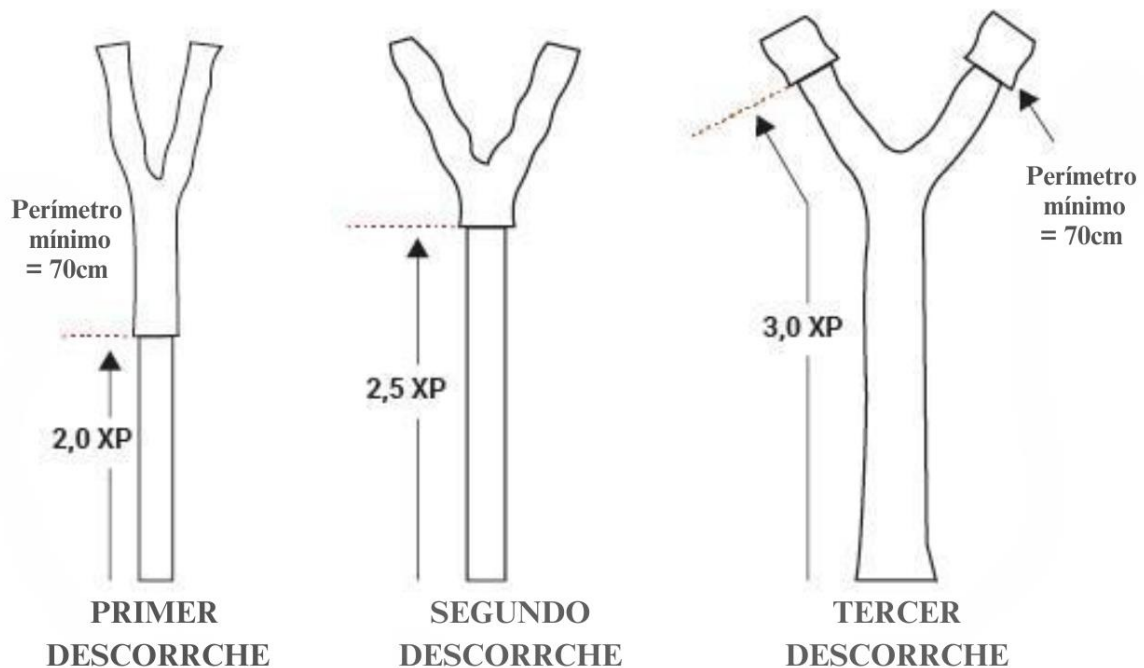


Figura 1.12 Tres fases de descorte de la vida del alcornoque (Adaptado de [46]).

Los límites de intensidad se establecieron con base en la experiencia y el sentido común empírico en cuanto al porcentaje de superficie de tallo y rama que un árbol puede tolerar perder su peridermis sin pérdida irreparable de vitalidad. La intensidad del descorte está relacionada con la frecuencia de las extracciones, definida como el número de años entre dos extracciones, lo que se denomina ciclo de producción. No hay estudios disponibles que midan la influencia del tiempo del ciclo del corcho en el crecimiento de los árboles. El crecimiento del corcho a lo largo del ciclo se ha examinado exhaustivamente y parece que la duración del ciclo ha sido dictada por la necesidad de alcanzar un espesor específico en la tabla de corcho para el uso industrial posterior. Como resultado, la duración puede variar según la región, dependiendo del promedio anual de crecimiento del corcho. En la mayor parte de Portugal y el sur de España, normalmente se consigue un grosor de plancha de aproximadamente 3-3,5 centímetros en nueve años. Sin embargo, alcanzar tal valor en el nordeste de España (Cataluña) o el sur de Francia lleva más de quince años.

Existe un límite legal de nueve años para el período mínimo entre extracciones tanto en Portugal como en España. La edad se puede determinar contando los anillos en una sección transversal de corcho, contando los años de extracción como medios años, como se ilustra en la Figura 1.13.

La extracción de corcho en un rodal puede ocurrir simultáneamente en todos los árboles – corcho de la misma edad – o en un subconjunto de árboles – corcho de edad irregular. Se establecen dos rotaciones de descorte en rodales de corcho de edad desigual, el descorte de árbol y de rodal, en función del número

de edades distintas del corcho en el rodal. Para ayudar en la gestión forestal, el año de extracción se registra en el árbol pintando de blanco el último dígito del tallo después de la extracción del corcho; por ejemplo, si se extrajo en 2005, se pinta el número 5, como se ilustra en la Figura 1.14. La estrategia de gestión actual favorece las zonas de gestión del corcho de edad uniforme y dos o tres edades de corcho en rodales grandes.

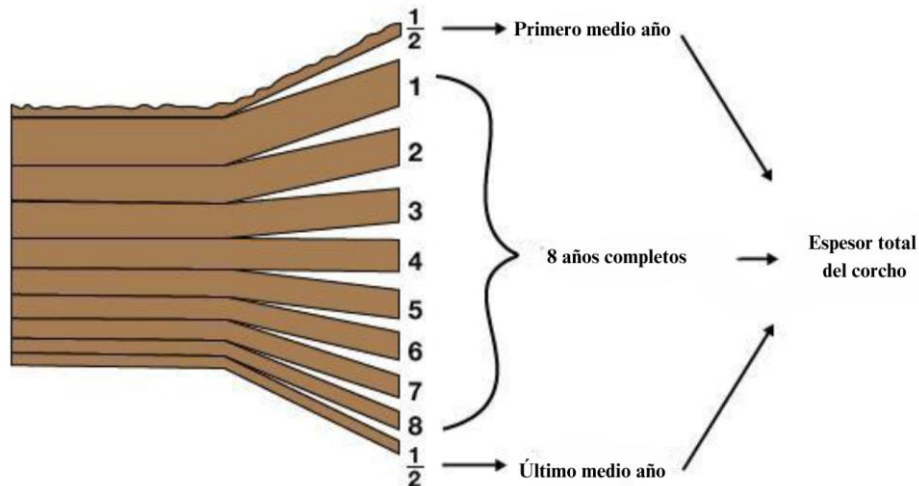


Figura 1.13 Representación del conteo de anillos en una sección de corcho para determinar su edad (Adaptada de [7]).

Históricamente, también se practicaba el descorchado de tallo fraccionado: aproximadamente la mitad de la altura del tallo se descortezaba en un año y el área restante se descortezaba después de 4 o 5 años. Como resultado, un árbol experimentó dos ciclos de corcho separados por un retraso de 3 a 5 años. Esta práctica está actualmente prohibida o desaconsejada, ya que el corte repetitivo en la misma parte del tallo provoca reacciones de heridas que forman un cinturón alrededor del tallo, lo que da como resultado un corcho de mala calidad. Estos alconoques siguen siendo muy característicos del entorno de la dehesa.



Figura 1.14 Indicación del año de descorche (imagen cortesía de APCOR© [1])

1.2.1.2. Efecto sobre el crecimiento de los árboles

Se reconoce que el trabajador involucrado en la extracción del corcho debe ser hábil y cuidadoso para cortar la corteza sin dañar el árbol. De hecho, es necesario un golpe de corte fuerte y rápido, o el corcho absorberá la mayor parte de la energía pero no demasiado fuerte hasta el punto de penetrar el floema o el cámbium. Las heridas, como las que resultan de la extracción del corcho, proporcionan puntos de entrada para la infección y el ataque biológico. El árbol responde formando callos que emergen en el tallo, a veces bastante prominentes, como la línea límite entre las extracciones en el saca fraccionado. Este fenómeno se ve facilitado por las líneas de corte repetitivas en la ubicación exacta durante las sacas posteriores. La producción de corcho disminuye en las zonas de reacción, y los siguientes descorchados son técnicamente más desafiantes, con mayores posibilidades de heridas. El efecto del daño del árbol causado por extracciones posteriores sobre su crecimiento se analizó en [47]. En general, el desarrollo radial de los árboles se redujo en alrededor de un trece por ciento en comparación con los alcornoques ilesos [47]. La producción de corcho disminuyó un catorce por ciento, con un efecto pronunciado en los dos años posteriores a la extracción [47].

Una investigación sobre los daños causados por el descorche y la poda del corcho en cuatro lugares seleccionados de la región de Extremadura, España, informó de una incidencia significativa de daños (afectando entre el 31-47% de los árboles) y paralelismos notables entre los daños y los agujeros causados por el ataque del escarabajo *Cerambyx* y la posterior infección fúngica por *Biscogniauxia mediterranea* (Figura 1.15) [48]. La necesidad de emplear mano de obra altamente calificada para el descorche, la desinfección de los instrumentos de corte entre descortezados de árboles individuales y el control estricto de la operación son temas recurrentes en la gestión del alcornoque, pero no siempre se cumplen.

El descorche tiene un impacto fisiológico directo en el árbol. La región donde se extrajo el corcho experimenta una mayor pérdida de agua por la transpiración del tallo, mientras que los estomas se cierran rápidamente en las horas siguientes (p. ej., no hay actividad estomática después de 24 horas), lo que provoca la interrupción de los procesos nutricionales y sólo vuelve a la normalidad después de 24 a 30 días. Durante este período de tiempo, se forma felógeno traumático y se forman varias capas de células de corcho, protegiendo al floema activo de perder más agua. Debido a que este proceso requiere un consumo de reserva significativo, la actividad del cambium vascular disminuye y el crecimiento de la madera cesa durante esta fase. Hay pocos hallazgos de investigación sobre la influencia de la eliminación del corcho o su severidad en el crecimiento radial del árbol.

Debido a la dificultad de observar los anillos anuales en el alcornoque, es imposible rastrear cómo afecta el descorche al crecimiento siguiente mediante el análisis del disco del tallo. Sin embargo, parece que cuando un árbol comienza a producir corcho, la anatomía de la madera se altera: células más pequeñas con paredes más gruesas, más fibras y menos parénquima, elementos de madera distribuidos irregularmente sin la característica transición gradual de madera temprana a madera tardía [48]. También se informa de la reducción del crecimiento de la madera en árboles maduros en los dos años posteriores al descorche (alrededor del 15% en un ciclo de producción de nueve años) [49]. Sin embargo, la eliminación del corcho no redujo el crecimiento radial general del árbol en árboles muy jóvenes que crecían en condiciones favorables [13].

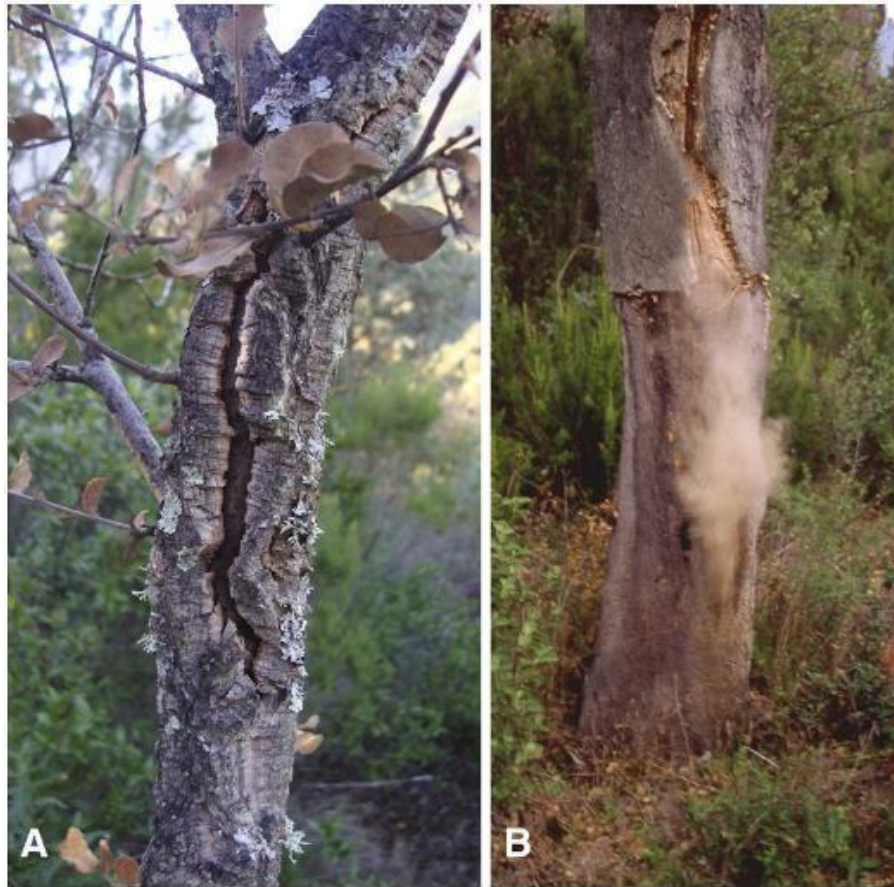


Figura 1.15 Alcornoque afectado con *Biscogniauxia mediterranea*: a) Estromas negros característicos que brotan a través de la corteza.; b) un chancro carbonoso esporulante en la parte inferior del tronco (imagen de [43]).

1.2.2. Operaciones posteriores a la saca

1.2.2.1. Almacenamiento en campo

Los scadores dejan las planchas de corcho retiradas en el suelo. Posteriormente, estas serán recogidos por un tractor y apilados en un patio. En zonas escarpadas con acceso limitado, las planchas de corcho se transportan utilizando un tractor de correa o mulas (en España).

La creación de pilas es un proceso meticuloso, que comienza con la selección del sitio (plano, seco y de fácil acceso por carretera). Las planchas de corcho siguen la forma del tallo (curvado - la parte posterior del corcho hacia el lado convexo). Estos se apilan uno encima del otro con la parte posterior del corcho hacia arriba y se colocan con cuidado para crear una pared exterior recta y sólida para la pila mediante el uso de planchas o panas de forma regular. En el interior de la pila se colocan planchas de forma irregular y más pequeños. Las dimensiones de las pilas varían, pero suelen tener entre 8 y 10 metros de ancho, entre 2 y 2,2 metros de alto y entre 30 y 50 metros de largo. La Figura 1.16 y la Figura 1.17 muestran algunos ejemplos. La pila se construye tan pronto como llegan las planchas del bosque. Como resultado, contiene planchas de corcho de diferentes espesores y calidades ya que aún no se ha realizado ninguna segmentación. Distintos pillas se construyen íntegramente con planchas de corcho (400 cm^2 de superficie mínima), además de un corcho virgen y de segunda.

Los profesionales de realizar las pilas de corcho son expertos calificados que hacen la pila sabiendo que los posibles compradores la inspeccionarán. De hecho, la comercialización del corcho y el acuerdo sobre el precio se establecen tras una inspección visual de la pila. Si bien a veces se toman muestras del núcleo de la pila antes de hacer una oferta, las planchas a la vista juegan un papel importante. El precio se determina por peso, con la unidad de pesaje estándar de 15 kg. Sin embargo, se requiere un acuerdo adicional sobre la cantidad de agua que contiene el corcho y el descuento de peso asociado, como se especifica en la siguiente sección. La duración del almacenamiento en el campo varía y puede durar unas pocas semanas o, en última instancia, hasta un año. Los acuerdos entre el productor y el cliente lo determinan en gran medida y, con frecuencia, la logística en la planta industrial dicta el momento en que se recolecta el corcho. El almacenamiento en campo y la construcción de las pilas se han eliminado recientemente, y las planchas de corcho se entregan directamente al patio industrial después del descorche. No obstante, para lograr una perfecta maduración y estabilización, el corcho debe dejarse al aire libre después del despalillado. El Código internacional de prácticas de tapones de corcho (CIPR) establece pautas estrictas para este paso, incluido el apilamiento de las planchas debajo de materiales no contaminantes durante no menos de seis meses [50].



Figura 1.16 Recogida de las planchas en el campo (fuente APCOR© [1]).



Figura 1.17 Pila de planchas de corcho (fuente APCOR© [1]).

1.2.2.2. Variación del contenido de agua

El corcho presenta un contenido de humedad durante la saca. Esto es de esperar dada la actividad del felógeno y la turgencia de las células en esta ubicación. Después del descorche, las planchas de corcho contienen alrededor de un 25 % de agua, pero esto varía significativamente entre las muestras, desde porcentajes inferiores al 10 % hasta superiores al 50 % [51].

La plancha de corcho está húmeda en el centro y seco en los bordes. Después de la separación del tallo, la capa de corcho más interna de 1 mm de espesor es translúcida, como se esperaba de un tejido lleno de agua. En el momento de la extracción, el corcho tiene un contenido de agua inferior al de la madera recogida durante la recolección (más del 50 % contenido de humedad). La razón es la higroscopicidad del corcho y el largo período de secado del ciclo actual del corcho para las capas externas de la periderma. A temperatura ambiente, las planchas de corcho pierden agua rápidamente. Después de aproximadamente nueve días, las planchas de corcho apilados en el campo deben tener menos del 14 % de contenido de agua y pueden considerarse corcho seco comercial. El corcho completamente equilibrado tiene un nivel de humedad de entre 6 y 10%. El almacenamiento en pilas de campo no afecta el ancho del anillo de crecimiento del corcho ni la porosidad de las tablas o panas de corcho.

A la hora de negociar la venta de un montón de corcho se suele acordar el precio (cuando se pesa). El corcho transportado inmediatamente después de la saca o poco tiempo después tiene un descuento del 20% en el contenido de agua, lo que suele estar sujeto a un intenso debate. Se puede estimar el contenido real de agua y se puede calcular la proporción de agua con respecto al peso del corcho. Con un contenido de humedad del 25 % en el momento de la saca, del 14 % después de nueve días y del 10 % después de un mes, 100 kg de corcho seco (0 % de humedad) pesarán 125, 114 y 110 kg, respectivamente. Esto sugiere que el "descuento" al peso debido al agua sería (a) respecto a un corcho seco absoluto, 20, 12,3 y 9,1% del corcho pesado después de la saca nueve días y un mes, respectivamente, y (b) en corcho secado al aire (el método común) con 10% de humedad, 10, 2,3 y 0% del corcho pesado después del despalillado, nueve días y un mes, respectivamente.

1.2.2.3. Almacenamiento en patio y preparación para el procesamiento

Tradicionalmente, las industrias de preparación de corcho disponen en sus terrenos de una importante zona al aire libre dedicada al almacenamiento de la materia prima del corcho. La zona de almacenamiento de planchas de corcho, o zona de estabilización, tiene una ligera pendiente y está cementada para evitar que el agua de lluvia se acumule cerca del suelo. Esta precaución tiene por objeto evitar el crecimiento de microbios o la contaminación en las tablas de corcho, que podrían introducir o acentuar sabores a moho o humedad. Los fabricantes de tapones prestan mucha atención a este problema, ya que estos sabores y otros sabores considerados negativos pueden ser transferidos del tapón al vino y por lo tanto son problemas críticos de calidad.

En la Figura 1.18 se representan las pilas de planchas de corcho en los patios, estas pueden disponerse de manera regular (igual que las pilas de campo) o más aleatorias si se levantan directamente desde la descarga del camión, como en la Figura 1.19. En la empresa de preparación se preserva el origen de las materias primas y se separan las pilas de almacenamiento según su origen como primer paso para la trazabilidad del corcho dentro del proceso industrial.



Figura 1.18 Planchas de corcho almacenadas en el patio de manera regular (fuente APCOR© [1]).



Figura 1.19 Planchas de corcho en el patio de una empresa de preparación de corcho después de descargarlos del camión (fuente APCOR © [1]).

La duración del almacenamiento depende en gran medida de los requisitos del proceso industrial en términos de flujo de materia prima. Históricamente, se realizaban períodos prolongados de hasta dos años, luego reducidos a un año, y se consideraban necesarios para la estabilización química y estructural de las planchas de corcho. Como ocurre con un gran número de normas empíricas, ésta también carece de fundamento científico. Las sucesivas operaciones de ebullición en agua dan como resultado la relajación estructural de las tensiones, mientras que el secado de las capas internas de corcho y la oxidación al aire de los productos metabólicos tienen lugar en el campo, teniendo en cuenta que estos últimos se limitan a las pocas capas celulares cercanas al felógeno. Actualmente, las buenas prácticas oficiales recomiendan un plazo de almacenamiento de seis meses. Sin embargo, la materia prima se procesa con frecuencia con períodos de almacenamiento más cortos debido a factores económicos y logísticos relacionados con la estacionalidad de la producción de corcho y el costo extremadamente alto de las materias primas. La duración del almacenamiento no tiene efecto sobre las variaciones del ancho del anillo de corcho, la porosidad del corcho y las propiedades mecánicas de los tapones de corcho [52] - el último estudio se aborda duraciones de cero a seis meses.

La preparación para el procesamiento industrial se lleva a cabo en el patio de almacenamiento y consiste en juntar las planchas de corcho en paletas para hervirlas en agua. Durante este procedimiento, las planchas con una calidad extremadamente baja evidente se separan y definen como planchas de corcho de baja calidad o desperdicio, así como planchas de corcho con inclusiones de moho y manchas amarillas. Varias planchas de la parte más baja del tallo del alcornoque tienen el collar de corcho colocado en el suelo en la unión de las raíces del árbol, lo que se conoce como zapatas. Esta sección se corta del tablón a una altura de unos veinte centímetros para evitar el ataque microbiano del suelo. Este procedimiento también comienza en el campo antes de la construcción del pilote.

1.2.2.4. Tipos de corcho crudo

El corcho bornizo, formado en la primera periderma del alcornoque, se puede observar en árboles jóvenes como el representado en la Figura 1.20a, antes de la primera extracción de corcho o en ramas sin desbornizar de alcornoques adultos. Así, la primera extracción de corcho a la edad de 25 años da como resultado un corcho virgen. Debido a su estructura irregular y dureza excesiva, este corcho no es adecuado para la producción de tapones de corcho. Este corcho también se utiliza para diversos fines, como pisos y aislamiento.

Tras la extracción inicial del corcho, se desarrolla la nueva periderma traumática hasta la posterior extracción (corcho secundario). Este segundo dercorche se produce como mínimo nueve años después del anterior y da como resultado un corcho menos rígido y con una estructura más uniforme, como se puede observar en la Figura 1.20b. Sin embargo, el corcho secundario presenta con frecuencia fisuras profundas, lo que lo hace también más adecuado para aglomerados, así como para su uso en la construcción y otros productos.

El corcho de reproducción, representado en la Figura 1.20c, es el corcho a partir de la tercera extracción –cuando el árbol tiene unos 43 años, como mínimo– así como cualquier otra que pueda desarrollarse posteriormente. Esta es la materia prima que utilizará la industria para la fabricación de tapones. El alcornoque producirá corcho excelente cada nueve años a partir de este momento durante aproximadamente un siglo y medio.

El corcho bornizo (corcho virgen) se obtiene de árboles jóvenes que acaban de empezar a producir cuyo corcho se puede quitar desde una altura elevada debido a la expansión radial del árbol. En esta situación, se coloca una tira de corcho virgen en la parte más alta del tallo hasta alcanzar el límite de altura deseado.

La Figura 1.21 muestra un árbol joven después del descorche, con los límites entre las extracciones de corcho visibles: el corcho bornizo ubicado en la parte superior, el corcho secundero de la siguiente región inferior y la corteza interior expuesta en la parte inferior restante del tallo.

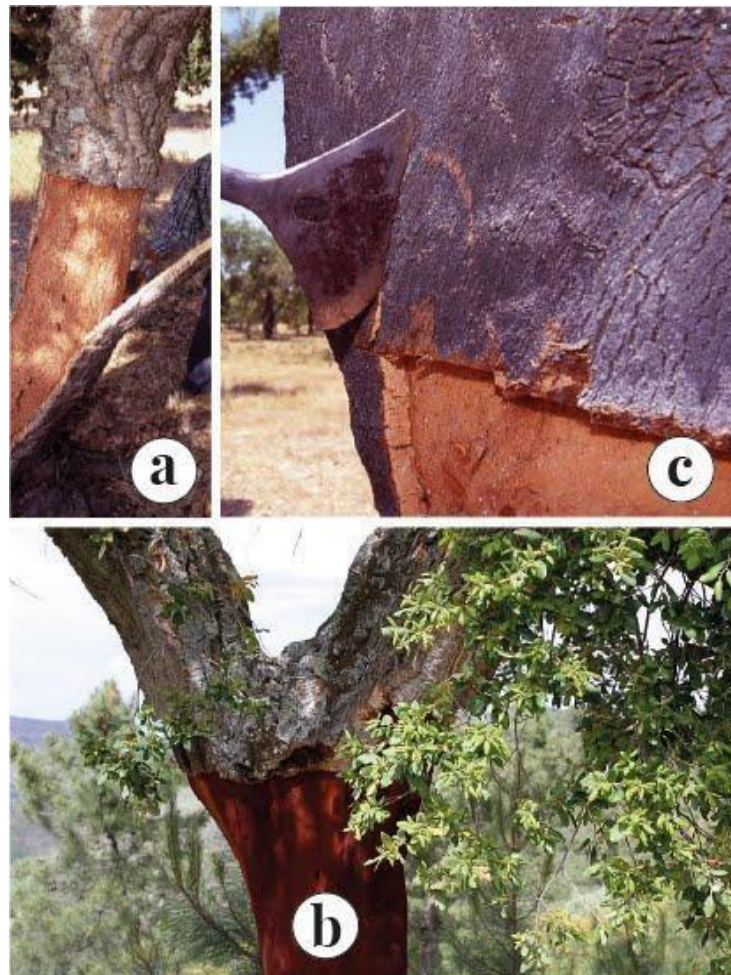


Figura 1.20 Tres tipos de materia prima de corcho a) corcho bornizo (fuente APCOR© [1]); b) corcho secundero (fuente Gerd Eichmann [53]); c) corcho de reproducción (fuente APCOR© [1]).



Figura 1.21 En este tallo es posible visualizar, de arriba abajo, el corcho virgen, el corcho secundario y el felógeno expuesto después del descorche (imagen de [54])

El corcho virgen también se puede obtener de ramas podadas o árboles jóvenes que se hayan eliminado durante las operaciones de aclareo. Debido a que los alcornoques se podan en invierno, la capa de corcho se adhiere firmemente a la corteza interna. El corcho se retira manualmente con una pequeña hacha o un equipo mecánico de descorchado. El corcho se obtiene en ambos casos en piezas que van desde unos pocos centímetros hasta tiras más largas (aproximadamente 20 centímetros), aunque incluye una parte importante de la corteza interior. Esta variedad de corcho se conoce como madera de corcho (también conocida como corcho de invierno). Esta materia prima tiene un valor industrial menor ya que debe limpiarse a fondo después de la molienda para eliminar la madera de los gránulos de corcho.

En conjunto, los posibles tipos de corcho (materia prima) que se pueden obtener del aprovechamiento de estos árboles se resumen en la Tabla 1.1, junto con sus principales características y aplicaciones industriales.

Tabla 1.1 Tipos de corcho (materia prima) obtenidos de la explotación de alcornoques y su respectiva caracterización y uso (adaptado de [3])

| | Origen | Características | Usos principales |
|-------------------------------|---|--|---|
| Corcho bornizo | Primera extracción de corcho del alcornoque joven | Tiene fracturas profundas y una estructura distorsionada | Trituración para aglomerar |
| | Aumento de la altura de descorche de tallo y ramas durante la edad juvenil y primera etapas adultas | | |
| | De ramas de árboles talados podados (obtenidos manualmente con un hacha) | Tiene una gran porción de corteza interior y madera. (también conocido como corcho bornizo de invierno) | Trituración para aglomerados termoexpandidos |
| Corcho secundero | Corcho de segunda extracción | Tiene fracturas profundas | Trituración para aglomerar |
| Corcho de reproducción | Corcho procedente de la tercera extracción y posteriores | Puede obtenerse ya sea descorcho el árbol en pie o extrayéndolo con un hacha después de la tala. En este último, t contiene porciones de corteza interna | Planchas para la producción de tapones de corcho. |
| | Corcho envejecido procedente de la tala de árboles | | Refugo, recortes y planchas muy finas para la trituración o aglomeración. |

1.2.2.5. Requisitos industriales

La industria produce una variedad de bienes con diversos grados de incorporación de corcho y transformación tecnológica. Aún así, la viabilidad económica de todo el sector viene definida principalmente por la fabricación de tapones de corcho natural, principalmente para el embotellado de vino. Hoy en día, la idoneidad del corcho como materia prima para esta aplicación determina en gran medida su valor comercial y los objetivos del gestor forestal.

Al determinar la idoneidad de la materia prima para el procesamiento, el grosor de la plancha es la variable crítica. Por lo tanto, es común que el cliente industrial potencial preste mucha atención a la distribución del espesor de las planchas de corcho al inspeccionar las pilas de campo. El grosor de las planchas obtenidas de varios árboles dentro del mismo rodal y entre rodales dentro de la misma región varía significativamente. El factor decisivo es la fracción de planchas de corcho con un espesor adecuado (un mínimo de veintisiete milímetros) para la fabricación de tapones. Las planchas más finas se utilizan para fabricar discos de corcho para tapones técnicos, como los que se utilizan en las botellas de vino espumoso (champán, cava, proceso, sidra, cerveza, etc.).

El grosor de la plancha está determinado por las circunstancias ambientales, la genética del árbol y la duración del ciclo del corcho: se obtienen planchas de corcho más gruesas con intervalos más largos entre extracciones. Esta es una variable de gestión que los silvicultores pueden utilizar para optimizar el valor de la producción teniendo en cuenta los requisitos industriales. Además, se tiene en cuenta la calidad de las planchas de corcho en términos de homogeneidad del tejido de corcho. La porosidad excesiva causada por los canales lenticulares, visibles en la Figura 1.22, y otras discontinuidades como grietas o galerías de insectos reducen significativamente el rendimiento y la calidad de la producción de tapones, lo que puede resultar en rechazos de calidad. En esta situación, dichas planchas se consideran de baja calidad y se procesan para obtener gránulos de corcho con el fin de producir aglomerados de corcho.

Las dimensiones de las planchas de corcho en bruto varían según el tamaño del árbol y los factores operativos relacionados con el descorche del alcornoque. Son aproximadamente rectangulares, con una altura de 1 a 1,8 m y un ancho de 0,4 a 0,8 m. Las planchas de corcho utilizadas para fabricar tapones tenían una altura media de 1,19 metros y un ancho de 0,47, lo que da como resultado una superficie media de $0,37 \text{ m}^2$ [47]. Dimensiones comparables en planchas de corcho destinadas a la producción de discos revelaron una altura media de 0,75 metros y una anchura de 0,35 metros, lo que da como resultado una superficie media de $0,19 \text{ m}^2$ [56]. Las piezas con una superficie inferior a 400 cm^2 no entran en la categoría de planchas y se apilan por separado para su uso en la producción de granulados.

Después de hervir en agua, las planchas de corcho se clasifican según su espesor y calidad. El criterio principal es su idoneidad para la fabricación de tapones.

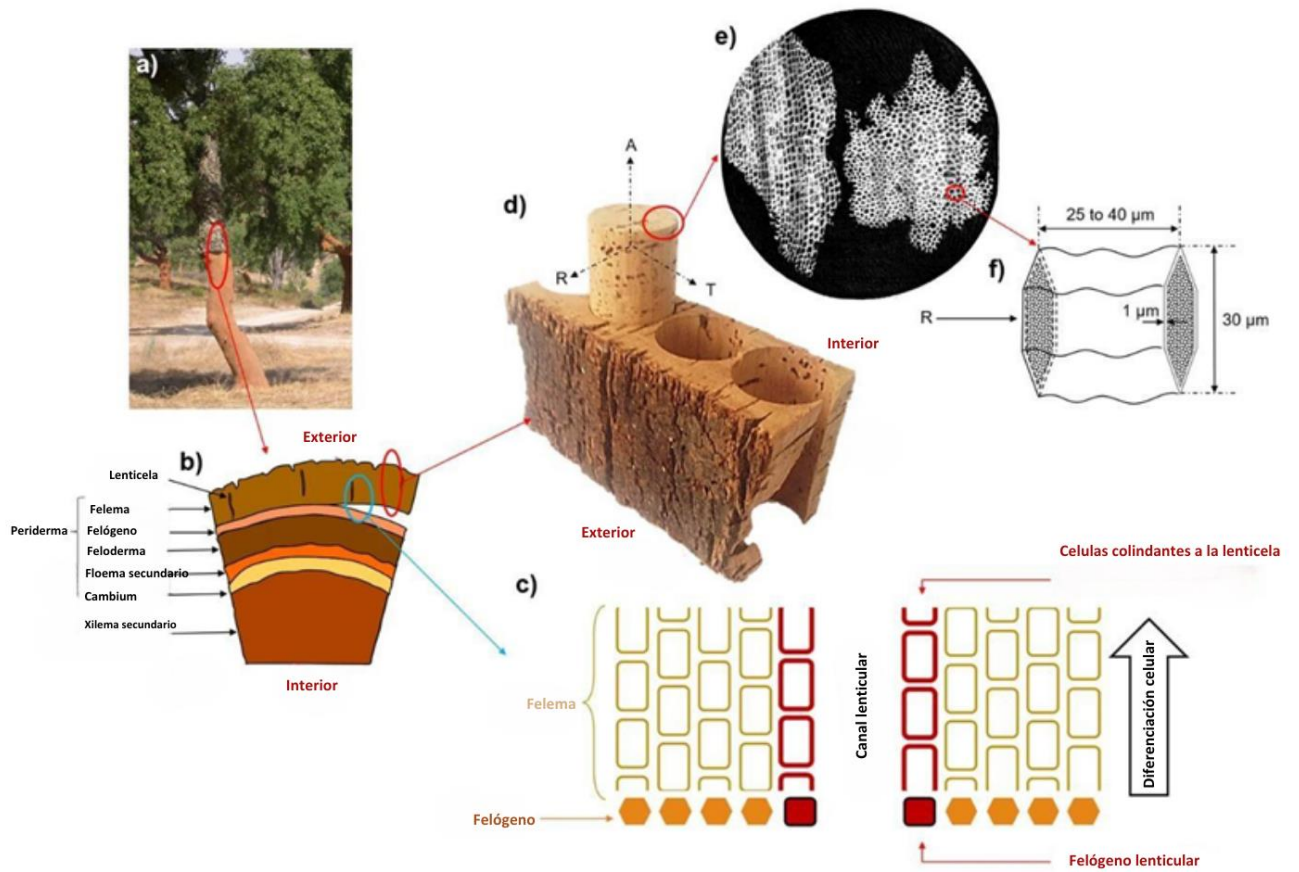


Figura 1.22 Canales lenticulares que cruzan la capa de corcho: (a) Alcornoque después de la saca; (b) Sección transversal de alcornoque; (c) Región felógena con diferenciación celular. (d) Producción de tapones de corcho a partir de la corteza (A - dirección axial, R - dirección radial y T - dirección tangencial). Es posible observar los canales lenticulares alineados con la dirección radial; (e) Primera observación de células de corcho por Robert Hooke en 1665. (f) Forma y dimensiones típicas de células de felema (de [55]).

1.2.3. Defectos e implicaciones del corcho

La porosidad provocada por los canales lenticulares, característica fisiológica natural e importante que permite la comunicación entre las células vivas del árbol y el medio exterior, no puede considerarse un defecto. Sin embargo, en exceso, como se ha explicado anteriormente, puede comprometer la calidad de la plancha de forma que ya no se pueda utilizar para tapones ya que puede aumentar la permeabilidad de los fluidos y por tanto contaminar el vino o provocar fugas.

En ocasiones, el corcho también contiene rajaduras de origen biológico o externo que se correlacionan con fallas estructurales y tienen un grado de impacto en la calidad de la materia prima dependiendo de su tipo y cantidad. Estos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Galerías de insectos: el alcornoque puede sufrir ataques de insectos que desarrollan galerías en el tejido del corcho (capa felógena), como se observa en la Figura 1.23. Hormigas: la más común es la *Crematogaster scutellaris* Oliv. – vivir en la corteza del alcornoque y cavar canales que discurren aleatoriamente por la pana. Aparte de contaminantes ocasionales como partículas de arena, excrementos de insectos e hifas de hongos, las galerías están completamente vacías [57]. Además, los coleópteros (*Coroebus undatus* F) ponen huevos en las grietas internas del corcho y las larvas, que alcanzan un tamaño justo de tres centímetros, se alimentan del felógeno. Estas áreas que han sido atacadas por dichos insectos no son adecuadas para la fabricación de tapones.



Figura 1.23 Galerías de insectos causadas por hormigas (imagen de [58]).

- Poro leñoso o clavos: el defecto conocido como “leño”, representado en la Figura 1.24, consiste en la presencia de células lignificadas en el tejido del corcho, de paredes gruesas, a menudo casi sin lumen abierto y de composición química lignocelulósica. Ocurren debido a la inactividad de algunas células felógenas, lo que lleva a la regeneración de una nueva porción felógena. Por ello, presentan mayor tenacidad, densidad y baja elasticidad [6].

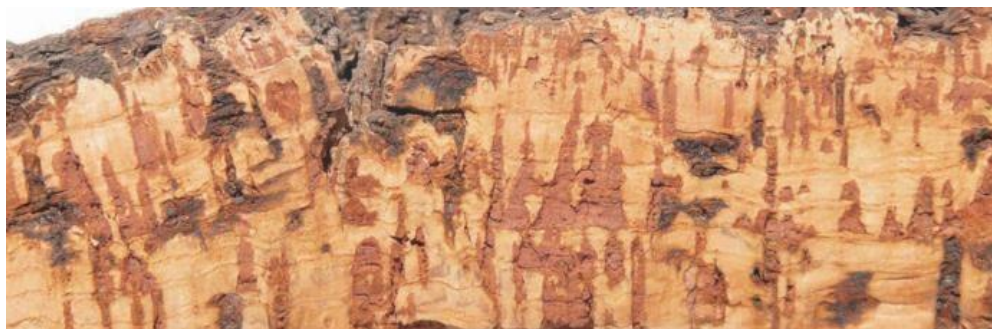


Figura 1.24 Poro leñoso, leño o “clavo” en la pana de corcho (imagen de [58]).

- Rajado: puede haber un surco profundo en la parte posterior de la plancha, como se muestra en los ejemplos de la Figura 1.25. Corren verticalmente, penetrando el tejido de corcho. Las líneas de los surcos indican la falla del tejido como resultado del estrés tangencial del crecimiento y, por lo tanto son más frecuentes en árboles con una alta tasa de crecimiento radial (típico del corcho secundero).



Figura 1.25 Panas con rajado (imagen de [58]).

- Manchas: las panas pueden presentar manchas, como amarillas o marmoleado, como resultado de ataques microbianos. *Armillaria mellea*, basidiomicetos saprofitos que crecen en el suelo y materiales lignocelulósicos, causa manchas amarillas, como se ve en la Figura 1.26. Las células de corcho protegen al árbol de la invasión de patógenos. El corcho se vuelve gris y los tejidos circundantes revelan una decoloración blanca amarillenta y un olor a moho distintivo. Los extractivos polares reemplazan la lignina y los polisacáridos en la composición química del corcho. La decoloración es más común más cerca del suelo en la base del tallo (zapatas del árbol). Como resultado, los tapones de corcho manchados no se utilizan en la fabricación de tapones para vino. En cuanto a la mancha de mármol, un ataque de hongos (*Melophia opiospora* Sacc) provoca una tinción azulada corcho en las capas exteriores y alrededor de los canales lenticulares. Aparte de la ubicación de la perforación, la pared celular del corcho permanece intacta y las hifas no afectan las propiedades del corcho [57]. Dicho corcho no se utiliza para fabricar tapones de corcho. En cambio, podría encontrar un valor agregado si se usa con fines decorativos debido a su distribución aleatoria de manchas similar al mármol y sus líneas de contorno oscuras.



Figura 1.26 Ejemplo de mancha amarilla en una sección de corcho (imagen de [59]).

- Corcho verde: Es un defecto del corcho que provoca niveles de humedad excepcionalmente altos (400-500 %) y cuya causa se desconoce. Sin embargo, Natividade [6] sugiere que es causado por la pérdida de impermeabilidad celular, que a su vez resulta de la deposición anormal de suberina en las

capas secundarias de las paredes celulares. Este defecto ocurre principalmente en las capas anuales más recientes, adyacentes al vientre de los planchas y en la región adyacente a la base del tallo. El principal inconveniente es la excesiva contracción que sufre el corcho en la zona afectada tras el secado (llegando en ocasiones incluso al colapso de las células), lo que perjudica su capacidad de sellado y estabilidad dimensional; por lo tanto, no es adecuado para la producción de tapones [60]. Un ejemplo de corcho verde en un tablón de corcho se puede ver en la Figura 1.27.



Figura 1.27 Ejemplo de plancha afectado por corcho verde (imagen de [58]). Clasificación de calidad de las planchas de corcho

1.2.4. Clasificación de la calidad de las planchas

1.2.4.1. Clases de calibre

El calibre o espesor de las planchas es el aspecto primordial a la hora de definir la aplicación final del corcho natural, repercutiendo en su transformación industrial y comercial. El enfoque industrial consiste en clasificar las planchas de corcho según su grosor, tal y como especifican las normas y se ilustra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Clases de calibre de las planchas utilizados en la industria del corcho (adaptado de [4]).

| Clase comercial | Calibre (mm) |
|------------------------|---------------------|
| Extra delgado | 9-22 |
| Delgado | 22-27 |
| Medio estándar | 27-32 |
| Estándar | 32-40 |
| Grueso | 40-54 |
| Extra grueso | >54 |

Las clases se crearon teniendo en cuenta el potencial de procesamiento posterior. Las clases de calibre más adecuadas para la producción de tapones son de 27 a 32 mm y, por lo tanto, los fabricantes de corcho pretenden producir tabloncillos de corcho en este rango de espesor. El grosor de la plancha de corcho está determinado por la duración del ciclo de producción de corcho y la tasa de crecimiento

anual del corcho. En los lugares de mayor producción de corcho, un ciclo de producción de corcho de 9 años es adecuado para cumplir con los requisitos de materia prima industrial primaria.

El calibre total de la pana se mide desde el vientre hasta la espalda. Por lo tanto, al determinar la idoneidad industrial de un tablón, se debe considerar la capa exterior de la espalda. Aunque los precios varían significativamente entre las clases de calibre de panas de corcho, en general, el precio de las planchas (por kilogramo) en los rangos de 27-32 y 32-40 milímetros es el mismo y sirve como guía para otras clases. Los precios de las planchas en el rango de 22-27 milímetros son casi la mitad de este valor de referencia, menos 1/3 del precio de los tablonos de menos de 22 milímetros y casi 2/3 de los tablonos en el rango de espesor de 40-54 mm.

1.2.4.2. Clasificación de calidad

Las planchas de corcho se clasifican comercialmente en varias clases según su calidad. Esta inspección visual de las porciones transversal y radial de la pana de corcho y su superficie ventral se utilizan para determinar su calidad. El primer parámetro de calidad está asociado a la porosidad proporcionada por los canales lenticulares, que varían en número pero principalmente en área. Una plancha de alta calidad contiene una cantidad mínima de canales lenticulares. Segundo, la presencia de rajado y su impacto potencial en el procesamiento.

La clasificación de una sola pana de corcho se basa en la noción integrada de este rendimiento potencial en artículos de corcho natural de alta calidad, como taponos y discos.

Las planchas de corcho se clasifican en función de su calidad en 6 clases (1^a a 6^a) y una clase de desecho adicional. La evaluación es manual y depende en gran medida del operador. Por lo tanto, existe un alto grado de subjetividad y la clasificación puede variar entre operadores. Si bien es común y fácil distinguir entre corcho muy bueno y pésimo, esto no es cierto para el corcho de calidad media. Como resultado, existen variaciones significativas entre las clasificaciones establecidas por varios expertos. Un estudio que utilizó un catálogo de referencia de 480 muestras de corcho clasificadas por cinco especialistas independientes [61] reveló solo una correlación del 5,3 % en la clasificación de las muestras individuales (pero con una coincidencia del 100 % con respecto a las calidades superior e inferior: 1.^a calidad y rechazo).

Esta categorización de seis calidades (y desechos) de los tableros de corcho ya no se utiliza en la práctica. Más bien, se emplean clases de calidad agregadas adicionales: un sistema de clasificación actual utiliza una variedad 1 a 3 para representar corchos de alta calidad, una variedad 4 a 5 para representar corchos de calidad media y una clase 6 para representar corchos de baja calidad. Otra posibilidad, y probablemente la más utilizada, es reducir la clasificación de calidad de las planchas a solo 2 categorías: una 1.^a a 5.^a gama que representa planchas de corcho adecuados para la producción de taponos de corcho y una 6.^a clase que comprende tablonos de menor calidad y rendimiento para la producción de taponos .

Se examinó la relación entre la clasificación de la calidad y la cuantificación de la porosidad basada en

imágenes, y la porosidad y el tamaño de los poros aumentaron a medida que aumentaba la clase de clasificación. Esto es cierto tanto para las secciones tangenciales como transversales o radiales. Sin embargo, dentro de cada clase existe una diversidad considerable y las diferencias en los valores medios entre clases contiguas son estadísticamente insignificantes. La Tabla 1.3 representa diferentes parámetros de porosidad en planchas de corcho de distintas clases de calidad.

Tabla 1.3 Parámetros promedio relacionados con la porosidad para diferentes grados de calidad de tabloncillos de corcho (observaciones en la sección tangencial). Promedio de 40 muestras por clase (Adaptado de [4]).

| | Clases visuales | | | | |
|---|-----------------|-----------|------|----------|------|
| | 1era | 1era-3era | 3era | 4ta-5ena | 6a |
| Coefficiente de porosidad (%) | 3,3 | 4,5 | 6,0 | 6,7 | 12,4 |
| Nº de poros/ 100cm³ | 568 | 585 | 785 | 860 | 815 |
| Nº de poros > 0,8mm/100cm³ | 47 | 84 | 111 | 121 | 176 |
| Media de área de poros (mm) | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,6 |
| Área máxima de poros (mm) | 19,7 | 23,1 | 21,1 | 26,3 | 82,0 |

La división en solo tres clases permite una mayor diferenciación y una calificación uniforme. Por ejemplo, el coeficiente de porosidad se puede emplear para categorizar las planchas estableciendo los siguientes límites de clase: las planchas de alta calidad tienen una porosidad inferior al 6 % y las planchas de calidad media deben tener una porosidad inferior al 10 %. Las dimensiones o formas de los objetos que se ven en la imagen de la superficie del corcho se pueden emplear para distinguir los canales lenticulares de otros defectos, como las galerías de insectos [62].

1.2.4.3 Índice de valor integrado del corcho

Dado que el valor de la plancha está determinado por una combinación de calibre y calidad relacionada con la porosidad, se ha recomendado una variable combinada para indicar el valor del corcho en función del valor comercial relativo de varias combinaciones de rango de calibre y clases de calidad. Esto se puede utilizar para evaluar el valor de producción de un soporte de corcho determinado, teniendo en cuenta el espesor de las tablas y la distribución de la calidad [4]. Se propuso el siguiente índice de calidad (Ec. 1.2):

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

Donde Q_k denota el precio índice del corcho de clase k , p_k denota la proporción de unidades de muestreo de corcho en el corcho de clase k , n_k denota el número de clases de calidad, Q_i es el precio índice de la unidad de muestreo extraída del árbol i , y n_t denota el número total de árboles

muestreados.

Los precios del índice están vinculados a la clase de calidad de corcho más valorada, como se ilustra en la Tabla 1.4, con un ejemplo establecido por un panel de expertos. Claramente, es posible que las cifras deban actualizarse para reflejar los cambios en el mercado del corcho o para reflejar las condiciones comerciales y de procesamiento únicas.

Tabla 1.4 Índice de precios de corchos industriales de diferentes espesores y calidades (adaptado de [4]).

| Grosor (mm) | Clase visula | | | |
|-------------|--------------|-------|----|--------|
| | 1a-3a | 4a-5a | 6a | Refugo |
| 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. Tratamientos posteriores a la saca

Una vez recibidas las planchas de corcho en bruto en la fábrica, se mantienen en condiciones ambientales y luego pasan por un procedimiento conocido como preparación, que consiste en hervir en agua, recortar y clasificar las planchas. Un esquema completo del proceso de preparación se representa en la Figura 1.28.

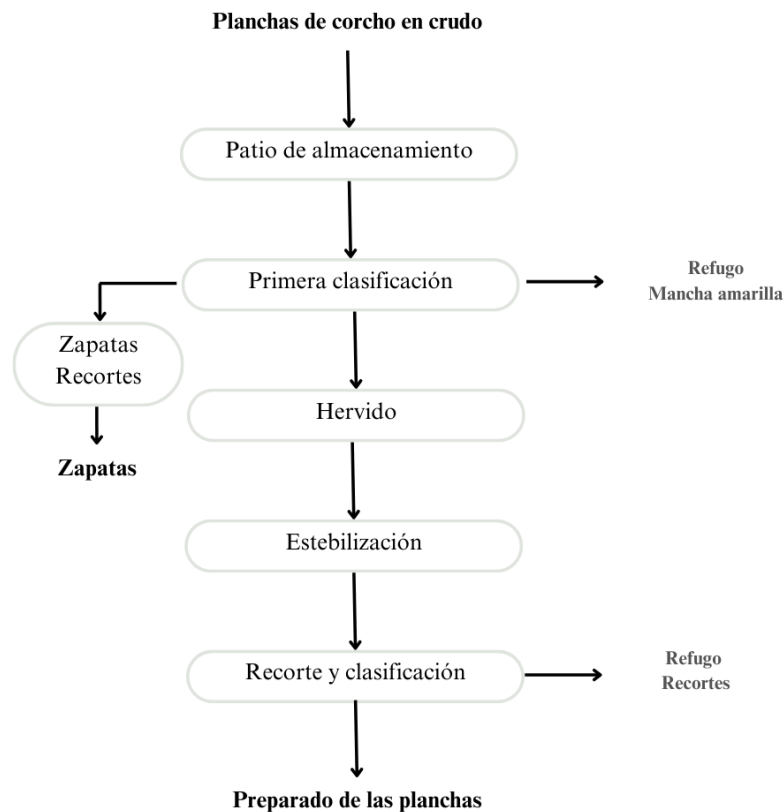


Figura 1.28 Esquema de preparación de las planchas de corcho crudo en el molino (adaptado de [4]).

1.3.1 Hervido de las planchas

Hervir el corcho en agua es un proceso de una hora que se aplica a todas las planchas de corcho de reproducción utilizadas para crear tapones y discos. El método ha experimentado una modernización significativa en los últimos años. Las pilas de tabloncillos se apilaban en tanques de gran capacidad, hirviendo agua en un horno alimentado generalmente con leña. El proceso se repite para lotes posteriores utilizando la misma agua, y para reponer la cantidad absorbida en el corcho o evaporada, también se introduce agua limpia. Cada cuatro o cinco días, el tanque se vacía, limpia y vuelve a llenar con agua. En estas condiciones, el agua se vuelve rápidamente de color marrón oscuro con un exceso de espuma, y las concentraciones de partículas suspendidas y disueltas en las aguas residuales efluentes son elevadas. Por ejemplo, después de un día de operación, los sólidos disueltos ascienden al 0,24 % y los compuestos fenólicos solubilizados ascienden al 0,04 % de la masa de la plancha de corcho [63].

La técnica y los equipos actuales para hervir el corcho han experimentado una evolución importante. Las planchas ahora se apilan en palés de acero inoxidable y el tratamiento del agua se realiza en un autoclave cerrado de acero inoxidable. El esquema simplificado representado en la figura 1.29 muestra la operación de ebullición. El agua se calienta a 95 °C y se hace circular dentro del autoclave mediante intercambiadores de calor. Los filtros en las líneas de agua eliminan los sólidos en suspensión. El autoclave vacío se carga con palés de corcho y se agrega agua después del cierre y se hace circular durante el procedimiento de 1 hora. Finalmente, se vacía el autoclave, se abre la puerta y se retiran los palés. El fondo troncopiramidal del autoclave evita la deposición de sólidos. El autoclave está principalmente automatizado y controlado por ordenador, incluida la carga y descarga. En algunas situaciones, se puede usar vapor a 110–120 °C para expandir tabloncillos delgados para fabricar discos para tapones de champán.

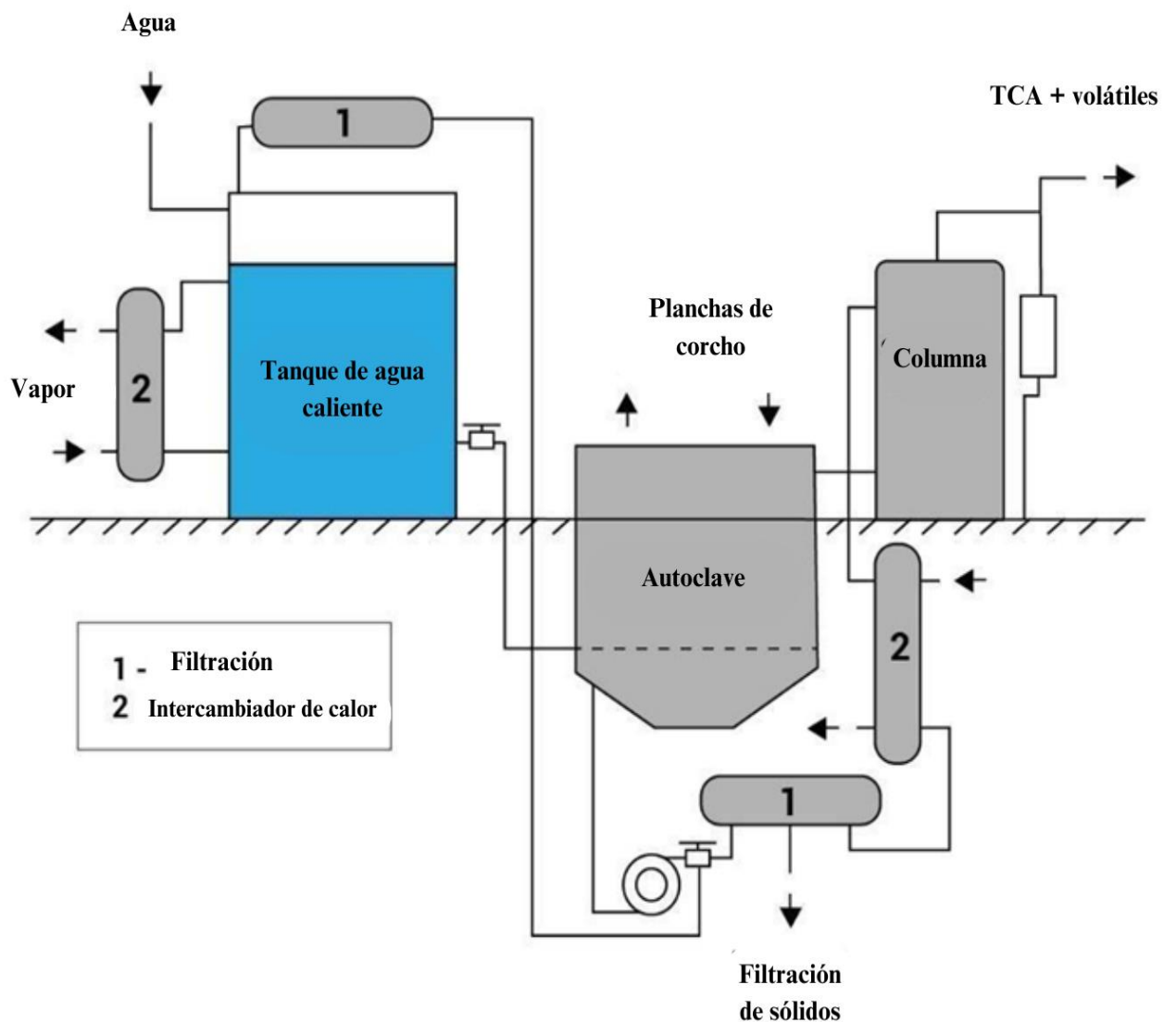


Figura 1.29 Diagrama que representa un autoclave para hervir corcho con circulación de agua y extracción de volátiles (adaptado de [4]).

Para evitar la entrada de sustancias cloradas en el corcho, lo que podría provocar la contaminación y la corrupción del vino, el agua utilizada no está clorada. En otras circunstancias, como en el sistema representado en los esquemas de la figura 1.29, se utiliza una columna de extracción para extraer y concentrar los volátiles del agua caliente. El agua hirviendo extrae y concentra 2,4,6-tricloroanisol (TCA) y clorofenoles, que contaminan el vino.

Las aguas efluentes son un problema de residuos debido a sus concentraciones promedio de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 7,4 y 1,3 g/L, valores de pH de 4,8 a 5,1 y alta toxicidad debido a la presencia de compuestos fenólicos y compuestos polifenólicos en concentraciones de 9 g/L (fenol) y 0,5 g/L (como ácido cafeico), respectivamente [64,65]. Se han propuesto varios procesos, que incluyen ultrafiltración [66], floculación, flotación y ultrafiltración combinadas [67], degradación y desintoxicación de hongos [64], floculación de cloruro férrico [65], oxidación química con el reactivo de Fenton [68]. Varios de los compuestos fenólicos importantes que se encuentran en las aguas residuales del corcho, como la esculetina (6,7-dihidroxycumarina) [69], el ácido gálico [70], el ácido elágico [71] y la acetovanillona, se han investigado como compuestos modelo para el tratamiento [72].

1.3.1 Cómo afecta la ebullición al corcho

El objetivo principal del procedimiento de ebullición con agua es alterar las propiedades mecánicas de los tabloncillos para que puedan aplanarse y facilitar futuros procesos de corte. La combinación de calor y agua da como resultado un debilitamiento significativo del corcho poco tiempo después del hervido. Esto alivia las tensiones de crecimiento, reduciendo las ondulaciones en las paredes celulares y aumentando la homogeneidad de la estructura celular. El corcho se expande en dimensión debido al enderezamiento de la pared de la celda: el espesor de las planchas de corcho aumenta aproximadamente un 15 %, en relación con la expansión radial de las celdas, mientras que la expansión es de alrededor del 6 % tanto en dirección tangencial como axial [73]. Es razonable predecir que la expansión de los diferentes corchos con la ebullición varía significativamente, ya que este valor depende de las ondulaciones celulares debidas a las tensiones internas, que son propiedades extremadamente variables. Aunque las cifras típicas para la expansión radial de los tabloncillos de corcho suelen oscilar entre el 11 y el 15 %, también se obtienen valores individuales que oscilan entre casi cero y más del 40 %. Medida por el coeficiente de porosidad, la porosidad del corcho disminuye a medida que aumenta la temperatura del agua [74]. Así, la ebullición del corcho en agua mejora la calidad de las planchas en la práctica aumentando su tamaño y disminuyendo los diámetros de los canales lenticulares. Además, se elimina prácticamente la curvatura de las planchas de corcho en bruto, quedando prácticamente planas, como se presenta en la Figura 1.30, lo que facilita la fabricación de tapones y la introducción de equipos automatizados en el proceso de fabricación.



Figura 1.30 Tablones de corcho después de hervir.

A temperaturas inferiores a 100°C, el cambio dimensional del corcho provocado por la ebullición es irreversible. Esto significa que el remojo y secado repetido del corcho, como ocurre durante el lavado y el blanqueo del tapón, no tiene ningún efecto sobre sus dimensiones.

Debido a que la duración de la extracción y la superficie del agua del corcho son demasiado limitadas, el corcho hirviendo extrae una pequeña cantidad de los compuestos solubles en agua correspondientes a menos del 2 % de los extractos de agua del corcho. Por lo tanto, a pesar de las frecuentes afirmaciones, la extracción de compuestos químicos del corcho no es el objetivo del proceso de ebullición en las condiciones empleadas en la industria. Lo mismo es válido para lo que se denomina esterilización microbiológica de la plancha.

La frecuencia de renovación del agua y el decapado de volátiles no pretenden maximizar la extracción de material, sino más bien evitar contaminar las planchas con agua hirviendo, concentrándose progresivamente en sustancias potencialmente nocivas.

1.3.2. Proceso posterior del hervido

Después del hervido, los tablones de corcho reposan, se secan al aire durante unos días (dos o tres días), un proceso llamado estabilización. Los palés se apilan uno encima del otro para ayudar a aplanar las planchas. Por lo general, se construyen enormes pilas de planchas hervidas y el secado dura varias semanas. Esto se ha modificado en los últimos años, utilizándose tiempos de estabilización más cortos para evitar el crecimiento microbiano que podría poner en peligro la naturaleza inerte del tapón de corcho con respecto al vino. Inmediatamente después del hervido, el contenido de humedad de las planchas se reduce de alrededor del 40 % al 70 %. Después de dos días, el contenido de humedad debería descender a alrededor del 14-18 %, considerado como el contenido de humedad de trabajo suficiente en la industria.

Después del secado, cada plancha de corcho hervida es examinada individualmente por un trabajador experimentado responsable de recortar y cortar el tablón en piezas más uniformes para su procesamiento adicional. La primera medida es eliminar las secciones defectuosas (o toda la tabla)

para su procesamiento en tapones o discos:

- las planchas de corcho húmedos se separan para el secado en horno o el secado al aire a largo plazo;
- los planchas con mancha amarilla o con diversas áreas mohosas se excluyen de la fabricación y se envían a trituración;
- las partes que contienen galerías de insectos se rechazan y se retiran para su trituración;
- las planchas, o porciones de los mismos, que presentan un alto porcentaje de defectos como grietas, entre otros, son desechados y retirados para su trituración;
- las planchas, o porciones de ellos, excesivamente delgados para la producción (más delgados que 13 mm), se desechan y se retiran para su trituración.

La recortadora/clasificadora corta las planchas a mano con un cuchillo. El propósito es clasificar las pans rechazados y separar las piezas inadecuadas para su posterior procesamiento como corcho sólido de las planchas en bruto.

Además, si la plancha es heterogénea en grosor y calidad, se separará en tablones más pequeños y homogéneos, lo que permitirá el troquelado de tapones o la fabricación de discos. Además, los planchas grandes se dividen, lo que permite a los trabajadores manipularlos manualmente con más facilidad. Las medidas de las planchas de corcho en bruto demuestran un área media de 3745 cm^2 , con unas dimensiones de alrededor de 47 cm en dirección horizontal y 119 cm en dirección vertical. Por el contrario, las medidas de las planchas preparados posteriormente revelan unas dimensiones medias de 34 y 70 centímetros en las direcciones horizontal y vertical (superficie media de la plancha 1674 cm^2), respectivamente [75]. Este procedimiento pierde el 5% de la materia prima inicial en forma de pequeños trocitos de corcho.

Se mide experimentalmente una pérdida de materia prima de corcho durante el corte de tablones para su posterior procesamiento en comparación con las planchas delgadas que se utilizan en la fabricación de discos de corcho [56]. El material de desecho representa alrededor del 19,5 % de su masa inicial, mientras que el rendimiento entre tablones varía entre 0 y 50 %, dependiendo de las características de forma y calidad de los tablones individuales.

Recortar las planchas endereza los bordes y crea secciones transversales más atractivas mientras clasifica las pans por calibre y clase de calidad. Operaciones como el recorte se minimizan en la fabricación de tapones y discos para evitar pérdidas de materia prima. Los requisitos específicos del molino determinan la separación en las clases de espesor y calidad: es común dividirlo solo en tres clases de calibre, 14 a 22, 22 a 27 y superior a 27 milímetros, y 2 clases de calidad, la 1ra a la 5ta clase como el surtido de materias primas primarias para la elaboración de tapones y discos, y un sexto de menor calidad. Cuando la plancha de corcho es el producto final del molino, se presta mayor atención para garantizar que los bordes y el grosor sean uniformes, y la categorización de la calidad es más explícita, por ejemplo, como 1° a 3°, 4° a 5° y 6°, o según la demanda del cliente.

1.3.3. Procesamiento del corcho verde

Las planchas con secciones de corcho verde se separan y secan hasta un contenido de humedad del 14 % o menos, que es el estándar para el corcho. Esto se puede lograr mediante el secado al aire natural durante un período de 1 a 2 años o mediante el secado con aire caliente forzado en las cámaras del horno. Adaptados de los hornos de secado de madera, se han implementado en unidades más modernas, utilizando ciclos de secado con aumento de la temperatura del aire. Las condiciones varían según el molino: un ejemplo es un período de secado de 96 horas a una temperatura final de 90°C; otro es un período de secado de dos semanas a una temperatura final de 80°C.

Después del secado, las panas se lanzan a la línea de procesamiento y pasan por el circuito operativo estándar para la fabricación de tapones o discos.

1.2.4 Segundo hervido

Cuando el corcho se seca lo suficiente hasta un contenido de humedad en el rango de 5 a 8% (lo que denota equilibrio) entre hervir las planchas de corcho y procesarlos de los tapones o discos, las ventajas de una mayor cantidad de humedad sobre la resistencia del material y la capacidad de maquinado se han perdido. Este suele ser el escenario si las planchas de nervido no se procesan en la fábrica de preparación o si se almacenan durante más de dos o tres semanas.

En esta situación, las planchas se someten a una segunda operación de hervido siguiendo la misma técnica indicada anteriormente pero con una duración inferior a los 30 minutos. Debido al hecho de que las tensiones internas del corcho ya se aliviaron durante del hervido inicial, como se mencionó anteriormente, no se produce una mayor expansión del corcho.

Referencias

- [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.* 143(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* 9, 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-Urión, K., Chanut, J., Lagorce, A., Winckler, P., Wang, Z., Verboven, P., Nicolai, B., Lherminier, J., Ferret, E., Gougeon, R.D., Bellat, J.P., Karbowski, 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.* 30:207–215.
- [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.

CAPÍTULO 2

Sostenibilidad, Huella de Carbono y Productos Potenciales del Corcho

María Verdum, Albert Hereu, Patricia Jové*

Fundación Institut Català del Suro, Palafrugell, España

*Correspondencia: mverdum@icsuro.com

Resumen

Este capítulo analiza la importancia del material de corcho en relación con la sostenibilidad y la economía verde, así como su uso actual y futuro más allá del conocido tapón de corcho. También explorará la conexión entre el consumo de corcho y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, así como los desafíos que plantea el cambio climático. El capítulo consta de tres apartados: (i) el corcho y la sostenibilidad, (ii) la huella de carbono de los productos de corcho y (iii) las posibles aplicaciones del corcho. El primer apartado se centra en la sostenibilidad y el corcho y describe los servicios ecológicos que proporciona el alcornocal. La segunda sección se concentra en la huella de carbono (concepto, cálculo y valores para diferentes productos de corcho). En la tercera unidad, se proporciona una descripción general de los múltiples usos y aplicaciones del corcho. Al final del capítulo, se abran tratado: la comprensión del corcho como material sostenible, el concepto de huella de carbono del corcho y los distintos pasos para su cálculo, una introducción a las diversas aplicaciones del material de corcho y las características que hacen que el corcho sea adecuado para la industria aeroespacial.

Palabras clave: corcho, sostenibilidad, ecosistema del corcho, servicios ambientales, cambio climático, huella de carbono, ciclo de vida.

Nomenclatura

CO₂ eq Dióxido de carbono equivalente

GEI Gas de efecto invernadero

Evaluación del ciclo de vida del ACV

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas

2.1 Corcho y Sostenibilidad

2.1.1 Ecosistema de corcho

Ecología

En términos ecológicos, el alcornoque o *Quercus suber* L. es originario del suroeste de Europa y noroeste de África. Es adaptado para este clima:

- verano corto
- una lluvia abundante y uniformemente distribuida
- inviernos muy suaves
- períodos secos moderados por la humedad atmosférica
- suelos silíceos muy permeables, húmedos y profundos

El alcornoque crece en condiciones cálidas, húmedas y subhúmedas desde el nivel del mar hasta los 2000 m. Este crecimiento óptimo alcanza una altitud de 600 m [1]. Este es el caso de las zonas de clima mediterráneo con una temperatura media anual de 13-18°C, inviernos húmedos, veranos de alta temperatura y con una precipitación media anual que no supera los 900 mm. El árbol es muy sensible a la acumulación de agua. Las precipitaciones en las zonas mediterráneas se concentran a finales de otoño e invierno, mejorando la adaptabilidad de los alcornocales. Esta especie también está bien adaptada a inviernos suaves y veranos calurosos y secos. Las mejores condiciones de suelo adecuadas para el crecimiento del alcornoque son suelos silíceos y/o arenosos y suelos bien aireados y drenados [1]. Esta especie también es tolerante a suelos pobres y poco profundos.

Hace algunos años, los alcornoques se introdujeron en los Estados Unidos y en varios países, desde Australia hasta Bulgaria y América del Sur, sin éxito. Algunos aspectos, como la conservación de semillas o problemas en el crecimiento de plantas jóvenes, han sido los responsables de no obtener árboles adultos. El largo ciclo de vida del árbol tampoco ayuda. Sin embargo, es posible encontrarlo en muchos parques de todo el mundo por su alto valor ornamental.

El bosque de alcornoques cubre un área mundial de más de 2,1 millones de hectáreas. En Europa principalmente cubre Portugal y España y en menor proporción en Francia y Italia. También se encuentra en los países del norte de África como Marruecos, Argelia y Túnez. Según los inventarios forestales, las zonas de alcornocales se distribuyen: 713.000 ha en Portugal, 475.000 ha en España, 68.000 ha en Francia, 65.000 ha en Italia, 348.000 ha en Marruecos y 90.000 ha en Túnez. El mapa de distribución de los alcornoques y la producción de corcho se muestra en la Figura 2.1.

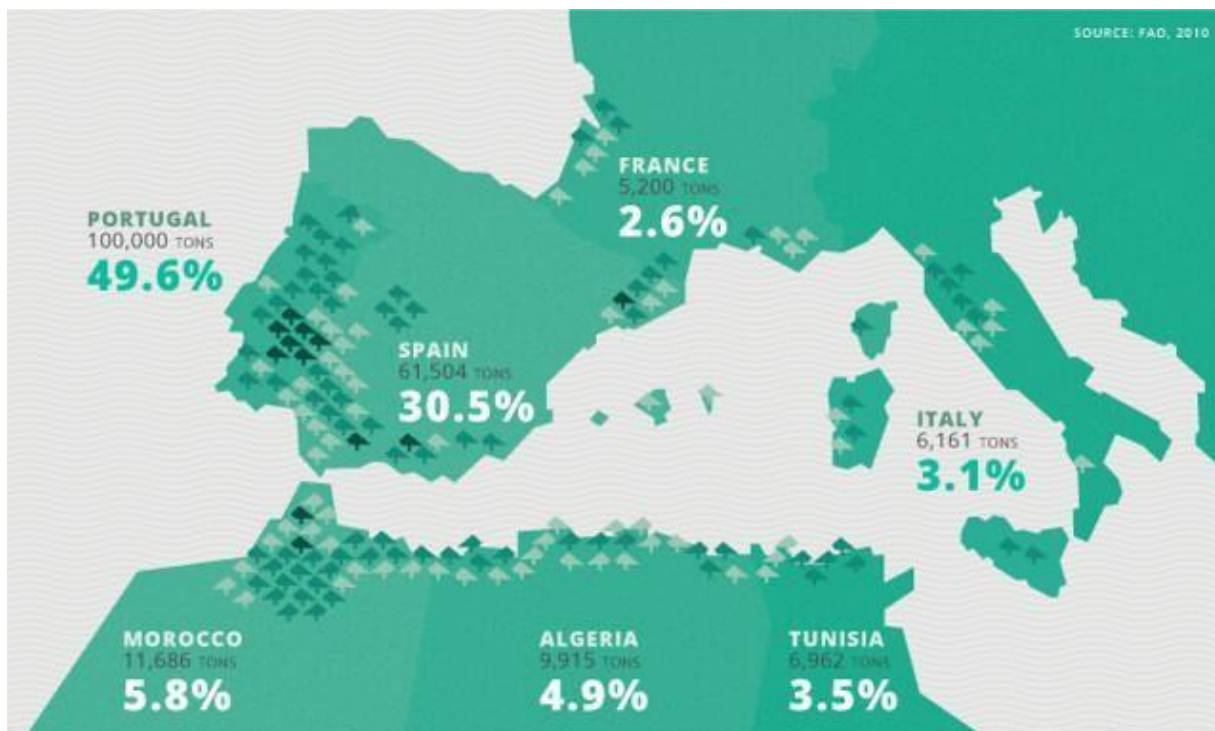


Figura 2.1 Distribución del alcornoque y toneladas de producción de corcho. Fuente: AmorimCork

Biodiversidad

Los alcornocales representan un ecosistema importante debido a su rica biodiversidad, salvaguardando una amplia gama de hábitats para la flora y la fauna [2, 3]. Esta es la razón por la que el Mediterráneo es conocido como uno de los 35 “puntos calientes” del mundo. La biodiversidad es la variedad de vida en todas sus formas, niveles y combinaciones: ecosistema, especies y diversidad genética [4].

En resumen, los ecosistemas de alcornoques se describen como ecosistemas multifuncionales con una capa de cubierta arbórea dominada por alcornoques (*Quercus suber* L.) frecuentemente asociados con encinas (*Quercus ilex* y *Q. rotundifolia*), acebuches y pinos [1, 5] y con una especie herbácea [6]. La dinámica temporal de estos sistemas ha sido reportada por varios autores [7-9].

Los paisajes de alcornocales son un reservorio de biodiversidad y hogar de una gran variedad de especies, algunas de ellas en peligro de extinción, como el águila imperial (*Aquila adalberti*). También es el hábitat de una gran biodiversidad natural de fauna silvestre (alrededor de 24 especies de reptiles y anfibios, más de 160 especies de aves y 37 especies de mamíferos). Además, la cuenca del Mediterráneo es la región del mundo con el tercer mayor número de especies de plantas endémicas. En concreto, en los alcornocales, la biodiversidad vegetal puede alcanzar un nivel de 135 especies por metro cuadrado. Estos incluyen varios tipos de plantas aromáticas, medicinales y culinarias. El sotobosque incluye arbustos y matas como lavanda o madroño.

Impacto social y económico

El paisaje de alcornoques es uno de los mejores ejemplos de equilibrio entre conservación y desarrollo en beneficio de las personas y del medio ambiente. Este ecosistema no natural es la consecuencia de siglos de gestión constante y actividades silvícolas enfocadas que han moldeado el entorno de árboles y alcornoques. A raíz de algunas prácticas como el pastoreo, el desbroce o el arado para la agricultura, los bosques de alcornoques se fueron transformando paulatinamente en montes abiertos.

Hoy en día, los ecosistemas de alcornoques incluyen cuatro tipos de mosaicos: bosques, sabanas de alcornoques (o dehesas en Portugal y dehesas en España), matorrales y pastizales (Figuras 2.2 y 2.3). “Montado” es el término portugués que se utiliza para describir paisajes donde la agricultura mixta se centra en extensos bosques alcornoques intercalados con áreas de arbustos y/o pastizales. Como se mencionó anteriormente, las sabanas de alcornoques y los pastizales se mantienen como resultado de la presencia humana a largo plazo y las actividades relacionadas en esta área [10, 11].



Figura 2.2 Sabanas o dehesas de alcornoques en Portugal y dehesas en España (<https://gosuber.es/>).



Figura 2.3 Bosque en Cataluña.

El ecosistema del corcho es un ejemplo de explotación forestal sostenible y representa una importante fuente de ingresos derivada principalmente de la producción de tapones de corcho. A pesar del alto valor de mercado de los tapones de corcho (que representan casi el 70% del valor de mercado del corcho), se han llevado a cabo otras prácticas agrícolas y silvícolas paralelas a la recolección del corcho. La ganadería, la recolección de hierbas, hongos y plantas medicinales, la producción de miel y el ecoturismo son algunas de las actividades que también se desarrollan en los parajes alcornoques [12,13]. Hay miles de empleos directos (puestos de trabajo en el campo de la silvicultura) e indirectos relacionados con este ecosistema.

Impacto medioambiental

Los paisajes de alcornoques como barrera natural contra la desertificación y su papel en la resistencia al fuego son otros aspectos a tener en cuenta. Debido a que recogen aproximadamente el 26,7% del total de las precipitaciones, los alcornoques protegen frente a la erosión y favorecen la tasa de infiltración del agua de lluvia. Los alcornoques transportan una cantidad sustancial de nutrientes del suelo desde los niveles inferiores hasta los superiores, haciéndolos accesibles a otras plantas. Por último, su porosidad y composición orgánica le confieren una alta capacidad de retención de agua.

En definitiva, el alcornoque es una especie que conviene conservar, teniendo en cuenta su importancia ecológica y económica. Por un lado, los bosques de alcornoques albergan uno de los niveles más altos de biodiversidad forestal del mundo, solo superado por la selva amazónica. En este sentido, los alcornoques son focos de biodiversidad y constituyen ecosistemas únicos reconocidos por su valor ecológico [14]. Los paisajes de alcornoques bien gestionados evitan que las especies de matorrales mediterráneos los invadan rápidamente, lo que aumenta el riesgo de incendios y la pérdida de hábitats y biodiversidad [15]. Por otro lado, la extracción de corcho y el alto valor añadido de los tapones de corcho son responsables de miles de empresas en los diferentes niveles de su producción (forestal, industrial y/o laboratorio). La industria del corcho contribuye a evitar el abandono de los alcornoques porque da empleo en diferentes ámbitos forestales.

2.1.2. Servicios ambientales

Como estrategia de gestión de los recursos naturales, el concepto de servicios ambientales ha ganado mucha atención durante la última década. Además, esto se ha ido integrando progresivamente en las políticas ambientales [16]. Simultáneamente, los pagos por servicios ambientales continúan atrayendo un interés significativo tanto en los académicos como en los profesionales de la conservación [17].

El primer paso para trabajar en los servicios ambientales es cuantificar y analizar económicamente los beneficios directos e indirectos de los servicios asociados con la zona o, específicamente, los alcornoques. Los diferentes servicios ambientales que ofrece un ecosistema se clasifican, según otros estudios [18], en cuatro categorías: (a) provisión de bienes y servicios, (b) regulación, (c) apoyo, y (d)

servicios culturales.

Así, los ecosistemas ofrecen múltiples funcionalidades, como provisión de alimentos, agua, combustible, materiales, protección solar, regulación del agua, prevención de incendios, uso recreativo y ciclos de nutrientes, entre muchas otras.

Este documento toma como ejemplo un estudio realizado por el Dr. Jesús Rives y sus compañeros, donde se presenta una metodología para realizar este tipo de servicios: “El valor de los servicios ambientales de los alcornocales en Cataluña. Evaluación de los servicios ambientales de los ecosistema” [18]. De acuerdo con este estudio, en la Figura 2.4 se presenta un ejemplo de una metodología utilizada para la determinación de los servicios ambientales.

En el caso de cuantificar y analizar económicamente los beneficios ambientales directos e indirectos asociados al alcornoque en Cataluña, el primer paso es seleccionar la muestra forestal lo más representativa posible y, luego, seleccionar los criterios. En este paso es importante considerar algunos aspectos como:

- la actividad principal es la extracción de corcho pero hay posibilidad de otras actividades complementarias.
- el campo en funcionamiento,
- las dimensiones de campo representativas a nivel catalán (entre 200 y 1.000 ha),
- la estructura de bosque maduro - representativa de las clases diametrales,
- sin disturbios recientes significativos,
- distribuidos en diferentes zonas,
- disponible en PTMGF actualizado y con cartografía digital.

La información sobre los campos seleccionados se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Caracterización de campos seleccionados [18].

| Zona | Albera- Salines | Gavarres | Selva-Gironès | Montseny | Montnegre |
|--------------------------|-----------------|----------|---------------|-----------|-----------|
| Superficie total (ha) | 201,7 | 937,9 | 269,9 | 479,2 | 481,0 |
| Altitud mín i máx (m) | 155-395 | 75-325 | 325-704 | 475-980 | 91-357 |
| Pendiente medio (%) | 40% | 30% | 20-80% | 25% | 20% |
| Temperaturas medias (°C) | 2,3-28,2 | 2,5-30,7 | 1,6- 28,3 | -2,0-25,0 | 2,7-29,0 |
| Pluviometría (mm) | 580,8 | 819,0 | 900,0 | 850,0 | 750,0 |

Figura 2.4 Metodología para la determinación de los servicios ambientales [18].



EL VALOR DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS ALCORNOCALES EN CATALUÑA. Evaluación de los servicios ambientales del ecosistema

Figura 2.5 Los ejemplos de los diferentes servicios ambientales que ofrece un ecosistema se clasifican en cuatro categorías: (a) provisión de bienes y servicios, (b) regulación, (c) apoyo y (d) servicios culturales [18].

SERVICIOS DE PROVISIÓN

Provisión de alimentos

| | | |
|---------------------|--|-------------|
| Alimentos naturales | Setas | Kg setas/ha |
| | Frutos silvestres | kg fs/ha |
| | Castaña | Kg/ha |
| | Piñones | Kg/ha |
| | Miel | kg miel/ha |
| | Plantas aromáticas y/o con interés culinario | % |

Recursos forestales

| | | |
|----------------------------|---|-------------|
| Madera | Cantidad madera extraída | |
| | Quercus suber | t/ha |
| | Pinus pinaster | t/ha |
| | Pinus insignis / radiata | t/ha |
| | Pinus pinea | t/ha |
| | Eucaliptus | t/ha |
| Otras maderas | t/ha | |
| Corcho | Corcho (bornizo, secundero, reproducción, etc.) | t/ha |
| Piñas y resinas | Piñas y resinas | Kg/ha |
| | Biomasa | m3/ha |
| Otros productos forestales | Leña | t/ha |
| | Arbustos decorativos | unidades/ha |
| | Superficie conreada con árboles navidad | ha |

SERVICIOS DE REGULACIÓN

Ciclos

| | | |
|----------------------------------|---|---------------------------|
| Formación y protección del suelo | Cantidad de suelo erosionado | t suelo erosionado/año |
| | Tasa de erosión del suelo | t suelo erosionado/año/ha |
| Polinización | Cantidad de rojaliceros a través del BMS | Núm. individuos/ha |
| | Cantidad especies de rojaliceros a través del BMS | especies/ha |
| | Cantidad de enjambres | Núm. enjambres/ha |
| Regulación clima | Población abejas | abejas/ha |
| | Cantidad de carbono acumulada | t totales CO2/ha |

Prevención

| | | |
|----------------------------------|--|------------------|
| Prevención incendios / control | Cantidad de incendios en los últimos 100 años | ha quemadas |
| | Cantidad de incendios en los últimos 20 años | N. incendios |
| | Densidad de caminos gestión fina y protección de incendios | ha quemadas |
| | Cantidad de agua para incendio (capacidad bajas) | m3/ha |
| Prevención enfermedades y plagas | Cantidad de trampas | Núm. trampas/año |

El segundo paso es la identificación de los servicios ecosistémicos ambientales a estudiar y su descomposición por funciones. Así, los diferentes servicios ambientales que ofrece un ecosistema se clasifican en cuatro categorías, como se mencionó anteriormente. En la siguiente Figura 2.5 se presentan ejemplos de cada servicio y algunas funciones de cada uno de ellos.

El siguiente paso es la determinación de uno o más indicadores para la cuantificación física y la cuantificación de cada uno.

2.1.3. Gestión sostenible

El corcho asegura la sostenibilidad económica, social y ecológica de los alcornoques [11]. Esta sostenibilidad se caracteriza desde el punto de vista de tres aspectos: natural, social y económico, de acuerdo con la diversificación de las funciones forestales [19] y las aplicaciones del corcho.

La gestión sostenible de la producción de corcho se basa en el hecho de que la corteza de corcho se extrae sin poner en peligro la viabilidad del árbol y se regenera con el tiempo. La extracción de corcho para la producción de tapones de corcho requiere la extracción periódica de corcho del alcornoque durante un periodo de tiempo donde es compatible con la preservación del árbol, ya que este se encuentra en excelentes condiciones fisiológicas. Esta gestión sostenible del corcho y su ciclo de vida del alcornoque se representa en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Ciclo de vida del corcho desde la germinación de las semillas hasta la muerte del árbol

Como podemos ver en esta Figura 2.6, el primer descorche del alcornocal se realiza cuando el árbol tiene entre 30 y 40 años o cuando el árbol es adulto (depende de la región). Esta primera corteza obtenida se denomina corcho bornizo. Luego, después de 9 a 14 años, según la región, se vuelve a extraer el corcho obteniendo la segunda corteza o el segundo segundero. Éste primer material no es apto para la producción de tapones de corcho debido a sus propiedades mecánicas y a sus características visuales. Luego, el alcornoque se extrae periódicamente a intervalos de 9 a 14 años, obteniendo otro material denominado: corcho de reproducción. Estas últimas cortezas son útiles para la fabricación de tapones de corcho. Este proceso es continuo hasta que el árbol tiene entre 150 y 250 años. Estas condiciones permiten obtener el corcho de grado comercial.

El descorche se realiza manualmente. El proceso se muestra en la Figura 2.7. El descorche es un proceso manual que requiere cierta pericia para evitar herir al árbol: sin alcanzar y dañar el cambium vascular debajo del felógeno. Esta competencia de los sacadores es necesaria para ejecutar correctamente la operación, además de seleccionar el momento de inicio de descorche.



Figura 2.7 Proceso de descorche (ICSuro).

El proceso de descorche se realiza utilizando un hacha con una hoja de corte curva y un brazo de madera relativamente largo para usarlo como palanca para separar la corteza de corcho. Primero, se realizan cortes largos en el corcho: horizontales alrededor del perímetro del árbol y algunos cortes verticales. Luego, se separa la corteza del árbol introduciendo el brazo del hacha en el corte hasta extraer la plancha [1]. Normalmente, el equipo de personas responsables del descorche está formado por dos personas, y el proceso se lleva a cabo con bastante rapidez y con un rendimiento medio de unos 900 kg de corcho en una jornada laboral [20]. Hoy en día, existe un proceso mecanizado alternativo para la extracción del corcho.

La Figura 2.8 muestra el aspecto visual del corcho bornizo, el secundero y el corcho de reproducción después de la extracción. Las planchas de corcho bornizo y secundero presentan algunas diferencias en el aspecto visual en comparación con las planchas de corcho de reproducción. Estas diferencias se deben al desarrollo del tejido llamado periderma y su regularidad. La superficie de las dos primeras cortezas de corcho es irregular y presenta estructuras lignocelulósicas. Esa es la razón por la que ambas cortezas no son adecuadas para la producción de tapones de corcho natural.



Figura 2.8 *Quercus suber*: (A) corcho bornizo; (B) corcho secundero; y (C) corcho de reproducción en árboles maduros (ICSuro).

El proceso de extracción del corcho se realiza únicamente cuando el alcornoque está fisiológicamente activo o cuando las células están turgentes, y las paredes celulares son finas y frágiles. Aplicando una fuerza moderada, la capa corteza de corcho se puede separar fácilmente [1]. Esta etapa corresponde a finales de primavera y principios de verano. Después del descorchado, el felógeno muere y se forma uno nuevo. Estas condiciones mencionadas anteriormente son esenciales para garantizar que el árbol no sufra daños y se generen puntos de infección. En este caso, un ataque biológico podría producir la muerte del árbol.

Pero, ¿cómo es posible la regeneración de la corteza de corcho? Cuando observamos una sección transversal del tallo alcornocal (Figura 2.9), podemos diferenciar dos meristemas o un grupo de células indiferenciadas con capacidad de división celular (cambium y felógeno). Ambos meristemas pueden producir tejidos en ambos lados. En el caso del cambium, es el responsable de la formación del xilema o madera (en la parte interna) y del floema o principal tejido conductor de alimentos en las plantas vasculares (en la parte externa). Esta es la estructura típica de las plantas leñosas. Y en el caso del felógeno, es responsable de la formación del feloderma y felema (o corcho) en el interior y la otra parte, respectivamente. La periderma es la suma de feloderma, felema y felofeno [1].

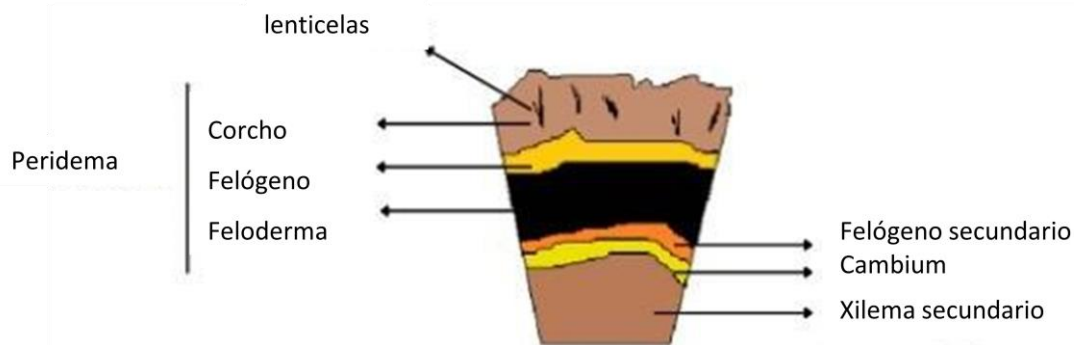


Figura 2.9 Sección transversal de fuste de alcornoque (ICSuro).

El periderma es un tejido protector y, en algunas especies, solo es funcional durante un período de tiempo. En el caso de *Quercus suber*, las sucesivas muertes del tejido y posteriores regeneraciones de la peridermis son las responsables de la producción de corcho. Además, el periderma del alcornoque tiene unas características especiales relacionadas con su desarrollo, regularidad, intensidad de crecimiento y longevidad, y como se ha comentado anteriormente, su capacidad de regeneración tras su extracción ha hecho que esta especie sea única.

Tras su extracción, el corcho se puede utilizar en múltiples aplicaciones. Hoy en día, los tapones de corcho natural son el producto más valioso y el más producido en la industria del corcho. Los tapones de corcho representan el 70% de los ingresos totales generados por la industria corchera. Según el registro APCOR, los tapones de corcho natural o tapones para vino tranquilo representaron el 60% del mercado, mientras que otros tipos de tapones representan el 21%, como los tapones para vino espumoso, representaron el 19%.

El corcho que no es apto para la industria del tapón de corcho: el corcho bornizo o corcho de baja calidad se utilizan para producir gránulos de corcho que se clasifican según su densidad y granulometría [21]. La presencia de defectos tales como discontinuidades excesivas, es decir, fracturas profundas, no son adecuadas para la producción de tapones de corcho, por lo que no se utiliza ni el corcho bornizo ni el secundario para la fabricación de tapones de corcho. Estos gránulos de corcho pueden utilizarse como producto final en diversas aplicaciones aprovechando sus propiedades que se caracterizan por su ligereza, elasticidad e impermeabilidad a gases y líquidos.

La calidad de la plancha de corcho es un factor importante para decidir el uso final de esta materia prima. Esta calidad se evalúa mediante un control visual de las planchas de corcho. Como se mencionó anteriormente, la clasificación de las planchas la realiza un operador especializado teniendo en cuenta criterios subjetivos que son diferentes según el uso final que se les dé. En el caso de la calidad del corcho en la producción de tapones de corcho, las principales características consideradas son principalmente la porosidad, el espesor del corcho crudo y algunos defectos como agujeros de insectos o grietas tangenciales.

2.1.4. Efecto del cambio climático en el ecosistema del corcho

El alcornoque aporta beneficios ecológicos, económicos y sociales. Desde la década de 1950, sin embargo, se reconoce el fenómeno de la disminución del número de alcornoques. Además, investigaciones previas indican que este declive se ha acelerado en los treinta años transcurridos desde la década de 1980 [22]. La capacidad de los bosques mediterráneos para responder a cambios sistemáticos, como soportar intensas influencias humanas o el cambio climático, es limitada. Sin embargo, las causas de esta situación aún no están claras.

Los factores bióticos y abióticos, como el cambio climático o algún tipo de actividad humana, podrían conducir a una pérdida constante del número de alcornocales, particularmente en la zona mediterránea. Por ejemplo, como resultado de algunas prácticas como el desbroce, el pastoreo o el arado para la agricultura, los bosques de alcornoques se fueron transformando gradualmente en bosques abiertos [15].

Kim et al. [5] sugirieron algunas hipótesis sobre el declive de *Quercus suber*. Según este estudio, algunos agentes naturales como el aumento de la temperatura media anual, los períodos de sequía, las precipitaciones extremas o la disminución de 57 mm en la precipitación media anual durante las últimas dos décadas se han sugerido como causantes de la degradación de estas zonas. Estos cambios ambientales podrían conducir a un aumento de la vulnerabilidad de los árboles a insectos y patógenos y/o una disminución fisiológica de los árboles [23] debido a que la supervivencia y el desarrollo de patógenos aumentan cuando la temperatura sube en invierno.

En el caso del aumento de la temperatura, se espera que la temperatura media anual en la región mediterránea aumente entre 2 y 4,5 °C, según el informe del IPCC. Durante un verano caluroso, un aumento en la temperatura del aire podría obstaculizar el crecimiento de los árboles debido al aumento en las tasas de respiración y al estrés por sequía impuesto por la creciente demanda de evapotranspiración [5]. Además, fenómenos ambientales como períodos de sequía severa, rápida fluctuación de los niveles de agua del suelo, anegamiento y/o inundaciones prolongadas podrían estar implicados en la disminución del número de alcornoques. Estos fenómenos pueden ser particularmente importantes en el inicio de los síndromes de declive [24].

Este fenómeno de disminución está asociado con un aumento en el número de árboles con síntomas de "muerte súbita" que están relacionados con la infección por el hongo *Phytophthora cinnamomi* [25, 26]. Otras razones que conducen a una disminución de los alcornocales son la presencia de escarabajos en las cortezas o una invasión de hongos oportunistas en la zona del tallo y de las raíces [26].

El impacto humano es otro factor a tener en cuenta. Algunas actividades humanas como la industrialización, la urbanización, la sobreexplotación o los incendios forestales pueden provocar el deterioro ambiental de algunos países mediterráneos. Algunas de sus consecuencias son el cambio

climático o grandes problemas medioambientales como la degradación del suelo, la sedimentación, la pérdida de biodiversidad o la contaminación del agua y del aire. A finales del siglo XIX y principios del XX, la extracción excesiva de taninos tras el descortezado fue una de las principales causas del declive a largo plazo de los bosques de alcornoques [27]. Los bosques mediterráneos tienen una larga historia de pastoreo. Algunas evidencias científicas han demostrado que el pastoreo del ganado es un factor ecológico que puede mejorar la conservación de los bosques mediterráneos si se utiliza adecuadamente. Masson et al. han encontrado que el pastoreo en los alcornoques franceses controla el crecimiento de arbustos. En el pasado, otros estudios culpaban a los animales domésticos de su destrucción. Estos sugirieron que el uso excesivo y la explotación de alcornoques podrían reducir su tasa de regeneración por debajo del nivel sostenible en la cuenca mediterránea [28, 29]. Según Costa et al. [20], el abandono de las prácticas tradicionales de manejo de la tierra ha tenido como resultado transformaciones significativas en el uso de la tierra, como el reemplazo de usos agrícolas y bosques de robles nativos por matorrales y plantaciones de eucalipto y pino (*Pinus pinea* L.) de rápido crecimiento.

2.2. Huella de Carbono de los Productos de Corcho

2.2.1. Introducción a la Huella de Carbono

El cambio climático es el principal problema para el futuro de la naturaleza y la humanidad, y necesitamos reducciones significativas de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para mitigar los problemas futuros y promover un camino sostenible hacia el futuro. Las emisiones antropogénicas netas totales de GEI han seguido aumentando durante la última década, al igual que las emisiones netas acumuladas de CO₂ desde 1850. El sector forestal ofrece importantes oportunidades de mitigación al tiempo que proporciona alimentos, madera y otros recursos renovables, así como la conservación de la biodiversidad. Los recursos naturales pueden ser renovables o no renovables, según se puedan extraer más de una vez y reponerse de forma natural, y tienen potencial para hacer más eficiente la industria aeronáutica.

El análisis del ciclo de vida (ACV) y la huella de carbono son herramientas cada vez más populares para la evaluación ambiental de productos que tienen en cuenta todo su ciclo de vida. La diferencia entre un ACV y una huella de carbono se relaciona con las categorías de impacto estudiadas. Una huella de Carbono se concentra en una categoría de impacto ambiental: las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂¹). El análisis de la huella de carbono es un subconjunto de una evaluación del ciclo de vida completo de un producto, actividad o proceso. ACV identifica las entradas y salidas de materia y energía a lo largo de la vida útil de un proceso, producto, servicio, persona u organización, según el alcance del estudio. Este análisis, junto con la huella de carbono, permite la estandarización de datos, la realización de análisis y comparaciones, y la determinación del impacto ambiental del objeto de investigación en una misma unidad (CO₂eq) independientemente del contexto.

¹ CO₂ equivalente, abreviado como CO₂ eq, es una medida métrica utilizada para evaluar las emisiones de otros gases de efecto invernadero en función de su potencial de calentamiento global (GWP) mediante la conversión de los niveles de otros gases a la cantidad equivalente de dióxido de carbono con el mismo GWP

Para evaluar la contribución ambiental de diferentes productos, podemos usar el ACV y traducir los resultados en CO_{2eq} (dióxido de carbono equivalente) como huella de carbono. Podemos definir la metodología de evaluación del ciclo de vida como la evaluación de los impactos ambientales asociados con un producto, proceso o servicio a lo largo de su vida mediante el inventario de recursos materiales, entradas de energía y problemas ambientales a través de la obtención, fabricación, uso y eliminación del producto o servicio (enfoque de la cuna a la tumba) (Figura 2.10).

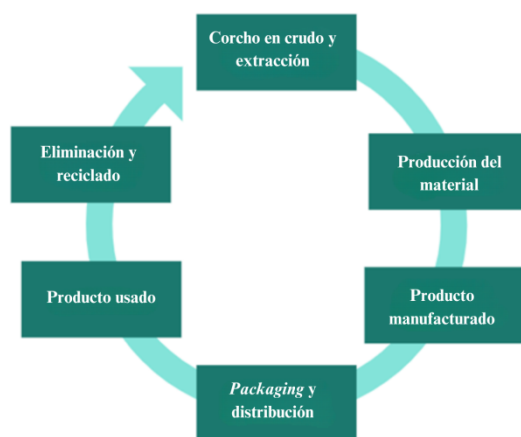


Figura 2.10 Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) (ICSuro).

El material de corcho está íntimamente relacionado con la preservación de la biodiversidad, piedra angular del desarrollo sostenible, así como con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el secuestro de CO₂. El corcho se regenera después de cada pelado, lo que permite que el alcornoque resista la pérdida de una cantidad significativa de corteza, normalmente más del 50 por ciento de la superficie total del tronco y las ramas. El hecho de que los corchos se creen a partir de la corteza externa de árboles vivos ha llevado a los legisladores a favorecer su uso sobre alternativas menos naturales. Existen algunos estudios de evaluación del ciclo de vida que se centran en la gestión forestal del alcornoque y su relación con el medio ambiente [30-33].

La huella de carbono del sector del corcho debe considerarse en todas sus diferentes etapas, desde la gestión forestal (no solo la recolección del corcho), pasando por los procesos de fabricación y distribución del producto, hasta el final de la vida útil del producto (es decir, eliminación, incineración, reciclaje, etc.). Además, el carbono biogénico secuestrado en los productos de origen forestal (corcho, madera, etc.) no suele incluirse porque se liberan a la atmósfera durante las etapas de procesamiento y fin de vida por descomposición, incineración o degradación biológica. El sumidero de carbono biogénico y la emisión retardada en el bosque (madera, corcho, raíces y follaje) se mantienen dentro del producto de corcho durante el uso del producto hasta las etapas finales de su vida útil (considerando que la incineración con o sin uso de energía, el vertido con degradación anaerobia del corcho, y el compostaje son etapas de fin de vida en función de las posibilidades de cada territorio y servicios públicos de recogida y gestión de residuos y subproductos).

2.2.2. Fijación de carbono de los bosques

Según el informe más reciente del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) de las Naciones Unidas de 2022, es "inequívoco que el impacto humano ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra". En el siglo XXI, el calentamiento global alcanzará los 1,5 °C y los 2 °C a menos que se reduzcan drásticamente las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero en las próximas décadas. Desde un punto de vista científico físico, limitar el calentamiento global causado por el hombre a un nivel predeterminado implica limitar las emisiones acumuladas de CO₂ y lograr emisiones netas de CO₂ cero, además de reducciones significativas en otras emisiones de gases de efecto invernadero. Si bien los humanos son los responsables de la combustión de los combustibles fósiles, la asimilación y almacenamiento a mediano plazo de carbono en los bosques puede ayudar a la reducción de las emisiones de gases carbónicos de los combustibles fósiles.

Los bosques de *Quercus suber* son ecosistemas sobresalientes porque son la consecuencia de prácticas tradicionales de manejo humano a largo plazo y una relación simbiótica entre los humanos y el medio ambiente. Los bosques de alcornoques, como todos los bosques, contribuyen a la mitigación del cambio climático eliminando (CO₂) de la atmósfera a través de la actividad fotosintética y almacenándolo en sus tejidos perennes durante el proceso de crecimiento natural y en el suelo como materia orgánica. Los alcornoques son árboles longevos; son capaces de almacenar carbono durante largos períodos de tiempo, y su corteza excepcionalmente dura puede durar mucho después de que el alcornoque haya muerto. Lo mismo ocurre con los productos de corcho, ya que son extremadamente duraderos y se pueden utilizar durante largos períodos de tiempo, así como en un vertedero (el material de corcho no se degrada fácilmente), almacenando la mayor parte del carbono contenido en la corteza de corcho (carbón biogénico) extraído del alcornoque, contribuyendo así a la reducción del efecto invernadero provocado por el gas CO₂.

El secuestro de carbono en los ecosistemas forestales se evalúa por el equilibrio entre la absorción de carbono fotosintético y el dióxido de carbono emitido por la respiración del ecosistema (incluida la descomposición de la materia orgánica en el suelo, que proporciona los nutrientes esenciales para la vida). De ahí la importancia de medir el equilibrio del ecosistema o la producción neta.

El ecosistema del alcornocal absorbe entre 2 y 14 toneladas de CO₂/ha/año, según diferentes estudios [34-38], y esta cantidad depende del tipo de ecosistema (pradera o bosque) y de las condiciones climáticas.

ICOS (Sistema Integrado de Observación de Carbono) fue desarrollado por la Unión Europea para ayudar a los esfuerzos globales para cuantificar el balance de carbono. La capacidad anual de retención de carbono de los bosques de alcornoques montados o portugueses ha sido evaluada a través de una investigación realizada en Portugal. Por ejemplo, en el centro de Portugal (Herdade da Maxuqueira), un bosque abierto de alcornoques (*Quercus suber*) de 50 años con un sotobosque de especies de

arbustos semicaducifolios y pastizales nativos puede retener hasta $-388 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ [37] (es decir, 14,2 toneladas de CO_2 por hectárea al año). Sin embargo, la ocurrencia de condiciones adversas, como un año seco, puede resultar en disminuciones significativas (alrededor del 45%) en la captura de carbono.

La reserva de carbono en los bosques de alcornoques depende principalmente de la ubicación del alcornoque porque esto afecta la densidad de árboles por hectárea, el período de extracción del corcho y la tasa de crecimiento. La variación anual del secuestro de carbono también depende de las condiciones climáticas de un año determinado.

La siguiente tabla muestra los resultados del secuestro neto de carbono (fijación menos emisión o tasa neta de intercambio ecosistémico) del alcornocal según diversos estudios, y también presenta la variación del intercambio neto de CO_2 en función de las condiciones climáticas como así como el promedio final. Los resultados de la fijación de carbono en los estudios a menudo se informan en unidades de $\text{gCm}^2 \text{ año}^{-1}$, estos han sido convertidos a valores estándar de $\text{ton CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; Además, cuando los estudios reportan rangos de valores, estos se han transformado a un valor medio en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Tasa de Intercambio Ecosistémico Neto ($\text{ton CO}_2/\text{ha}\cdot\text{año}$).

| | Autor | Ton CO_2 /ha·año | Ecosistema | Período | Ubicación |
|---|------------------------------------|---|----------------------------------|----------------|-----------------------|
| 1 | Pereira [34] | -3.1 | encina y alcornoque bosque | 2003-2006 | Alentejo, Portugal |
| 2 | García [82] | -2.9 | Alcornoque bosque | 2005 | Cataluña, España |
| 3 | Costa-e-Silva et. Alabama. [37] | -14.2 | Alcornoque bosque | 2011 | centro de portugal |
| 4 | Spampinato et al. [38] | -5.0 | Alcornoque bosque | 2017 | Calabria, Italia |
| 5 | Montero et al. [35] | -1.9* | Alcornoque bosque y bosque | 2004 | España |

*Resultado del cociente del incremento anual de la biomasa total (1.031.232 $\text{ton CO}_2\text{eq}$) dividido por la superficie de distribución del alcornoque en España (541.179 ha según datos del INIA-CSIC).

La medición de la biomasa, informada como peso seco, cuantifica la cantidad de carbono fijado en los ecosistemas forestales, así como la cantidad comparable de dióxido de carbono (CO₂) eliminado de la atmósfera. El carbono fijado en los tejidos vegetales (madera, hojas, etc.) representa alrededor de la mitad de la biomasa, mientras que el dióxido de carbono equivalente se calcula multiplicando el contenido de carbono de la biomasa por la relación entre los pesos moleculares del carbono anhídrido y el carbono elemental. .

El uso del corcho está estrechamente relacionado con la captura de CO₂. La extracción periódica de corcho hace que los alcornoques produzcan entre un 250 % y un 400 % más de corcho [39] de lo que producirían si no se extrajera el corcho (después de retirar el corcho, el árbol comienza rápidamente a producir nueva corteza para protegerse), lo que aumenta la fijación de CO₂. La gestión y explotación sostenible del alcornocal, debido a la explotación comercial de este material, favorece la formación de más corcho, y por tanto se secuestra más CO₂ [40]. Además, estos productos de corcho pueden tener una vida útil de años (como los tapones de corcho) o decenas de años (como los suelos y otros materiales de construcción). De hecho, aún no existen estudios en profundidad sobre la influencia del reciclaje de tapones de corcho en el aumento de la vida útil del corcho, por ejemplo, las iniciativas en la aplicación de tapones de corcho reciclados y granulados en aplicaciones urbanas como las impulsadas por la Fundación Institut Català del Suro. En la fase de fin de vida también se tuvieron en cuenta las emisiones de carbono biogénico. En concreto, en caso de incineración, se consideró que todo el carbono biogénico de los productos de corcho se emitía de nuevo a la atmósfera (después del período de uso de los productos de corcho). En el caso de los vertederos, normalmente se considera que se libera solo el 2 % del carbono biogénico contenido en los elementos, y el resto permanece permanentemente retenido en el vertedero [41]. El alargamiento de su vida útil permite prolongar sus características de neutralidad en carbono hasta el instante de su descomposición o aprovechamiento energético.

La época de recolección del corcho tiene lugar en verano (mayo a agosto) y se realiza después de que el árbol haya alcanzado 0,7 m (Portugal), 0,65 m (Cataluña y Andalucía), o 0,60 m (Extremadura) en el perímetro a 1,3 m desde el suelo. En un mismo árbol, dos descortezados consecutivos están separados por intervalos mínimos de 9 o 14 años (dependiendo del territorio). La primera saca de corcho (extracción de corteza de corcho) puede tener lugar cuando el diámetro del tronco es lo suficientemente grande. La primera corteza que se extrae se denomina corcho virgen y, debido a las irregularidades de la superficie exterior, suele triturarse y utilizarse para la construcción. En la actualidad, este primer corcho se destina a la industria del granulado de corcho en la producción de gránulos que serán aglomerados para la elaboración de productos de corcho negro utilizados como aislantes en la construcción.

Tras el primer descorte, entre los 9 y los 14 años, tiene lugar la segunda saca de corcho. Este corcho

de segunda extracción se denomina corcho segundo (*secundeira* en portugués y *matxot* en catalán), y dado que sus características no son las óptimas para la producción de tapones de corcho (utilización de los de mayor valor añadido), se envía a la industria de la granulación para la producción de corcho blanco granulado para aislamiento y otros productos de corcho aglomerado.

La tercera saca de corcho y los decorche subsiguientes producen planchas de corcho más uniformes. El corcho de reproducción se utiliza para la fabricación de tapones de corcho natural para la industria del vino tranquilo para el cierre de botellas de vino y discos de corcho natural para el montaje de tapones de corcho aglomerado (llamados tapones técnicos) para vino espumoso. Las botellas de vino espumoso cuentan con presión interna y tapones de corchos técnicos para sellar más eficientemente las botellas. El corcho obtenido a través de la poda de las ramas y los troncos irregulares del alcornoque produce un subproducto del corcho conocido como corcho muerto (*suro pelut* en catalán o *falca* en portugués), que es una mezcla de varias variedades de corcho, corteza interna y madera. Una vez que el corcho ha sido separado de la madera, se considera que es de calidad inferior (virgen y segundo) y se tritura y aglomera para su uso en la creación de materiales de construcción.

Se considera que 150 -200 años es la edad máxima de explotación de un alcornoque [37]. La densidad de árboles de un bosque de alcornoques varía ampliamente según la región (50–150 árboles por hectárea), y se puede suponer una densidad promedio de 100 árboles por hectárea para los análisis de ACV durante la fase de producción de corcho. La producción de corcho forestal puede variar mucho según el territorio, lo que indica diferentes circunstancias climáticas y ecológicas, que a su vez influyen en la densidad de árboles, la tasa de desarrollo de los alcornocales y la intensidad del descorche. Por ejemplo, podemos calcular la producción de 1,49-3,48 toneladas de corcho bruto total por hectárea en el bosque catalán [42].

Existen dos modelos principales de gestión o ecosistemas de alcornocales: sistemas agrosilvopastoriles (principalmente en Portugal y sur de España) y sistemas forestales (es decir, Cataluña y sur de Francia). Se originan en diferentes niveles de impacto, que tienden a ser significativamente menores en los sistemas forestales [41]. Los puntos críticos ambientales en los dos modelos son distintos. En el sistema forestal, están asociados a la limpieza, mantenimiento de caminos y transporte de trabajadores y corcho. En los sistemas agrosilvopastoriles son la fertilización, la poda y la limpieza. Los dos criterios de asignación de impactos ambientales afectan significativamente a los resultados obtenidos para corcho virgen en sistemas agrosilvopastoriles y para corcho virgen y de segundo en sistemas forestales. La comparación de los impactos encontrados para corcho bornizo y segundo en Portugal y Cataluña revela que los impactos en Cataluña son significativamente menores debido a los procedimientos de gestión menos intensos descritos anteriormente. Tanto Portugal (región del Alentejo) como Cataluña mantienen sus bosques de alcornoques de manera diferente. En Portugal, los alcornocales son sistemas agrosilvopastoriles de mantenimiento intensivo caracterizados por una baja

densidad de árboles. Los sistemas forestales en Cataluña tienen una mayor densidad de árboles, menos operaciones automatizadas y ninguna fertilización. Debido a estas distinciones, el corcho producido en Portugal tiende a tener mayores repercusiones ambientales que el corcho producido en Cataluña [41].

El modelo de carbono de corcho (CCFM), desarrollado para el sector corchero portugués [33], es extrapolable a otros territorios corcheros como España. Esto demuestra que el sector del corcho es un sumidero de carbono; esto significa que el sector del corcho en su conjunto retiene más CO₂ del que emite a la atmósfera en la fabricación de productos de corcho. La Figura 2.11 muestra que el carbono tomado por el bosque para fines biológicos es mayor que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de todo el sector, incluidos el carbón biogénico.

Además, la figura muestra que los procesos que más emiten GEI son la fabricación de productos aglomerados, principalmente debido a las resinas que se mezclan con los gránulos de corcho durante la producción de corcho aglomerado. Con esta cifra, queda claro que los bosques de alcornoques y los productos de corcho obtenidos con la recolección del corcho tienen potencial para mitigar el efecto invernadero al reducir las emisiones de carbono a la atmósfera.

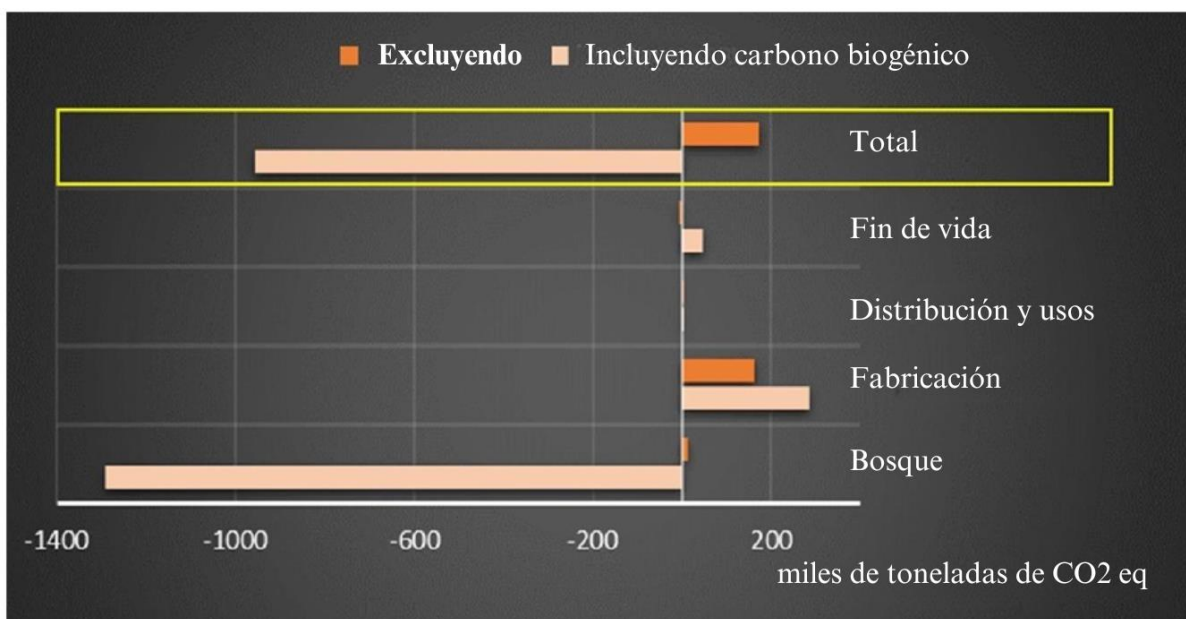


Figura 2.11 Huella de carbono del corcho por etapa del sector calculada por el modelo de huella de carbono del corcho [43].

2.2.3. *Ciclo de vida de los productos de corcho*

El desarrollo y despliegue de Reglas de Categoría de Producto (PCR) podría ser ventajoso en el caso de los productos de corcho, ya que permitiría la comparación de diferentes estudios y ayudaría a evitar errores de cálculo al proporcionar una metodología estandarizada. De hecho, en el momento de redactar este documento, el Comité Técnico Español de Normalización (CTN 56 SC5), encargado de la normalización de productos de corcho y liderado por la Fundació Institut Català del Suro, está desarrollando un PCR para estandarizar la metodología de cálculo la huella ambiental de los diferentes tipos de tapones de corcho. Podemos encontrar en la literatura algunos estudios de ACV que investigan el efecto ambiental de los principales productos de corcho. Por ejemplo, tapones de corcho natural, tapones de corcho para champán y pisos flotantes de corcho. Actualmente, en Cataluña se está actualizando un análisis ambiental integrado de algunos productos de corcho [44].

Mediante la aplicación de ACV, es posible evaluar todos los materiales utilizados, los combustibles fósiles y renovables consumidos, y todas las emisiones resultantes para encontrar las fases más influyentes que pueden modificarse para reducir el impacto ambiental total de la fabricación de productos de corcho. Los datos sobre los principales puntos críticos del proceso de fabricación (caldera y gestión forestal) pueden ser examinados por la industria para implementar medidas de mejora y reducir los impactos ambientales finales, así como la estrategia de fin de vida. Dado que estos dos procesos son los más impactantes en todas las categorías de efecto evaluadas. La industria del corcho podría lograr un mejor desempeño ambiental centrándose en estos dos aspectos. En el caso de la gestión forestal, por ejemplo, se podría implementar un enfoque alternativo alterando la frecuencia de actividades como la limpieza de la vegetación espontánea o la fertilización; sin embargo, esto debe estudiarse a fondo para no reducir la productividad forestal, lo que sería perjudicial para la huella de carbono.

Como se ha indicado anteriormente, el carbono secuestrado permanece en la biomasa del alcornoque y posteriormente en los productos del corcho hasta que se libera a la atmósfera por combustión o descomposición. Considere la etapa forestal (incluidas las actividades de gestión del alcornoque), la etapa de fabricación (incluidos los diversos procesos para la producción de productos de corcho), la etapa de uso (incluido el transporte de productos de corcho usados a los lugares de distribución) y la etapa de final de la vida (incluidas las estrategias de gestión de reciclaje, compostaje, incineración o generación de energía y vertido). También describe el secuestro de CO₂ en la etapa forestal (durante el crecimiento de los alcornoques). Teniendo en cuenta las emisiones y el almacenamiento de CO₂ biogénico (CO₂ almacenado en el propio material de corcho), es fundamental señalar que el destino final de vida tiene un impacto considerable en los resultados, ya que puede alterarlos considerablemente. No es posible suponer que persiste todo el carbono biogénico presente en el circuito del sistema. Teniendo en cuenta que los tapones de corcho reciclado pueden utilizarse en la

creación de otros productos de corcho aglomerado (p. ej., construcción), Demertzi [33] calcula que el 30 % de la materia prima se incluye en el producto terminado. En caso de reciclado, se cree que el 30% del carbono contenido en los tapones de corcho natural queda en el sistema sin ser liberado a la atmósfera, mientras que el 70% del carbono biogénico contenido en los tapones de corcho natural es liberado a la atmósfera (debido a combustión de polvo de corcho). Cuando se incluye el carbono biogénico en los cálculos, el secuestro de CO₂ en la etapa forestal se considera una emisión negativa ya que disminuye la cantidad de CO₂ en la atmósfera.

De acuerdo con la norma ISO 14067:2018 *Gases de efecto invernadero — Huella de carbono de los productos — Requisitos y pautas para la cuantificación*, cuando el carbono biogénico se almacena en un producto durante más de 10 años, debe documentarse y valorizarse pero no debe incluirse en la carbono huella.

Los porcentajes utilizados para los destinos finales de los distintos productos de corcho deben basarse en los principales destinos finales de los residuos sólidos urbanos y las estrategias de reciclaje. El reciclaje aumentaría significativamente la vida útil en el sector del corcho en su conjunto. Hay que tener en cuenta que en el año 2020 se recogieron 440 toneladas de tapones de corcho en plantas de tratamiento de vidrio en España, según ECOVIDRIO (entidad sin ánimo de lucro encargada de gestionar el reciclaje de todos los residuos de envases de vidrio en España). En conjunto, en España, las bodegas adheridas al Sistema Integrado de Gestión de Residuos declararon 3.700 toneladas de tapones de corcho, según ECOEMBES (sociedad sin ánimo de lucro que supervisa el reciclaje de residuos depositados en los contenedores amarillo y azul). Por tanto, los sectores del corcho y del vino tienen un alto potencial para reciclar los tapones de corcho y aumentar su vida útil a través de otras aplicaciones y así aumentar el tiempo hasta que el carbono biogénico pase definitivamente a la atmósfera.

Dependiendo de la categoría de efecto evaluada, se pueden seleccionar muchas soluciones de gestión de uso final, como el vertido, la incineración, la producción de energía, el compostaje y el reciclaje. Algunas alternativas pueden brindar los mejores resultados ambientales para el cambio climático, el agotamiento del ozono y la acidificación, mientras que otras pueden brindar los mejores resultados ambientales para la generación de ozono fotoquímico y el agotamiento de los recursos minerales y fósiles. En la mayoría de las categorías de efectos ambientales, la opción de vertedero no proporciona el rendimiento óptimo.

Sin embargo, cuando se evalúa la emisión de dióxido de carbono biogénico para la categoría de cambio climático, la opción de reciclaje demuestra ser la más eficiente, ya que la mayoría del carbono biogénico se retendría casi permanentemente en los productos de corcho y no se liberaría a la atmósfera. El secuestro de CO₂ en productos de corcho para diferentes aplicaciones se basa en determinaciones previas del contenido de carbono de diferentes materiales de corcho. Conocer la

cantidad de carbono biogénico en diferentes tipos de materiales permite a ingenieros, arquitectos, diseñadores y otros técnicos estimar de forma sencilla la cantidad de CO₂ secuestrada en los productos de corcho al utilizarlos en muy diferentes aplicaciones. Por otro lado, y desde una perspectiva más amplia, podemos considerar que los productos de corcho, dadas sus características físico-mecánicas, tienden a ser sustituidos por materiales plásticos que son mucho más intensivos energéticamente en su fabricación y proceden de fuentes energéticas y no -materia renovable. Estos cálculos son un tema de actualidad y tienen una importancia creciente a la hora de comparar materiales teniendo en cuenta la necesidad de conseguir la neutralidad en carbono. Un ejemplo de estos cálculos se puede encontrar en el trabajo de Gil [31] (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Contenido de CO₂ de diferentes productos de corcho [31].

| Producto | g CO ₂ /producto | g CO ₂ / g producto |
|---|-----------------------------|--------------------------------|
| Tapón de corcho espumoso (aglomerado con 2 discos de corcho) | 16.5 | 1.90 |
| Tapón de corcho para vino tranquilo (tapón de corcho natural) | 10.6 | 1.89 |
| Tapón de corcho aglomerado para vino tranquilo | 9.3 | 1.90 |
| Tapón de corcho microaglomerado para vino tranquilo | 7.9 | 1.47 |
| Losa de corcho expandido (40 mm de ancho) | - | 2.27 |
| Junta expandida (12 mm de ancho) | - | 1.93 |

Los taponés de corcho natural tienen un 100% de corcho; de hecho, para que un tapón sea considerado “tapón de corcho” debe contener al menos un 65% de corcho en masa en su formulación [45]. Otros materiales a base de corcho también tienen un contenido de carbono considerable, desde alrededor del 55 % hasta alrededor del 65 % (p/p), y esto corresponde a un alto secuestro de carbono en estos materiales. Dado este aspecto y debido a que los materiales de corcho tienen una vida útil bastante larga, que puede prolongarse tras un primer uso mediante el reciclaje, son materiales de elección para las denominadas aplicaciones “verdes” y sostenibles.

2.2.4. Valores de Huella de Carbono

La industria del corcho se distingue por una amplia gama de productos de corcho. La Figura 2.12 muestra los productos de corcho más representativos fabricados a partir de los distintos tipos de corcho: productos de construcción y gránulos de corcho aglomerado negro (de corcho de madera muerta y corcho virgen), productos de construcción de corcho aglomerado blanco y gránulos (de

madera muerta y corcho de segunda reproducción), tapones de corcho natural y discos, y tapones de corcho aglomerado y materiales de construcción (de corcho de reproducción). Estos productos representan el 97,6% del total de productos de corcho vendidos en Portugal [46], en España casi el 100% de los productos de corcho fabricados son tapones de corcho. La parte restante del material de corcho incluye principalmente materias primas y productos de decoración, compuestos y láminas de corcho utilizadas en productos de moda y, en la actualidad, no hay datos disponibles sobre las emisiones de GEI durante su fabricación.

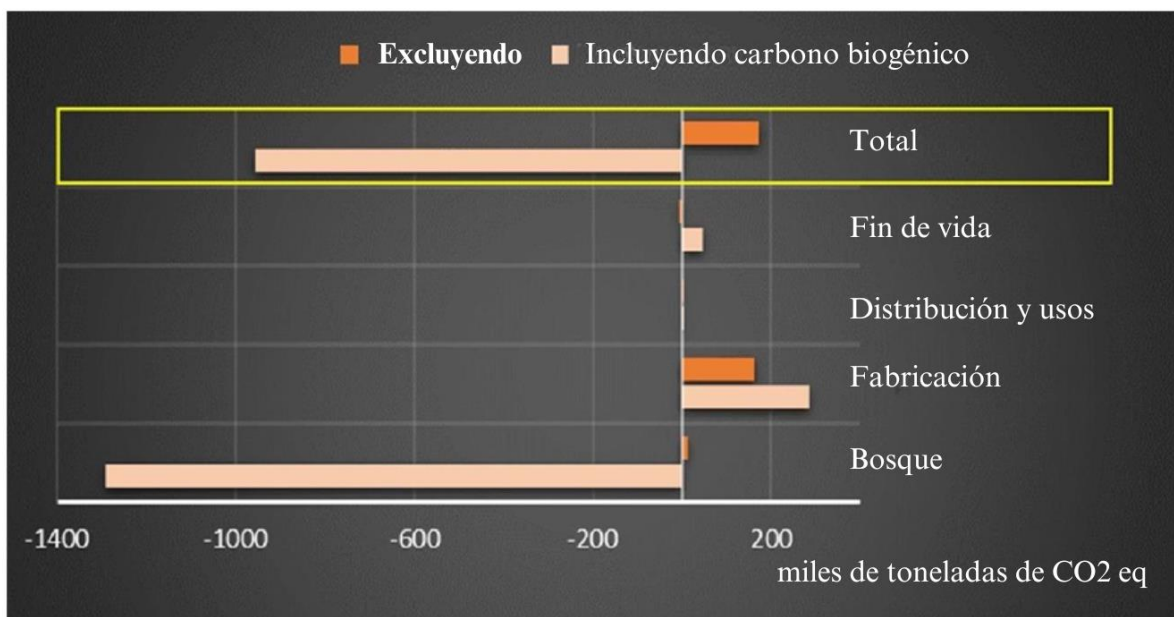


Figura 2.12 Salida de la huella de carbono del modelo para los productos finales más representativos de la industria del corcho, excluyendo el carbono biogénico y el secuestro forestal [48].

La huella de carbono total del sector del corcho puede reducirse sustancialmente si tenemos en cuenta el secuestro de carbono en la etapa forestal. Se sabe que el 79% del carbono secuestrado en la etapa forestal es madera almacenada, raíces y follaje del alcornoque, mientras que el 21% restante se conserva en el corcho crudo [48]. Si consideramos las mejores condiciones para la captura de carbono en el bosque ($14,2 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y una productividad media de 1,5 toneladas por hectárea, tenemos que ser absorbidos $-9,5 \text{ kg de CO}_2$ por cada kg de corcho extraído. Este cálculo de la fijación de carbono forestal puede valorarse junto con el resultado del cálculo de la huella de carbono para comprender mejor el impacto positivo del uso del material de corcho.

Obtener un valor de secuestro de carbono lo más cercano posible a la realidad es importante desde la perspectiva de la agricultura de carbono. La agricultura de carbono se puede definir como un modelo de negocio verde que recompensa a los administradores de la tierra por adoptar prácticas mejoradas de gestión de la tierra que aumentan el secuestro de carbono en la biomasa viva, la materia orgánica muerta y los suelos al mejorar la captura de carbono y/o reducir la liberación de carbono a la atmósfera, mientras se adhiere a los principios ecológicos que son beneficiosos para la biodiversidad y

el capital natural en su conjunto. Los incentivos financieros pueden provenir de fuentes públicas o privadas y pueden recompensar a los administradores de la tierra por sus técnicas de gestión que aumentan el secuestro de carbono atmosférico o por la cantidad de carbono secuestrado. La agricultura de carbono sería una nueva fuente de ingresos para los administradores de la tierra, quienes, en muchos casos, también podrían cosechar los beneficios de una tierra más fértil y resistente en general. Además, los enfoques de agricultura de carbono generan con frecuencia co-beneficios para la biodiversidad, mejoran los servicios ecosistémicos y ayudan a los administradores de la tierra a ser más resistentes al cambio climático.

2.3. Usos potenciales del corcho

2.3.1. Principales Propiedades del Corcho

El corcho es una sustancia natural extraída de la corteza exterior del alcornoque. El alcornoque (*Quercus suber* L.) es una especie autóctona de los bosques de la región mediterránea occidental. El corcho es una sustancia peculiar. Es ligero y repelente al agua, por lo que es un material adecuado para flotadores. Se utiliza para tapar botellas ya que es comprimible e impermeable a los líquidos. [34]. Su conductividad térmica extremadamente baja lo convierte en un excelente aislante para los aislantes ablativos utilizados para proteger las naves espaciales de las altas temperaturas, y su capacidad de absorción de energía también se utiliza en otras aplicaciones aeroespaciales. Pero, ¿por qué el material de corcho tiene estas propiedades?

En el siglo XVII, Robert Hooke cortó un pequeño trozo de corcho, lo colocó bajo su microscopio, enfocó la luz del sol sobre él con una lente gruesa y observó la muestra a través del ocular. Hooke comparó lo que observó con un panal de abejas. La estructura de corcho estaba compuesta por numerosas cámaras pequeñas y vacías divididas por paredes delgadas. Los compartimentos los denominó "poros o células". Calculó que había aproximadamente mil doscientos millones de estas células por pulgada cúbica de corcho. Hooke había descubierto la estructura microscópica del corcho. Creía que la estructura microscópica del corcho era responsable de sus cualidades macroscópicas. Y lo que predijo era cierto, pero desconocía que había otro factor que explicaba las múltiples propiedades del corcho [49]. Las cualidades de un material están también determinadas por las propiedades químicas de sus constituyentes, así como por sus cantidades y distribuciones relativas (Figura 2.13). Al igual que con otros materiales celulares, los componentes químicos del corcho están situados en las caras y bordes de las celdas, formando una red tridimensional de una matriz sólida que rodea las celdas huecas llenas de aire. Muchas de las características únicas del corcho están directamente relacionadas con su composición química, mientras que otras, como su comportamiento mecánico y su interacción con los fluidos, son el resultado tanto de las características estructurales a nivel celular como de la estructura química de la pared celular. Así, las propiedades físicas y mecánicas del corcho son el resultado de la estructura celular y la composición química de la pared vegetal (suberina, lignina y polisacáridos).

Este subcapítulo resume el conocimiento sobre las principales propiedades del corcho y también se explica a su composición química y estructura.

Características estructurales

La estructura celular macroscópica del corcho está ampliamente establecida y es bien conocida, pero su estructura microscópica sigue sin comprenderse bien. Después de crecer, las células de corcho carecen de citoplasma y se vacían. En general, se reconoce que la pared celular es una estructura

enrevesada hecha de la pared primaria, que se forma principalmente de celulosa, la pared secundaria, que se ensambla a partir de depósitos laminares de suberina y, en cierta medida, lignina, y la pared terciaria, consta de polisacáridos. La estructura resultante se compone de una colección de celdas huecas. El corcho es un material anisotrópico. La sección transversal de la dirección radial (superficie perpendicular a la dirección de crecimiento de la corteza) se asemeja a un panal de abejas con celdas poligonales de cuatro a nueve lados [1]. En cambio, las secciones transversales tangenciales y axiales son morfológicamente comparables, y la estructura se asemeja a la de una pared de ladrillos (celdas prismáticas) [2]. El corcho comprende un número notable de propiedades que son únicas dentro de los materiales naturales. Se estima que en 1 cm³ de corcho hay de 15 a 40 millones de células. Cada celda mide alrededor de 40 μm en promedio, de los cuales 10 μm corresponden a la pared celular.



Figura 2.13 Representación esquemática de las propiedades físicas y mecánicas del corcho: características estructurales y composición química. Micrografías SEM tomadas de un pequeño cubo de corcho (a) sección tangencial y (b) sección radial [50].

Composición química

La composición del corcho comenzó a ser estudiada por Brugnatelli en 1787. La suberina es el principal compuesto del corcho, y fue identificada por Cheureul en 1807. Desde entonces hasta hoy, se sigue estudiando la composición del corcho y su estructura macromolar, todavía no hay modelos claros.

La composición química del corcho está dominada por la presencia de suberina como principal componente estructural de la pared celular y por su estrecha asociación con otros componentes, principalmente compuestos aromáticos de lignina y no lignina. La composición química del corcho es

sustancialmente diferente de las otras partes del tejido del árbol. Su especificidad da lugar a algunas lagunas en el conocimiento de la estructura de la composición química del corcho. Además de su composición y las propiedades químicas de sus constituyentes, una comprensión química más completa del corcho requiere el conocimiento de su distribución dentro de la pared celular, conocida como topoquímica de la pared celular, y su eventual interacción.

La metodología utilizada para determinar la composición química, así como otros aspectos, como el origen, el estado fisiológico o el número de ejemplares, pueden condicionar los resultados. Por ello, si se habla de la composición química del corcho se da el rango de cada familia de compuestos. Los componentes estructurales de la pared celular son por orden de importancia relativa la suberina (50% aprox.), la lignina (20-25%), y los polisacáridos (alrededor del 20%), celulosa y hemicelulosas; las extractivas (14-18%), que incluyen sustancias lipídicas y fenólicas y componentes inorgánicos (1-2%) [1] (Figura 2.13).

- Suberin es un polímero compuesto de ácidos grasos, alcoholes y glicerol, es decir, cadenas alifáticas de cadena larga conectadas por enlaces de éster y sitios de anclaje en su mayoría glicerídicos. La suberin es el principal componente estructural de la pared celular del corcho (que constituye más del cincuenta por ciento de su masa sólida) [34,51]
- La lignina es un polímero aromático reticulado que contribuye a la rigidez estructural y la resistencia a la compresión de las células. La lignina se compone de tres monómeros de fenilpropano: p-hidroxifenilo (H), guayacol (G) y siringilo (S) [34,52].
- En el desarrollo de la pared celular del corcho, los polisacáridos juegan un papel menor. Los polisacáridos estructurales de las paredes celulares de las plantas consisten en celulosa y hemicelulosas [34].
- Los extractivos son moléculas de bajo o medio peso molecular que se pueden extraer de las células sin cambiar la estructura celular del material ni sus propiedades mecánicas [14].
- Los componentes inorgánicos de los materiales lignocelulósicos suelen ser el contenido de cenizas, que representa el residuo sólido después de la combustión total.

En la pared celular, las fracciones de suberina, lignina y hemicelulosa forman un ensamblaje espacialmente estable y químicamente resistente, lo que hace que su fraccionamiento sea muy desafiante, y dependientemente de la técnica empleada. Pereira [34] representó esquemáticamente la construcción de la pared celular de corcho (Figura 2.14). La matriz de lignina de la lámina media une las células y refuerza la estructura en su conjunto. Las capas de lignina y aromáticos entre las láminas de suberina también imparten solidez estructural a las paredes celulares, sirviendo como una especie de andamiaje para el componente alifático flexible. El lado del lumen de la celda está revestido con la pared terciaria de celulosa.

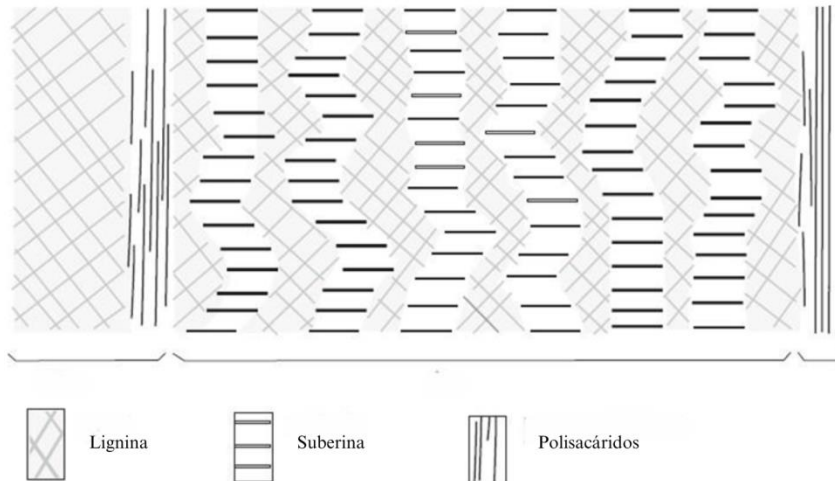


Figura 2.14 Representación esquemática de las paredes de las células de corcho en *Quercus suber* mostrando la ubicación de los componentes estructurales [34].

Propiedades del corcho

El corcho posee una notable combinación de cualidades, que incluyen baja densidad, muy baja permeabilidad a líquidos y gases, baja conductividad, estabilidad química, durabilidad, alta compresibilidad con buena recuperación y baja conductividad. Como se indicó anteriormente, las características de la estructura celular del corcho (disposición de las células, tamaño de las células y ondulaciones de las paredes de las células) y la composición química de las paredes de las células explican estas cualidades. Muchas cualidades del corcho están influenciadas por su contenido de agua, y los tratamientos térmicos alteran el tamaño de las células y el contenido químico. La masa de corcho en sí parece uniforme y desprovista de distinción de tipo celular. La única característica macroscópica distintiva del corcho es la presencia natural de lenticelas. Los canales lenticulares atraviesan las capas de corcho desde el exterior hacia el interior del tejido felógeno y se rellenan con material no suberificado de un tono más profundo [34].

La alta cantidad de gas, el bajo poder de adsorción de agua y la medida celular, entre otras características, hacen que el corcho tenga una gran versatilidad y que pueda ser utilizado para múltiples propósitos. Las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del corcho se pueden resumir en diez puntos o el decálogo del corcho [89].

1. Baja densidad y ligereza [1].

El corcho es un material ligero que flota en el agua. Este es el resultado de su estructura celular formada por células huecas y cerradas con una pequeña fracción sólida que se concentra en paredes celulares delgadas, sin ningún canal de comunicación intercelular. La densidad del tejido de corcho secado al aire es baja, en promedio en el rango de 150-160 kg/m³ pero con valores que pueden ir desde menos de 120 hasta más de 200 kg/m³. La densidad del corcho variará debido a las siguientes

características estructurales: el tamaño de las células, la proporción de corcho temprano (células formadas en el primer período de crecimiento) y corcho tardío (las células formadas al final de la temporada de crecimiento), la ondulación de células, la extensión de la porosidad derivada de los canales lenticulares y la presencia de inclusiones leñosas. Esta característica ha sido ampliamente utilizada en todos los elementos de flotación.

2. Impermeabilidad e impermeabilización [1].

Como las celdas de corcho están ocupadas en un 90% por aire, se podría pensar que un líquido puede llenar ese espacio vacío. El comportamiento hidrófobo del corcho en contacto con el vapor de agua y el agua líquida resulta de su estructura con células huecas sin comunicación intercelular y una pared celular que contiene suberina como componente químico mayoritario. La presencia de suberina, lignina y ceras en la pared celular hacen del corcho un material impermeable a los líquidos, lo que evita su deterioro. Sin embargo, su impermeabilidad a los gases no es absoluta, ya que permite una lenta difusión de los gases. Los tapones de corcho son estancos y tienen una tasa de transferencia de oxígeno de 0,004 a 0,14 mg/día después de un año de embotellado [54-56]. El alto contenido de gas tiene baja conductividad, el pequeño tamaño de las celdas elimina la convección del gas, la baja fracción sólida y el bajo poder de adsorción debido a las numerosas paredes de las celdas hacen que el corcho tenga una baja transmisión de calor. Las ondas de calor se disipan y se esparcen por su superficie y lo convierten en un buen aislante térmico. Al mismo tiempo, es transpirable y no inflamable, lo que lo convierte en un regulador climático único. La conductividad térmica (λ) y la difusividad térmica (α) del corcho con una densidad de 140-170 kg/m³ es 0,040-0,045 W/m·K, 1×10^{-7} - $1,5 \times 10^{-7}$ m²·s⁻¹ respectivamente. Cuando el corcho se calienta, se producen cambios químicos y físicos que afectan a la masa de la pared celular, su composición y las dimensiones celulares. Estos cambios influyen en las propiedades, es decir, en las propiedades mecánicas, en una medida que depende de la temperatura y el tiempo de tratamiento. La pérdida de masa del corcho es relativamente pequeña (alrededor del 6% de la masa inicial) hasta los 200°C, pero aumenta después hasta la carbonización completa a unos 450°C.

3. Baja transmisión de sonido y aislamiento acústico [57-59].

El corcho presenta un coeficiente de Poisson cercana a cero (alrededor de 0,2) para NR/NR [57], baja densidad y alta porosidad. Las propiedades del corcho aprovechan al máximo las ondas sonoras al ser absorbidas y transformadas en calor energía. La impedancia acústica del corcho es de $1,2 \times 10^5$ kg·m⁻²·s⁻¹ para un corcho natural de 120-200 kg/m³ [58]. El corcho es muy absorbente del sonido de frecuencias bajas y medias. Es una buena propiedad aislante para percusión acústica; por este motivo, se puede utilizar en suelos laminados [59].

4. Alta resistencia al movimiento y alto coeficiente de fricción [34,58].

La estructura celular provoca efectos de succión. La resistencia al movimiento que ofrece el corcho contra una superficie es una propiedad de interés especialmente en dos casos: la extracción de tapones de corcho de botellas donde el corcho se mueve contra una superficie de vidrio, y el uso de tratamientos de superficie para favorecer el deslizamiento [34]. Esta propiedad es muy importante en los tapones de corcho para asegurar el correcto cierre de las botellas y su mantenimiento en el tiempo. El coeficiente de fricción es 0,35-0,76 para corcho-vidrio [58].

5. Capacidad amortiguadora y capacidad de absorción de energía de choque (amortiguación).

La estructura celular permite la deformación por flexión de las paredes celulares, ya que en los casos anteriores, la propagación de ondas mecánicas puede disiparse en la superficie. La tensión de colapso de las celdas de corcho es baja, por lo que la tensión máxima durante el impacto es limitada, mientras que son posibles grandes deformaciones por compresión, que absorben una gran cantidad de energía a medida que las celdas colapsan progresivamente. La energía total de compresión a una deformación del 83% es de aproximadamente $3,4 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ y $2,2 \times 10^6 \text{ J/m}^3$, respectivamente para las direcciones radial y no radial. La parte correspondiente a la deformación hasta el final del colapso es de alrededor de $1,5 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ [34]. Esta propiedad es muy importante para algunas aplicaciones como la capacidad de amortiguamiento en juntas "sísmicas", suelas de calzado de la industria automotriz o esteras.

6. Compresibilidad, elasticidad y flexibilidad [1,60].

El alto contenido de aire de las celdas y su índice de Poisson cercano a cero permite comprimir el corcho casi a la mitad sin perder flexibilidad, y recuperar su forma y volumen cuando ya no se presiona. El corcho no se fractura bajo compresión ni a través de las celdas ni a través de las paredes de las celdas. La recuperación dimensional después de la descarga es considerable y la deformación residual es pequeña incluso desde las deformaciones iniciales dentro de la región de colapso y las regiones de densificación. El corcho solo se fractura si se somete a tensión (también en el lado de la tensión en flexión) y bajo fuerzas de corte. Los poros tienen un efecto dominante en la resistencia a la tracción del corcho y la fractura se inicia siempre en la vecindad de un poro. El corcho es un material celular aproximadamente elástico que combina un interesante conjunto de propiedades mecánicas. En el comportamiento mecánico del corcho, dos características tienen una función importante: la capacidad de las paredes celulares para pandearse y colapsar fuertemente sin fractura de la pared celular y la presencia de canales lenticulares. El módulo de elasticidad del corcho es un rango de valores entre 10 MPa y 20 MPa que se reportan en los diversos estudios para la compresión del corcho en las diferentes direcciones. En el corcho la reversibilidad dimensional no es total debido a la componente viscosa de la deformación. El corcho sólo se asemeja a un comportamiento elástico y dentro de él se encuentra un material viscoelástico [60]. Estas características están totalmente relacionadas con la capacidad de absorción de energía del corcho.

7. Desgaste, estabilidad e inercia [34,50,59].

La lignina y los polisacáridos de su pared celular proporcionan rigidez. Y estos componentes confieren al corcho resistencia al paso del tiempo. El corcho es un tejido muerto. Además, el corcho no es tóxico ni alergénico y no produce reacciones indeseables en contacto con la piel u otros tejidos. El corcho es un material resistente al desgaste superficial que soporta sin fracturas ni abrasiones significativas el roce repetido de objetos contra él [34]. El corcho presenta resistencia a la mayoría de los disolventes, incluidas las soluciones básicas y ácidas suaves [50]. No se oxida por acción del aire ni de la humedad [59]. Estas son las razones por las que los productos a base de corcho, en su mayoría aglomerados de corcho, se utilizan para pavimentar en áreas sujetas a un uso intensivo, como hospitales, escuelas o vestíbulos de aeropuertos.

8. Higroscópico y biosorbente [61-69].

El corcho se hidrata dependiendo de las condiciones ambientales. El corcho se hincha cuando absorbe agua. Debido a su anisotropía estructural, la variación dimensional no es la misma en las tres direcciones. La ondulación de la pared celular, como aspecto estructural, debe tenerse en cuenta para comprender la variación dimensional del corcho. En el interior, el enderezamiento de las paredes celulares puede superponerse al hinchamiento debido a la adsorción de agua en las paredes celulares. La absorción de agua por el corcho parece proceder por dos mecanismos: la difusión de las moléculas de agua a lo largo de las paredes celulares y la penetración en el lumen celular. La toma de agua por el corcho depende por tanto de dos aspectos: la composición química del material y la presencia de canales lenticulares. El contenido de humedad de equilibrio del corcho después del secado al aire y el equilibrio en condiciones de interior es en promedio del 7 %, con un rango de alrededor del 5 al 10 % con muy baja HR del aire o condiciones de humedad, respectivamente. Por ejemplo, la madera de alcornoque tiene un contenido de humedad de equilibrio de aproximadamente el 20 % para una HR del 80 %. El contenido máximo de humedad que puede existir en un material depende de su densidad. Por ejemplo, el contenido máximo de humedad de un corcho con una densidad de 160 kg/m³ sería del 545 %, mientras que para una densidad de 190 kg/m³ sería del 446 % [34]. Además, varios investigadores han demostrado el potencial del corcho para eliminar contaminantes emergentes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos [61-63], el fenantreno [64], el naranja de metilo [65], la ofloxacina [66], la bifentrina [67], el ibuprofeno, la carbamazepina y el clofibrico. ácido [68] o metales pesados [69].

9. Natural, reciclable y renovable.

El corcho es un material natural porque es la corteza exterior del alcornoque. El alcornoque puede regenerar corteza de corcho después de cada saca. Permite un balance equilibrado entre el manejo agroforestal y la actividad humana. Se puede incorporar fácilmente a una economía circular. Como material natural, puede ser reciclable en el contenedor compostable. Además, se puede reutilizar, es

decir, los tapones de corcho usados se pueden recoger y/o triturar. El corcho de estos tapones puede formar nuevos productos (pero no nuevos tapones).

10. Aislante eléctrico [69,70].

Otra aplicación importante del corcho es como aislante eléctrico, ya que es un material dieléctrico. El corcho exhibe un patrón complejo de mecanismos de polarización donde se pueden distinguir tres procesos de relajación diferentes, aunque se fusionan o se superponen parcialmente. Se ha informado que el factor de pérdida del corcho es de aproximadamente 0,1 con una débil dependencia de la frecuencia en el rango de 10^{-2} -10 kHz pero que aumenta a casi 0,3 para amplitudes de deformación altas [69, 70]. Esta es una pérdida alta (el caucho tiene un coeficiente de pérdida de 0.08) y le da al corcho buenas propiedades de amortiguación y absorción del sonido, y un alto coeficiente de fricción, como ya se discutió.

2.3.2. Aplicaciones de corcho

Debido a su combinación única de valiosas propiedades físicas, el corcho tiene una amplia gama de aplicaciones tradicionales. Los tapones de corcho tienen el mayor valor añadido y la mayor cuota de mercado, principalmente para vinos tranquilos y espumosos [59]. Según el anuario APCOR 2018-2019 [46], el principal producto de la industria del corcho es el tapón de corcho (72%) destinado a la industria del vino. La producción anual de corcho es de aproximadamente 201 mil toneladas. Sin embargo, sólo el 25% de la producción anual de corcho es apta para la fabricación de tapones de corcho natural (tapones de corcho fabricados con una sola pieza de corcho). Esto significa que el 75% del corcho cosechado no es apto para esta aplicación, por lo que se fabrica en tapones de corcho aglomerado u otros productos excedentes de este material. Los tapones de corcho natural se troquelan directamente de la corteza de corcho de mejor calidad, el corcho de reproducción. Otros tapones de corcho, como los aglomerados con o sin disco, los microaglomerados o los tapones de corcho técnico para vino tranquilo y espumoso, son subproductos del corcho a partir de la fabricación del corcho natural. La fabricación de tapones de corcho aglomerado también tiene algunos residuos como corcho con defectos sensoriales o polvo. Hay algún corcho que nunca ha entrado en el proceso de fabricación de tapones de corcho, como el corcho bornizo (corcho de primera saca), tablonos de corcho con alteraciones, o corcho residual forestal. El corcho utilizado para el resto de aplicaciones es el llamado corcho de baja calidad: subproducto del corcho o desperdicio de corcho (Figura 2.15).

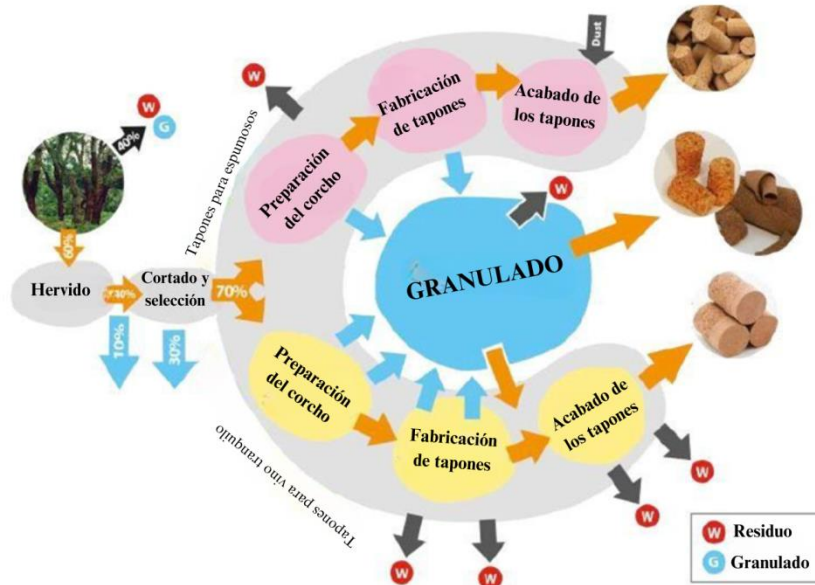


Figura 2.15 Diagrama de los flujos de corcho en la fabricación de tapones para vino tranquilo y espumoso [59].

2.3.3 Corcho en la Construcción

Las soluciones constructivas con corcho son el segundo destino en orden de importancia dentro del sector. Los productos de corcho se utilizan principalmente en la construcción para el aislamiento térmico y la absorción de energía, pero también juegan un papel importante en la decoración y los pavimentos ligeros. Suelos, juntas de dilatación, cámaras de aire y revestimientos exteriores son usos habituales del corcho en la edificación. Incluso se puede usar en una mezcla con concreto para entradas de vehículos o pavimentos exteriores. Por lo tanto, el corcho permite una variedad de aplicaciones basadas en capacidades antivibratorias, térmicas y acústicas (Tabla 2.4).

Uno de los principales productos en este campo es el corcho aglomerado o paneles de corcho aglomerado. Los aglomerados se fabrican por proceso de aglutinación de gránulos de corcho con un tamaño de partícula específico y/o una densidad predeterminada mediante una acción específica de compresión, temperatura y aglutinante, dando lugar a diferentes tipos de aglomerados.

De esta forma, el tipo de corcho (tamaño de partícula y densidad), el tipo y proporción de cola, y las condiciones de aglutinación (temperatura, tiempo y/o presión) son factores que afectan el resultado del aglomerado final. Cada una de las combinaciones de las condiciones anteriores dará lugar a diferentes productos de corcho aglomerado. Así cada proceso de aglomerado proporciona un producto aglomerado con características diferentes. Cada productor tiene procesos de producción estandarizados definidos en las diferentes fichas técnicas.

Tabla 2.4 Productos de corcho utilizados en aplicaciones de construcción y sus propiedades subyacentes [72].

| Usos | Productos | Ejemplos | Propiedades requeridas |
|---|--|--|---|
| Recubrimientos (suelos, paredes y techos) | Aglomerados de corcho- <i>composites</i> | Baldosas de corcho para suelos | Resistencia al desgaste |
| | Aglomerados de corcho expandido | Capa base para techos | Resiliencia |
| | Corcho-goma o corcho-caucho | Subsuelo para suelo | Absorción de impacto |
| | Corcho proyectado | Cubiertas, fachadas y suelos | Resistente a las humedades |
| Aislante térmico y acústico | Aglomerados de corcho- <i>composites</i> | Aglomerados de corcho-epoxi | Conductividad térmica baja |
| | Aglomerados de corcho expandido | Paneles de techo y pared interior | No absorción de humedad y adecuada resistencia mecánica |
| | Granulado de corcho | Materiales de relleno para espacios vacíos entre paredes dobles y suelos | Resistencia al fuego, durabilidad y baja densidad. |
| | Corcho proyectado | Cubiertas, fachadas, paredes y suelos | Resistente a las térmicas y acústicas |
| Aislante de vibraciones | Aglomerados de corcho- <i>composites</i> | Estructuras tipo <i>sandwich</i> | Absorción de la vibración de los choques. |
| | Aglomerados de corcho expandido | Paneles expandidos de alta densidad | |
| | Aglomerados de corcho expandido | Juntas | |
| Juntas de expansión | Aglomerados de corcho expandido | Paneles expandidos | Alta compresibilidad y recuperación |
| | Corcho-goma o corcho-caucho | | |

Los planchas de corcho aglomerado son el principal producto de corcho que se utiliza en la construcción (Figura 2.16). Los aglomerados de corcho se pueden agrupar y dividir de muchas maneras. Está ampliamente aceptada la división de los productos aglomerados (sin tapones aglomerados) según se utilicen o no aglutinantes y aditivos en su fabricación:

- **Corcho aglomerado expandido o aglomerado termo expandido**. El aglomerado expandido es una plancha de corcho sin ningún tipo de aditivo. Está hecha de gránulos de corcho crudo aglutinado o corcho de muy baja calidad. Se utiliza el poder de unión de la propia suberina, que tiene la capacidad de unirse a altas presiones y temperaturas. Este proceso proporciona planchas de diferentes espesores y formas según el molde utilizado. Normalmente el proceso finaliza con correcciones diametrales y de forma. Este producto es natural y de origen vegetal ya que no se utilizan agentes sintéticos (Cuadro 2.5).

Tabla 2.5 Propiedades del tablero de corcho de aglomerado expandido [59].

| Propiedades | Valores |
|--|---|
| Densidad | 105 a 130 kg m ⁻³ |
| Coefficiente de conductividad térmica | 0,040 W m ⁻¹ k ⁻¹ |
| Coefficiente de absorción acústica (a 500Hz) | 0,33 |
| Tensión al estrés (MOR) | 0,14 a 0,20MPa |
| Temperaturas de usos | -180 a +140 °C |
| Categoría de resistencia al fuego | Euroclass E |

- **Composites:** Un compuesto de corcho es una plancha de corcho con aditivos. Está hecho de gránulos de corcho aglutinados con resinas naturales o sintéticas. Este producto se puede fabricar con diferentes propiedades y formas. El material resultante es un compuesto de corcho y otros materiales que originan un nuevo material compuesto diferente con las propiedades y características de ambos productos. Dependiendo de su función se pueden distinguir diferentes *composites*: antivibratorios, acústicos, amortiguadores, etc. (Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Propiedades de un tipo de compuesto de corcho (caucho-corcho) [72].

| Propiedades | Resistente al agua | Acústico |
|--|--------------------|----------|
| Densidad (kg m ⁻³) | >900 | 550-650 |
| Coefficiente de conductividad térmica (W m ⁻¹ k ⁻¹) | 0,018 | 0,075 |
| Coefficiente de resistencia térmica (m ² K W ⁻¹) | 0,019 | 0,027 |
| Fuerza de tensión (MPa) | >1,3 | >0,6 |



Figura 2.16 Planchas de corcho aglomerado. El segundo tablero empezando por arriba, es de corcho termoexpandido. Los otros son ejemplos de compuestos de corcho.

Actualmente, el corcho también se empieza a utilizar en el urbanismo. Los *composites* de corcho se utilizan para fabricar mobiliario urbano (barreras acústicas de carreteras y revestimientos de edificios) y pavimentos para pistas y parques infantiles. Al mismo tiempo, la innovación en la industria está acercando el uso del corcho a la fabricación de pavimentos donde el peso es un factor determinante, como en los vagones de tren o la aeronáutica.

2.3.4. Textil y Movilidad

El corcho se ha utilizado en la industria textil y de la moda durante siglos. Uno de los productos de referencia en este campo son las suelas de corcho, tanto de corcho natural como aglomerado o tipo sándwich. Actualmente, el corcho como solución textil se puede encontrar como corcho natural, aglomerados o en combinación con otras fibras naturales. Cubre un nicho de mercado muy amplio: calzado, marroquinería, muebles, tapicería, ropa, colchonetas para la práctica de deportes y encuadernación de cajas (Figs. 2.17-2.18).

Entre ellos se pueden distinguir diferentes opciones: textil de corcho (láminas de corcho natural o corcho aglomerado, corcho con algodón, poliéster o poliuretano gelificado para calzado, revestimiento de paredes, marroquinería, regalo y novedades, y papel de corcho (revestimiento de paredes y lámparas) Al igual que el cuero o la gamuza, el corcho brinda un aspecto sofisticado y un toque lujoso. El corcho es fácil de limpiar (simplemente pasando un paño húmedo) y es muy resistente al agua ya las manchas. Puede ser una solución ecológica para los tejidos. Como detalle, Lady Gaga (cantante) lució un vestido de corcho en 2014 tras un concierto en Lisboa, y Cristiano Ronaldo (futbolista) apareció ante la prensa con unas zapatillas Nike de corcho en 2018.



Figura 2.17 Ejemplo de productos de corcho utilizados en diferentes aplicaciones textiles
(<http://www.articor.com/es/>).



Figura 2.18 Peugeot 208 Natural con *composite* de corcho en el techo [81].

Debido a su potencial de absorción de energía de impacto, este material se ha utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, incluidos cascos de carretera [73-75], mecanismos de seguridad pasiva [76-78] y otros tipos de armaduras sujetas a carga de compresión dinámica. El corcho y sus variantes aglomeradas se ven como una alternativa expresiva a las espumas poliméricas [73-75,79,80] debido a sus propiedades antes mencionadas.

Hay algunos ejemplos de corcho en movilidad en el mercado del automóvil, como el Peugeot “208 Natural”. En este automóvil, se usa un compuesto de corcho para el techo. El corcho se ha utilizado en la exploración espacial. Además, la NASA ha utilizado el corcho en naves espaciales. El papel del corcho en la industria aeroespacial podría ser el de aislante ablativo para cubrir los vehículos espaciales. Estos sistemas de aislamiento térmico son esenciales para el lanzamiento y operación de todas las naves espaciales, ya sean tripuladas o no tripuladas.

Hay varios ejemplos del uso de ablatores que contienen corcho. La nave espacial Jupiter C demostró la eficacia de la ablación como método de protección térmica en 1957. Scout, el primer vehículo de lanzamiento de combustible sólido, usó escudos térmicos de corcho/fibra de vidrio y aletas con aislamiento de corcho para lanzar el primer satélite estadounidense Discover I. Pathfinder utilizó un escudo térmico con un panel fenólico relleno de corcho y epoxi relleno de perlas de sílice para su entrada en Marte de 1997. El transbordador espacial incorpora corcho en varios de sus componentes, incluidos los propulsores de cohetes sólidos y el aislamiento del tanque externo. Los accidentes que involucraron al transbordador espacial requirieron un nuevo examen de sus componentes, incluido su complejo sistema de aislamiento térmico; se conservó uno de los componentes, un ablator fabricado con resinas de silicona y corcho. En una descripción de patente, dicho ablator se describe con una composición en masa de 7,22 a 7,98 % de corcho molido. El

cohetes Atlas V que lanza la sonda New Horizons para la misión de la NASA a Plutón está encerrado en un cuerpo de corcho. La superficie cónica del European ARD (Atmospheric Reentry Demonstrator) está recubierta con un compuesto de polvo de corcho y resina fenólica [34].

Según Reculosa [83] examinó el ablator de corcho/resina fenólica vendido bajo la marca Norcoat*-liège a temperaturas de hasta 2500°C. El grado espacial Norcoat*-liège HPK F1 contiene aproximadamente un cincuenta por ciento de partículas de corcho, un treinta por ciento de resina fenólica y un veinte por ciento de fungicida y agente ignífugo mineral. El punto fundamental es que la estructura celular original del composite se conserva después del tratamiento térmico.

2.3.5. Farmacia y Cosmética

El corcho y sus derivados pueden ser una fuente importante de múltiples compuestos bioactivos, como el ácido fenólico, los terpenoides y los taninos [84]. Estos bioactivos tienen una variedad de propiedades relevantes: actividad antioxidante, antiinflamatoria, antienvjecimiento, depurativa o captadora de radicales libres. De esta forma, el corcho se puede utilizar como un ingrediente prometedor en la industria cosmética. De hecho, ya existen algunos ejemplos del uso del corcho como tensor de alisado (SUBERLIFT), como aceite activo (DIAM OLÉOACTIF), o como agente exfoliante (ACTISCRUB). Recientemente la empresa Biogründel ha desarrollado SUBERCHEM, y Quimivita acaba de lanzar al mercado un nuevo agente exfoliante fabricado con corcho EXFOBREEZE con la colaboración de la Fundación Institut Català del Suro. SUBERCHEM es un extracto de corcho rico en polifenoles obtenido mediante extracciones verdes. Los compuestos fenólicos son sustancias con un interés creciente gracias a sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antibacterianas, antialérgicas, anticancerígenas y antiinflamatorias, e incluso algunas antisecretoras y antiulcerogénicas propiedades [84]. En este sentido, algunos estudios demuestran la alta actividad antibacteriana que presenta el corcho, reduciendo la actividad de bacterias como *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli* en un 96,93% y 36%, respectivamente [85], y también se afirma que el corcho tiene una potencial antitumoral obtenido por diferentes métodos de extracción en células de leucemia promielocítica humana [86].

Como se ha dicho a lo largo de este capítulo, el corcho tiene múltiples propiedades y, por tanto, puede tener una gran variedad de aplicaciones. La mayoría de las aplicaciones del corcho han perdurado durante siglos y son en gran medida las mismas que hace siglos, pero cada año surgen nuevos campos de aplicación para el corcho.

2.3.6. Otros

Hoy en día, la conciencia climática de las personas y los objetivos de desarrollo sostenible han vuelto a poner el corcho en el punto de mira. El corcho es un material natural y ecológico, y puede ser un buen candidato para formar parte de un nuevo material de base biológica para reducir el plástico, por ejemplo.

En 2017, 3DSpider Print y la Fundación Institut Català del Suro desarrollaron una moneda de doble corcho. El objetivo del estudio era desarrollar un nuevo producto aditivo a base de corcho adecuado para impresión, extrusión, inyección y otros procesos de fabricación. Este artículo es una mezcla de gránulos de corcho y biopolímero plástico (como se utiliza en la impresión 3D). El nuevo material, 3DCORK, es ecosostenible porque está basado en PLA y contiene más del 20 % de corcho [89].

El corcho también es un buen candidato para el tratamiento y depuración de aguas residuales. Como se ha explicado, el corcho es un buen biosorbente de pesticidas, metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y productos recalcitrantes. Hay varios ejemplos de tratamientos de aguas residuales con corcho: humedales (LIFE ECOCORK y [90]), paredes húmedas [87], muros verdes [88 y 91] o depuración de agua mediante fotobiorreactores (LIFE SPOT).

Con corcho se pueden hacer muchas cosas, y con corcho, sólo tienen que descubrirse.

Referencias

- [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 Iteimia (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
- [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] Urbietta, 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. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9388-1>

[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. <https://doi.org/10.1080/00207230600720829>

[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 alcornoques 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. <https://doi.org/10.1051/forest:2005065>
- [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
- [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 holmoak 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. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2005.00397.x>
- [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 Alcornoques. 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 CO2 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 CO2 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-INCREDBILE.
- [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
- [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
- [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 productos de corcho, propiedades del corcho y tendencias futuras del corcho

Mariusz Ptak, Marek Sawicki, Mateusz Dymek*

Universidad de Ciencia y Tecnología de Wrocław, Departamento de Diseño e Investigación de Máquinas, Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polonia

*Correspondencia: mariusz.ptak@pwr.edu.pl

Resumen

El corcho es un material versátil y sostenible con una amplia gama de usos en muchas industrias. Es naturalmente resistente al agua, ignífugo y respetuoso con el medio ambiente. A lo largo de los años, su uso ha crecido exponencialmente de manera que los productos de corcho se han vuelto cada vez más populares en los mercados de consumo doméstico, comercial e industrial. Hay varios sectores que utilizan este material, incluido el sector de la construcción como aislamiento y sellado. Dado que las preferencias de los consumidores se han desplazado hacia productos más sostenibles, la demanda de corcho se ha disparado y se espera que el sector se expanda aún más en un futuro próximo.

Palabras clave: Corcho, productos de corcho, propiedades del corcho, automoción, aeroespacial, aviación, aislamiento.

3.1 Introducción

El corcho es el principal producto de un ecosistema forestal único en el mundo denominado alcornocal. El corcho es un material con propiedades únicas que puede reutilizarse, no es tóxico, es duradero y resistente al desgaste. El corcho une eficazmente el dióxido de carbono atmosférico, que es esencial, especialmente en relación con el calentamiento global. El mundo de la ciencia y la empresa valora el corcho por sus extraordinarias propiedades físicas y mecánicas que pueden aprovecharse sinérgicamente para el desarrollo sostenible de la economía y la industria. Otro artículo [1] trata sobre el crecimiento del corcho y su micro y macroestructura.

El corcho es uno de los materiales naturales más versátiles. Tiene una amplia gama de aplicaciones, desde los tapones de corcho para botellas hasta escudos térmicos de aviación especializados. Es ligero, comprimible, elástico, duradero, química y biológicamente resistente, no tóxico, ignífugo, prácticamente impermeable a gases y líquidos, presenta un buen aislamiento térmico y acústico, además es un excelente aislante vibratorio y eléctrico. Las propiedades únicas del corcho son el resultado de su estructura celular similar a un panal de abejas [1]. La baja densidad del corcho es el resultado de su estructura celular y de

las lenticelas ubicadas entre las células. Las dimensiones mencionadas de las celdas varían ligeramente dependiendo de la edad de la corteza del alcornoque y el período de su recolección [1]. El valor de la densidad del corcho está entre 120 a 240 kg/m³, y la densidad promedio de un corcho seco es de 150 a 160 kg/m³ [2]. Debido a la baja densidad, el corcho influye significativamente en la reducción del peso de las estructuras que lo contienen. La estructura celular garantiza una distribución específica de las tensiones que se aplican sobre las células de corcho y evita roturas en el material. El corcho conserva sus propiedades independientemente de la humedad y la temperatura del ambiente. Siempre es suave pero elástico, agradable al tacto y resistente al desgaste [3].

El corcho se distingue por tener propiedades interesantes como serían la flexibilidad, la alta estabilidad física, la compresibilidad, la resistencia a los ciclos de carga a largo plazo y el aislamiento térmico, eléctrico y acústico [2]. La capacidad aislante es debida al valor reducido del coeficiente de conductividad térmica del corcho natural $\lambda = 0,040-0,045 \text{ W / (m}^\circ\text{C)}$ [2], y el aislamiento acústico - resistencia acústica de 1,2 10⁵ kg / (m²s) [2], permite la reducción de la intensidad del sonido entre 31 y 36 dB, según el grosor del material [4]. Por otro lado, el aislamiento eléctrico depende en gran medida tanto del contenido de humedad del material como de la temperatura. Este coeficiente a 25°C con un contenido de agua de 3,5% es igual a 1,2 × 10⁻¹⁴ S/m, mientras que para un corcho completamente seco a la misma temperatura es de 2,9 × 10⁻¹⁰ S/m. Sin embargo, la reducción radical de la capacidad de aislamiento de este material dieléctrico se debe principalmente al aumento de la temperatura: la conductividad eléctrica por ejemplo, en el rango de 25 a 100 °C, aumenta en tres órdenes de magnitud. El contenido de aglutinante en el material aglomerado de corcho aumenta la conductividad hasta cuatro órdenes de magnitud [2]. Cabe destacar que el uso de materiales de origen natural (por ejemplo, corcho, lana) en lugar de materiales aislantes altamente procesados, como el poliestireno expandido o el poliuretano, dispuestos por incineración, reduce significativamente (en un 98 %) el impacto negativo sobre el entorno. El corcho no es susceptible a cambios de volumen, incluso debido a cambios bruscos de temperatura. También es ignífugo, no se quema provocando llama sino que se transforma en carbón. Presenta propiedades antideslizantes y alta resistencia al desgaste superficial [2], [5] (no se deteriora por el roce repetido contra el cuello de la botella, a pesar del coeficiente de fricción relativamente alto de 0,5) [6], [7]. El corcho natural es químicamente inerte, es una barrera a los líquidos y gases, y en contacto con ellos, no absorbe olores [2], [3], [8].

Debido al alto contenido de suberina, el corcho muestra propiedades antibacterianas y antifúngicas, lo que impide la penetración de estos microorganismos, por ejemplo, en una botella bloqueada con él [9,12]. El corcho es un material hidrofóbico con una energía superficial de 18 mN/m, y una baja fuerza de adhesión que lo caracteriza de otros materiales [2], [4]. La naturaleza hidrofóbica del corcho puede cambiar debido a la modificación de la superficie por plasma bajo presión atmosférica (antorcha de plasma a presión atmosférica - APPT) o a condiciones de baja presión (cámara de plasma de baja presión - LPPC) [13]. El tratamiento con plasma solo afecta a la superficie exterior del corcho sin cambiar sus propiedades. Los grupos reactivos que se forman debido a estos tratamientos en la superficie del corcho

permiten una conexión más permanente con otros materiales [14, 15]. El proceso de silanización también mejora las propiedades adhesivas de la superficie del corcho [16]. Una de las características más críticas que distingue al corcho de otros materiales naturales y que permite su amplia aplicación es su alta capacidad para absorber energía, incluso bajo tensiones relativamente bajas. El valor promedio de la energía absorbida durante la compresión del tapón al nivel del 83% del volumen inicial en la dirección radial o no radial es $3,4 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ y $2,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ [2]. El retardo en la obtención de llama ya mencionado y la capacidad de ralentizar la propagación del fuego son características importantes del corcho. El corcho arde sin llamas y, muy importante, no emite gases tóxicos [2]. El corcho es un material celular flexible y anisotrópico con propiedades mecánicas específicas, principalmente debido a su susceptibilidad a la flexión, deformación y engrosamiento gradual de sus paredes celulares bajo carga [3].



Figura 3.1 Muestras de corcho en el ensayo de compresión.

El comportamiento del corcho bajo compresión cuasiestática se ilustra mediante el diagrama lineal de tensión-deformación con una gráfica que termina cuando la estructura celular del corcho está completamente comprimida y densificada (Figura 3.1) [2]. La pendiente de la curva en la región del pico determina los valores del módulo de elasticidad del tapón (preparado de manera específica) dentro del rango de 6 a 20 MPa, dependiendo de la dirección de la carga. En el caso de cargas en dirección radial, estos valores son superiores a los de cargas en dirección axial y tangencial [2], [17]. Calentar el corcho a 100–150°C durante 24 horas lo priva de humedad y aumenta significativamente su resistencia a la compresión. Sin embargo, un calentamiento más prolongado, superior a 24 horas, reduce su resistencia debido a la degradación térmica de la estructura [17]. La extraordinaria flexibilidad del corcho se evidencia en su comportamiento a lo largo del ensayo de compresión. Después de comprimir el tapón NL10 (densidad 135 kg/m^3) al 80 % de su espesor original, vuelve en 0,5 min, después de la fuerza

aplicada, sin síntomas de rotura, hasta aproximadamente el 80 % de su tamaño original. Las propiedades mecánicas del corcho no pueden caracterizarse por un valor de la relación de Poisson [18], [19] o el módulo de Young [30] porque sus grados difieren, especialmente en densidad, dimensiones de celda y porosidad [2].

3.2 Sectores para la Producción de Corcho

En los últimos años, la industria del corcho ha ganado nuevos sectores de actividad. El corcho como material tiene propiedades fascinantes que pueden mejorar significativamente los diseños actuales. Los sectores que aplican corcho son tan amplios:

- Tapones para Vinos Tranquilos, Espumosos y Licores
- Automoción y ferrocarriles
- Micromovilidad
- Energía
- Aeroespacial
- Deportes
- Aplicaciones de arquitectura y diseño, incluidos pisos y revestimientos de paredes
- Construcción e infraestructura con base de corcho
- Juntas de dilatación y paneles de corcho aislantes
- Moda

En este punto, cabe señalar que la introducción exitosa del corcho se centra en su uso en productos ya existentes. Los prototipos o las soluciones personalizadas que no están en producción en masa no pueden considerarse aplicaciones válidas de los materiales de corcho porque son programas de investigación públicos o privados o productos altamente personalizados pagados en exceso. Por lo tanto, la discusión de los materiales de corcho actualmente introducidos se limita a los productos que se ofrecen en el mercado. En este párrafo, el material de corcho se considera corcho en bruto y materiales derivados del corcho, como el conglomerado de corcho a base de poliuretano, etc.

En la mayoría de los casos, la aplicación del corcho está fuertemente relacionada con sus destacadas propiedades específicas. El corcho como material a granel es relativamente caro. Esa es la razón principal por la que los diseñadores eligieron estos materiales solo teniendo en cuenta los requisitos especiales que deben cumplir. Es por eso que las aplicaciones del corcho son únicas y no generales. No es común que el corcho sea el material principal para equipos de ingeniería. El uso del corcho es un material secundario ya que otros materiales no lo pueden sustituir en aplicaciones particulares.

Las propiedades de aislamiento del corcho son peores o mejores cuando se compara con el coste de las

espumas poliméricas de uso común, como las espumas poliméricas de poliestireno, ABS o XPS. Las propiedades de resistencia al fuego de los paneles de corcho en bruto no cumplen con ningún estándar de protección contra incendios. Únicamente los conglomerados con aditivos autoextinguibles del fuego podrían ser considerados material resistente al fuego. Las propiedades de supresión de ruido son relativamente altas en comparación con otros materiales. Para algunas propiedades, como las propiedades mecánicas, es difícil comparar el corcho con otros materiales. Los diagramas de Ashby caracterizan el corcho con respecto a otros materiales. Por eso es difícil definir una pista general sobre el corcho. En este punto, cabe mencionar que el corcho tiene algunas propiedades únicas que son muy importantes para su elección en varios diseños. La mayoría de los usuarios de materiales naturales tienen buenas sensaciones cuando los dispositivos táctiles están cubiertos con corcho. Además, la absorción de la humedad y el sudor por parte de los materiales de corcho son muy recomendables para la manipulación prolongada de dispositivos. Las excelentes propiedades en la atenuación de las ondas electromagnéticas o la buena ablación por reentrada atmosférica demuestran que el corcho no tiene ninguna ventaja sobre los compuestos poliméricos de materiales de base metálica en la ingeniería. Sin embargo, algunas propiedades muy específicas permiten su uso en aplicaciones específicas y exigentes.

En la industria aeroespacial, la introducción del corcho en las aplicaciones actuales, ocupadas por otros materiales generalmente basados en polímeros, es difícil de lograr. Uno de los resultados más triviales de los cambios en la industria aeroespacial es el costo de certificación y recertificación de cualquier nuevo diseño. El reemplazo de los materiales usados actualmente en este momento no es una prioridad para los fabricantes y operadores de aviones. Además, la estabilidad de la cadena de suministro en la producción aeroespacial es uno de los factores más importantes durante la producción del producto. El corcho, como material natural, se obtiene de los bosques de alcornoque. Cada año, la producción de corcho y su precio pueden variar significativamente.

Como se mencionó anteriormente, el corcho exhibe una excelente atenuación de los sonidos producidos durante la etapa de propulsión. Durante esta etapa, se generan sonidos muy molestos que requieren de sistemas adicionales para su reducción, principalmente aviones, para evitar que los sistemas de defensa aérea enemigos los detecten. Esta propiedad está fuertemente relacionada con la microestructura del corcho. La lignina y la suberina son canales alargados que atrapan las ondas de radio magnéticas, que no reflejan las ondas de radio hacia la fuente de radiación (sistemas de radar).

Una de las tendencias de futuro del corcho en la industria aeroespacial está relacionada con los sistemas de supresión de sonido en propulsión. Los sistemas de propulsión actuales generan ruidos desagradables, que requieren sistemas de supresión de sonido adicionales. Para los motores a reacción, las góndolas del motor están diseñadas para reducir el ruido. Rediseñar las góndolas de los motores a reacción con el material de supresión de sonido que lo acompaña, donde el corcho puede ser considerado como la próxima aplicación de corcho.

Una propiedad no trivial del corcho es el bajo impacto ambiental de la erosión del panel de corcho. Cualquier escape de gases no inflamables, calientes o fríos con cualquier partícula que pueda erosionar el material puede cubrirse con corcho. Tiene buenas propiedades de aislamiento térmico, capaz de erosionarse con pequeñas cantidades de material. Obviamente, después de un tiempo específico, estas cubiertas deben ser reemplazadas.

El corcho se asume como material de protección contra el calor para una misión de prueba, donde la nave espacial volverá a entrar en la atmósfera terrestre. Durante el reingreso, cada nave espacial experimenta altas cargas térmicas debido a la fricción del aire contra la estructura de la nave espacial. Durante la era del transbordador espacial, los transbordadores espaciales estaban cubiertos con paneles de cerámica. Una de las hipótesis es que el corcho podría usarse para el blindaje de reingreso. Bajo la regresión de la combustión y las altas propiedades de aislamiento térmico a altas temperaturas tienen un gran potencial para la fabricación a bajo coste y sin complicaciones de escudos térmicos para el reingreso.

El corcho, reconocido como un material verde y sostenible, es ampliamente utilizado en la industria de la moda. En este campo, las tendencias juegan un papel importante, por lo que la cantidad de solicitudes variará en los próximos años. Los campos de aplicación en la industria de la moda son el tejido de corcho decorativo, los revestimientos y el material para la fabricación de calzado. En este sector, donde las empresas manufactureras hacen fuertes declaraciones sobre la ecología y el uso sostenible de materiales, se espera que el material de corcho junto con otros materiales de base natural esté más presente.

El uso del corcho en la arquitectura está muy extendido. Debido a su estructura atractiva y su buen tacto, el corcho es muy común en cualquier tipo de arquitectura, desde accesorios para el hogar hasta importantes funciones decorativas en grandes edificios e instalaciones artísticas.

En todas las aplicaciones arquitectónicas, se utilizan grandes cantidades de corcho para fabricar paneles de suelo y de pared. Estos dos productos consumen corcho de la más alta calidad en arquitectura. En esta aplicación, el corcho es caro y tiene características de alto nivel.

Una de las posibles aplicaciones del corcho es la absorción química del aire. El corcho, debido a su microestructura interna, puede absorber sustancias químicas. Muchas sustancias orgánicas son muy tóxicas para los humanos. La fuente de sustancias dañinas a base de carbono proviene del uso de carbón en chimeneas privadas, gasolina y escape de motores diésel, incluidos vehículos y otros tipos de dispositivos como generadores de energía, cortadoras de césped y otras herramientas de jardinería doméstica con motores de combustión. Una fuente adicional de sustancias orgánicas nocivas es la agricultura intensiva, los vertederos y el compostaje de grandes cantidades de residuos orgánicos con procesos de descomposición.

En ambientes abiertos, no es posible el uso de sistemas de filtración, por lo que se podrían utilizar

granulado de corcho para atrapar sustancias nocivas. Además, en este caso, el corcho puede provenir del reciclaje, pero requiere que las células de corcho no estén cubiertas por ninguna capa aglutinante y estén expuestas a la atmósfera circundante.

El corcho es natural, renovable y reciclable con valiosas propiedades y diversas aplicaciones. Aproximadamente el 70% del corcho obtenido se utiliza como tapones para botellas. Aún así, se usa cada vez más en la producción de materiales compuestos destinados principalmente a la industria de la construcción (aprox. 22%) [3], [4], [20]. Se espera que amplíe su uso en otras áreas de la economía en el futuro.

3.2.1. Aglomerados de corcho para uso general

Los productos de corcho se preparan a partir de aglomerados de varios granulados, normalmente con un tamaño de grano de 0,5 a 30 mm. Los gránulos utilizados suelen ser residuos de la producción de tapones. Los gránulos se mezclan con un prepolímero reactivo y se prensan a temperatura ambiente o se mezclan con un aglutinante polimérico y se prensan a temperatura elevada bajo presión para producir *composite* de corcho [4]. Las propiedades previstas del producto terminado dependen de las dimensiones de los gránulos de corcho, su fracción de masa en el compuesto (hasta el 90 % en masa), el tipo de aglutinante (poliuretanos, resinas de fenol-formaldehído, etc.) y la densidad de los aglomerados utilizados en el proceso de producción.

Los bloques de aglomerado de corcho se laminan, se les da forma según las dimensiones previstas y se alisan (Figura 3.2). Se utilizan para obtener paneles, tablas, plantillas para calzado, etc. [2], [4]. Los aglomerados para revestimientos de paredes [4] y suelo se producen de manera similar pero con un aglutinante adecuado y una presión variable durante el proceso de prensado. El material obtenido es más duradero e inodoro. Su resistencia a la abrasión se puede aumentar aplicando una o más veces una capa protectora de polímero en multicapa. Un grupo separado e importante de compuestos de corcho es el llamado tapón de caucho, una mezcla de gránulos de corcho y caucho. Los ingredientes de la composición se mezclan (componen) y el producto final se moldea y pule. Los compuestos producidos se utilizan como material para juntas en automóviles y prensaestopas para tanques de aceite porque son impermeables a los líquidos y no experimentan expansión transversal debido al bajo valor de la relación de Poisson del tapón [3], [19].

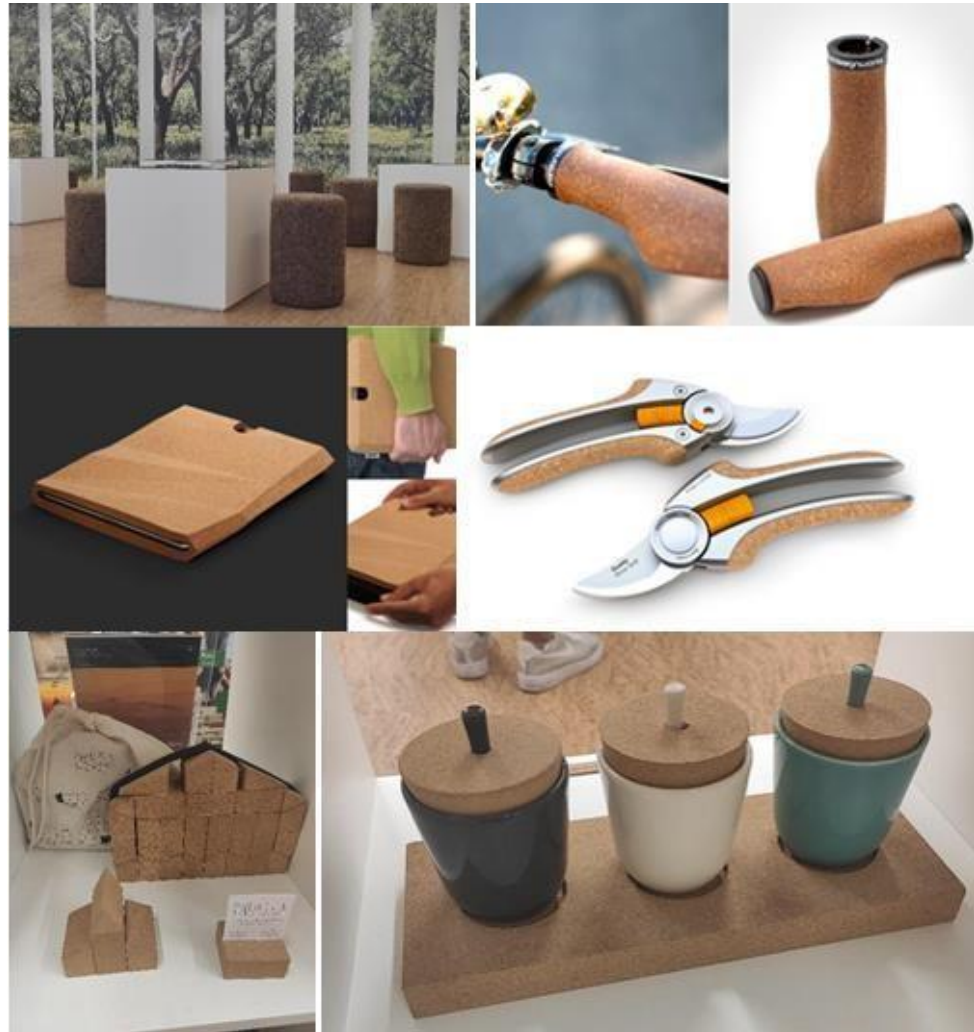


Figura 3.2 Taburetes de corcho, agarraderas de corcho para bicicletas, estuche POMM para iPad, tijeras de jardín Fiskars, bloques para bebés, portavasos y tapones [21]–[24].

3.2.2. Aislamiento Térmico y Acústico

Los aglomerados de corcho para aislamiento térmico y acústico en la construcción (Figura 3.3). El corcho se caracteriza por una baja conductividad térmica, velocidad de propagación del sonido e impedancia acústica, lo que lo hace adecuado para su uso como material de aislamiento térmico y acústico. Los *composites* de corcho utilizados de esta forma contienen un 90-95 % del peso del corcho en una matriz de poliuretano. Los componentes mezclados generalmente se calientan a unos 100°C durante un tiempo específico para aglomerarlos. Este tipo de material es muy utilizado en la construcción de aislamiento térmico y acústico. También lo utilizan las agencias espaciales de la NASA y la ESA como escudos térmicos y antivibración para componentes de cohetes [2]. Según la Asociación Portuguesa del Corcho, el Peugeot 208 Natural, presentado en 2014 en Sao Paulo, tenía corcho implementado en el techo y en el salpicadero. El material aseguró un mejor aislamiento térmico y acústico.



Figura 3.3 Aislamiento de la casa creado a partir de corcho aglomerado.

La industria de la construcción es el segundo sector donde se utiliza el corcho natural en la insonorización de paredes, falsos techos, papel pintado, zócalos, revestimientos de suelos en edificios y aislamiento en cámaras frigoríficas industriales (Figura 3.4). Los compuestos utilizados anteriormente con un núcleo de espuma sintética y un refuerzo de carbono de revestimiento tienen un aislamiento acústico relativamente bajo. En respuesta a la creciente necesidad de reducir el ruido, se desarrolló un compuesto innovador con una estructura en capas, que consiste en un espaciador de corcho natural y fibra de carbono. Tal compuesto muestra una sinergia de las ventajas de los materiales constituyentes. Conserva sus propiedades de resistencia y bajo peso, suprime el ruido con mayor eficacia que los materiales de aislamiento tradicionales (en un 250 %) y es mucho más resistente [3], [25]. Los llamados aglomerados negros están hechos de gránulos de corcho natural sin aglutinante y se produce en un autoclave cerrado a alta temperatura (aprox. 300°C) y alta presión (aprox. 540 kPa) [26], [27]. Como resultado de la degradación termoquímica de las paredes celulares del corcho, se libera suberina (que actúa como un aglutinante natural). Los residuos de degradación se aglomeran y se forma el producto intermedio utilizado para producir tableros de corcho [3], [28], [29]. Es un material reutilizable y, al mismo tiempo, completamente natural, sin aditivos químicos. La empresa de medios de transporte usa corcho por su baja densidad ($0,24 \text{ g/cm}^3$) y buen aislamiento. El corcho es frecuentemente utilizado como material para componentes de vehículos a motor y diversos tipos de material sobre ruedas.



Figura 3.4 Industria de construcción: suelo de corcho aglomerado e implementado.

3.2.3. Caso de aislamiento de sonido

Como se mencionó anteriormente, el corcho se produce a partir de la corteza de un alcornoque. Es una materia prima natural con propiedades únicas como su bajo peso, es impermeable a líquidos y gases, flexible, comprimible y un buen aislamiento térmico y acústico. En su forma natural, el corcho también es un excelente retardante del fuego, aunque el polvo de corcho es muy inflamable (porque la estructura celular se ha descompuesto). Además, es completamente biodegradable, renovable y fácil de reciclar. El estudio de caso de Klusak y Grygny presenta la aplicación de un separador rígido de tipo corcho para fabricar *composite* de corcho y su aplicación en vehículos de extinción de incendios.

Se utilizaron los siguientes métodos de fabricación para producir compuestos y una comparación de masas entre las muestras:

- Laminación HLU (Hand Lay Up), - Bolsa de vacío VB (Vacuum Bagging), laminación manual con el uso de vacío
- pulverización de fibra cortada y resina SU (Spray-Up)
- Infusión VI (infusión al vacío)
- Inyección de resina CCBM (Closed Cavity Bag Molding) bajo un diafragma de silicona reutilizable
- LRTM (Inyección de resina Light Resin Transfer Molding en un molde cerrado)

El material Soric se ha utilizado hasta ahora en la producción de compuestos de 10 mm de espesor. El estudio tiene como objetivo construir un compuesto que sea más liviano que un compuesto con un espaciador Soric y que no cree problemas tecnológicos durante el procesamiento. Durante las pruebas, se decidió hacer un compuesto con un núcleo de corcho y un espaciador tipo SBC para comparar. El compuesto hecho del espaciador SBC resultó ser muy inestable dimensionalmente debido a que se obtuvieron grandes desviaciones de espesor en diferentes secciones transversales de las muestras. Se

convirtió en un desafío tecnológico para procesar y se omitió en trabajos posteriores [30]. Como parte de los intentos de producir un compuesto de corcho por varios métodos, resultó que 1 m² del material hecho con un espaciador de corcho pesaba 6,2 kg y era 1,3 kg más liviano que un compuesto con una capa intermedia de poliéster no tejido del tipo Soric. Como resultado de la sustitución del espaciador sintético Soric por un espaciador de corcho durante la producción de elementos para la nueva construcción compuesta, fue posible reducir el peso de la estructura fabricada [30].

Para las pruebas experimentales, las muestras se fabricaron con un espaciador de corcho, un espaciador de espuma de PVC y un espaciador Soric, así como estructuras de laminado sólido. Los materiales compuestos probados se utilizaron para construir carrocerías de automóviles únicas, incluidos los compartimentos de la tripulación para el transporte y el servicio del personal. Se llevaron a cabo pruebas exhaustivas de compuestos siguiendo los requisitos R1 de PN-EN 45545-2: 2013 e incluyeron las siguientes características [30]:

- ensayo de reacción al fuego - propagación del fuego según ISO 5658-2
- Respuesta a la prueba de fuego. Prueba de la intensidad del calor, el humo y la tasa de combustión másica según ISO 5660-1: 50 kW/m²
- ensayo de la producción de humo de los materiales y la toxicidad de sus productos de combustión según ISO 5659-2: 50 kW/m² PN-EN-45545-2: 2013 Anexo C

Las pruebas se realizaron en materiales compuestos producidos mediante varias tecnologías, incluidos los compuestos tipo sándwich. Las pruebas realizadas como parte de la opinión de los expertos cubrieron la inflamabilidad horizontal (según ECE-R 118 Anexo 6), la fusibilidad de los materiales (según ECE-R 118 Anexo 7) y la inflamabilidad vertical (según ECE-R 118 Anexo 8). Las pruebas se realizaron para las siguientes cinco estructuras [30], [31]:

- estructura no. 1: composite fabricado por infusión formado por tejidos cuatridireccionales de 600 g/m², espaciador de corcho Core-cork de 6 mm, y resina viniléster ignífuga
- estructura no. 2: compuesto realizado por infusión formado por tejidos de cuatro vías de 600 g/m², un espaciador sintético Soric de 6 mm y una resina de viniléster ignífuga
- estructura no. 3: composite fabricado por infusión formado por 9 capas de un tejido de cuatro vías de 600 g/m² y una resina de viniléster ignífuga
- estructura no. 4: Composite realizado mediante laminación manual, formado por tejidos de 600 g/m² en ^{cuatro} direcciones, espaciador de corcho Core de 6 mm y resina de poliéster ignífuga
- estructura no. 5: Un compuesto hecho por laminación a mano, que consta de telas de cuatro vías de 600 g/m², un espaciador sintético Soric de 6 mm y una resina de poliéster ignífuga

En conclusión, todas las muestras (5 estructuras) cumplieron con los requisitos de la normativa, lo que

brinda una excelente oportunidad para seleccionar la estructura adecuada en función de la resistencia mecánica requerida [32]–[35]. Según la norma PN-EN ISO 527-4, las muestras realizadas con corcho como distanciador con de 30 mm de espesor obtuvo un menor valor del perfil de deflexión a máxima tensión que con la espuma de PVC [34]. Los siguientes materiales obtuvieron los resultados: perfil de deflexión del tapón con una tensión máxima de 17,2 mm; Espuma de PVC de 26,67 mm. La estructura que usa corcho como material espaciador mostró una mayor rigidez, incluso en un 35%, en comparación con el espaciador de espuma [30].

El uso en cabinas y estructuras contra incendios se justifica por varias razones. El corcho permite una importante reducción del peso de los elementos fabricados, lo que se traduce en un menor consumo de combustible en los camiones de bomberos. La disminución de peso también permite transportar equipos de rescate más especializados sin el riesgo de exceder las cargas por eje permitidas del automóvil. Las cabinas de los automóviles han sido insonorizadas con alfombras especialmente instaladas y aseguradas con una capa de refuerzo. Se decidió reemplazar otros materiales espaciadores usados utilizando productos con corcho y, en una sola operación, por el método de infusión, para hacer una cabina de automóvil. Tal cabina con un tipo de espaciador de corcho resultó ser más liviana y mantuvo la resistencia mecánica requerida. La cabina obtuvo un mayor aislamiento acústico sin realizar operaciones adicionales, lo que redujo la cantidad de horas-hombre necesarias para insonorizar la cabina. La cabina también se realizó con una distribución y materiales que cumplieran con los requisitos de resistencia al fuego según la normativa ECE R 118 [30], [31].

3.2.4. Estructuras tipo *sándwich*

Las estructuras de paneles livianos son una buena opción para reorganizaciones rápidas del espacio para pasajeros del vehículo. Puede usarse para paredes, pisos y techos temporales. Este tipo de paneles suelen ser estructuras tipo *sándwich*. Los paneles exteriores están hechos de material de revestimiento lateral que garantiza la rigidez y soporta la mayoría de las cargas, mientras que en el interior, el material del núcleo es liviano. El material del núcleo pegado a los paneles de revestimiento evita la deformación. En este punto, se debe tener en cuenta que ni los paneles de revestimiento ni el material del núcleo pueden soportar ni siquiera una pequeña parte de las cargas que puede soportar el material *sándwich* correctamente encolado, principalmente debido a la pérdida de estabilidad, generalmente denominada deformación.

La figura 3.5 muestra paneles de revestimiento de aluminio con diferentes espesores generales y materiales de núcleo. Hoy en día, los materiales de núcleo se dividen en materiales de núcleo natural o sintético, como madera, madera contrachapada, cáñamo, paja o corcho. El panel inferior izquierdo (Figura 5) se crea con material de núcleo de madera en dirección perpendicular a la superficie del panel. Otros dos paneles se crean con núcleos sintéticos que tienen nido de abeja de aluminio y núcleos de espuma. El resto de los paneles tiene núcleos de corcho. Es fundamental mencionar que en las estructuras *sándwich* el volumen del material del núcleo puede llegar hasta el 95% del material. Por

lo tanto, es crucial garantizar un alto grado de uso de materiales ecológicos y sostenibles para los núcleos. Los paneles skin, generalmente de aluminio, tienen un bajo impacto ecológico debido a su alta capacidad de reciclaje. El uso de materiales naturales para este propósito permite crear estructuras ligeras de alto rendimiento con una baja huella de carbono.



Figura 3.5 Paneles sándwich con núcleo de madera, corcho, nido de abeja de aluminio y espuma sintética.

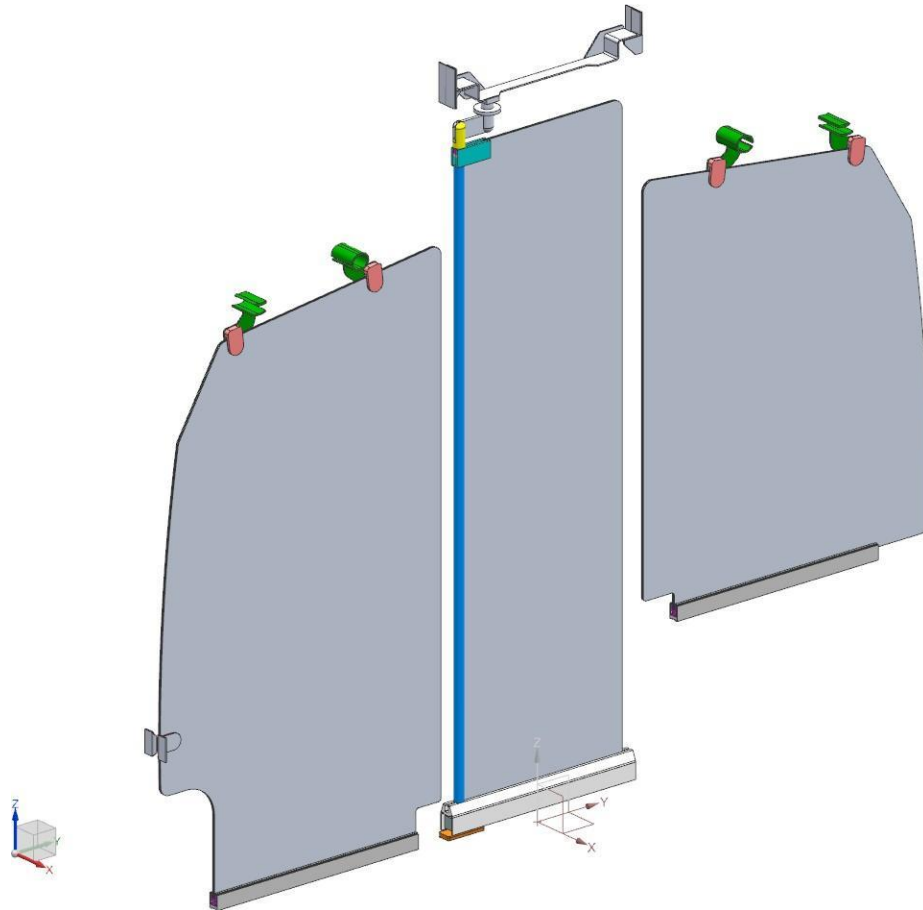


Figura 3.6 Tren modelo de muros temporales.

Entre los sectores en los que se pueden utilizar paneles con núcleo de corcho, es necesario discutir y revisar los requisitos generales y las buenas prácticas de cada sector específicamente. En la industria ferroviaria, donde los requisitos de seguridad se trasladan al servicio de larga duración, las instalaciones temporales para la reorganización interior son una práctica común. Los requisitos para los aviones de pasajeros de fuselaje ancho son muy exigentes y, debido a la alta concentración de pasajeros y al corto tiempo de evacuación, es imposible utilizar paredes temporales móviles. Para el sector de la automoción, las reorganizaciones temporales del interior son muy raras y son soluciones muy personalizadas. En la industria marina, los barcos y yates están diseñados para un solo propósito y solo se introducen cambios menores.

En el escenario del caso presentado se muestra un muro de tren temporal para reacomodo interior (Figura 3.6). Este tipo de muro se puede desmontar y colocar en una nueva posición durante la preparación del tren de viaje, cambiando la distribución de pasajeros en el interior. El concepto original consideraba dos materiales para estas paredes: madera contrachapada altamente modificada con pintura superficial brillante y vidrio de doble capa encolado. Después de considerarlo, se supone que un cambio de materiales para el material sándwich con núcleo de corcho es una opción posible.

Una de las ventajas del material sándwich con núcleo de corcho es su alta propiedad de amortiguación

del sonido. Es mucho mejor que la madera contrachapada altamente modificada o el vidrio de doble capa encolado, principalmente debido a que utiliza dos materiales combinados con cambios significativos de densidad que funcionan como un filtro de paso de banda. Con un escenario de masa similar, los paneles sándwich tienen una rigidez significativamente mayor que los materiales mencionados anteriormente con mayor espesor. La desventaja de las estructuras de paneles sándwich es el montaje complejo, que requiere el uso de insertos para manejar las fuerzas de compresión provenientes de las conexiones de pernos/tornillos. La alta resistencia al fuego se consideró al mismo nivel que la madera contrachapada, mientras que el panel de vidrio tiene excelentes propiedades de resistencia al fuego.

El análisis de elementos finitos (FEA) permite determinar la tensión en el material y la deformación de la geometría examinada frente a las cargas aplicadas. Por lo general, FEA requiere los siguientes pasos: limpiar la geometría original mediante la eliminación de características innecesarias de la geometría, preparar un modelo discreto (convertir, por defecto, continuo infinito, la geometría en elementos discretos), aplicar mecanismos de interacción como contactos, lazos o pegado de conexiones, usar condiciones de contorno y fuerzas, configuración de parámetros de simulación. La Figura 3.7, arriba a la izquierda, muestra un modelo discreto preparado con condiciones de contorno y fuerza ocultas, mientras que los otros ejemplos de la Figura 3.7 muestran los resultados de escenarios de casos estáticos, que suponen un fuerte empuje contra otros vehículos de tren. La Figura 3.7, arriba a la derecha y abajo a la izquierda, son diagramas de deformación que ocurrirán bajo cargas supuestas. Cabe señalar que la escala está en milímetros y la escala de deformación se amplía diez veces para una mejor visualización de las direcciones de deformación. La Figura 3.7, abajo a la derecha, presenta la tensión principal máxima (MPa) en piezas que están sujetas a las cargas mencionadas anteriormente. Sin consideraciones y explicaciones más amplias, que están fuera del alcance de este libro, los resultados presentados deben tratarse como cualitativos y no cuantitativos.

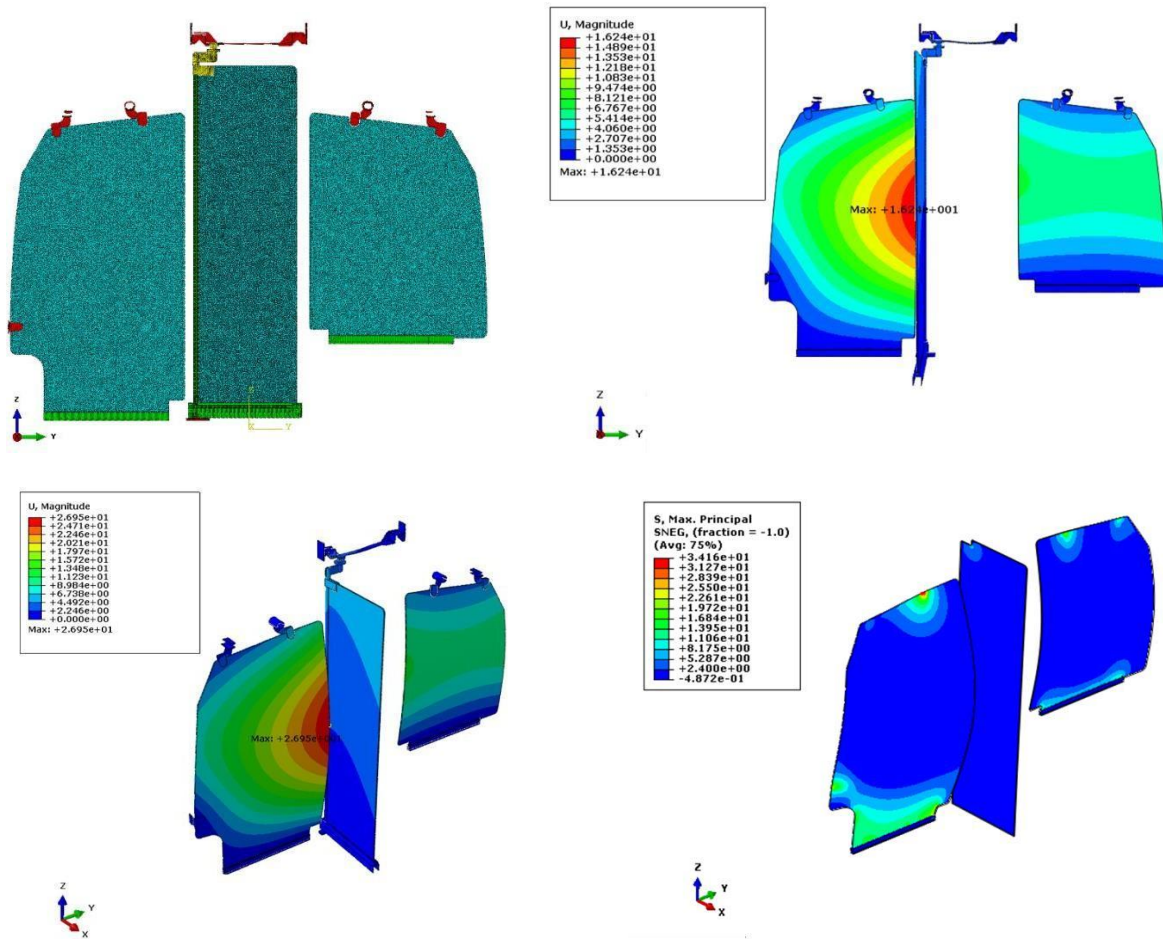


Figura 3.7 Arriba a la izquierda - Modelo discreto de muros temporales de tren; arriba a la derecha - Vista frontal de la deformación de las paredes temporales del tren bajo el escenario de caso de carga de empuje fuerte en la dirección del movimiento [mm]; abajo a la izquierda - Vista isométrica de la deformación de las paredes temporales del tren bajo el escenario de caso de carga de empuje fuerte en la dirección del movimiento [mm]; abajo a la derecha - Vista isométrica de la tensión principal de las paredes temporales del tren bajo el escenario de caso de carga de empuje fuerte en la dirección del movimiento [MPa].

Una propiedad interesante del corcho en las estructuras tipo sándwich es su excelente función de soporte para los paneles de revestimiento que soportan la mayoría de las cargas. En las pruebas de flexión de 4 puntos, en el medio de la muestra, está presente un estado de esfuerzo de flexión puro. Los investigadores deben determinar la resistencia general de la estructura y evaluar el mecanismo de daño en una determinada combinación de panel y material del núcleo en relación con los espesores y la película de adhesión utilizada. Como se muestra en la Figura 3.8, los resultados de las pruebas muestran buenas propiedades del corcho frente a las cargas aplicadas. El primer panel de espuma (arriba) sufrió daños locales debido a la sobrecarga local del núcleo, que colapsó y permitió una deformación excesiva de la piel. Por el contrario, el segundo panel de espuma sufrió fuerzas de

cizallamiento en la zona de adhesión entre la espuma y la piel. En el caso del corcho, donde los resultados requieren una consideración mucho más profunda, podría decirse que el corcho tiene buenas propiedades de adhesión con varios materiales de piel y buenas capacidades para soportar pieles que evitan daños locales. En la mayoría de los casos, toda la estructura tiene un amplio rango de influencia.



Figura 3.8 Análisis posterior al experimento del modo de daño y los mecanismos para paneles sándwich de corcho y materiales de núcleo sintético.

El ejemplo que se muestra de paneles de piel es uno de los casos más interesantes, económica y estructuralmente justificados de uso avanzado del corcho. Se logra combinar materiales de piel de alta resistencia y rigidez tales como aluminio o compuestos a base de epoxi/poliéster en un volumen pequeño con un volumen alto de material de núcleo, que puede ser, es decir, corcho, material sándwich. Esto permite el diseño de estructuras inteligentes, livianas y de alta resistencia con una baja huella de carbono y está listo para comercializar.

3.2.5 Automotor

El corcho se utiliza para fabricar varios asientos, especialmente para automóviles, y para el acabado interior de cabinas de vehículos. Se aprovecha su flexibilidad, resistencia al calor ya los impactos, y textura agradable al tacto [5], [36]. La industria del transporte tiene una demanda creciente de materiales con una alta relación resistencia-peso [37]. Debido a su baja densidad, alta resistencia, nivel independiente de humedad y cambios de temperatura, el corcho se utiliza como material central en estructuras sándwich. El llamado sándwich, donde el material del núcleo es aglomerado de corcho y los revestimientos multicapa delgados están hechos de materiales altamente rígidos, como acero, aleaciones de aluminio, polímeros o varios compuestos de fibra [3], [27], [38].], [39]. Existen investigaciones sobre compuestos sándwich de aluminio-corcho producido en condiciones industriales

(Carbon Fox), con uso potencial para paredes y pisos en la industria ferroviaria. La Figura 3.9 muestra un ejemplo de un producto elaborado utilizando la tecnología de producción de compuestos a partir de preimpregnados en la empresa mencionada anteriormente.

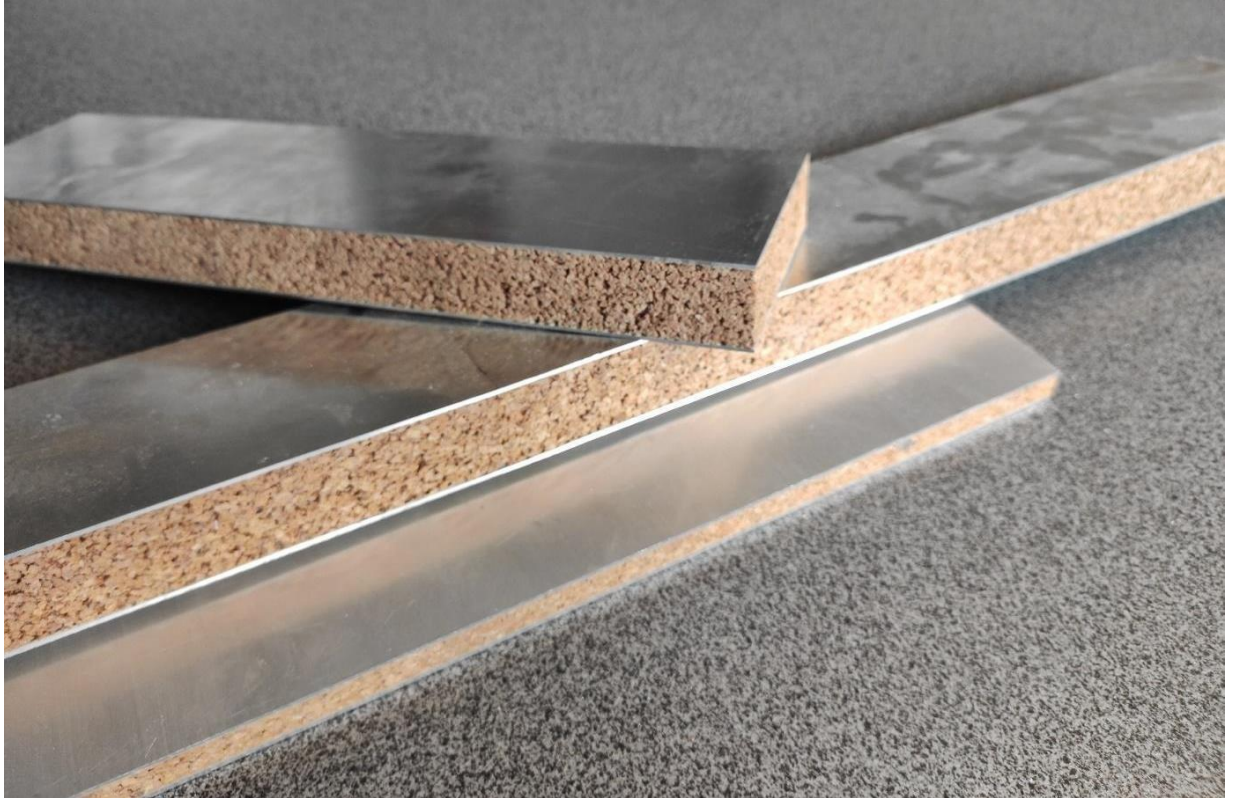


Figura 3.9 Vista de detalle de la lámina de aluminio, material sándwich con núcleo de corcho de diferentes espesores.

Los elementos del interior del coche, el panel basculante para un coche de rally, está compuesto por fibras de carbono y aramida en una matriz de resina epoxi, con un espaciador de corcho central (solución basada en la solicitud de patente P-413342). El espaciador de corcho se usó para aumentar la rigidez del producto manteniendo el peso requerido, la resistencia al impacto, la absorción de energía y la vida útil, reduciendo así los costos de producción. Cabe mencionar el uso exclusivo del corcho en la industria de los vehículos espaciales. La calidad de los materiales aislantes juega un papel fundamental en los motores de los cohetes porque la estructura de sus componentes está sometida a altas temperaturas, creando un riesgo de explosión de gas durante el lanzamiento y regreso de los cohetes a la Tierra. Debido a sus propiedades, el corcho se suele utilizar para obtener toberas y escudos térmicos críticos para la seguridad de los cohetes.

3.2.5.1. Caso de estudio

Este capítulo introduce al lector al estudio de caso, en el que los autores presentan el enfoque para utilizar el compuesto de corcho en el sector de la automoción. La investigación tuvo como objetivo

mejorar la seguridad de los usuarios vulnerables de la vía (VRU) mediante el desarrollo e implementación de un sistema de protección frontal (FPS), que mitiga las lesiones durante un accidente con un vehículo.

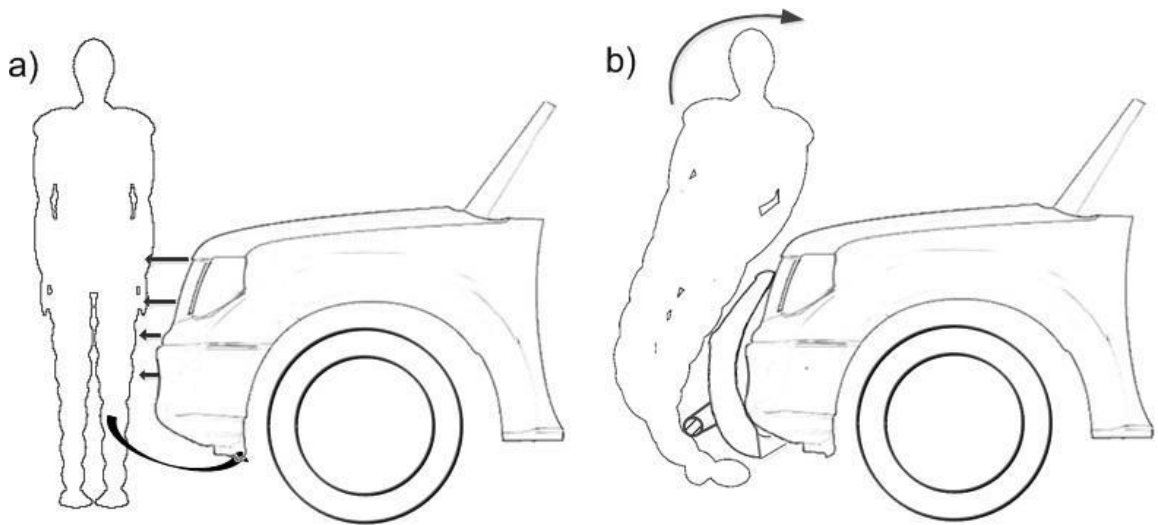


Figura 3.10 Diagrama esquemático de la cinética de un peatón después de una colisión con un SUV: a) sin un FPS seguro; b) con un FPS seguro instalado en el vehículo – basado en la patente del autor [40].

Debido a la tendencia de compra de SUV en Europa y su participación más frecuente en accidentes que involucran a peatones y ciclistas (los SUV se usan comúnmente en las ciudades), los autores identificaron la necesidad de un sistema de protección frontal seguro (Figura 3.10) [41]– [43]. El FPS diseñado proporciona a los peatones y ciclistas una cinética adecuada, respaldada por pruebas numéricas, después de la colisión con un vehículo, al mismo tiempo que contribuye a la reducción de lesiones mediante el uso de materiales apropiados que absorben energía, es decir, materiales naturales (corcho) y compuestos (fibra de carbono). Como parte de la investigación, se crearon y probaron modelos numéricos multivariados y un prototipo físico. Esta implementación de la combinación de corcho con fibras de carbono permitió a los autores sustituir acero y aleaciones de aluminio en el FPS. Cabe destacar que el desarrollo del nuevo FPS no solo mejoró la seguridad de los VRU, sino que también mejoró el diseño de la parte delantera del vehículo (Figura 3.11).



Figura 3.11 El diseño propuesto del sistema de protección frontal.

Posteriormente se realizó un minucioso escaneo 3D, con un escáner Leica P20, del vehículo con el cinturón delantero quitado para reconocer los elementos de montaje del sistema de protección frontal. Las mediciones se tomaron desde dos posiciones del escáner y se combinaron en el software Leica Cyclon [44]. El registro, es decir, el efecto del procedimiento de combinación de exploración, se representa en la Figura 3.12 (con la intensidad de reflexión marcada). La calidad de la nube de puntos obtenida en el caso de métodos ópticos depende, entre otros, de la reflectividad de la superficie del objeto. Los elementos estructurales escaneados son relativamente negros, lo que hace que falten puntos en la nube de puntos que representan la geometría del cuerpo. La influencia de esta propiedad es especialmente visible cuando se comparan las ventanas o los faros transparentes con la estructura frontal que absorbe más luz.

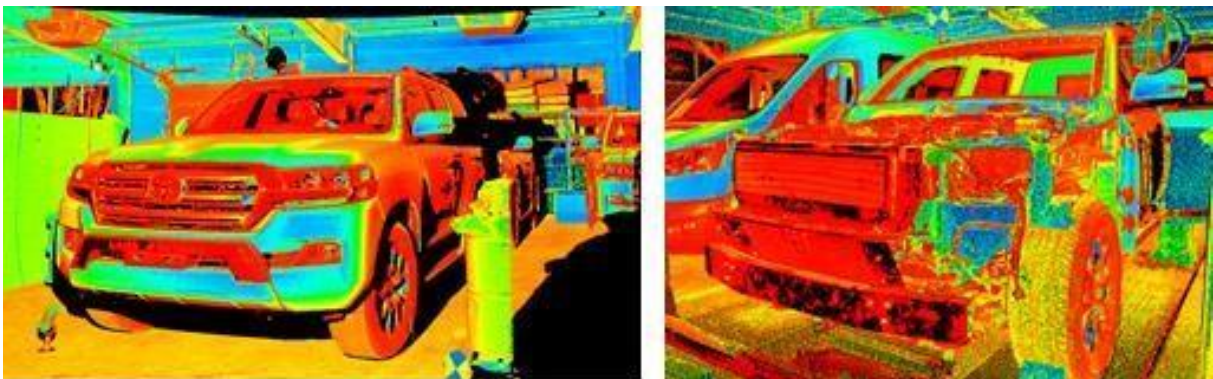


Figura 3.12 Nube de puntos de vehículo Toyota Land Cruiser con cinturón delantero desmontado (con intensidad de sombra marcada).

El resultado final de las mediciones es la nube de puntos combinada de todos los escaneos, que es la base para recrear la geometría frontal del vehículo. La tolerancia de escaneo obtenida después de combinar la nube de puntos fue de aprox. 1 mm. En la Figura 3.13 se muestra una vista ejemplar de la nube de puntos obtenida del escaneo. Es la base de diseño para modelar el sistema de protección frontal. Se realizaron más trabajos de diseño en el software CATIA v5.



Figura 3.13 Nube de puntos de Toyota Land Cruiser con modelos FPS (izquierda) y representación FPS (derecha).

Se probaron varios tipos de corcho, es decir, corcho natural, corcho aglomerado con poliuretano y corcho relleno con líquido no newtoniano [45]. Con el fin de minimizar las lesiones en la cabeza durante los impactos múltiples (especialmente en motociclistas), también se investigaron diferentes configuraciones de disposición de diferentes tipos de corcho conectados con pegamento (compuestos de corcho). Finalmente, también se desarrolló un modelo de material (FEM), que será validado durante las pruebas experimentales. Debido a las propiedades de seguridad de FPS, el uso del corcho para el relleno de FPS que absorbe energía fue la opción más razonable. Sin embargo, se consideraron dos tipos de refuerzo (que cubren el material de corcho): fibra de carbono y fibra de vidrio. El carbono está compuesto de estructuras casi en su totalidad químicamente similares al grafito. Se caracterizan por una alta resistencia a altas temperaturas y a los productos químicos, y, a una buena conductividad térmica y eléctrica. Además, las ventajas de las fibras de carbono incluyen su baja densidad, alta resistencia y la capacidad de amortiguar las vibraciones.

Además, otro aspecto importante en el contexto del mercado del automóvil, es que la fibra de carbono tiene una apariencia atractiva (Figura 3.14). También se consideró la tecnología de fibra de vidrio S-2 glass / SC-15 [46]. Las propiedades de las fibras de vidrio difieren de las del material de vidrio puro porque se caracterizan por una alta resistencia a la tracción y flexibilidad, gracias a las cuales no se rompen con ángulos de flexión elevados. Sin embargo, las propiedades de los *composites* con fibras de vidrio son inferiores a las de los materiales reforzados con fibras de carbono. Por lo tanto, finalmente se decidió utilizar fibras de carbono en el prototipo FPS. Las desventajas de los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) incluyen el alto precio del material y un proceso de producción más complicado que el refuerzo de fibra de vidrio [47].

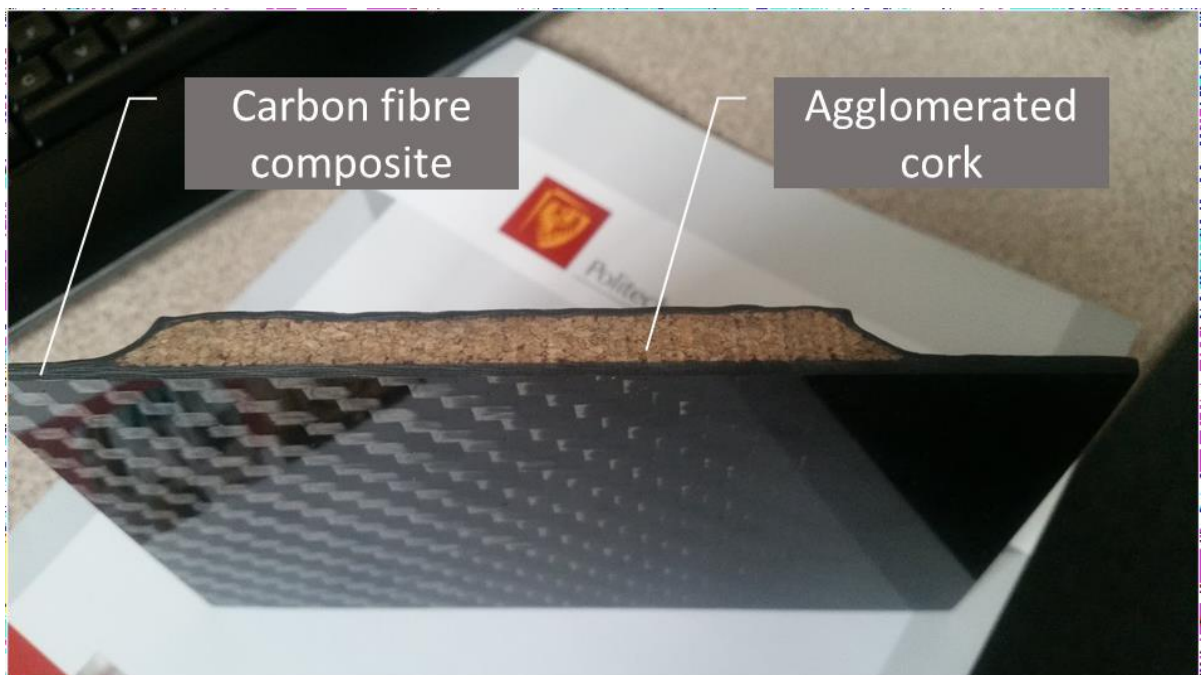


Figura 3.14 La sección transversal del sistema de protección frontal fabricado con corcho aglomerado en el centro y tejido de fibra de carbono.

La demanda del mercado requiere no solo un producto con las características de seguridad adecuadas, sino también un diseño atractivo. Por lo tanto, los autores eligieron la estructura de tejido de fibra de carbono que es el tipo de tejido más común para las piezas de fibra de carbono, a veces denominado tejido 2x2 [48]. El patrón pasa por dos urdimbres que se cruzan para crear una tela tejida con un patrón diagonal (Figura 3.5).

Los ensayos de homologación exigidos para el FPS, es decir, el Reglamento (CE) 78/2009 [49] basado en impactadores, no incluyen la cinemática completa del impacto del vehículo con un peatón. Por lo tanto, nuestro enfoque involucró un análisis cinética de un peatón atropellado por un vehículo equipado con un sistema de protección frontal compuesto. Utilizamos un maniquí peatonal elipsoidal de la biblioteca MADYMO v7.5. Numerosas instituciones independientes han confirmado que este maniquí es ampliamente utilizado en pruebas de seguridad para peatones y le confieren fidelidad. Según los resultados de las pruebas [50], [51], el punto de contacto entre el maniquí y el suelo se definió como 0,55. Durante toda la simulación, el maniquí estuvo en el campo de aceleración $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$. La velocidad inicial del vehículo era de 40 km/h sin desaceleración de frenado aplicada.

Las condiciones de contorno que definen la restricción de la parte delantera del vehículo se consideraron el peor caso computacional [52]. Las conexiones tornillo-tuerca se mapearon utilizando elementos de viga y conjuntos de nodos que están disponibles en el código LS-DYNA. La configuración numérica completa se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.15 Un modelo discreto de la parte delantera del vehículo con el FPS montado y el modelo ficticio masculino del percentil 50 de MADYMO.

Al analizar el curso de la simulación que se presenta a continuación, se puede observar una mejora significativa en los parámetros cinéticos y biomecánicos del maniquí en relación al vehículo no equipado con FPS (Figura 3.16). Las desviaciones de la rodilla se reducen significativamente, lo que

se confirma con las pruebas de criterios biomecánicos. La cabeza y la parte superior del cuerpo permanecen inmóviles durante un cierto momento bajo la fuerza de la inercia, pero la rotación dada permite proyectar la cabeza sobre el capó del vehículo. Podemos observar una desviación reducida de las vértebras cervicales del maniquí, lo que reduce la probabilidad de lesiones graves [53]. El curso de la cinética ficticia permite que se use otros sistemas que mejoren la seguridad de los peatones, incluida una máscara elevadora con amortiguación de gas adicional, como una bolsa de aire para proteger la cabeza. La rotación dada al peatón también hace que el peatón no experimente la aceleración máxima de todo el cuerpo en poco tiempo. Además, la aceleración de la cabeza no supera el parámetro estándar, entre otros HIC (valor crítico 1000 – en la simulación <100) [54], [55].

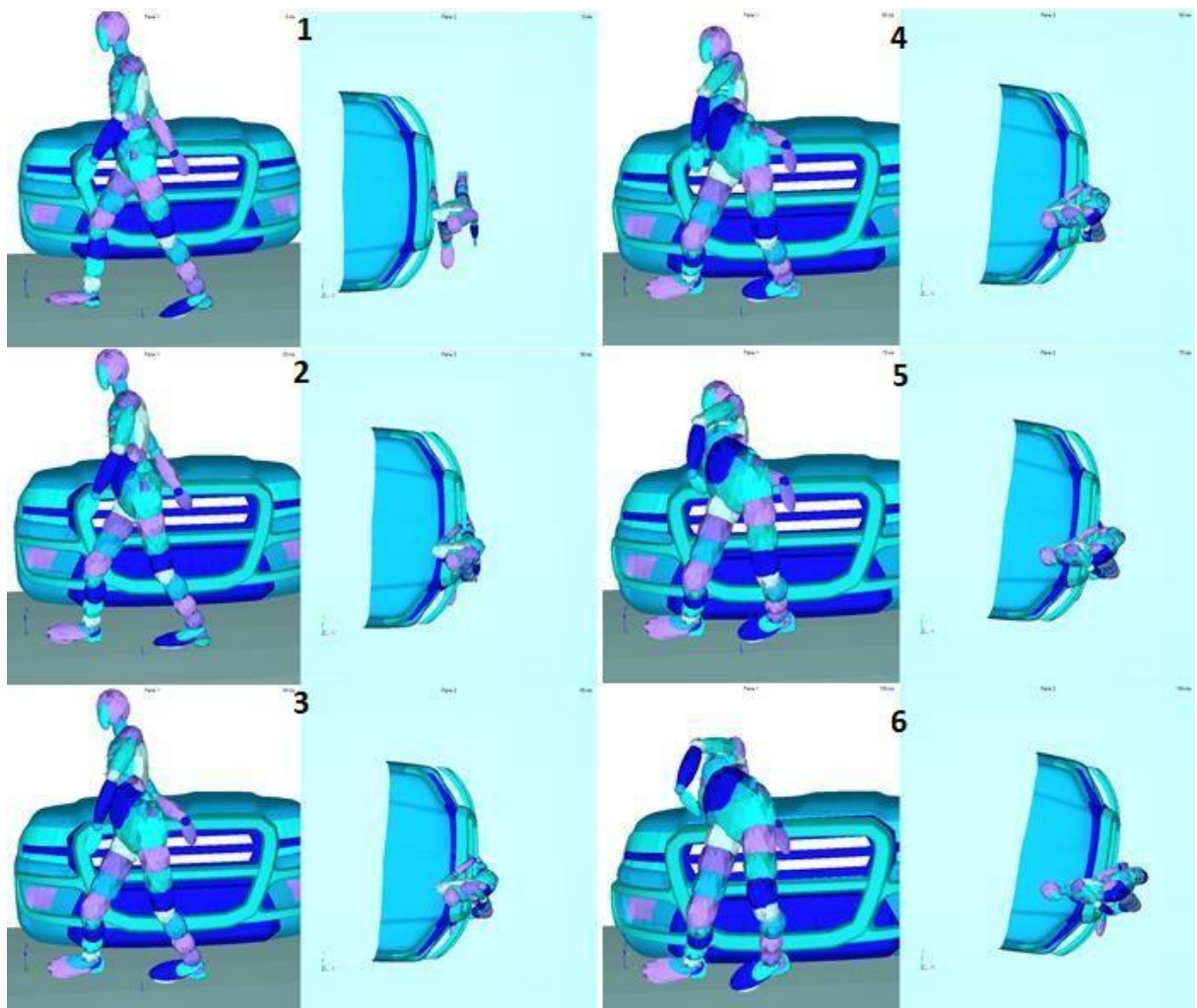


Figura 3.16 Simulación numérica del impacto de peatones LS-DYNA y MADYMO a 40 km/h – disparos sucesivos de 0-100 ms mostrados en intervalos de 15 ms .

La evaluación de la eficacia del FPS para garantizar la protección de los peatones incluyó una validación cinética positiva. Una evaluación de la trayectoria posterior al impacto del peatón fue suficiente en la etapa de diseño del FPS. La siguiente etapa del trabajo implicó la aplicación del criterio de optimización y consiste en que el FPS cumpliera con los requisitos de homologación de tipo

establecidos en el Reglamento (CE) 78/2009 del Parlamento Europeo y el Consejo para la prueba del impactador simulador de piernas para el sistema de protección frontal como se describe en [56]. El diseño final de FPS montado en un vehículo Toyota Land Cruiser y Ford Transit se muestra a continuación (Figura 3.17).



Figura 3.17 Sistema de protección frontal de corcho y CFRP montado en Toyota Land Cruiser (izquierda) y Ford Transit (derecha).

Observaciones

El estudio tenía como objetivo mejorar la seguridad de los peatones y ciclistas mediante el desarrollo e implementación de sistemas basados en materiales naturales consumidores de energía. En este caso de estudio, se diseñó y probó numéricamente un FPS corcho-corcho. El compuesto de fibra de carbono se usa cada vez más en la industria del automóvil debido a su baja densidad de masa y alta resistencia. Gracias a ello, los FPS fabricados con fibra de carbono pueden proteger de forma eficaz los elementos delanteros del vehículo. Además, las capacidades de absorción de energía del núcleo de corcho pueden reducir las lesiones sufridas por un peatón durante un accidente. Combinar material de corcho y fibra de carbono es una buena solución a la hora de seleccionar el material de los elementos para proteger al coche y al peatón. Así, se ha demostrado que la combinación de corcho y fibra de carbono es una solución perfecta a la hora de elegir el material de los elementos para proteger tanto al coche como al peatón – el corcho asegura la absorción de la energía mecánica, gracias a la cual se eliminan las lesiones que sufre el ser humano son relativamente pequeñas. En cambio, la fibra de carbono por su resistencia, protege la parte delantera del vehículo.

3.2.6. Tecnología de absorción de energía

Las tendencias actuales en la búsqueda continua de materiales ecológicos y rentables dieron lugar a numerosos estudios por parte de varios grupos de investigación [3], [57]–[65]. Actualmente, la mayoría de los equipos de seguridad personal utilizan revestimientos absorbentes de energía que están hechos de materiales celulares sintéticos como poliestireno expandido (EPS) y polipropileno expandido (EPP) con la combinación de diferentes densidades dentro de diferentes almohadillas, absorbiendo la energía del impacto a través de la deformación permanente. Bajo carga de compresión,

los materiales celulares pueden sufrir una gran deformación por esfuerzo mientras mantienen su bajo, casi constante, su nivel de tensión hasta la densificación [66]. En el trabajo de Fernandes et al. [67], se emplea como referencia un casco de moto basado en EPS disponible en el mercado certificado por la norma europea R22.05 [68] (Figura 3.18). La idea era comparar los resultados de validación de cascos con EPS como lineal y con corcho aglomerado como liner. Las pruebas se realizaron con aglomerados de corcho AC199, AC216 y EC159 (AC - corcho aglomerado, EC - corcho expandido).

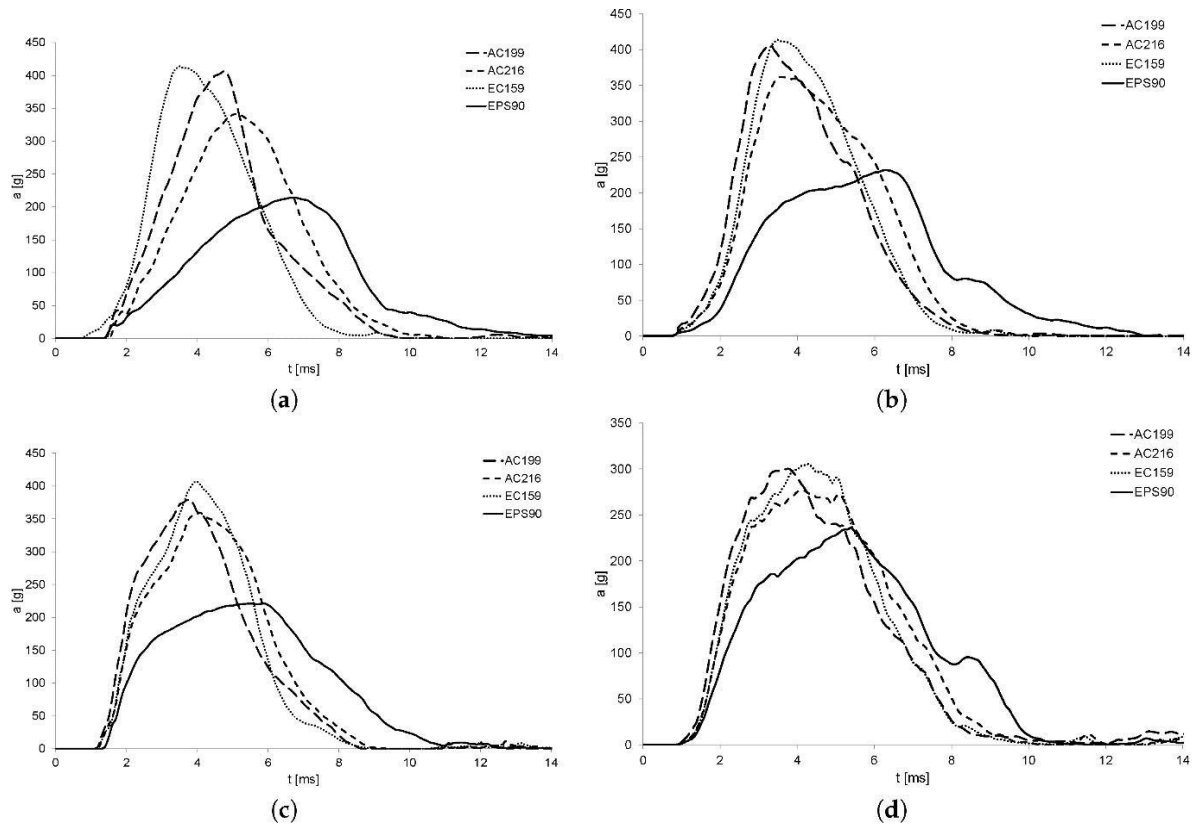


Figura 3.18 Aceleración medida en las condiciones de prueba COG - ECE 22.05 del simulador de cabeza: (a) Punto de impacto B. (b) Punto de impacto P. (c) Punto de impacto R. (d) Punto de impacto X adaptado de [67].

El aglomerado de corcho AC216 destacó frente a las otras configuraciones propuestas. Para las curvas de aceleración-tiempo investigadas, la característica de la curva es más ancha y tiene aceleraciones máximas más bajas. Además, AC216 fue el mejor material en cuanto a la respuesta a un segundo impacto, incluso mejor que EPS90. Además, AC216 tiene una mayor capacidad para soportar la energía del impacto. Por lo tanto, se cree que el casco utilizado en este análisis absorbe la energía con un espesor superior al necesario para AC216. El siguiente paso de la investigación fue modificar la geometría del revestimiento. Según los autores, el mejor caso fue un liner AC216 de 40 mm de espesor con orificios de 15 mm en un patrón circular caracterizado por un ángulo de 30 ° y una separación de

45 mm. Esto ayudó a reducir 0,907 kg de la estructura. La investigación se resumió colaborando con CMS, una empresa portuguesa de cascos. El producto se enriqueció con un revestimiento de corcho responsable de la absorción de energía (Figura 3.19).

La empresa portuguesa Nexx desarrolló un casco a base de corcho para disciplinas de invierno similar al CMS. La tecnología de absorción de energía se utiliza como parte de la amortiguación interior. La carcasa está formada por una carcasa de termoresina avanzada resistente a los impactos, un forro interior afelpado antisudor y antialérgico (que es extraíble) y una visera PC Lexan. Además, el productor ofrece un diseño de corcho [69].



Figura 3.19 Concepto de casco de motocicleta basado en corcho (izquierda) y casco con diseño de carcasa de corcho (derecha) [69].

3.3. Conclusiones

El corcho es una materia prima natural notable con una combinación única de propiedades de refuerzo sinérgicas. Es adecuado para diversas aplicaciones, desde los típicos tapones de botellas hasta los sofisticados escudos de aislamiento térmico para motores y tanques de cohetes. El objetivo del módulo era presentar de una manera técnicamente creíble cómo las diversas propiedades del material de corcho crean e impulsan el sector de la producción de corcho. En el módulo, se presentó el conocimiento sobre la combinación característica de las propiedades del corcho, lo que condujo a ciertas aplicaciones del material de corcho. Comenzando con la caracterización del corcho con respecto a otros materiales y subrayando sus ventajas/desventajas, el lector tendrá conocimiento sobre la correcta aplicación del corcho de acuerdo con los requisitos del mundo real y, en particular, un caso de estudio: un frontal original basado en corcho, un sistema de protección para un SUV. Las capacidades de absorción de energía del núcleo con corcho pueden reducir las lesiones sufridas por un peatón durante un accidente. En este módulo, presentamos al lector un conjunto de propiedades que hacen del corcho un material único y excepcional. Además, el capítulo ofrece una explicación basada en ejemplos de por qué el corcho es la elección correcta en el proceso de selección de materiales para la aplicación presentada.

El corcho es una materia prima natural notable con una combinación única de propiedades de refuerzo

sinérgicas. Es adecuado para diversas aplicaciones, desde los típicos tapones de botellas hasta los sofisticados escudos de aislamiento térmico para motores y tanques de cohetes. El conocimiento de la ingeniería moderna de materiales permite la expansión continua del área de aplicación del corcho y sus compuestos, y también continúa la investigación sobre aplicaciones innovadoras con corcho. El corcho es un precioso regalo de la naturaleza que debe tratarse con respeto y utilizarse de la forma más amplia posible, de forma sostenible y ecológica.

Referencias

- [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., Düggelein, 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., Desmanson, 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] I cork case. Available: 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] Klusak M., Grygny, S. (2017). The Application of Composite With Cork Core For Cabs and

- [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] Farag, 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/Interdyscyplinarnosc_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 przebicia 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 ImpactEngineering*, 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
- [69] Cork motorcycle helmet (2015). Available: <http://lumberjac.com/2015/02/nexx-x60-cork-motorcycle-helmet/>

CAPÍTULO 4

Fabricación e implementación de compuestos a base de corcho en la aviación

*Bronius Merkys*¹, *Justas Nugaras*^{2,*}, *Mykola Karpenko*³, *Andrius Dubovas*¹

¹ Instituto de Aviación Antanas Gustaitis, Universidad Técnica de Vilnius Gediminas, Vilnius, Lituania

² Facultad de Industrias Creativas, Universidad Técnica de Vilnius Gediminas, Vilnius, Lituania

³ Facultad de Ingeniería de Transporte, Universidad Técnica de Vilnius Gediminas, Vilnius, Lituania

*Correspondencia: justas.nugaras@vilniustech.lt

Resumen

Es vital examinar las propiedades positivas y negativas más significativas de los compuestos a base de corcho para determinar el uso de estos elementos en la aviación y su implementación racional en los elementos estructurales. Esta investigación proporciona un enfoque más amplio de los procesos de fabricación de materiales de corcho y las áreas de aplicación de los mismos en estructuras sándwich a base de corcho en la aeronáutica. En este capítulo se presentan las aplicaciones de compuestos de corcho para juntas y otros materiales de sellado. Para comprender más acerca de las características del material, se realizaron los dos principales enfoques de prueba: vibración y flexión. Los resultados de las pruebas de vibración realizadas sugieren la posibilidad de sustituir la espuma de polimetacrilimida por un material renovable a base de corcho en estructuras compuestas laminadas. La prueba se realizó empleando el análisis modal, comparando así las características de amortiguación de vibraciones del material. Como se pudo ver a partir de los resultados de la prueba de flexión obtenidos, el material con la tasa de resistencia más alta estaba compuesto por los gránulos de corcho más grandes. La fuerza de resistencia fue tres veces mayor que el material compuesto con relleno de espuma de polimetacrilimida. La integración de materiales renovables como el corcho en los compuestos estructurados en sándwich permite implementar y buscar el mayor nivel de sostenibilidad en la industria de la aviación.

Palabras clave: Corcho, *composites* estructurados en sándwich, materiales de sellado, ensayos de vibración y flexión.

4.1. Una descripción general de los compuestos estructurados en sándwich a base de corcho

4.1.1. Definición y tipos de compuestos estructurados en sándwich

Los compuestos estructurados en sándwich fabricados con varias capas de diferentes materiales unidos son ampliamente utilizados en aeronáutica donde se requieren estructuras ligeras y rígidas [1]. Los compuestos estructurados en sándwich, en los que se unen dos láminas frontales al núcleo, se usan más comúnmente en aeronáutica.[2] (Figura 4.1).

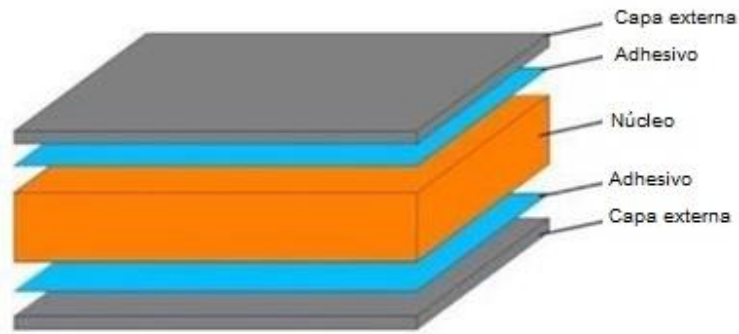


Figura 4.1 Un compuesto estructurado en sándwich [3].

Tal estructura permite características de alta rigidez mientras mantiene una masa baja.

Los compuestos estructurados en sándwich se pueden fabricar a partir de múltiples capas, con dos o incluso más capas centrales entre las que se ubican las láminas frontales [4]. Por ejemplo, los paneles sándwich multicapa utilizados en la construcción constan de dos láminas frontales (Figura 4.2). Estas capas están separadas por una capa de doble núcleo separada por una capa adicional.

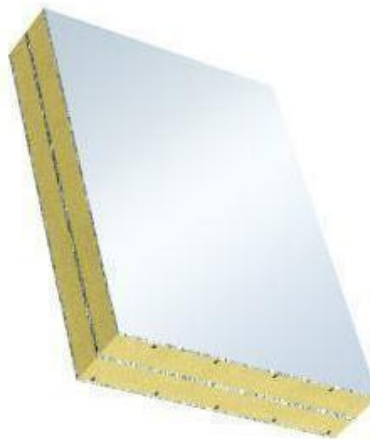


Figura 4.2 Un panel de construcción multicapa fabricado con tres hojas de metal [5] . Dos capas de núcleo están intercaladas entre capas metálicas.

Tales estructuras multicapa con un núcleo a base de corcho y capas de materiales compuestos, madera o metal podrían usarse como paneles decorativos que tienen propiedades ecológicas y de buen aislamiento acústico. Aunque una estructura multicapa, en cierta medida, difiere de una estructura sándwich, sus propiedades de fabricación e implementación son idénticas. Por lo tanto el presente documento se centrará únicamente en los compuestos con estructura de sándwich, observando las diferencias tecnológicas o estructurales de las estructuras multicapa.

4.1.2. *Propiedades, ventajas y desventajas más relevantes en aeronáutica de los composites estructurados en sándwich a base de corcho*

Para definir los compuestos a base de corcho natural utilizados en la aeronáutica y los elementos estructurales más racionalmente utilizados, es fundamental examinar las propiedades positivas y negativas más significativas de estos compuestos.

Las ventajas de los composites a base de corcho natural:

- A. La ventaja más convincente de este compuesto es que es respetuoso con el medio ambiente y fácilmente reciclable [6] . Es una cualidad relevante, especialmente hoy en día, ya que se presta más atención a los materiales que podrían utilizarse sin deteriorar el medio ambiente, o incluso con capacidad para reciclarse o reutilizarse. Es una característica realmente relevante para la aeronáutica, ya que la mayoría de los materiales compuestos que se utilizan actualmente en este campo son complicados de desechar o reciclar para su reutilización.
- B. Debido a su suavidad y elasticidad, los compuestos estructurados en sándwich a base de corcho tienen buenas propiedades de amortiguación del ruido y las vibraciones [7] .
- C. A pesar de la naturaleza orgánica de los materiales estructurados en sándwich a base de corcho, cuentan con un alto nivel de resistencia al fuego, la cual es otra propiedad digna de mención [8] y que los hace adecuados para el acabado interior de cabinas de aviones y planeadores.
- D. Los compuestos a base de corcho tienen propiedades estéticas y son agradables al tacto. Esta propiedad se tiene en cuenta a la hora de aplicarla como acabados interiores [9] . Además, estos materiales podrían decorarse con varios patrones transfiriéndoles imágenes en su superficie mediante el uso de tecnologías modernas (por ejemplo, grabado con láser).



Figura 4.3 Paneles a base de corcho decorados con láser [10].

Al aplicar la técnica de corte por láser, los paneles compuestos a base de corcho podrían cortarse con patrones definidos. Dichos elementos cortados podrían usarse para la decoración interior de la cabina de la aeronave (Figs. 4.3 y 4.4).



Figura 4.4 Un corte láser a través de paneles compuestos a base de corcho [11], [12].

- E. Estos compuestos son resistentes a la humedad y no absorben agua.
- F. Los compuestos a base de corcho tienen buenas propiedades de aislamiento térmico [13].
- G. Los compuestos a base de corcho se mecanizan fácilmente con métodos convencionales en el proceso de fabricación de maquinaria en general (Figura 4.5).

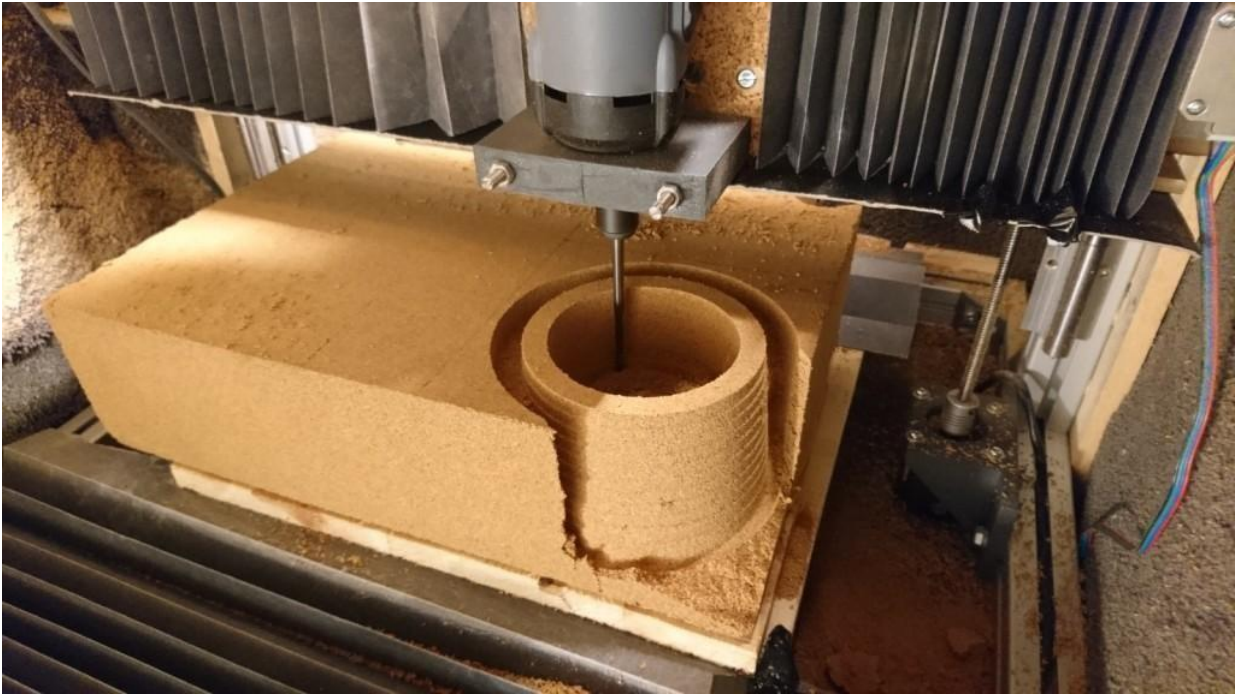


Figura 4.5 Fresado de corcho con fresa de dedos [14].

Desventajas de los materiales compuestos a base de corcho:

- A. Como la mayoría de los demás materiales naturales, los compuestos a base de corcho tienen propiedades mecánicas sensibles. No siempre son del todo homogéneos ya que el corcho depende de las condiciones de crecimiento y del clima. La parte exterior de la corteza del alcornoque es quebradiza y leñosa y se caracteriza por una alta densidad. La densidad de la corteza disminuye a medida que se acerca al tronco y gana elasticidad. Por lo tanto, la densidad de la corteza oscila entre 60 kg/m^3 y 250 kg/m^3 — la elasticidad y la dureza de la corteza cambian en consecuencia [15] .

Esta desventaja representa un obstáculo para la aplicación de estos materiales en estructuras aeronáuticas, ya que la estabilidad de la resistencia mecánica es una condición esencial para asegurar la resistencia estática, la resistencia a la fatiga y propiedades tecnológicas. Este obstáculo podría superarse triturando la corteza de corcho en pequeños gránulos y mezclándolos.

- B. La naturaleza orgánica de los materiales compuestos a base de corcho determina su baja resistencia al moho y otros daños causados por hongos [16] . Existe el riesgo de que puedan ser un medio para que los insectos se alimenten y reproduzcan.
- C. En la aeronáutica se utilizan muchos tipos de disolventes, limpiadores y otros productos químicos. Su efecto sobre los materiales compuestos a base de corcho aún no se ha examinado suficientemente.

4.1.3. *Áreas de aplicación aeronáutica de los compuestos estructurados en sándwich*

Siguiendo las ventajas y desventajas definidas de los materiales compuestos a base de corcho natural, es posible estimar qué elementos estructurales de aeronaves podrían fabricarse utilizando compuestos estructurados en sándwich o multicapa.

Pequeñas cargas aerodinámicas y de inercia masiva afectan las puntas de las alas, los carenados y los huecos de las ruedas del tren de rodaje de los ultraligeros, ligeros y planeadores [17]. Estos elementos estructurales no tienen un efecto determinante en las características de resistencia o fatiga cíclica de estas aeronaves. Por lo general, tienen varias capas o tienen una estructura de sándwich.

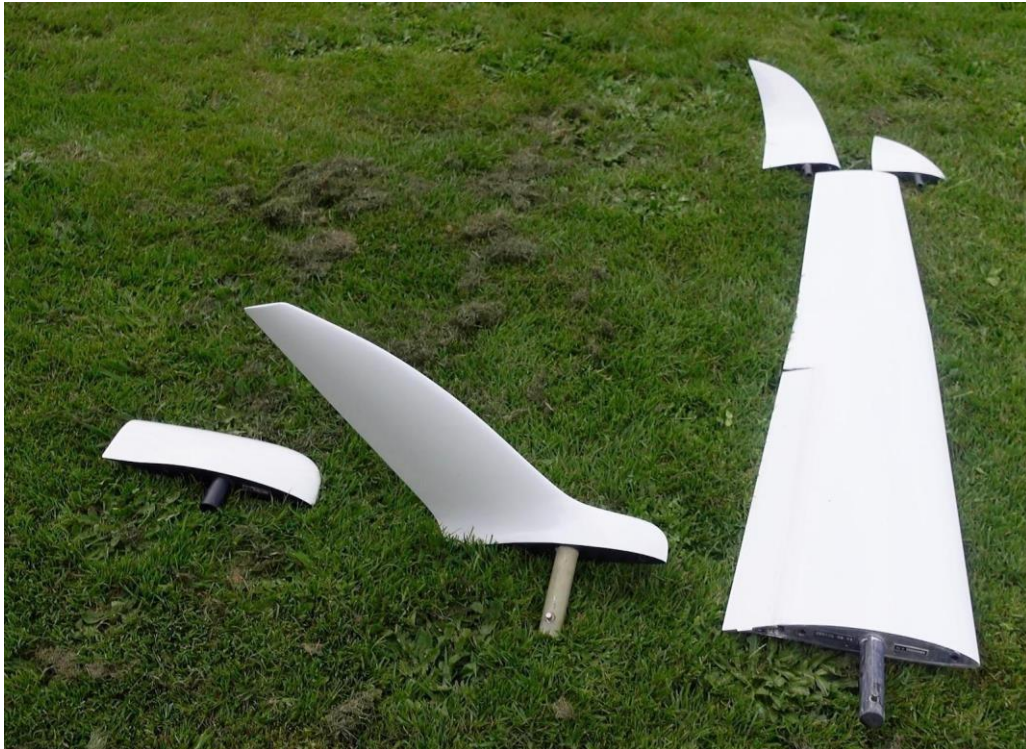


Figura 4.6 La parte del ala del planeador con cuatro tipos de alerones [18].

Al diseñar tales elementos estructurales, es suficiente analizar si los rellenos de nido de abeja o espuma podrían reemplazarse con materiales a base de corcho. Probablemente, la aplicación de estos materiales no tendrá un efecto adverso sobre la masa de la estructura. Sin embargo, reducirá considerablemente el impacto ambiental cuando estos elementos estructurales dejen de ser adecuados para su uso y se destinen a su disposición final. Por ejemplo, las puntas de las alas de los planeadores (winglets) son fácilmente extraíbles y reemplazables, y a menudo se dañan cuando aterrizan en áreas al aire libre. Además, el mercado ofrece varios winglets adaptados específicamente para diversas condiciones de vuelo [19]. Por lo tanto, los planeadores usan varios tipos de alerones (Figura 4.6) o se ven obligados a cambiarlos en caso de daños. Estos elementos son complejos de utilizar de forma respetuosa con el medio ambiente. La aplicación de materiales a base de corcho representaría una solución parcial a este problema.



Figura 4.7 . Un planeador motorizado [20]. Se puede ver un compartimento de motor abierto en la parte superior de su fuselaje, mientras que se puede observar un espacio para las ruedas del tren de aterrizaje en la parte inferior del fuselaje. Estos elementos estructurales podrían fabricarse utilizando materiales compuestos estructurados en sándwich a base de corcho.

El relleno a base de corcho es un buen material para fabricar maquetas de aviones o pequeños vehículos aéreos no tripulados. Ellos requieren materiales ligeros y la elasticidad del corcho puede evitar los daños típicos de este tipo de aeronaves cuando aterrizan.

Sería posible fabricar pasos de rueda de tren de aterrizaje con estructura sándwich o puertas de compartimiento de motor replegadas a partir de láminas de aleación de aluminio de dos capas, rellenando el espacio entre ellas con material a base de corcho (Figura 4.7). Así, se podría obtener una estructura ligera y resistente, y todos los componentes (láminas de aluminio y materiales a base de corcho) serían reciclables.

Las mamparas suelen instalarse dentro de los fuselajes de las aeronaves de clase ejecutiva, separando la cabina de pasajeros de la cabina y asegurando una separación para espacios aislados. Estas mamparas suelen estar decoradas con madera (Figura 4.8).



Figura 4.8 El fuselaje de un avión de clase ejecutiva [21]. Se aprecia una mampara decorada con madera en la parte trasera de la aeronave. En el lado izquierdo de la foto está instalada una mesa plegable entre las sillas.



Figura 4.9 . Panel con estructura tipo sándwich relleno con aglomerado de corcho y láminas de madera adheridas a ambos lados externos [22].

Dichas mamparas deben ser livianas, resistentes al fuego y tener propiedades sonoreductoras y de aislamiento térmico. Es suficiente fabricar estas mamparas con paneles sándwich de madera, donde el relleno interior se fabrica con material a base de corcho (Figura 4.9).

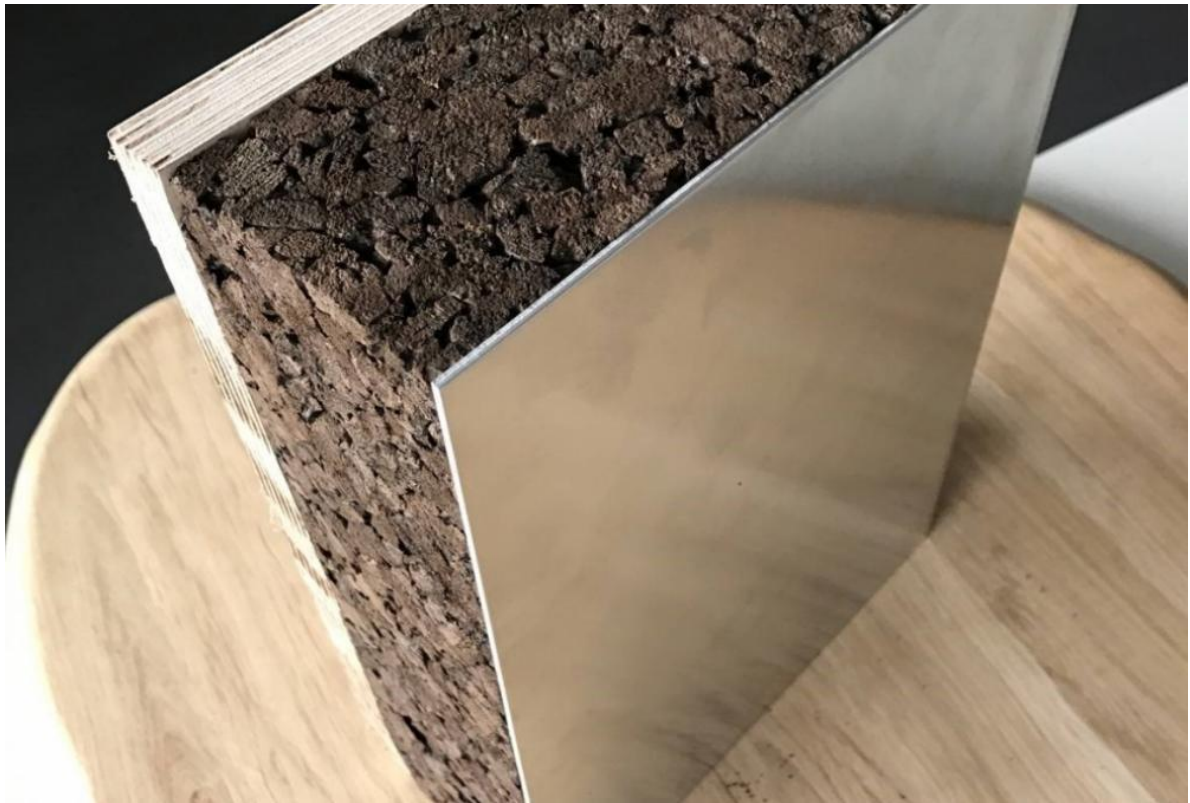


Figura 4.10 Panel con estructura tipo sándwich [23]. Un lado está cubierto con madera contrachapada, el otro con una lámina de metal. El relleno interior está hecho de material de corcho granulado.

El exterior de las mamparas podría cubrirse con láminas de metal o plástico. La capa de madera se puede aplicar a un solo lado. Por lo tanto, la mampara se adapta rápidamente al diseño interior de la cabina y a los requisitos específicos de los compartimentos de aviones separados. Por ejemplo, si hay un compartimento justo detrás de la cabina de pasajeros, la mampara podría ser de madera por un lado, mientras que el otro podría estar cubierto con láminas de metal o plástico (Figura 4.10). En el lado de la madera la mampara aporta una estética de lujo, mientras que el lado de metal del lado de la cocina es fácil de limpiar y es resistente a los daños mecánicos.

Tales mamparas aseguran un buen aislamiento acústico, tienen una apariencia masiva y se caracterizan por tener poca masa. Se podrían usar tales estructuras para fabricar muebles para aviones de clase ejecutiva. (Por ejemplo, la superficie de la mesa se muestra en la figura 4.8). Dada la premiumización del sector aeronáutico, es un subsector con alto potencial.

Las superficies de los mamparas y del mobiliario podrían cubrirse con capas de material a base de corcho específicamente decoradas. Como los materiales a base de corcho son fáciles de tratar aplicando varios métodos, es posible obtener superficies que iluminan el interior.



Figura 4.11 La superficie de la puerta del armario está cubierta con material a base de corcho estampado [24].

La figura 4.11 muestra una puerta de armario decorada con una capa de material a base de corcho con motivos geométricos. Las formas contemporáneas de tratar los materiales ofrecen una amplia gama de opciones de decoración de superficies. También se pueden utilizar para interiores de aviones de clase ejecutiva.

Con el objetivo de mejorar las propiedades de aislamiento acústico, es suficiente aplicar rellenos de varias capas a base de corcho, cuyas capas podrían fabricarse a partir de varios materiales densos a base de corcho [25]. Tales hojas suprimen efectivamente el sonido en un amplio rango de frecuencia. La reducción del ruido en la cabina del avión de clase ejecutiva podría lograrse cubriendo las superficies decorativas de la cabina con paneles de material a base de corcho. Podrían ser lo suficientemente delgados y compilados a partir de varias capas diferentes de materiales de corcho de diferentes densidades. Por tanto, el peso de los paneles decorativos aumentaría; sin embargo, se reduciría el ruido generado por el aire que ingresa a la aeronave y al sistema de ventilación de la cabina.

Los materiales suaves, agradables al tacto y “cálidos” a base de corcho también son adecuados para fabricar palancas manuales para paneles de control de aeronaves (Figura 4.12).



A

B

Figura 4.12 Palancas manuales fabricadas con material a base de corcho A - Palanca manual fabricada con corcho granulado [26]

B - Una palanca de mano hecha de corcho macizo.

Tales palancas manuales se han utilizado en aviones ligeros durante mucho tiempo. Pueden fabricarse a partir de gránulos a base de corcho prensados en caliente (Figura 4.12A) o procesando mecánicamente material macizo a base de corcho (Figura 4.12B).

Al combinar materiales a base de corcho con capas de goma de varias elasticidades, se obtienen láminas amortiguadoras antivibratorias efectivas (Figura 4.13). Las láminas pueden ser planas o con doble curvatura. Son eficaces a la hora de fijar los asientos de piloto y pasajero en avionetas u otros elementos estructurales de la cabina, reduciendo así las vibraciones que les transmiten los motores y las hélices.



Figura 4.13 Una lámina antivibratoria con un núcleo a base de corcho cubierto con una goma porosa [27].

4.2. Métodos de fabricación de compuestos estructurados en sándwich a base de corcho

Al revisar los métodos de fabricación de compuestos estructurados en sándwich a base de corcho, es importante tener en cuenta las propiedades geométricas de tales estructuras. Es vital distinguir entre paneles sándwich planos y elementos sándwich de superficies de curva simple o doble curva.

4.2.1. Métodos de Fabricación de Paneles Sándwich Planos

4.2.1.1. Fabricación de Paneles Sándwich Planos bajo Compresión Mecánica

Al aplicar compresión mecánica para los paneles con estructura tipo sándwich, la mejor opción son los paneles planos con láminas frontales que consisten en láminas prefabricadas de metal, madera, plástico u otros materiales (Figura 4.14). También se pueden utilizar láminas compuestas de vidrio, carbono o plástico polimerizado reforzado con otras fibras. Para el proceso de fabricación se necesita una superficie lisa y sólida de dimensiones suficientes y la capacidad de comprimir el panel.

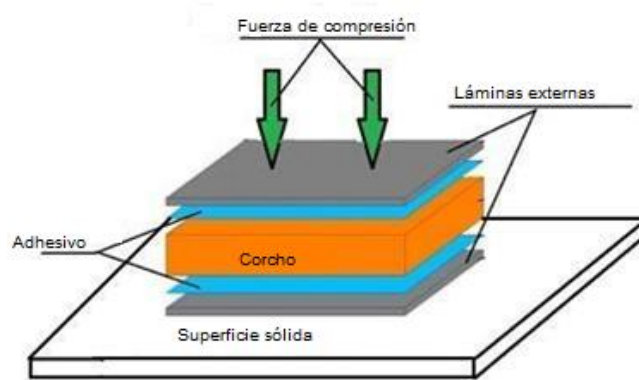


Figura 4.14 Diagrama esquemático del proceso de fabricación de un panel plano estructurado en sándwich.

Se coloca una lámina frontal con un recubrimiento adhesivo sobre la superficie. Luego, se coloca un núcleo a base de corcho, se aplica el adhesivo y se cubre la estructura con otra lámina frontal. El panel se comprime, y después de que el adhesivo haya endurecido o polimerizado, se obtiene un panel plano estructurado en sándwich, que se debe cortar según el contorno requerido.

Cualquier equipo de compresión mecánica (una prensa, un compresor especializado y otros) puede usarse para comprimir el panel. Los paneles pequeños podrían comprimirse con objetos pesados. Para distribuir uniformemente la fuerza de compresión se utilizan sacos rellenos de arena o de cualquier otro material suelto y relativamente pesado. Es muy recomendable aplicar fuerza de compresión desde arriba mediante una superficie amplia para una compresión uniforme del panel. Es muy conveniente usar adhesivo de película para fabricar dichos paneles. No solo simplifica el proceso de fabricación, sino que también lo hace más conveniente y "limpio". Es fundamental asegurarse de que no se formen cavidades de aire en la capa adhesiva al aplicar el adhesivo líquido, ya que podría dañar el aspecto externo del panel o incluso provocar un desprendimiento parcial de las capas debido al cambio de temperatura. También es necesario asegurarse de que no haya una sobrecompresión localizada, que se evita aplicando una fuerza de compresión mediante placas en ambos lados. El relleno a base de corcho no es ni duro ni sólido. Por tanto, es fundamental controlar la fuerza de compresión, especialmente cuando se fabrican paneles de pequeñas dimensiones.

4.2.1.2. Fabricación de Paneles Estructurados en Sándwich bajo Compresión al Vacío

Es conveniente utilizar vacío para la compresión en el proceso de fabricación de paneles estructurados en sándwich a base de corcho. De esta forma se obtiene una compresión uniformemente distribuida y no excesiva, y también es más fácil evitar la formación de burbujas de aire en las capas adhesivas. El proceso de fabricación de dichos paneles se muestra en la Figura 4.15.

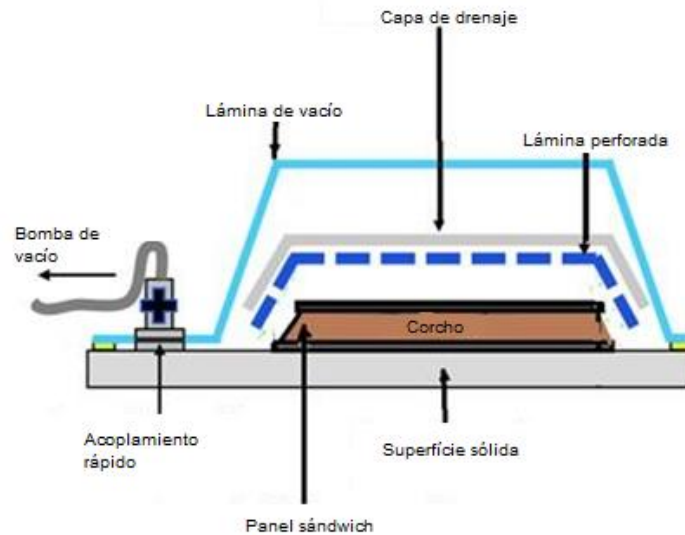


Figura 4.15 Diagrama esquemático del proceso de fabricación de paneles planos estructurados en sándwich con núcleo a base de corcho bajo compresión al vacío.

Los paneles se fabrican de la siguiente manera:

1. Se coloca una lámina frontal sobre una superficie sólida suficientemente lisa de dimensiones suficientes. Suponemos que se utiliza un adhesivo líquido en el proceso de fabricación de un panel con estructura tipo sándwich. En ese caso, es obligatorio cubrir previamente el panel con una capa antiadherente (normalmente con compuestos a base de silicona) para evitar que el desprendimiento de cola se pegue a la placa de proceso de fabricación.
2. La lámina frontal se cubre con adhesivo y se coloca el núcleo a base de corcho.
3. La hoja frontal superior está cubierta con adhesivo.
4. Sobre la capa adhesiva, se coloca otra lámina frontal.
5. Todo está recubierto con una lámina perforada especial. La lámina perforada se aplica solo cuando las capas del panel se pegan con adhesivo. Si se utiliza la película adhesiva, no es obligatorio aplicar la lámina perforada. Por lo tanto, la capa de película adhesiva no es gruesa y no sobresale de los bordes del panel cuando se comprime.

6. La lámina perforada está recubierta con un material permeable al aire. Es una capa de drenaje que evita la formación de burbujas de aire internas entre la lámina de vacío y la superficie del panel fabricado.
7. A una distancia de aproximadamente 50 - 150 mm de los bordes del panel en la placa de proceso de fabricación, se pega una cinta adhesiva especial alrededor de todo el panel fabricado y todo se cubre con una lámina de vacío. La lámina de vacío debe adherirse bien a la cinta adhesiva, ya que esto determinará si se obtendrá un vacío suficiente cuando se conecte la bomba de vacío.
8. Se hacen ranuras en la lámina de aspiración para un acoplamiento rápido con la inserción de la bomba de vacío, y se coloca el acoplamiento.
9. Después de la verificación, la bolsa se conecta a la línea de vacío (bomba) a través de un acoplamiento rápido.
10. El vacío está encendido. En esta etapa, es fundamental producir lentamente un vacío debajo de la lámina aspirante controlando la estanqueidad y la formación de pliegues a lo largo del perímetro del panel fabricado.
11. El vacío se mantiene activado hasta que el adhesivo se seca o polimeriza.
12. A medida que el adhesivo se ha endurecido, se apaga el vacío y se retiran la lámina de vacío y la capa de drenaje. El panel se retira de la placa de proceso de fabricación y se corta según las dimensiones requeridas.

De esta forma, se fabrican paneles a base de corcho estructurados en sándwich de alta calidad sin aplicar compresión mecánica. Sin embargo, para este proceso se requiere una bomba de vacío y varios materiales auxiliares.

4.2.2. *Proceso de Fabricación de Paneles de Curva Simple o Doble*

La mayoría de los paneles con estructura tipo sándwich que se utilizan en la aeronáutica se fabrican a partir de superficies de una o dos curvas [28] . Dichos artículos se fabrican utilizando una tecnología ligeramente diferente a la de los paneles planos. Esta tecnología también se utiliza en el proceso de fabricación de artículos planos estructurados en sándwich cuando las láminas frontales están hechas de materiales compuestos reforzados con fibra, que se forman durante el proceso de fabricación de productos estructurados en sándwich [29] . Para la fabricación de estos productos es necesario un molde utilizado como superficie de contacto que forma la zona de trabajo. Por lo general, dichos paneles se fabrican en dos etapas. La primera etapa se muestra en la Figura 4.16.

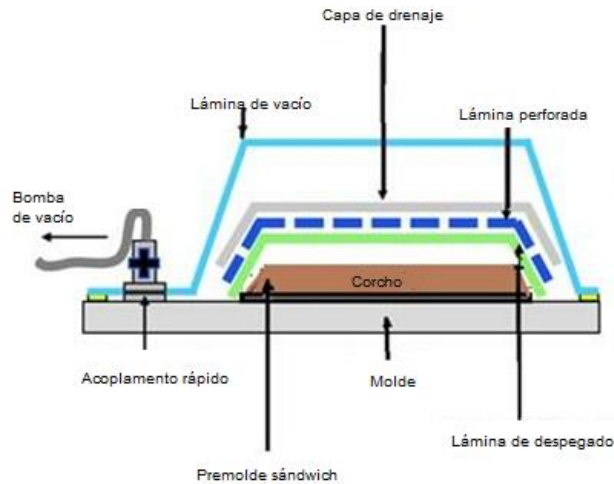


Figura 4.16 Diagrama esquemático de la primera etapa del proceso de fabricación de un panel estructurado en sándwich cuando se forma con materiales compuestos.

Analicemos el proceso de fabricación por etapas:

1. Antes del proceso de fabricación de la primera etapa, es vital realizar una inspección visual del molde, prestando especial atención a las superficies sobre las que se formará la lámina. Si es necesario, se pulen las imperfecciones menores del molde. En caso de daño severo, el molde se recubre y luego se pule.
2. El área de trabajo del molde se cubre con una capa antiadherente y luego se pule. Estas acciones se realizan siguiendo las instrucciones tecnológicas proporcionadas por el fabricante de la lámina.
3. Si el producto está pintado, la zona de trabajo del molde se cubre con una capa decorativa especial (Gelkaut).
4. Se aplica una cinta adhesiva especial alrededor de todo el perímetro del molde para sellar la lámina de vacío.
5. Después de que el Gelkaut se seque a un estado ligeramente pegajoso, se colocan las láminas frontales del compuesto, empapando cada una con resina. Al colocar las capas compuestas, es vital mantener la dirección del refuerzo especificada en la documentación tecnológica y de construcción.

6. El material del núcleo se coloca (material a base de corcho) a medida que se forman las capas. A la hora de colocar el material del núcleo (a veces el núcleo está formado por varias láminas, entonces es necesario hablar de láminas) y luego aspirar, es fundamental controlar que la lámina de este material ocupe la posición correcta en el molde y que no se mueva durante el proceso de aspiración. Este proceso requiere ciertas habilidades y una comprensión de cómo se deforma la superficie después de aplicar el vacío y comenzar a absorber el aire de la lámina aspiradora. Cabe señalar que cuando se fabrican las superficies doblemente curvadas en el molde, el radio del cambio de superficie es relativamente pequeño.
 7. En el premolde, se coloca una lámina de despegado especial que ayuda a absorber el exceso de resina y simplifica la preparación de superficies para la siguiente etapa de moldeo.
 8. Todo se cubre con una lámina perforada.
 9. Sobre la lámina perforada, se aplica una capa de drenaje. Evita la formación de burbujas de aire internas entre la lámina de vacío y la superficie del panel fabricado. Absorbe el exceso de resina que inevitablemente se produce con una tecnología de fabricación de este tipo.
 10. Un panel moldeado se cubre con una lámina de vacío. La lámina de vacío debe adherirse bien a la cinta adhesiva, ya que esto determinará si se obtendrá un vacío suficiente cuando se conecte la bomba de vacío.
 11. Se hacen ranuras estándar en la lámina de aspiración para un acoplamiento rápido con el inserto de la bomba de vacío, y se inserta el acoplamiento.
 12. Después de la verificación, la bolsa se conecta a la línea de vacío (bomba) a través de un acoplamiento rápido.
 13. El vacío está encendido. En esta etapa, es fundamental producir lentamente un vacío debajo de la lámina aspirante controlando la estanqueidad y la formación de pliegues a lo largo del perímetro del panel fabricado.
 14. El vacío se mantiene activado hasta que polimeriza el adhesivo.
 15. A medida que el adhesivo se ha endurecido, se apaga el vacío y se retiran la lámina de vacío, la capa de drenaje, la lámina perforada y la lámina de despegue.
- Luego de una inspección visual y el aseguramiento de que el producto cumple con los requisitos, se podría implementar la segunda etapa de fabricación.

La segunda etapa del proceso de fabricación consiste en moldear otra lámina frontal de una estructura tipo sándwich. La secuencia de las acciones de esta etapa es ligeramente diferente de las tomadas en la etapa uno. El diagrama esquemático de la segunda etapa se muestra en la Figura 4.17. A continuación se analiza con mayor detalle un proceso tecnológico de la segunda etapa.

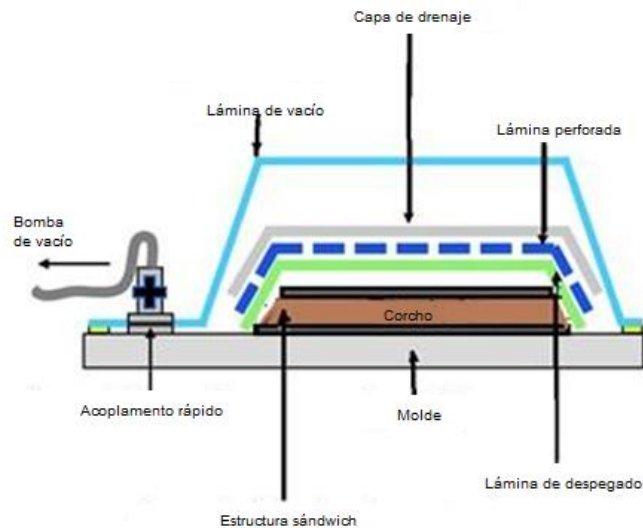


Figura 4.17. Diagrama esquemático de la segunda etapa del proceso de fabricación de un panel estructurado en sándwich, cuando se forma con materiales compuestos.

Antes de la implementación de la segunda etapa del proceso de fabricación de materiales compuestos estructurados en sándwich, después de la eliminación de la capa de despegue, las superficies se lijan ligeramente con papel de lija de grano 100 como mínimo. Se siguen los siguientes pasos:

1. Se colocan las capas que cubren el núcleo del compuesto. Cada capa está empapada en resina. Durante la primera etapa, al formar las capas mixtas, es fundamental mantener la dirección de refuerzo de las capas especificada en la documentación constructiva y tecnológica.
2. En una superficie formada, se coloca una capa de despegue especial. La capa despegable tiene la misma función que en la primera etapa.
3. Los siguientes pasos son idénticos a los pasos 8-12 del proceso anterior.
4. La superficie fabricada se retira del molde y se comprueba su calidad.
5. La superficie se corta de acuerdo con las dimensiones indicadas en el dibujo y, después de la verificación, está lista para su uso posterior.

4.2.3. Particularidades en el Montaje de Paneles Estructurados Sándwich

Los paneles estructurados en sándwich a base de corcho tienen varias particularidades constructivas. Uno de ellos es la complicada estructura de los puntos de anclaje. Esta particularidad es común a todos los materiales estructurados en sándwich basados en núcleos ligeros. Los materiales del núcleo son muy ligeros y tienen una tensión de contacto muy baja. Los materiales de la lámina frontal generalmente se caracterizan por tener buenas propiedades mecánicas (así como una tensión de contacto relativamente alta). Sin embargo, estos materiales son muy delgados. Es común sujetar varios conjuntos a elementos estructurados en sándwich. Por tanto, la recepción de cargas locales en este tipo de estructuras suele ser muy complicada y requiere soluciones estructurales únicas.

Puede haber varias opciones de anclaje. Cada uno de ellos utiliza un método de montaje específico.

4.2.3.1. Refuerzo de Paneles Estructurados en Sándwich en los Puntos de Anclaje de Otros Elementos Estructurales

Si un elemento estructural está expuesto a una carga mayor, debe unirse con la superficie de un panel sándwich o cualquier otra superficie estructurada en sándwich. En este caso, se necesita reemplazar el material del núcleo con un material más pesado de mejores propiedades mecánicas en el punto de montaje local. En la Figura 4.18 se muestra una ranura de una estructura tipo sándwich con dicho inserto.

Tal estructura se fabrica como una superficie ordinaria plana o de una sola curva o doble curva. En los puntos de montaje locales, se retira el material original del núcleo y se inserta otro material con mejores propiedades mecánicas. Para simplificar el proceso de fabricación, el inserto se puede formar en un rebaje en el núcleo, rellenándolo con resina mezclada con fibra de carbono u otros rellenos de resina especiales que mejoran las propiedades mecánicas.

Cuando se une otro elemento estructural sometido a cargas extremadamente bajas a un panel estructurado en sándwich, puede ser suficiente aumentar el espesor de la hoja frontal a la que se adhiere aplicando localmente más capas de material de refuerzo o simplemente adhiriendo con un parche de refuerzo más grande desde el exterior. El diagrama esquemático que representa dicho refuerzo se muestra en la Figura 4.19.

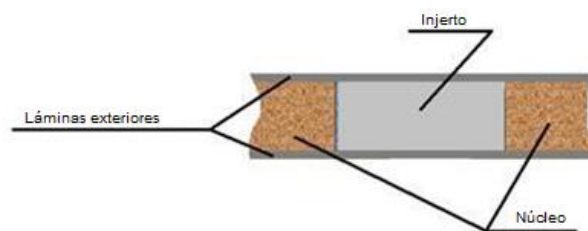


Figura 4.18 Una ranura de inserción en un panel estructurado en sándwich con un núcleo de corcho.

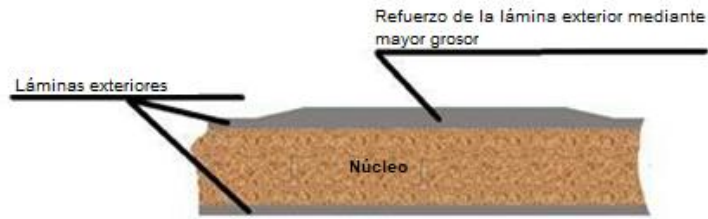


Figura 4.19 Diagrama de ranuras del refuerzo local externo del panel estructurado en sándwich.

4.2.3.2. Refuerzo de Paneles Estructurados en Sándwich en los Puntos de Montaje de Otros Elementos Estructurales cuando Estos Elementos Están Atornillados

Comúnmente, los paneles estructurados en sándwich u otros paneles se sujetan a otros ensamblajes que deben retirarse de vez en cuando. La mejor opción para eso son las uniones mediante tornillos. Sin embargo, en este punto, se pueden encontrar dos problemas:

- A. Con conexiones roscadas, es relativamente fácil sobrecargar el material del núcleo al apretar la tuerca roscada. Este problema se vuelve importante cuando el material del núcleo es a base de corcho. Tal núcleo tiene una alta tasa de elasticidad y es fácilmente deformable. Por lo tanto, cuando se aprieta el tornillo, es fácil romper el núcleo y dañar las láminas frontales.
- B. Bajo cargas más pesadas, los tornillos pueden arrancar un material del núcleo no reforzado en los puntos de montaje.

La solución a este problema es colocar los injertos en los lugares donde se instalarán los tornillos, como se muestra en la Figura 4.18. haciendo agujeros en esas cavidades.

El diagrama esquemático de dicho ensamblaje se muestra en la Figura 4.20.

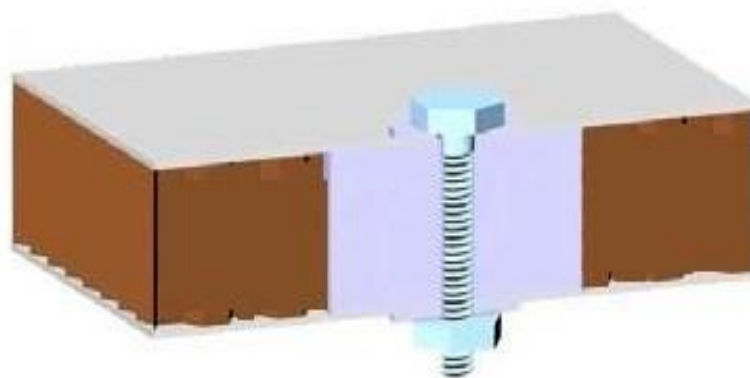


Figura 4.20. Una ranura en el injerto del panel con estructura sándwich para la conexión por tornillo [30].

Sin embargo, el injerto a veces no es suficiente. Es relativamente común que los puntos de montaje se vean afectados por cargas pesadas. La conexión roscada se debe desmontar y volver a montar fácilmente debido a requisitos operativos y de otro tipo [31]. A veces también hay requisitos para garantizar la hermeticidad de dicha conexión. Como es habitual en las estructuras aeronáuticas cerradas, el tornillo debe apretarse desde un lado sin utilizar una tuerca.

En tales casos, un injerto más grande se une con adhesivo en el núcleo y, después de perforar un orificio, se une con adhesivo un buje especial. El esquema de dicha conexión se muestra en la Figura 4.21. Los casquillos para aviones fabricados a medida certificados se utilizan principalmente en la aeronáutica (Figura 4.22). Los casquillos se pueden diseñar y fabricar a medida para puntos de conexión específicos si es necesario.

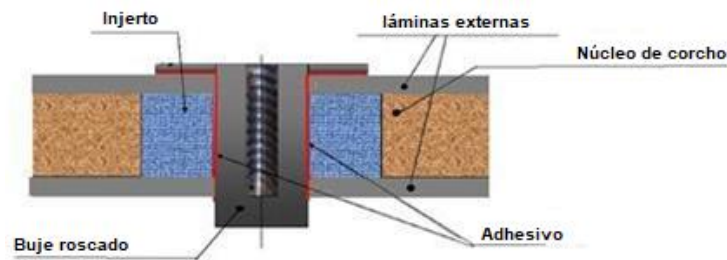


Figura 4.21 Casquillo roscado unido con adhesivo en una estructura tipo sándwich [32].



Figura 4.22 Muestras de bujes estándar de paneles con estructura sándwich [33].

4.2.4. Características de los cierres de borde de paneles estructurados en sándwich

Los bordes de los paneles con estructura tipo sándwich o multicapa deben sellarse. Hay que hacerlo para aislar el núcleo. Además, los cantos de los paneles suelen estar unidos a otros elementos estructurales. Sin embargo, los métodos de montaje mencionados anteriormente no podrían utilizarse en este caso.

Cuando los elementos estructurales se fabrican para ser utilizados en las estructuras afectadas por carga, el anclaje generalmente requiere un borde donde se unen las láminas frontales, y no hay material de núcleo entre ellas. La transición tiene que ser suave, sin cambios bruscos de rigidez. Por lo tanto, se crean las pendientes laterales del núcleo. El ángulo de la pendiente lateral debe ser lo más pequeño posible. Por lo general, es de 30 grados o incluso menos (Figura 4.23).

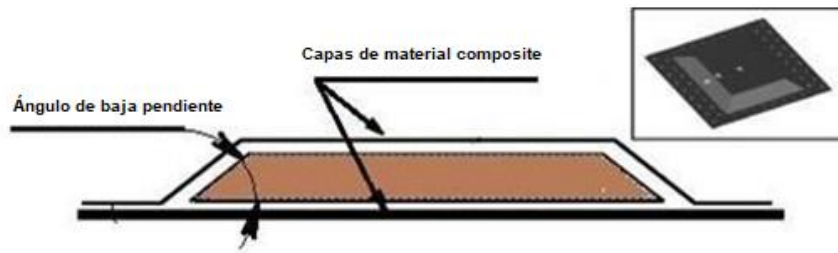


Figura 4.23. Cierres de cantos del panel estructurado en sándwich mediante la creación de pendientes laterales en el núcleo [34].

Cuanto menor sea el ángulo de inclinación, más suave será el cambio de rigidez en los bordes del panel. Se desea un ángulo de pendiente más pequeño cuando se fabrican los paneles utilizando los métodos de vacío mencionados anteriormente. En el caso de un ángulo de inclinación mayor (cerca de 90 grados) mientras se aspira el panel en el borde del núcleo, inevitablemente se forman zonas donde el vacío no comprime el panel compuesto. En consecuencia, aparecen defectos superficiales estéticos y la resistencia de los puntos de carga se deteriora significativamente.

A veces, un panel estructurado en sándwich con un núcleo a base de corcho debe sellarse cortándolo de forma pronunciada. En tal caso, el núcleo también podría mantenerse intacto. Por lo tanto, los paneles se sellan mediante la fabricación de varias mamparas para la cabina del avión. En tales casos, se utilizan los métodos de sellado del núcleo del panel con varios perfiles. El diagrama esquemático de estos métodos se muestra en la Figura 4.24.

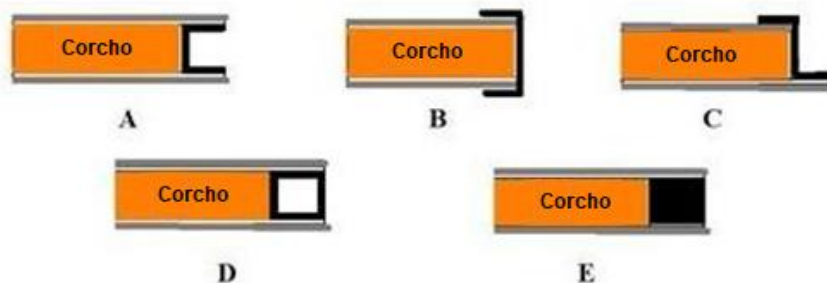


Figura 4.24 Métodos de sellado del panel estructurado tipo sándwich con núcleo a base de corcho cuando es necesario cortarlos en fuerte pendiente. A Perfil en forma de “U” en el interior de las láminas frontales; B Perfil en forma de “U” fuera de las caras; C Perfil en forma de “Z”; D Perfil hueco cerrado; E Barra sólida cuadrada o rectangular.

En todos estos casos de sellado de un panel estructurado en sándwich, los elementos de sellado (perfiles y varillas) se unen mediante adhesivo a las caras y al núcleo. Las conexiones con tornillos o remaches son menos comunes. Si los elementos de sellado deben ser invisibles desde el exterior, se usa el sellado con un perfil en forma de “U” en el interior de las caras (Figura 4.24A) o con un perfil

cerrado hueco o macizo (como se muestra en la Figura 4.24D y la Figura 4.24E).

A veces, un panel con estructura tipo sándwich debe "enmarcarse" en zonas específicas a lo largo del perímetro. A menudo se hace por razones estéticas, menos comúnmente debido a las características estructurales de las conexiones. En tales casos, las mejores opciones son utilizar los métodos de sellado que se muestran en la Figura 4.24B y la Figura 4.24C.

Analicemos el proceso de fabricación del sellado presentado en la Figura 4.24A. En primer lugar, el material del núcleo se retira mecánicamente de la zona en la que se prevé unir el perfil de sellado. Al completar este paso, es importante evitar dañar las láminas frontales del panel y no dejar residuos de núcleo en las áreas eliminadas. Las superficies internas de las láminas frontales están rectificadas y recubiertas con adhesivo. El perfil donde se colocará el adhesivo se limpia y se prepara para la unión de acuerdo con las instrucciones del adhesivo. Se inserta el perfil, se retira el exceso de adhesivo, y después de la compresión se deja el producto hasta que endurece el adhesivo. Tan pronto como el adhesivo se ha endurecido, se alivia la compresión y se elimina el exceso de adhesivo.

Cuando se trabaja en el interior de la cabina del avión, la conexión de paneles estructurados en sándwich de corte pronunciado suele ser vital. Para el sellado de los bordes, es racional utilizar este tipo de conexiones, que simplifican los perfiles más complejos.

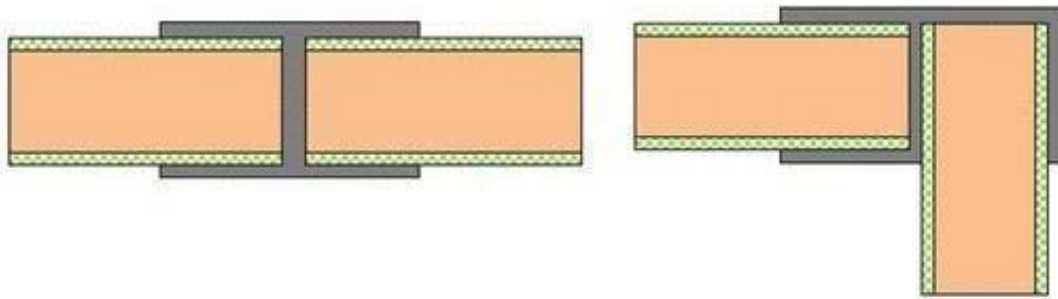


Figura 4.25 Conexión de paneles planos mediante perfiles sellando sus bordes.

La figura 4.25 muestra las conexiones para unir dos paneles planos con perfiles y opciones para sellar y unir elementos de los bordes del panel. Por lo tanto, se reduce la masa articular, se abarata la conexión y se obtiene la imagen estética.

4.3 Aplicaciones de composites de corcho para juntas y otros materiales de sellado

Las juntas se encuentran entre las aplicaciones más comunes y probadas para el material de corcho. La aplicación de composites de corcho por sus propiedades de sellado en la aviación está muy extendida y ha demostrado ser práctica. Las juntas hechas de composite de corcho se pueden usar con varios fluidos y gases en diferentes sistemas de aeronaves [35].

4.3.1 Fluidos más comunes utilizados en la industria aeroespacial

1. Gasolina (AVGAS 100LL):

AVGAS 100LL es el combustible estándar utilizado con la mayoría de los motores de pistón para aviones y helicópteros de hélice. *Avgas* es una gasolina convencional utilizada en la industria automotriz, solo con la adición de tetraetilo de plomo (TEL), que eleva el octanaje de la gasolina a 100. Además, el número de TEL agregado se reduce en comparación con AVGAS 100, de ahí el nombre: “Avgas 100LL (bajo contenido de plomo) [36].

2. Queroseno (combustible para aviones):

JET A-1 es el tipo de combustible de queroseno más ampliamente utilizado que se utiliza principalmente para motores a reacción para aviones y helicópteros [37]. Existen diferencias fundamentales cuando se compara el queroseno con la gasolina o el diesel, principalmente el punto de inflamación, la densidad de energía y la composición química. Los motores a reacción generalmente pueden funcionar con una variedad más amplia de combustibles, y generalmente utilizan combustible a base de queroseno al ser más económico.

3. Aceite de motor:

Se utilizan varios aceites de motor según el tipo de motor y sus características. Los aceites más utilizados para motores de pistón de cuatro tiempos para aeronaves de hélice son los aceites minerales descritos en SAE J-1966, como Aeroshell 80 (para temperaturas entre -17 °C y 21 °C), y los aceites semisintéticos descritos en SAE J-1899, como Aeroshell W15W50 y equivalente.

Los motores a reacción suelen utilizar aceites más diluidos debido a la mayor rotación del motor. El estándar más utilizado: MIL-PRF-23699F, Eastman Turbo Oil 2380 es uno de los ejemplos.

4. Fluido hidráulico

El propósito principal de este tipo de fluido es transferir energía (en forma de presión) de un lugar a otro. Debido a esto, el fluido normalmente no se consume en el proceso de operación. Sin embargo, los requisitos para las propiedades del fluido hidráulico son increíblemente altos. Por ejemplo, la presión de funcionamiento estándar para los sistemas hidráulicos es de 3000 psi (206,8 bar) [38]. Otra característica esencial es el caudal, que puede llegar hasta los 3 litros por segundo en algunos sistemas de aeronaves. Esto requiere que el fluido hidráulico funcione a altas presiones y altos caudales mientras permanece líquido, preferiblemente manteniendo el flujo laminar, sin evaporarse y sin cambiar sus propiedades bajo un estrés inmenso, como lo indica el estándar SAE AS1241.

Todas estas propiedades se consiguen mezclando aceite mineral y diferentes elementos químicos, normalmente no divulgados por motivos comerciales. Sin embargo, en una organización estándar de mantenimiento y reparación de aeronaves, el fluido hidráulico se considera el fluido más erosivo y

químicamente agresivo utilizado en la aviación (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Presiones y temperaturas de funcionamiento estándar de los fluidos de aviación.

| Tipo de fluido | Temperatura de funcionamiento estándar | Presión de funcionamiento estándar |
|------------------------------------|--|------------------------------------|
| Gasolina (AVGAS 100 LL) | -58°C a 60°C | ≤ 1000 psi |
| Queroseno (JET-A1) | -47°C a 80°C | ≤ 1500 psi |
| Aceite de motor (motor de pistón) | -17°C a 82°C | ≤ 65 psi |
| Aceite de motor (motor a reacción) | -40°C a 350°C | ≤ 45 psi |
| Fluido hidráulico | -40°C a 100°C | ≤ 3000 psi |

4.3.2 Tecnologías de sellado de fluidos

Debido a las diferentes propiedades químicas y mecánicas requeridas para los materiales de sellado utilizados en aplicaciones aeroespaciales, se han desarrollado bastantes soluciones. La solución más común son las juntas de lámina, las juntas de material sólido, las juntas envolventes, las juntas de perfil Kamm y las juntas tóricas (Figura 4.26). Sin embargo, las tecnologías de sellado de composites de corcho y caucho solo han demostrado su eficacia en forma de juntas de láminas [39].



Figura 4.26 Juntas de lámina de corcho-caucho [40].

Las propiedades de las juntas de corcho-caucho dependen de algunos factores, como el tamaño del grano del corcho, la densidad, la composición química y la relación caucho-corcho (Tabla 4.2). El ajuste de estas características hace posible crear un compuesto con los parámetros necesarios para una aplicación específica. Sin embargo, no es razonable esperar la posibilidad de hacer un compuesto "perfecto" que funcione bien en todos los entornos que se encuentran en la industria aeroespacial. Diferentes fluidos, temperaturas y presiones afectarán al material compuesto de varias maneras; por lo tanto, se requiere un diseño único de junta de caucho y corcho para cada sistema.

Tabla 4.2 Compuestos de corcho/caucho y sus propiedades [41].

| Material | Descripción | Densidad (kg/m ³) | Dureza (Shore-A) | Compresibilidad% (400 psi) | Resistencia a la tracción (Mpa) | Resistencia a la temperatura (°C) |
|---------------|--|-------------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| TS2050 (D205) | Mezcla de corcho/SBR. Adecuado para todos los aceites y refrigerantes de motores y engranajes. | 830* | 60-80 | 15-35 | 2* | -30°C a 90°C |
| TS4600 (GT46) | Mezcla de corcho/SBR. Adecuado para todos los aceites de motor y engranajes. | >640 | 70* | 25-45 | >1.03* | -30°C a 110°C |
| TS1521 | Mezcla de corcho/SBR. Adecuado para la mayoría de los fluidos lubricantes. | 550-750 | 50-70 | 35-50 | >0.8 | -30°C a 110°C |
| TS1400 | Mezcla de corcho/NBR. Adecuado para combustibles, biocombustibles, aceites y refrigerantes | 1100* | 75-90 | 10-22 | >3.5 | -30°C a 125°C |
| TS7100 | Mezcla de corcho/NBR. Adecuado para combustibles, biocombustibles y aceites. | 900* | 60-75 | 20-45 | 2.5* | -30°C a 110°C |

Los *composites* de corcho y caucho tienen muchas ventajas, como la sostenibilidad y el uso de subproductos de la industria del corcho, como virutas y recortes de corcho, para producir productos aeroespaciales de alta calidad. El corcho tiene una excepcional resistencia a la temperatura, amortiguación de vibraciones y propiedades de sellado. Sin embargo el corcho podría no funcionar en un entorno de alta presión. Por lo tanto, generalmente no se usa en sistemas hidráulicos donde las presiones de operación superan los 3000 Psi [42]. Los materiales más comunes para el sellado de

sistemas hidráulicos siguen siendo puramente sintéticos, como caucho de etileno propileno dieno (EPDM) curado con peróxido, fluorocarbono o silicona [43] .

4.3.3 Aplicaciones aeroespaciales probadas en el tiempo

Durante la era inicial de la industria de la aviación, el primer avión tenía principalmente motores de pistón con hélices, y el material estándar para las juntas del motor y del sistema de combustible era el corcho (Figura 4.27). La tecnología de otros materiales sintéticos no estaba lo suficientemente avanzada como para reemplazarla. Con el paso del tiempo, nuevos materiales comenzaron a reemplazar al corcho en la fabricación de juntas. Sin embargo, a medida que la industria de la era moderna avanzaba hacia la sostenibilidad y el respeto por el medio ambiente, los ingenieros aeroespaciales volvieron la cabeza hacia las juntas de corcho. En esta ocasión se está implementando la tecnología avanzada de fabricación de compuestos de corcho con diferentes materiales, como caucho o silicona, para producir la junta con las propiedades deseadas.



Figura 4.27 Junta de corcho (izquierda) y junta de silicona (derecha) [44], [45].

Un factor más por el que la industria de la aviación utiliza tanto corcho para varios sistemas es que los cambios y la implementación de nuevas tecnologías en la aviación son mucho más lentos y conservadores en comparación con la industria automotriz. Aunque los primeros motores usados para automóviles y aviones usaban principalmente corcho como juntas, cuando aparecieron nuevos materiales, los ingenieros automotrices fueron mucho más rápidos para implementar los cambios. Mientras tanto, la industria de la aviación tarda mucho más en probar y certificar adecuadamente los nuevos diseños tecnológicos. Por lo tanto, no había prisa por reemplazar algo que funcionaba bien. Cuando los materiales de sellado sintéticos evolucionaron y se probaron lo suficientemente a fondo, la industria cambió a soluciones sostenibles. Por lo tanto, las aeronaves continúan usando estas juntas de efectividad probada con el tiempo para los sistemas de aceite y combustible.

4.4 Ensayos de Materiales Compuestos Estructurados en Sándwich con Rellenos de Corcho

4.4.1 Análisis de espectro de materiales compuestos estructurados en sándwich con rellenos de corcho

El propósito de los análisis: encontrar puntos de resonancia y evaluar/comparar una propiedad dinámica (amortiguación) de diferentes materiales de corcho laminado (comparación adicional con material de espuma de polimetacrilimida laminada).

Objetos para análisis: En los análisis actuales, se estaban investigando cuatro objetos diferentes (3 tipos de corcho y 1 tipo de materiales de espuma de polimetacrilimida) (Figura 4.28):



Figura 4.28 Objetos de investigación (1-3: material laminado de corcho; 4: materiales laminados de espuma de polimetacrilimida). La dimensión del objeto 30x30x3 mm para 1-3 objetos y ~ 25x30x3mm para el objeto 4.

Tipo de análisis: el análisis actual se basa en el análisis modal. El análisis modal estudia las propiedades dinámicas de los objetos mediante aplicación de vibraciones de diferentes frecuencias. El análisis modal ayuda a determinar las características de vibración (frecuencias naturales y formas modales) de una estructura o componente mecánico, mostrando el movimiento de diferentes partes de la estructura bajo condiciones de carga dinámica, como las debidas a la fuerza lateral generada por los actuadores electrostáticos [43] . Las frecuencias naturales y las formas de los modos son parámetros esenciales en el diseño de una estructura para condiciones de carga dinámica [46] .

El análisis modal se realiza mediante un análisis de espectro de vibración FFT (Fast Fourier Transform). El enfoque clave de esta investigación es encontrar resonancia y comparar una propiedad de amortiguamiento de un objeto investigado. Hay varios pasos a seguir como pautas para ayudar a lograr un análisis actual exitoso. A continuación se muestra una lista general de estos pasos:

1. Recopile datos de la medición: velocidad de la vibración del objeto bajo el impacto del impulso (excluyendo la vibración ambiental baja). Realice pruebas adicionales si se requieren más datos.
2. Realice un análisis de espectro FFT para cada objeto para comparar.
3. Analice los datos espectrales: evalúe los valores generales y las frecuencias específicas correspondientes al material del objeto.
4. Informe de los resultados obtenidos y compare las propiedades de amortiguamiento de los objetos.

4.4.2 Banco de Pruebas y Condiciones de Mediciones

Las presentes mediciones experimentales se realizaron para establecer los puntos de resonancia de los objetos de investigación para comparar su propiedad de amortiguamiento. Las mediciones se realizaron mediante un diseño de medición de dos muestras y se basaron en un método estadístico de una muestra con estimación de la incertidumbre en mediciones repetidas del procesamiento de datos.

El banco de pruebas para la investigación experimental se muestra en la Figura 4.29. Incluye una base de metal con protección de goma contra la influencia ambiental de baja frecuencia, objetos de investigación y un sistema de escaneo láser para medir la vibración de la superficie del objeto bajo la señal de impacto del martillo de impulso piezoeléctrico electrónico integrado (IEPE).

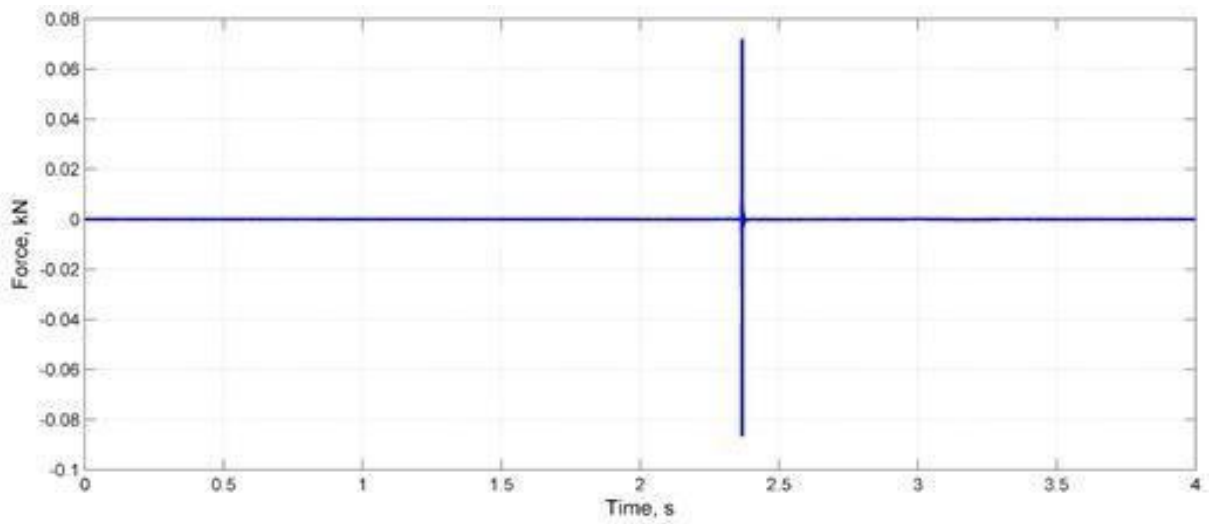
Las pruebas de medición incluyen la medición de la vibración de los objetos y la deformación de la superficie exterior (velocidad/desplazamiento) de los objetos debido al impacto con un martillo de impulso. El tiempo de uno medido por el cabezal del sensor PSV es firmemente de 4 segundos. Durante este tiempo, el martillo de impulso de IEPE genera un impulso en una base de metal con una fuerza que se muestra en la Figura 4.30a, y la cabeza del sensor PSV mide la velocidad en una base de metal, que se muestra en la Figura 4.30b, durante las pruebas.



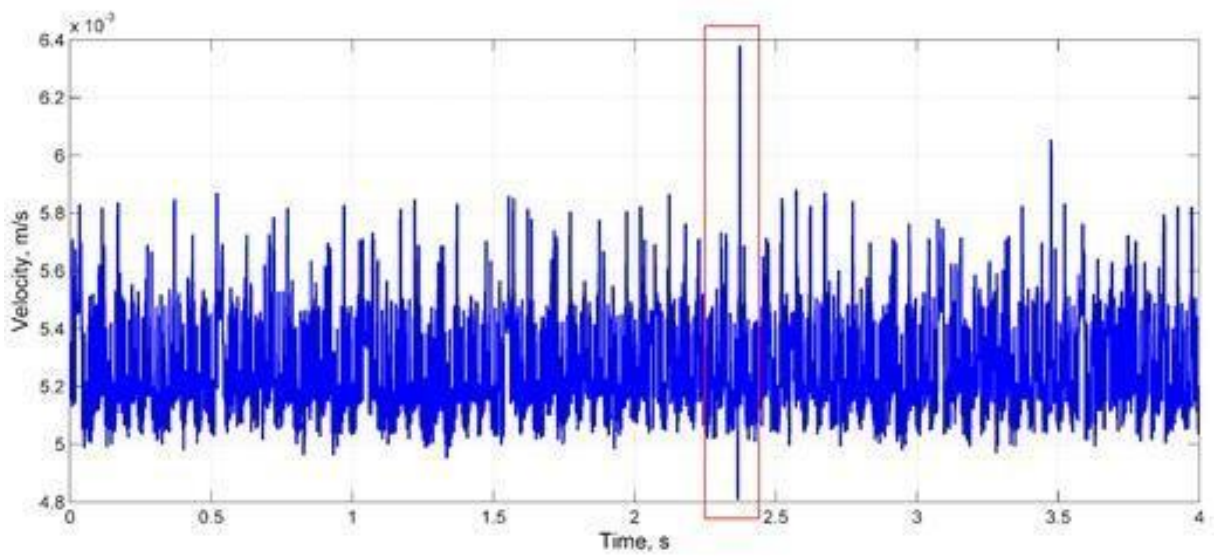
Figura 4.29 El banco de pruebas para medir [47].

Se aceptó la disminución durante las mediciones y se presentaron los promedios de varias mediciones. El principal resultado obtenido de las pruebas es la respuesta de frecuencia de los materiales basada en análisis de espectro utilizando el efecto Doppler para establecer mejor los puntos de resonancia y comparar la propiedad de amortiguamiento del material.

Sobre los objetos establecidos se creó una cuadrícula con 25 puntos creando una superficie cercana para medir (Figura 4.31a). Los puntos fueron escaneados por un láser, y se mide cuando escaneo llega a condiciones óptimas, lo que significa que una cuadrícula de puntos y foco de láser es óptimo para este tipo de material reflectante. Además, el dominio de la frecuencia incluye un ancho de banda de 1,6 kHz con una resolución de paso de 0,25 Hz (Figura 4.31b).

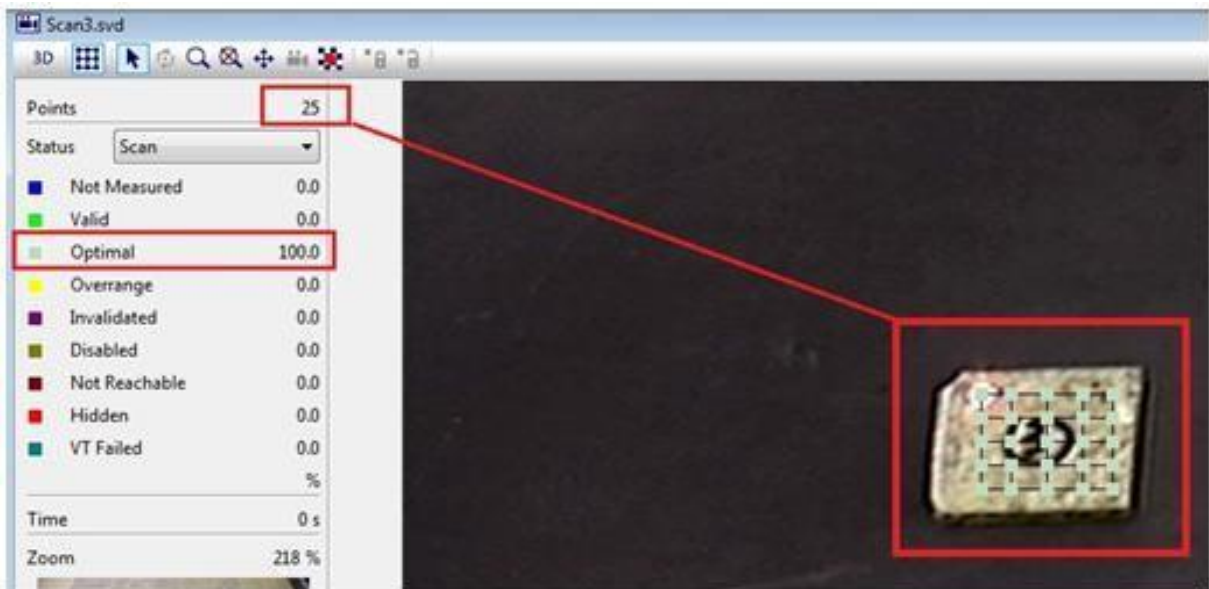


a)

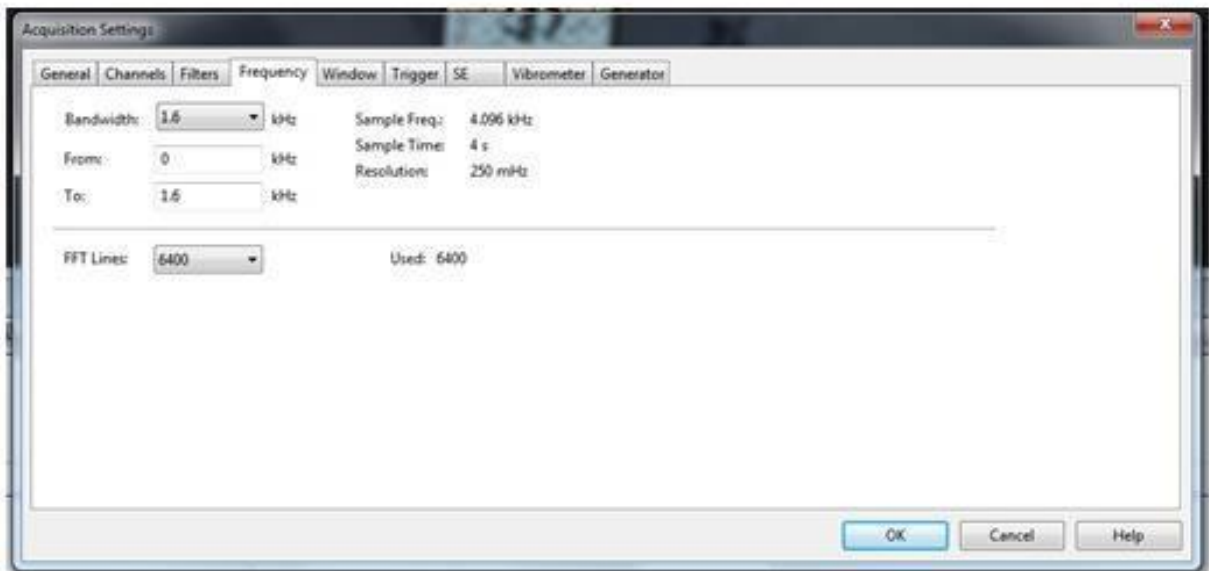


b)

Figura 4.30 Ejemplo de medición: a) señal del martillo de impulso del IEPE; b) medición de velocidad desde la cabeza del sensor PSV.



a)



b)

Figura 4.31 Configuración de medición: a) punto de medición; b) condición de frecuencia.

Esto significa que los resultados obtenidos del análisis de espectro serán de hasta 1600 Hz y se mostrarán cada 0,25 Hz (Figura 4.32).

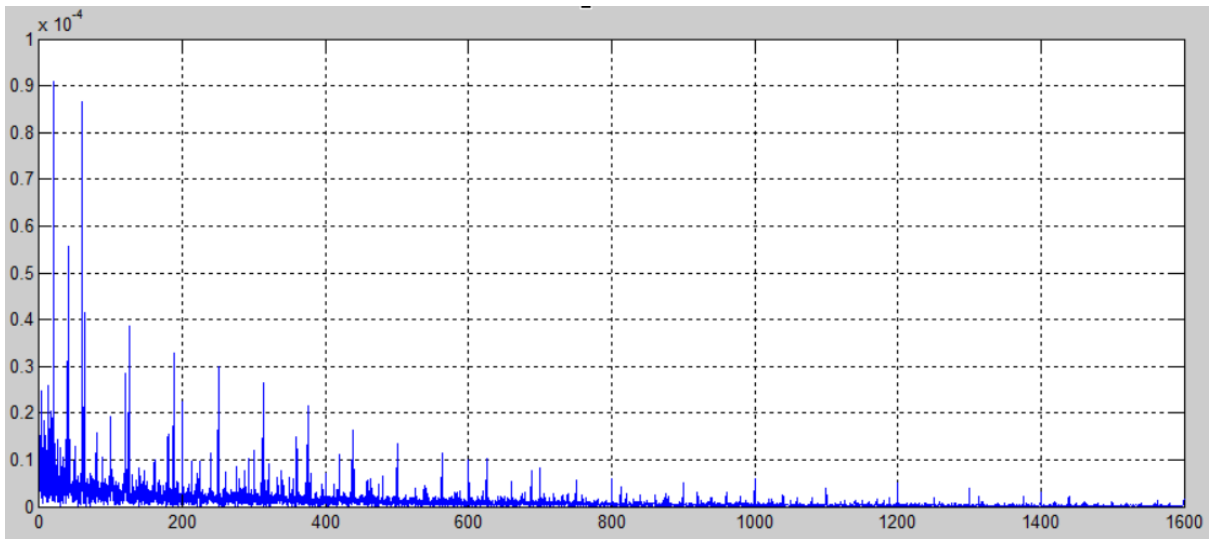


Figura 4.32 Los resultados obtenidos del análisis de espectro.

Los resultados de la medición por análisis modal se presentan a continuación (Figs. 4.33-4.37). Sin embargo, el principal interés para el análisis es el rango de frecuencias hasta 500 Hz ya que los principales modos resonantes se observaron en este rango de frecuencias. * *Nota: Los gráficos de respuesta de frecuencia se presentan en el dominio de la velocidad ya que, en este análisis de espectro, los puntos de resonancia son más visibles que en los gráficos de aceleración y desplazamiento.*

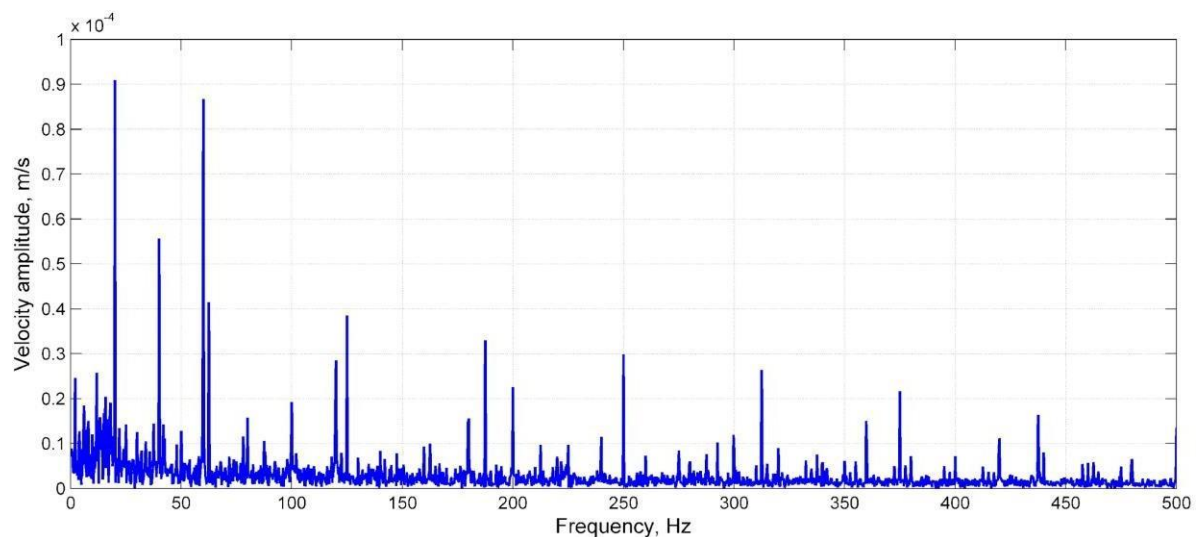


Figura 4.33 Gráficos de análisis de espectro – respuesta de frecuencia del primer objeto.

* *Además, se presenta un video del modo de forma en el primer punto de resonancia - 20Hz (+.gif) en un archivo separado.*

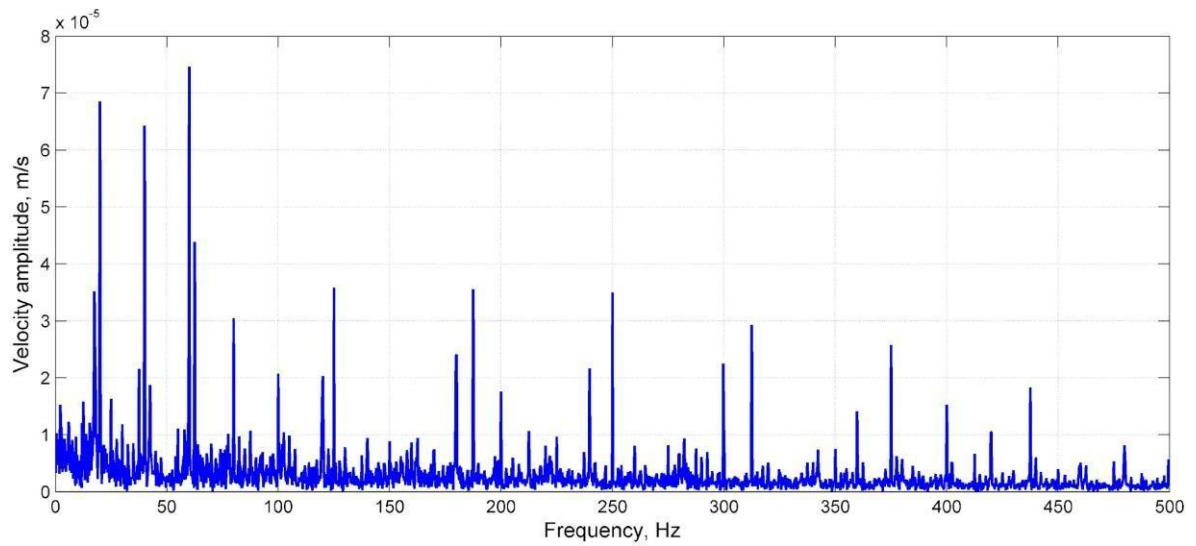


Figura 4.34 Gráficos de análisis de espectro – respuesta de frecuencia del segundo objeto.

* Además, se presenta un video del modo de forma en el primer punto de resonancia - 20Hz (+.gif) en un archivo separado.

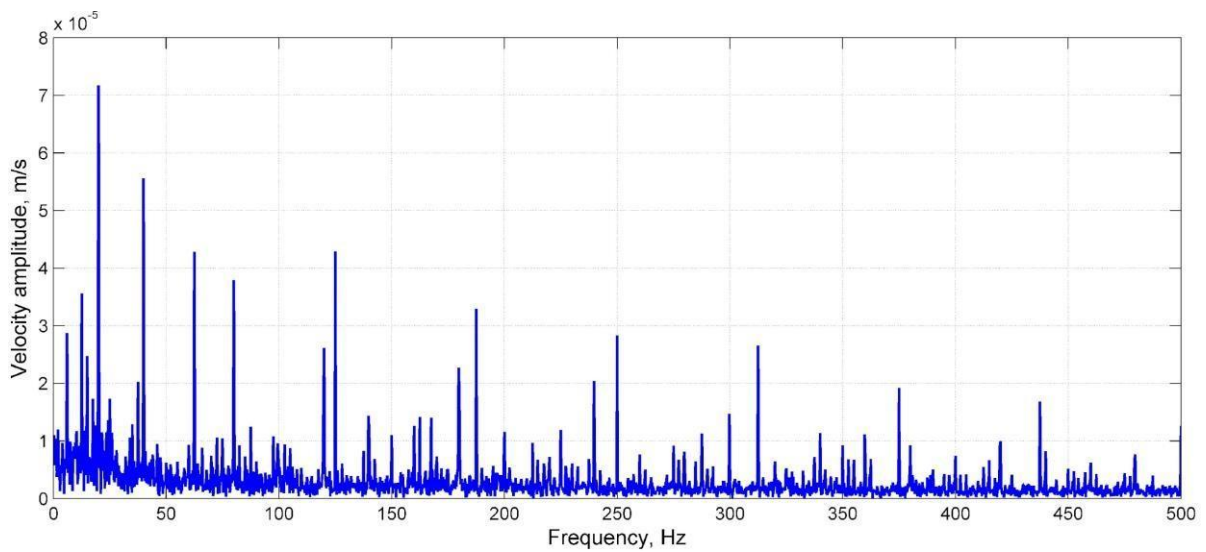


Figura 4.35 . Gráficos de análisis de espectro: respuesta de frecuencia del tercer objeto.

* Además, se presenta un video del modo de forma en el primer punto de resonancia - 20Hz (+.gif) en un archivo separado.

4.4.3 Conclusión del Primer Análisis

El primer análisis incluye una comparación de la respuesta de frecuencia de los materiales de corcho (Figura 4.36):

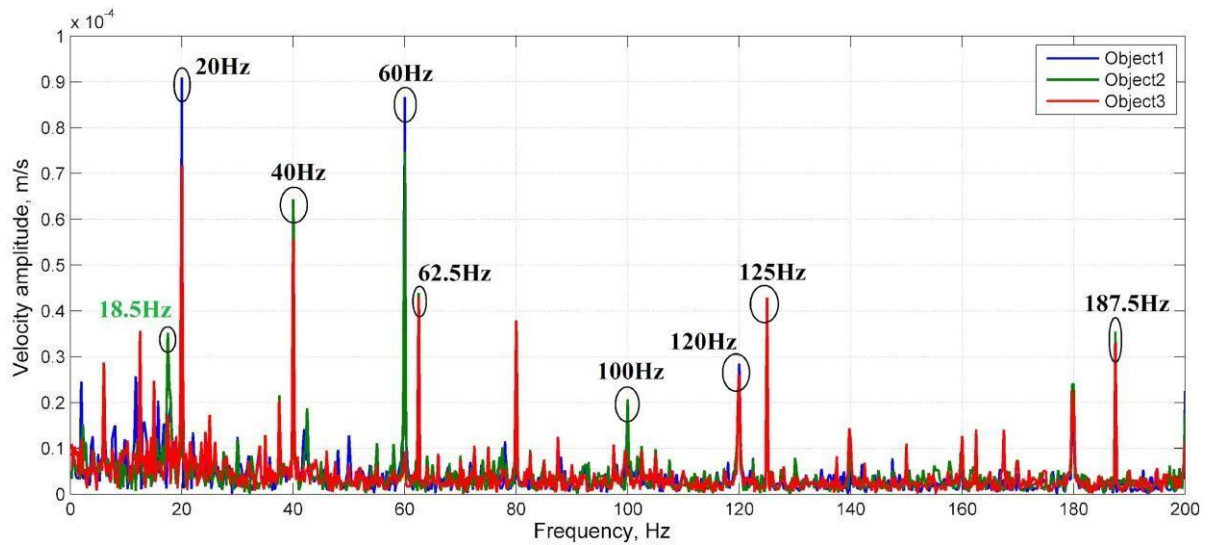


Figura 4.36 Análisis de comparación: gráficos de análisis de espectro: respuesta de frecuencia de objetos de material de corcho.

A partir de la comparación del análisis de frecuencia (Figura 4.36), parece que la frecuencia de resonancia central de los materiales de corcho laminado está en el rango de baja frecuencia (0 – 200 Hz) y comienza en el rango de frecuencia media (200 Hz – 500 Hz). Cabe señalar que en este rango de frecuencias se pueden observar los principales modos resonantes. La comparación se presenta hasta 200 Hz para una mejor visualización de los resultados obtenidos.

Por análisis de frecuencia, la frecuencia de resonancia principal y primera del material composite investigado es igual a 20 Hz con armónicos por cada 20 Hz (20/40...80/100...etc. Hz). Además, debe ser la frecuencia apuntada en el rango de frecuencias bajas de 62,5 Hz con el paso armónico que ha continuado en el rango de frecuencias medias (125 Hz...187 Hz, etc.). La naturaleza compuesta del corcho laminado explica una segunda frecuencia de resonancia.

La comparación de las propiedades de amortiguación de los objetos se proporciona en el ejemplo del primer punto de resonancia de 20 Hz:

En el punto actual, el primer objeto vibró con una amplitud de velocidad – $0,9 \cdot 10^{-4}$ m/s; segundo objeto – $0,68 \cdot 10^{-5}$ m/s; 3er objeto – $0,72 \cdot 10^{-5}$ m/s. Eso puede llevar a la primera conclusión de que el objeto 2 tiene una mejor propiedad de amortiguación que los otros dos objetos de corcho laminado.

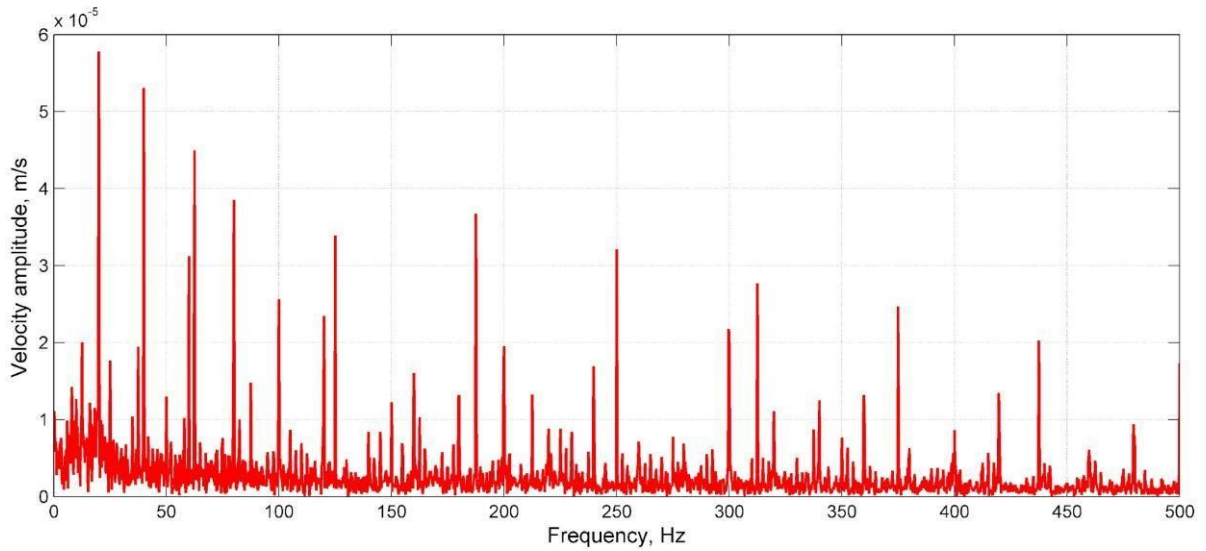


Figura 4.37 Gráficos de análisis de espectro – respuesta de frecuencia del cuarto objeto.

* Además, se presenta un video del modo de forma en el primer punto de resonancia - 20Hz (+gif) en un archivo separado.

4.4.4 Conclusión del Segundo Análisis

El segundo análisis incluye una comparación de la respuesta de frecuencia de los materiales de corcho laminado (objeto 2) y polimetacrilimida (objeto 4) (el objeto dos fue aceptado para la comparación ya que muestra la mejor propiedad de amortiguamiento) (Figura 4.38):

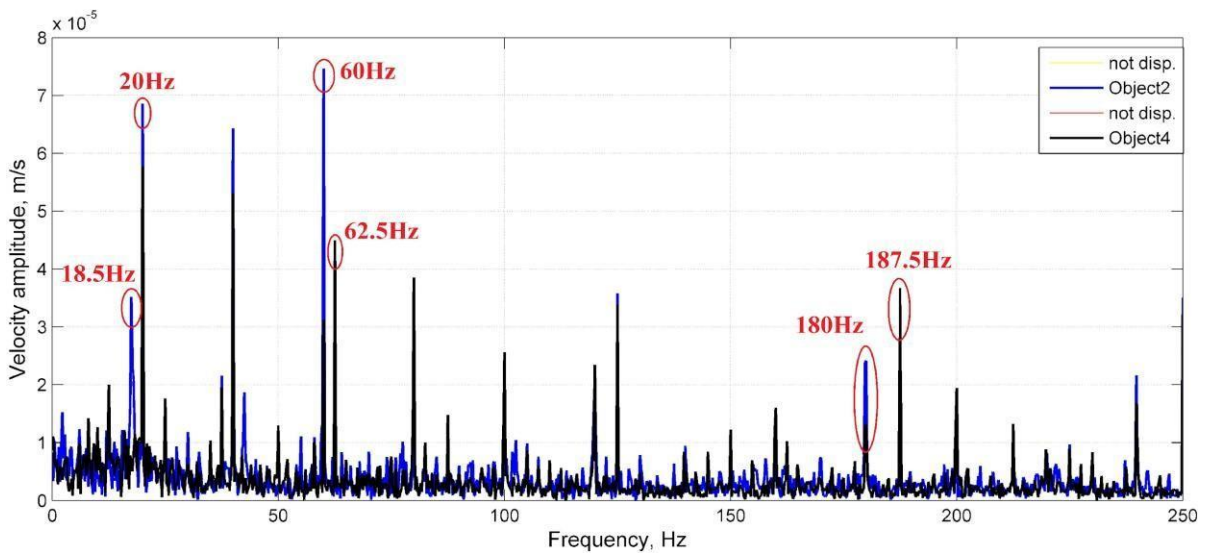


Figura 4.38 Análisis de comparación: gráficos del espectro - respuesta de frecuencia del corcho laminado y material de espuma de polimetacrilimida.

A partir de la comparación del análisis de frecuencia (Figura 4.38), parece que la frecuencia de resonancia principal del corcho laminado y los materiales de espuma de polimetacrilimida son casi iguales y se encuentran en el rango de baja frecuencia (0 – 200 Hz) y al comienzo del rango de frecuencia media (200 Hz – 500 Hz). La frecuencia de resonancia principal y primera de los materiales compuestos investigados es igual a 20 Hz con armónicos por cada 20 Hz (20/40...80/100...etc. Hz). Además, debe ser la frecuencia apuntada en el rango de frecuencias bajas de 62,5 Hz con el paso armónico que ha continuado en el rango de frecuencias medias (125 Hz...187 Hz, etc.). La laminación de corcho y espuma de polimetacrilimida con el mismo material puede explicar la coincidencia de puntos de resonancia en la misma frecuencia. La principal diferencia, en este caso, es que el objeto 4 proporciona una mejor propiedad de amortiguamiento en los principales puntos de resonancia de ~16% a ~57%, dependiendo de la frecuencia.

La comparación de las propiedades de amortiguación de los objetos se proporciona en el ejemplo del primer punto de resonancia de 20 Hz:

En el punto actual, el corcho laminado vibró con una amplitud de velocidad – de $0,68 \cdot 10^{-5}$ m/s y la espuma de polimetacrilimida laminada – $0,57 \cdot 10^{-5}$ m/s (diferencia de amortiguamiento ~ 16%). Además, en la frecuencia de 60 Hz: amplitud de velocidad de corcho laminado – $0,74 \cdot 10^{-5}$ m/s y espuma de polimetacrilimida laminada – $0,32 \cdot 10^{-5}$ m/s (diferencia de amortiguamiento ~ 57%). La amplitud de la velocidad de deformación en frecuencias de 62,5 Hz, 125 Hz, etc., casi no se amortigua con la espuma de polimetacrilimida (*en algún punto incluso es más alta). *La diferencia en la amplitud de los materiales confirmó que la espuma de polimetacrilimida amortigua mejor un impulso de impacto que el material de corcho, ya que la rigidez y la deformación de los objetos son diferentes. Al mismo tiempo, el segundo objeto muestra características cercanas para la amortiguación en algunos puntos de resonancia, lo que puede llevar a concluir que el corcho laminado en algunas tareas se puede utilizar además de la espuma de polimetacrilimida laminada.*

4.5 Pruebas de flexión de compuestos estructurados en sándwich a base de corcho

4.5.1 Muestras

Se fabricaron cuatro paneles de prueba para comparar diferentes características de flexión de los paneles estructurados en sándwich. Tres de ellos utilizaron diferentes rellenos compuestos a base de corcho. Las principales características se presentan en la Tabla 4.3. Uno de ellos contiene relleno de espuma de polimetacrilimida. Sus características se muestran en la Tabla 4.4. Todos los paneles fueron revestidos por ambos lados con un laminado uniforme de vidrio y plástico con un espesor de 0,135 mm. La fibra de vidrio utilizada es *Interglas 91110*, su peso es de 110 g/m^2 y el tipo de tejido es en espiga. Es de destacar que los paneles estaban revestidos con tejido en el mismo ángulo en ambos

lados. El tejido de fibra de vidrio se impregnó con una resina epoxi de dos componentes, "Resina epoxi L + endurecedor L", y se comprimió en la superficie de los paneles colocándolos en una bolsa de vacío sellada, donde se aplicó un vacío de 820 mbar. Después de 14 horas, la presión en la bolsa se igualó a la atmosférica, pero los paneles se retiraron solo después de 24 h. En la Figura 4.39 se presenta una imagen de paneles laminados.

Tabla 4.3 Características de los composites a base de corcho.

| Plano de material de corcho No. | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Tamaño de gránulo de corcho | 2-5mm | 0,5-1mm | 2-5mm |
| Material de unión de gránulos | Poliuretano | Poliuretano especializado | Poliuretano |
| Densidad | 186,1 kg/m ³ | 165,3 kg/m ³ | 357,7 kg/m ³ |
| Resistencia a la tracción | ≥500 kPa | ≥400 kPa | ≥400 kPa |
| Compresibilidad | 10-25 % | 30-50 % | 5-25 % |
| El regreso a la posición inicial | ≥70 % | ≥75 % | ≥70 % |

Tabla 4.4 Características de la espuma de polimetacrilimida.

| | |
|-----------------------------|----------------------|
| Nombre del material | CASCELL 30 RS |
| Densidad | 30 kg/m ³ |
| Resistencia a la Compresión | 400 kPa |
| Resistencia a la tracción | 800 kPa |
| Módulos elásticos | 38 MPa |
| Rigidez a la flexión | 800 kPa |
| Resistencia al corte | 400 kPa |
| Módulo de corte | 15 MPa |
| Resistencia térmica | ≥200 °C _ |



Figura 4.39 a) Paneles estructurados en sándwich con diferentes rellenos compuestos a base de corcho, b) Paneles estructurados en sándwich con relleno de espuma de polimetacrilimida.

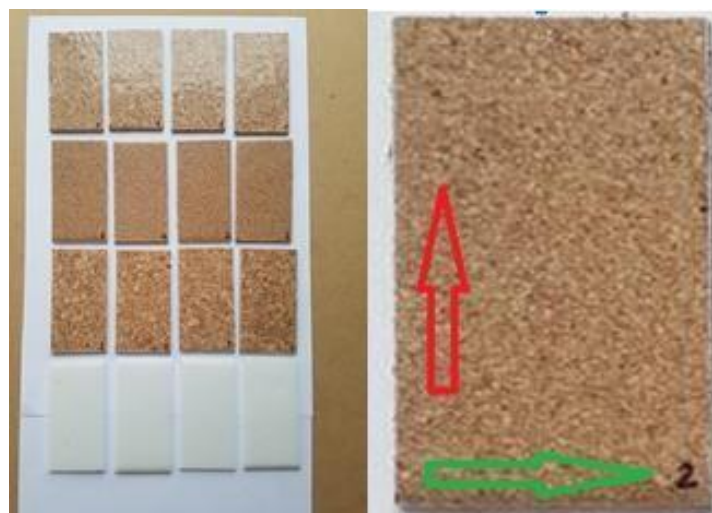


Figura 4.40 Paneles preparados para el ensayo de flexión. La flecha roja indica 0° , la verde 90° .

Las superficies del panel laminado estructurado en sándwich con relleno compuesto a base de corcho presentan una mayor rugosidad superficial que aquellos con relleno de espuma de polimetacrilimida. Vale la pena mencionar que cuanto más pequeños son los gránulos de un compuesto a base de corcho, más suave es la superficie.

De cada panel se cortan muestras con dimensiones: $40 \times 75 \times 3$ mm. Se fabricaron 16 paneles de muestra, es decir, se obtuvieron 4 muestras de cada panel estructurado en sándwich. Se sometieron a pruebas de flexión. También debe tenerse en cuenta que las muestras se prepararon girando la fibra de vidrio 0° - 90° a lo largo de la dirección del lado más largo de la muestra. Su imagen se muestra en la Figura 4.40.

4.5.2 Realización de pruebas de flexión

Las pruebas de tracción y flexión se llevaron a cabo utilizando una máquina de prueba universal Tira test 2300 con registro digital de datos de prueba. Se utilizaron tres software Catman Express para el registro de datos. Se utilizó un soporte de flexión de tres puntos. La distancia entre los cojinetes fijos se fijó en 50 mm. La velocidad de la prensa dobladora fue de 2-0,4 mm/min. La imagen se presenta en la Figura 4.41. El grosor y la anchura de todas las muestras se midieron con un calibrador.

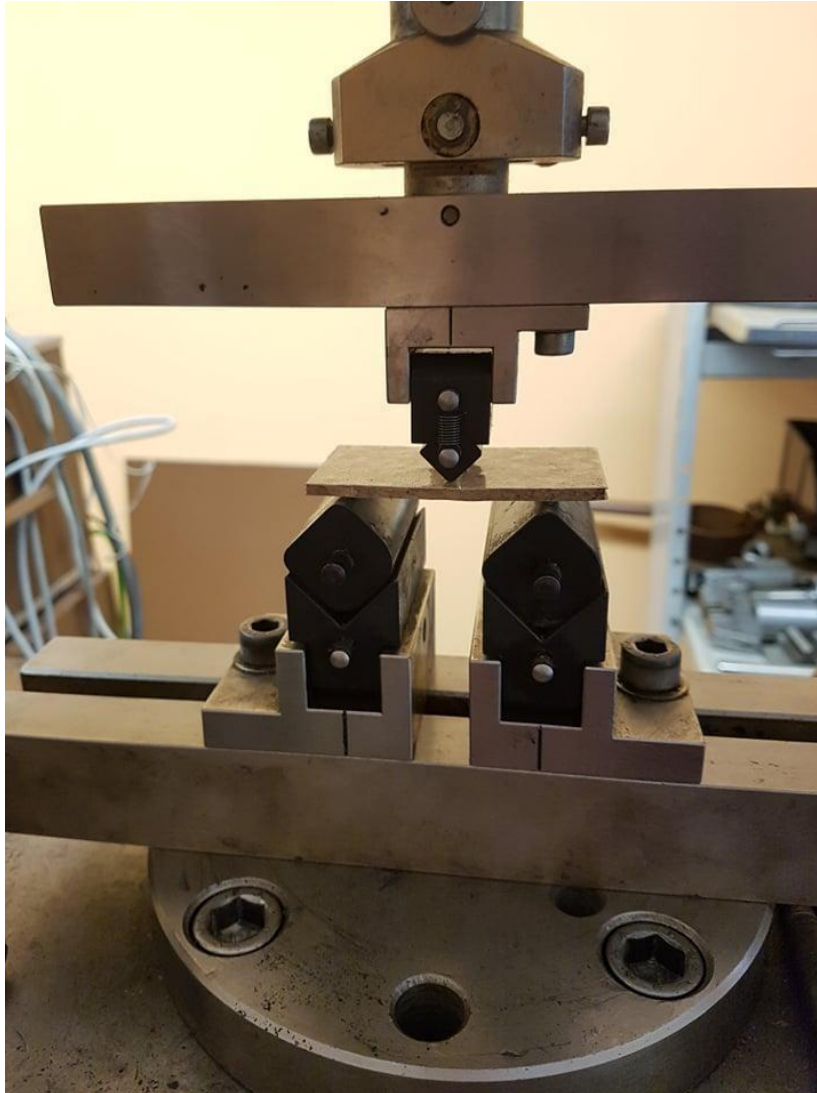


Figura 4.41 . El banco de pruebas de flexión.

Es fundamental preparar el sistema para obtener resultados precisos en las pruebas prácticas. Debido a la superficie irregular de los materiales, es necesario pulir la muestra durante la prueba. Las muestras se deforman entre 0,3 y 0,4 mm hasta que comienza la carga proporcional*. El gráfico de la interdependencia entre la deflexión y la resistencia a la tracción en la muestra 2_2 se presenta en la Figura 4.42.

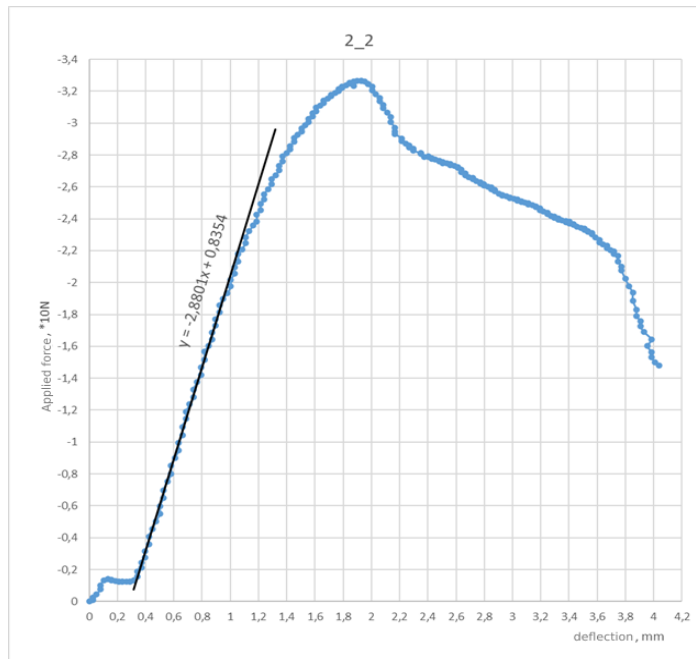


Figura 4.42 La interdependencia entre la deflexión y la fuerza aplicada en la muestra 2_2.

Dentro de los límites de la carga proporcional, se dibujó una curva de aproximación y se calcularon la resistencia y el módulo de elasticidad de cada muestra.

La fuerza (σ) se calculó con referencia a la fórmula (Ec. 4.1):

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

F - Fuerza de flexión en Newtons; L - distancia entre rodamientos fijos en milímetros; b - ancho de la muestra en milímetros; h - espesor de la muestra en milímetros.

Para los cálculos del módulo elástico, las deflexiones se calcularon en los valores de tensión ϵ correspondientes $\epsilon_1=0.0005$ y $\epsilon_2=0.0025$ (Ec. 4.2).

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

desviación lateral en milímetros; ϵ_i - valores de tensión correspondientes dados anteriormente; L - la distancia entre rodamientos fijos en milímetros; h - espesor de la muestra en milímetros.

El módulo elástico se calculó según la fórmula (Ec. 4.3):

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

σ_1 - resistencia en MPa, en el punto de flexión s_1 ; σ_2 - resistencia en MPa, en el punto de flexión s_2 .

4.5.3 Comparación de los Resultados y Análisis

La Tabla 4.5 presenta los datos recopilados durante la prueba. Además, proporciona la E_f calculada de cada muestra (Figura 4.43).

Tabla 4.5 Tabla de los datos de prueba.

| | h - total thickness | Laminate thickness | Filler thickness | b- width | l - distance | Fm | σ | 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 |

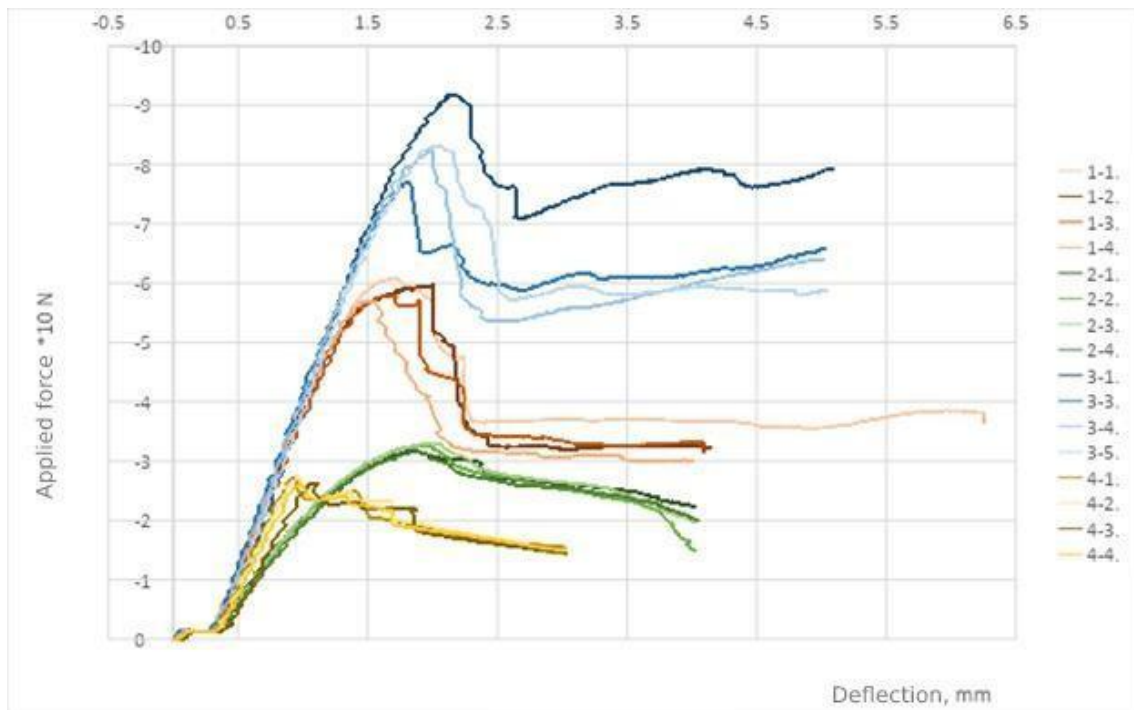


Figura 4.43 . El E_f calculado de cada muestra.

Como se pudo observar a partir de los resultados obtenidos, el material con mayor índice de resistencia fue el compuesto por los gránulos de corcho de mayor tamaño. La fuerza de resistencia fue tres veces mayor que el material compuesto con relleno de espuma de polimetacrilimida. Cabe señalar que a medida que disminuía el tamaño de los gránulos a base de corcho, también disminuía la fuerza de flexión soportada. La resistencia a la flexión de las muestras con los gránulos más pequeños fue tres veces menor que la de los compuestos con los gránulos más grandes.

4.5.4 Ensayos de tracción

Para la prueba práctica, los paneles de muestra se cortaron de los paneles laminados. Las dimensiones se seleccionaron de acuerdo con las recomendaciones del personal encargado de la prueba (Figura 4.44). Se cortaron formas de muestra de paneles laminados utilizando una fresadora (CNC).

La prueba se llevó a cabo utilizando el soporte de tensión. El principal problema durante las pruebas fue el deslizamiento de las placas en las pinzas. Debido a ello, no se obtuvieron resultados satisfactorios. Para la segunda prueba, con el fin de evitar que las placas se deslicen, se unió una placa de goma con adhesivo a los puntos de montaje para aumentar la adherencia.

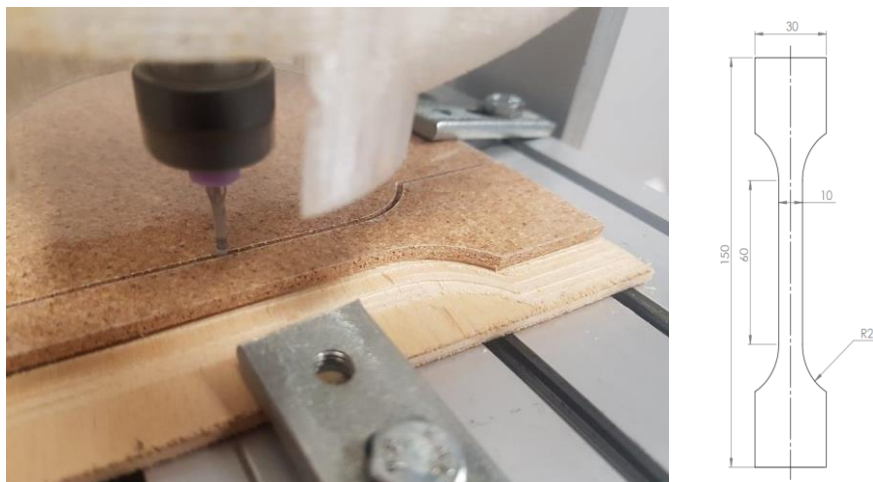


Figura 4.44 Ejemplo de fresado y dimensiones.

4.5.5 Resultados de las pruebas de tracción

Como se observa a partir de los resultados proporcionados en la Tabla 4, el material con la tasa de tensión más alta se fabricó a partir de material de corcho granulado. La tasa de tensión fue de aprox. 5 por ciento más alto que el material compuesto con relleno de espuma de polimetacrilimida. La tasa de tensión de las muestras con los gránulos más pequeños fue 20N menor en comparación con las que tenían los más grandes. Sin embargo, la resistencia a la carga de la muestra con gránulos de tamaño mediano fue aproximadamente un 10 % menor que la de la muestra con los gránulos más grandes.

Tabla 4.6 Tabla de datos de prueba.

| | a | b | S ₀ | F _m | R _m |
|-----|-----------|-----------|------------------------|----------------|----------------|
| | milímetro | milímetro | milímetro ² | norte | 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 |

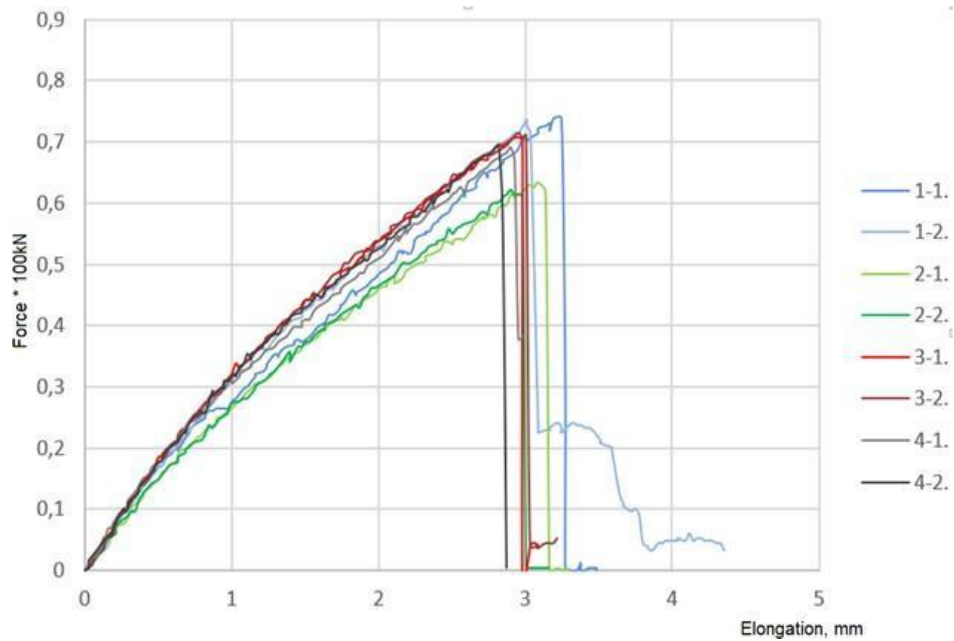


Figura 4.45 La interdependencia entre el alargamiento y la fuerza aplicada en cada muestra.

A raíz de los resultados de tensión obtenidos, se dibujaron los gráficos que muestran la correlación entre el alargamiento de las muestras y la fuerza de tensión (Figura 4.45). En los gráficos se pudo observar que la resistencia a la tracción de diferentes muestras es similar (los resultados fluctúan dentro de los límites del 10 por ciento) ya que depende poco del material de relleno de una estructura sándwich.

Referencias

- [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 (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/ (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/ (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] Trabolt, 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] Kamšcio produktu ekspertai! (n.d.). Dekoratyvine kamÂštinė danga NATŪRALUS 3D STRIPE - BESTSELLER! Kam□Cio 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., Knapic, 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> (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

Aplicaciones aeronáuticas/espaciales de compuestos de corcho

*Elvin Ragimov*¹, *Mehmet Alper Sofuoğlu*² *, *Selim Gürgen*³, *Melih Cemal Kuşhan*³

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Leeds, Reino Unido

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Eskişehir Osmangazi, Eskişehir, Turquía

³ Departamento de Ingeniería Aeronáutica, Universidad Eskişehir Osmangazi, Eskişehir, Turquía

*Correspondencia: asofuoglu@ogu.edu.tr

Resumen

El corcho es una materia prima natural, renovable y duradera que se ha utilizado durante años. La literatura académica sobre el corcho es sustancial debido a este interés prolongado. La mayoría de los estudios se concentran en la estructura química, las capacidades mecánicas y físicas y los productos y subproductos del corcho. Comenzando con su crecimiento, histología y estructura, se cubren los extensos intentos de caracterizar a fondo el corcho y los nuevos avances e investigaciones en desarrollo (a escala micro y macro). A continuación, se examinan las cualidades distintivas del corcho y se comparan con otros materiales utilizados en industrias similares. Se ha intentado describir por qué el corcho es mejor que otros materiales en varios aspectos. La resistencia a la tracción, el módulo de Young y las relaciones de Poisson son características mecánicas determinantes para esta investigación. Las características mecánicas y térmicas de los compuestos de corcho y su uso actual en aplicaciones aeroespaciales son los temas de esta revisión. Finalmente, se discute una parte del uso futuro de estos compuestos ecológicos.

Palabras clave: composites de corcho, eco-friendly, aplicaciones aeroespaciales.

Introducción

La búsqueda de mejores materiales naturales con propiedades específicas en ingeniería es vital para los investigadores. En diferentes líneas de aplicaciones de ingeniería y diseño, uno de los materiales naturales más conocidos es el corcho, demostrando el increíble potencial para alterar los materiales celulares sintéticos. Además, el mundo moderno ha sido testigo de la conciencia de los compradores, las políticas gubernamentales y las tendencias "ecológicas" que requieren que los fabricantes apuesten por soluciones sostenibles.

En el siglo XVI, el corcho fue uno de los primeros materiales descubiertos e investigados por Robert Hooke. Dibujó las láminas de corcho gracias al microscopio. Los resultados de la investigación se publicaron en 1665. Como se menciona en la investigación, las diminutas estructuras del material de corcho se denominan células. La celda proviene del latín, y su significado es una pequeña habitación. En la Figura 5.1 se puede observar el dibujo de Hooke. Para ese período de tiempo, este dibujo puede brindarnos información sobre muchas características topológicas de las celdas de corcho. El corcho ha sido utilizado por los seres humanos durante más de 5000 años como materia prima natural, renovable y sostenible. La humanidad utiliza materiales de corcho para sus necesidades diarias en todo el mundo, como sellador de contenedores, herramientas de pesca y sandalias. El uso moderno como tapón de corcho cobra vida gracias al monje benedictino Dom Perignon en la primera parte del siglo XVII. La mejora actualizada en la investigación del corcho se ha modificado de la forma de relación corcho-vino a la alta capacidad, el pensamiento natural, la aplicación de los restos de la industria del corcho y los compuestos. En el siglo XXI, se utiliza para diversas implementaciones, no solo como tapón de corcho, sino también como material aeroespacial, gracias a los compuestos utilizados para pisos, revestimientos de paredes y diversas aplicaciones industriales, tallando una parte importante de los materiales de corcho. Además, es un material de construcción versátil con propiedades como ligereza, elasticidad y resiliencia, así como impermeabilidad, aislamiento, resistencia al desgaste, cualidades ignífugas, propiedades hipoalergénicas y durabilidad que lo diferencian de la madera y la piedra [1].

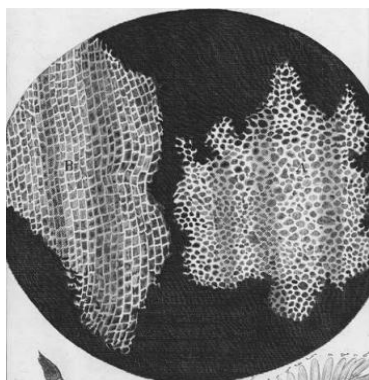


Figura 5.1 Dibujo de una celda de corcho desde una perspectiva microscópica [2].

La parte rígida que proporciona habilidades cruciales al corcho está contenida en las caras de cada etapa prismática. Estas cavidades prismáticas se denominan celdas. Además, la forma de los materiales sólidos de la célula no es homogénea. Este tipo de ultraestructura se manifiesta a nivel por debajo del microscópico debido a la composición de los componentes químicos y la disposición de esos componentes en el espacio, además del proceso de desarrollo biológico involucrado. La estructura celular del corcho es única. Los plásticos espumados tienen celdas más pequeñas y delgadas que el corcho. Una celda promedio ideal tendría las siguientes dimensiones: 40 μm de altura del prisma, 20 μm de borde de la base, 1 μm de espesor de la pared de la celda, de dos a tres ondulaciones por cara lateral del prisma, una longitud de onda de 15 metros y una amplitud de 5–6 μm . Las paredes de las

celdas de corcho son flexibles en gran medida y se ondularán u ondularán bajo compresión en un grado variable. Además, en comparación con las celdas de corcho tempranas, las celdas de corcho tardías cortas y de paredes gruesas son mucho más sólidas y resistentes. En la Figura 5.2, se demuestra la estructura del corcho virgen.

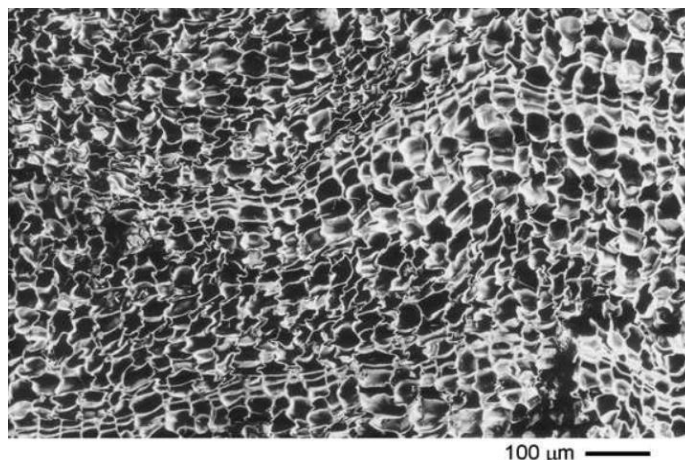


Figura 5.2 La estructura del corcho virgen [1].

Las diversas implementaciones de materiales de corcho son investigadas por diferentes investigadores. La respuesta mecánica del corcho aglomerado en diversas situaciones fue el tema de Jardin et al. [3] y Santos et al. [4]. Además, investigaron la caracterización de la dependencia, como la densidad, el tipo de aglomerante y el tamaño de grano del material de corcho expandido. Costas et al. [5] analizó el compuesto de corcho como un componente amortiguador de impacto híbrido de automóvil frontal. Además de la producción de amortiguadores, el corcho aglomerado se utilizó para dar forma a los reductores de impacto lateral de los vehículos de carretera para garantizar la seguridad. La investigación fue dirigida por Tay et al. [6]. Sánchez-Sáez et al. [7] estudiaron los impactos balísticos de las estructuras centrales hechas de corcho.

La corteza de un roble se usa para producir corcho, que es una sustancia a base de árboles. Se ha cosechado de la capa más externa del fuste de los árboles, de donde se extrae sin daños de los árboles, y esto sucede cada 9-12 años cuando el productor está seguro de que la capa alcanza el ancho requerido. La corteza es recolectada por personal calificado, lo que permite que el árbol crezca otra capa de corteza exterior que se puede recolectar en el futuro. Por lo tanto, el corcho se puede recolectar 17 veces durante la vida de un alcornoque, con una duración de 200 años. El corcho no es solo un recurso natural sino también un material reciclable y renovable. Es decir, es un material totalmente “verde” con una huella de carbono negativa por su periodo de producción, que se lleva a cabo durante el ciclo de vida del árbol. 2,1 millones de hectáreas están cubiertas de alcornoques en Portugal, el hogar de un tercio de todas las capacidades de árboles de roble en todo el mundo. La producción estacional de alcornoques en España y Portugal es aproximadamente el 30,5% y el 49,6% del total de materias primas del primero y segundo, respectivamente. Por ello, el corcho es la materia prima de las cadenas industriales integradas de gran trascendencia económica para estos países.

La proporción del volumen sólido del corcho es aproximadamente el 15% de su volumen total, el volumen restante es aire contenido en la celda. Además, la relación de volumen sólido es menor que el volumen de gas. Otra faceta fundamental es la producción de corcho aglomerado. Los granos de corcho se mezclan con resinas termoendurecibles de poliuretano para formar corcho aglomerado. La presión, el calor y el aglutinante juegan un papel importante en la determinación de las propiedades del material. Una vez que los gránulos se han aglutinado, la mezcla se exprime y se calienta a temperaturas entre 110°C y 150°C. Los cambios extremos en la reacción mecánica bajo cargas de compresión surgen según el tipo y la cantidad del material compuesto [4]. Es ampliamente conocido que se han probado las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas del aglomerado en la producción de tapones de corcho.

La aplicación del material de corcho a otros sectores sigue en expansión. Para utilizar compuestos a base de corcho en el sector aeroespacial, se deben considerar propiedades particulares con respecto a su desempeño bajo temperaturas extremas [8]. La baja conductividad térmica y la alta resistencia a la compresión del corcho lo convierten en un material ideal para aislantes térmicos en cohetes, estudios de grabación, aislamiento acústico en submarinos, motores de combustión y placas de piso que absorben energía.

Este documento se divide en cuatro secciones. Las características generales de los compuestos de corcho se examinan en la segunda sección de este estudio. Se explican las características mecánicas y térmicas del material de corcho. A continuación, la tercera sección explica los usos actuales de los compuestos de corcho en la industria aeroespacial con ejemplos. Finalmente, se discuten las aplicaciones potenciales de los materiales de corcho en términos de aplicaciones aeroespaciales. La conclusión se da al final de la sección.

5.2 Propiedades generales de los compuestos de corcho

Los compuestos de corcho se obtienen procesando el producto de corcho con varios métodos. En general, son estructuralmente similares a los compuestos que ya se utilizan en ingeniería. Las propiedades de la estructura compuesta dependen de la forma en que se junta el material compuesto y de las propiedades y concentraciones de las capas y materiales que forman el compuesto. En este contexto, los compuestos de corcho tienen propiedades como la ligereza, el aislamiento térmico y acústico y la amortiguación de impactos que tienen los materiales de corcho.

Para su utilización en diferentes sectores, los compuestos de corcho se fabrican gracias a varios métodos para obtener diferentes propiedades físicas y mecánicas. Estos métodos difieren según cómo se procesa el material de corcho y cómo se ensambla la estructura compuesta. Los materiales compuestos se pueden diversificar aproximadamente por sus tipos de productos y métodos de unión según el uso general. En términos del proceso de producción, los materiales de corcho podrían diversificarse en triturados, partidos y prensados. Además, los materiales se nombran según sus

métodos de unión, como sándwich, multicapa o aglutinante.

Dado que los compuestos de corcho son similares a las propiedades físicas y mecánicas del corcho en términos de propiedades generales, las ventajas de usar compuestos de corcho están directamente relacionadas con las propiedades del material de corcho

Por ello, las ventajas que ofrecen los composites de corcho se evalúan según el área de aplicación. En esta sección, las características mecánicas y térmicas de los compuestos de corcho se evaluarán e investigarán desde diferentes lados [9].

5.2.1 Propiedades mecánicas/físicas

El corcho posee propiedades extraordinarias, como baja conductividad, compresibilidad extrema, baja densidad, permeabilidad relativamente baja a líquidos y gases, estabilidad química y durabilidad. Además, el corcho es anisotrópico en cuanto a la orientación de sus celdas, por lo que las propiedades muestran diferencias entre medidas junto con direcciones radiales (R, coincidente con el eje radial del prisma) y direcciones no radiales (NR, plano perpendicular). Sin embargo, las relaciones de anisotropía de la forma son pequeñas y las propiedades relacionadas con eso son mucho menores que las de otros materiales. Se han observado varias propiedades mecánicas en el material de corcho. En la Tabla 5.1 se presentan algunas de las propiedades cruciales del material de corcho.

La curva de compresión se representa en un gráfico en tres partes (Figura 5.3). Cada porción está vinculada a uno de los tres mecanismos que controlan las propiedades de los materiales celulares flexibles [10],[11]. La primera área, que demuestra la flexión elástica de las paredes celulares, tiene una tensión de hasta el 7%. En segundo lugar, una meseta horizontal cubre alrededor del 70% de la tensión. Finalmente, debido al pandeo gradual de las paredes celulares, el aplastamiento de las paredes celulares y la completa decadencia de las células, la curva comienza a ascender verticalmente [10],[11].

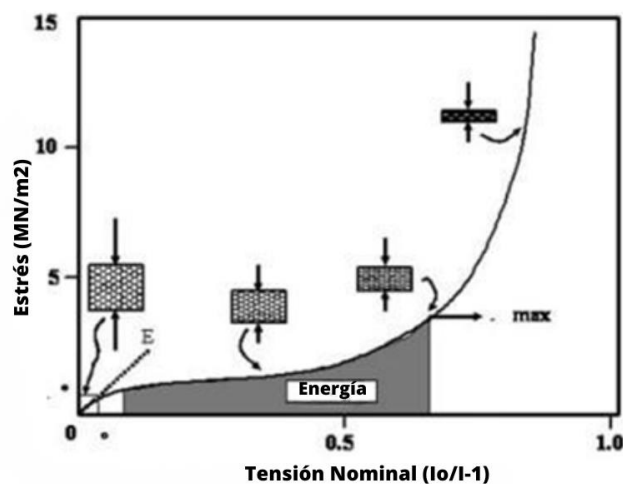


Figura 5.3 Curva de compresión del compuesto de corcho [16].

Tabla 5.1 Características mecánicas del corcho.

| Referencia | Propiedad mecánica | Valor |
|---|---|--|
| Gibson et al. [10] | Tensión de fractura bajo tensión, % | 5 (R) 9 (N.R.) |
| Gibson et al. [10] | Esfuerzo de fractura bajo tensión, MPa | 1.0 (R) 1.1 (NR) |
| Rosa y Fortes [11] | Tenacidad a la fractura, hervida, MPa | 60–130 |
| Gibson et al. [10], Fortes y Nogueira [12] | Relación de Poisson, hervida | 0–0.097 (R) 0–0.064 (N.R.) 0.26–0.5 (R.) |
| Rosa et al. [13] | Módulo de Young, hervido, MPa | 6 (R) 8–9 (N.R.) |
| Rosa y Pereira [14] | Módulo de Young, tratado térmicamente a 150 °C, MPa | 15 (R) 14 (NR) |
| Rosa y Fortes [11] | Módulo de tracción, hervido, MPa | 38 (R) 24–26 |
| Gibson et al. [10] | Deformación por colapso (pandeo), % | 4 (R) 6 (NR) |
| Gibson et al. [10], Vaz y Fortes [15] | Esfuerzo de colapso (pandeo), hervido, MPa | 0.75–0.8 (R) 0.6–0.7 (N.R.) |

Cuando se produce un alto nivel de compresión con grandes deformaciones en el material, después de aliviar el estrés, la recuperación comienza sustancialmente. Se sabe que la densidad afecta las propiedades de compresión del corcho de manera significativa. La resistencia a la compresión del corcho en varias direcciones no es muy alta. Sin embargo, la resistencia mecánica es mayor en la dirección radial [16], [17], [18].

Como se mencionó anteriormente, la disposición escalonada y aleatoria de las celdas, así como la ondulación que se presenta en las paredes laterales de las celdas, han impactado el coeficiente de Poisson, lo que puede alterar las propiedades variables del corcho en diversas aplicaciones del mismo [12], [18]. Cuando el material se tritura en una dirección radial, las ondulaciones obligan a las paredes de las celdas a plegarse y empaquetarse, aumentando la amplitud de la ondulación y alineando las bases de las celdas en la dirección radial. Cuando la compresión se alinea en la dirección NR, las celdas laterales se doblan, se enderezan e invierten el patrón de ondulación a altas deformaciones, lo que resulta en retiros cambiantes en la dirección R y una relación de Poisson negativa a altas deformaciones [12]. Se sabe que las placas de corcho tienen diferentes espesores debido a su entorno

de cultivo. El espesor impacta significativamente en las propiedades mecánicas [19],[20]. Por ejemplo, los diámetros más grandes reducen la resistencia a la compresión y el módulo en el proceso de prensado.

La forma celular alveolar del corcho es similar a la de un panal. Por lo tanto, las células del corcho se componen de suberina, celulosa y lignina. Debido a su estructura celular, los materiales a base de corcho tienen excelentes propiedades mecánicas [21]. Pereira et al. [22] realizaron experimentos y proporcionaron datos sobre las propiedades mecánicas del corcho natural. La resistencia a la compresión y el módulo específico del corcho natural son más altos que las espumas poliméricas flexibles y otras espumas rígidas. Además, cuando se combinan la resistencia a la compresión y la baja conductividad térmica, el material adquiere formas excelentes. Este material ecológico muestra una capacidad perfecta contra las ondas térmicas y las cargas de compresión.

La permeabilidad del material de corcho a gases no condensables como el helio no es alta [23],[24]. El corcho tiene una baja tasa de transferencia de calor debido a la enorme cantidad de aire y las pequeñas dimensiones de las celdas. Varias formas proporcionan transferencia de calor a través del material, como la convección de gas, la radiación o la conducción a través de la fracción sólida. En los compuestos de corcho, la barrera para la convección de gases está formada por celdas pequeñas y cerradas, y la radiación se agota por absorción en las numerosas celdas. Para la transmisión del sonido, la absorción es alta ya que la resistividad acústica es $1.2 \times 10^5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Tabla 5.2) [1],[16].

Está relacionado con las características de la superficie, aunque el corcho es un material hidrofóbico con baja humectabilidad para líquidos polares como el agua. Es decir, para líquidos no polares, demuestra una alta afinidad con una energía superficial de 18 mN m^{-1} [25].

Durante la última década, para determinar las propiedades y caracterización del corcho, los investigadores han llevado a cabo varios proyectos. Existen algunos modelos para comprender las propiedades mecánicas del corcho en términos de técnicas de minería de datos y aprendizaje automático cuando el material está bajo carga de compresión [26]. Los primeros y principales experimentos fueron realizados en el siglo pasado por varios estudios [27]-[31].

Al comparar el corcho con otros materiales, por un lado, el corcho natural tiene peores propiedades mecánicas que varios materiales de núcleo como las espumas sintéticas. Por otro lado, debido a algunas características y aplicaciones específicas, el corcho puede superar a otros materiales. Al comparar la resistencia específica a la compresión (σ_c/ρ) y el módulo específico (E/ρ), el corcho tiene un mejor comportamiento mecánico que las espumas poliméricas flexibles. Además, su baja conductividad térmica se fusiona con su resistencia a la compresión. Como resultado, se obtiene el ingrediente para la protección térmica. Este material también podría ser apropiado para lugares con cargas de compresión [32]. En la Tabla 2 se demuestra la caracterización general del corcho.

Tabla 5.2 Propiedades generales de los materiales de corcho.

| Referencia | Propiedades generales | Valor |
|------------------------|---|--|
| Medeiros [33] | Resistividad acústica ($\text{kg/ m}^2\cdot\text{s}$) | $1,2 \times 10^5$ |
| Fortes y Nogueira [12] | Conductividad eléctrica (S/m) | $1,2 \times 10^{-10}$ (25 °C) $1,6 \times 10^{-13}$ (50 °C) |
| Vaz y Fortes [15] | Coefficiente de fricción (corcho/corcho), hervido | 0,97 (R) 0,77 (NR) |

Castro et al. [32] investigaron la posible forma de producir un nuevo compuesto de corcho aglomerado con diferentes tamaños de gránulos y lo compararon con materiales disponibles comercialmente. Se fabricaron tres variedades diferentes de corcho compuesto de gránulos de diferentes tamaños y resina epoxi para mejorar la resistencia. Los tamaños de los gránulos son los siguientes; tamaño de gránulo pequeño (2/3), mezclado (mezcla de gránulos pequeños y grandes) y tamaño de gránulo grande (3/4). El problema principal es la dificultad del método en términos de cantidad de aglomeración y proporción de resina epoxi. Sin embargo, cuando se combinan los ingredientes deseados, se pueden lograr resultados ideales. En consecuencia, después de varios intentos, según el número de gránulos, se determinó que la tasa de resina precisa estaba entre el 24 % y el 30 %. El proceso de aprovisionamiento comienza con una combinación de granulado de corcho y las tasas de resina se enumeran en la Tabla 5.3. A continuación, varios materiales fueron moldeados y cubiertos con láminas de acero antes de ser prensados. La última etapa es colocar la mezcla moldeada en un horno a una temperatura constante de 80 °C durante aproximadamente 2 horas y luego esperar que el nivel de curado alcance el valor deseado.

Según Castro et al. [32], una prueba de flexión de tres puntos demostró que el tamaño del gránulo no afecta la flexión de la cara ni el esfuerzo cortante. De acuerdo con el resultado de la prueba, los compuestos de corcho-epoxi muestran una tensión de cizallamiento en el núcleo significativamente mejor, lo que reduce el área de fractura en expansión. Como resultado de esta característica, los aglomerados de corcho podrían colocarse encima de varias construcciones tipo sándwich. Los resultados de las pruebas de impacto revelaron que los compuestos tipo sándwich de corcho podían soportar cargas elevadas. Además, la capacidad de recuperación de los sándwiches a base de corcho no se ve afectada por el tamaño de los gránulos o el método de fabricación. Al comparar los compuestos a base de corcho con las espumas de alto rendimiento, los compuestos sándwich a base de aglomerados de corcho modificados tienen una mayor capacidad de absorción y un umbral de daño más bajo.





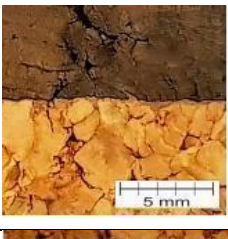
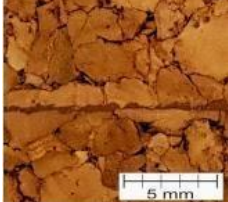
Tabla 5.3 Factores de preparación de aglomerados de corcho.

| Tipo de aglomerado de corcho | Porcentaje de resina en peso | Presión de aglomeración [bar] | Masa de gránulos de corcho [g] | Proceso de curado |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Pequeño (2/3) | 24% | 50 | 270 | 2 horas (a 80°C) |
| Grande (3/4) | 24% | 60 | 270 | 2 horas (a 80°C) |
| Mezclado (mixto) | 30% | 15 | 150 | 2 horas (a 80°C) |

5.2.1.1 Cambios relacionados con la temperatura en las propiedades mecánicas

Kaczynski et al. [33] estudiaron la alteración de las propiedades mecánicas según los cambios de temperatura. Se utilizaron varios compuestos de corcho para examinar las propiedades mecánicas en diferentes condiciones en estas pruebas (Tabla 5.4). Además, se analizó experimentalmente la dependencia del material de la temperatura de ajuste, el horno y un conector de enfriamiento de nitrógeno. Los trozos de corcho se calentaron hasta 100°C y con la ayuda de nitrógeno se redujo la temperatura a -30°C. La velocidad de impacto inicial fue de 9,2 m/s, y se utilizó Instron Dynatup 9250HV para las pruebas de caída. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando tres muestras de cada tipo de corcho. El diámetro del impactador es de 50 mm y el peso total es igual a 11,2 kg. Todas las muestras tienen un área de sección transversal de 50 mm × 50 mm y una altura de 60 mm. Las pruebas de caída se grabaron con una cámara Phantom V12 que posee una velocidad de cuadro de 10 000 fps de 40 μs para temperaturas bajo cero y 50 μs para temperaturas altas.

Tabla 5.4 Caracterización del material y valores de energía de impacto de los materiales de corcho con respecto a diferentes temperaturas [33].

| Nombre del corcho Tamaño de grano [mm] Densidad [kg/ m ³] | Energía de impacto [J] | Temperatura [°C] | Sección |
|--|------------------------|---|---|
| AC199A A 199 0.5-2 | 100 | 24 |  |
| AC216 216 2-4 | 100 500 | Para 100 J: 24 Para 500 J: -30; -15; 0; 24; 100 |  |
| EC159_AC199A n.a n.a | 100 | 24 |  |
| EC159 159 4-10 | 100 500 | Para 100J: Para 500 J: -30; -15; 0; 24; 100 |  |
| EC159_AC216 n.a. n.a. | 100 | 24 |  |
| EC159_AC216 n.a. n.a. | 100 | 24 |  |

Además, Kaczynski et al. [33] realizó un estudio para comprender la interacción entre la temperatura, la compresión y las características de las celdas de corcho. Todo el movimiento de las muestras relacionado con la influencia de la compresión se capturó y analizó utilizando la cámara de alta velocidad. Se predijo que las paredes de las celdas de corcho se doblarían y colapsarían potencialmente durante la etapa de compresión. Las muestras se trituraron a temperaturas que oscilaban entre -30°C y 100°C . Durante el proceso de prueba, las grietas eran visibles en todos los grados de compresión excepto -30°C . Según los resultados de las pruebas, la resistencia al choque del corcho depende directamente de la temperatura. En consecuencia, afirmaron que aumentar la temperatura de -30°C a 100°C reduce la energía de absorción un 25%.

Por lo tanto, los materiales de corcho en lugares seguros o en el sector aeroespacial deben adaptarse a las condiciones ambientales. Las propiedades de absorción de energía y alteración de la temperatura de los compuestos de corcho están linealmente relacionadas, lo que permite a los productores garantizar la seguridad mediante cálculos de datos adecuados. Otro aspecto importante es el impacto del tamaño de grano sobre la energía en diferentes materiales de corcho. Los hallazgos muestran que el tamaño del grano tiene un efecto sustancial en la resistencia al choque del corcho. A medida que la temperatura sube a 100°C , la viscosidad del corcho aumenta, lo que hace que la sustancia pierda sus propiedades adhesivas. Además, la separación de granos ocurre a nivel microestructural debido a esto. Por lo tanto, si el tamaño del grano es grande, vale la pena señalar los peligros a medida que aumenta la temperatura. La temperatura es la variable más influyente que afecta significativamente las características mecánicas del corcho bajo tensión dinámica. Como resultado, estos hallazgos demuestran que evaluar el material de corcho en varias condiciones de compresión y temperatura antes de usarlo en la fabricación es un paso crítico. En cuanto a su comportamiento mecánico, existe un estudio sobre los impactos de la alteración de la temperatura sobre los intervalos de energía del aglomerado entre 120 J y 850 J a $21-50^{\circ}\text{C}$ [31], [34], [35].

5.3 Utilizaciones actuales del corcho en aplicaciones aeronáuticas/espaciales

Las propiedades del material del corcho y el hecho de que los compuestos de corcho se pueden producir con los métodos deseados hacen que este grupo de productos sea adecuado para su uso en la aviación y especialmente en la industria aeroespacial. Los compuestos de corcho se utilizan principalmente en aplicaciones que están expuestas a cargas relativamente bajas y donde se buscan propiedades como aislamiento térmico o de vibraciones, amortiguación de impactos, ligereza e impermeabilidad. La utilización de material de corcho en los sectores industrial y de automoción es bien conocida. El uso de compuestos de corcho en la industria aeroespacial se ha diversificado a lo largo de los años y evolucionará hacia áreas más diferentes con estudios en curso. El uso de ingeniería más intensivo del grupo de materiales de corcho es el revestimiento del cuerpo y varias partes de la nave espacial con fines de aislamiento térmico. Se han realizado y se están realizando múltiples proyectos para utilizar materiales de corcho en carrocerías de aeronaves y otras áreas de la aviación.

Por ejemplo, los escudos térmicos protectores de algunos misiles y transbordadores espaciales están hechos de corcho. Además, en términos de la capacidad ignífuga del corcho, se utiliza en buques de guerra y en el revestimiento interno de submarinos [36].

Los componentes de los sistemas aeroespaciales suelen estar diseñados para un peso reducido, una gran resistencia y una mayor tolerancia a los daños. Es posible lograr estas características eligiendo correctamente los materiales. Los avances recientes han colocado a los materiales basados en sándwich en la parte superior de la lista de materiales candidatos para aplicaciones aeronáuticas. Además, los componentes sándwich, como los componentes de flexión, compresión e impacto, tienen una mayor rigidez y funcionan mejor en las condiciones de carga especificadas. Los compuestos reforzados con fibra a base de polímeros son materiales comunes que se utilizan para fabricar componentes sándwich y se combinan con diferentes tipos de materiales de núcleo de baja densidad, generalmente madera de balsa, panales y espumas poliméricas. Como era de esperar, los materiales del núcleo se eligen principalmente por su baja densidad, alto módulo de elasticidad, gran resistencia perpendicular a las caras y buena capacidad de aislamiento térmico y acústico. En este caso, como material natural, el corcho cumple estos requisitos debido a su morfología celular intrínseca, lo que sugiere que los aglomerados a base de corcho pueden considerarse una opción material alternativa. Claramente, la resistencia de una celda de corcho es comparable a la de algunas espumas sintéticas, y la resistencia específica del corcho es mucho mayor. Además, tiene una conductividad térmica baja y una resistencia a la compresión razonable, lo que lo convierte en una excelente opción para el aislamiento térmico y para aplicaciones con cargas de compresión. Además, el corcho se ha utilizado durante mucho tiempo en componentes que están sujetos a cargas dinámicas, ya que sus excepcionales propiedades de amortiguación lo hacen ideal para la supresión de vibraciones. En resumen, en cuanto a muchas propiedades, los materiales sándwich de corcho son muy convenientes para su uso en la producción de los campos de los sectores aeroespacial y aeronáutico [8].

El material a base de corcho es un componente sándwich adecuado y un material de núcleo para estructuras ligeras. Este material se utiliza en aplicaciones aeroespaciales [37]. Cuando se comparan los compuestos tipo sándwich con las espumas de alto rendimiento, los compuestos ciertamente tienen una mayor capacidad de absorción de energía y características superiores de resistencia a choques cuando se produce una carga. Además, los aglomerados de corcho muestran mejores propiedades térmicas, lo que es una forma importante de diseñar estructuras.

La utilización de material de corcho en los sectores industrial y de automoción es bien conocida. Asimismo, las industrias aeronáutica y militar son importantes usuarias del mismo. Por ejemplo, los escudos térmicos protectores de algunos misiles y transbordadores espaciales están hechos de corcho. Además, en términos de la capacidad ignífuga del corcho, se utiliza en buques de guerra y en el revestimiento interno de submarinos [36].

A primera vista, cuando se compara con materiales de núcleo alternativos, como las espumas sintéticas, se puede demostrar que el corcho natural tiene un comportamiento mecánico débil. Sin

embargo, su conductividad térmica y resistencia a la compresión lo convierten en un material ideal para la retención de calor. Los paneles sándwich compuestos ganaron protagonismo en el diseño aeronáutico por su resistencia al pandeo, al igual que las láminas de aleación de aluminio.

Una patente de muro sándwich de von Karman y Stock en 1924 es un excelente ejemplo de la aplicación de la construcción sándwich a la construcción aeronáutica. En 1934, en la fábrica de Schneider-Creusot en Le Creusot, Francia, SE Mautner aplicó por primera vez estructuras tipo sándwich a un avión existente. En 1938, el mismo ingeniero fabricó un avión monoala de bajo costo que presentaba un ala tipo sándwich con una estructura tipo sándwich de capas de corcho. Ha habido un uso extensivo de compuestos de corcho en la industria espacial, ya que la reducción de peso juega un papel aún más crucial dentro del contexto espacial, lo que genera importantes ahorros de costos. Además, los materiales ablativos son uno de los usos más comunes de los aglomerados de corcho. El material que produce la ablación disipa la energía a través de la vaporización en lugar de la absorción de calor. Como resultado, protege las estructuras de fuentes de alta energía térmica.

Los compuestos tipo sándwich en diferentes diseños se utilizan para la construcción de materiales constituyentes, como láminas frontales, núcleos y adhesivos, para escenarios de carga cuasi estáticos y dinámicos. Cuando se considera el uso prioritario de compuestos sándwich, su susceptibilidad al daño por objetos extraños es lo primero que se prefiere. En varios casos, se ha observado el desempeño de las secciones sándwich estructurales bajo cargas de impacto. Las interacciones locales con cosas diminutas pero potencialmente pesadas, como caídas de herramientas, golpes de pájaros, piedras o hielo, pueden causar daños a aeronaves o aviones durante la carga y descarga de mercancías. Además, las superficies horizontales, como los pisos de los aviones, pueden dañarse fácilmente [38],[39].

Hay dos tipos de aglomerados de corcho: aislamiento y corcho compuesto. El primero se produce sin herramientas o materiales de unión adicionales; por lo tanto, no podría denominarse material compuesto. Este último está compuesto por gránulos que han sido combinados con diversos ligantes sintéticos o naturales, como uretano, resinas fenólicas, etc.

Al hacer una breve investigación sobre el uso de compuestos de corcho en el sector aeroespacial, Amorim Cork Composites (ACC) Company tiene varios productos. La empresa ha producido dos compuestos de corcho (P45 y P50) que pueden utilizarse como escudos protectores en varios sectores. En la Tabla 5.5 se proporcionan diferentes caracterizaciones de estos tipos.

5.3.1 Componentes Estructurales con Corcho en Aplicaciones Espaciales

El sector aeroespacial hace el uso más extensivo de materiales de corcho y compuestos en los cuerpos y componentes de las naves espaciales (Figura 5.4). Los materiales de corcho se han utilizado ampliamente en naves espaciales desde los primeros días de la exploración espacial. Los compuestos de corcho se están utilizando en los sistemas de propulsión de naves espaciales a alta temperatura, así como en secciones como los depósitos de combustible que requieren aislamiento térmico. Además de

proporcionar aislamiento térmico, el corcho también se utiliza como capa protectora en caso de un cambio brusco de temperatura porque es menos costoso que los materiales de alta tecnología. Debido a que el corcho se quema sin llama ni ignición, será la primera capa en quemarse a altas temperaturas, protegiendo del fuego el cuerpo principal y las partes de la nave espacial. Tabla 5.5 Algunas características de los composites de corcho P45 y P50.

| Propiedades | P45 | P50 | Unidades |
|-------------------------------|----------|----------|-------------------------|
| Alargamiento | >30 | >13 | (%) |
| Calor específico | 2.5 | 2.1 | $\frac{KJ \cdot K}{Kg}$ |
| Resistencia a la tracción | >0,86 | >1,70 | (|
| Tamaño de partícula de corcho | 1/2 | 0.5/1 | (mm) |
| Dimensión de hoja | 1270x760 | 1270x760 | (mm) |
| Conductividad térmica | 0.06 | 0.07 | $\frac{W}{m \cdot K}$ |
| Densidad a 20 | 300-350 | 448-512 | $\frac{kg}{m^3}$ |

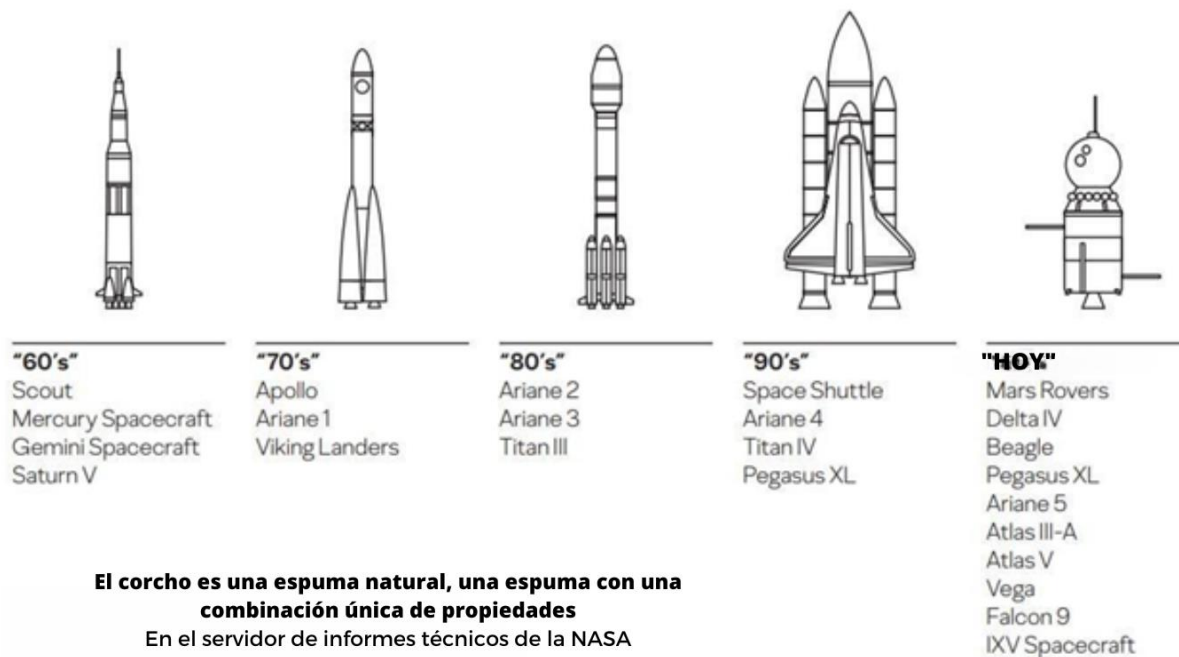


Figura 5.4 Nave espacial que utiliza materiales de corcho y compuestos de corcho [40].

Algunas características clave colocan a estos compuestos por delante del paquete en comparación con otras variedades. En primer lugar, los compuestos de corcho son más fáciles de procesar que otros. Los compuestos a base de corcho se adhieren fácilmente a la mayoría de los materiales de sustrato utilizando técnicas adhesivas estándar. El recorte y el mecanizado se pueden realizar utilizando instalaciones comunes y máquinas sin equipo de protección especial. Los sándwiches se



pueden incluir fácilmente; no se requieren procesos de ajuste complicados. Además, estos materiales ya se han mostrado como escudos térmicos adictivos en aplicaciones de cohetes y aislamiento térmico interior en construcciones calentadas en varias misiones. En la Figura 5.5, la demostración pertenece a la ojiva de Vulcan Rocket que desarrolló United Launch Alliance.

Figura 5.5 Cáscara del carenado con solución térmica ablativa Amorim P50 [41].

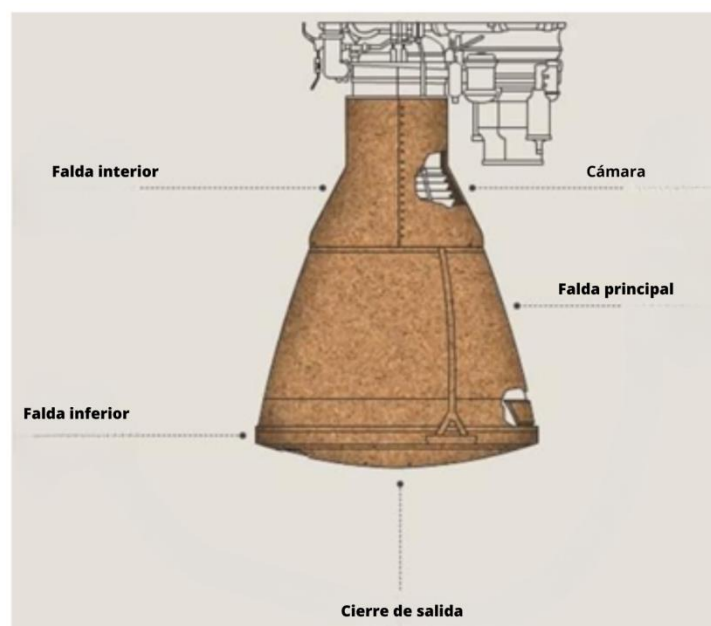


Figura 5.6 Uso típico de compuestos de corcho en cohetes [42].

Una capa de corcho cubría la piel exterior del caparazón cilíndrico. El corcho, adherido a la piel exterior del sándwich compuesto del carenado, lo protege del calor creado por la fricción aerodinámica en el exterior de la cubierta. Además, desde la década de 1970, los compuestos de corcho se han utilizado para garantizar los sistemas de protección térmica para los sectores aeronáuticos. La Figura 5.6 muestra cómo los compuestos de corcho se usan comúnmente como absorbentes de calor en el espacio. Además, los compuestos de corcho se pueden moldear fácilmente.

Además de los vehículos de vuelo orbital y de reingreso, los sistemas aeroespaciales de protección térmica (TPS) también forman parte integral de la estructura principal de los cohetes de sondeo. En las últimas décadas, la base de cohetes móviles (MORABA) del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) ha utilizado recubrimientos termoestables de dos componentes a base de epoxi para proporcionar protección térmica en una amplia gama de estructuras de vehículos de lanzamiento, incluidas aletas, conos de morro, adaptadores cónicos y escudos térmicos. Es relativamente simple de fabricar y se puede rociar en casi cualquier geometría. Los impulsores clave para desarrollar un nuevo sistema de protección térmica utilizando materiales de corcho especiales son sus gases nocivos, su vida útil limitada, los requisitos de almacenamiento extensos y los residuos que deja cerca de los componentes de la carga útil. La estructura principal de un cohete de sondeo, que incluye la aleta, el cono de la nariz, el adaptador cónico y el conjunto de escudo térmico, está diseñada para proteger el cohete de la radiación térmica. Se puede ver obviamente en la Figura 5.7. El material del sistema de protección térmica solía ser un recubrimiento termoendurecible de dos componentes a base de epoxi ablativo de la base de cohetes móviles (MORABA) del Centro Aeroespacial Alemán (DLR). los elementos de carga útil vecinos durante la ablación han contribuido a la creciente demanda de un nuevo sistema de protección térmica.



Figura 5.7 Vehículo Malemute mejorado (IM) con TPS basado en corcho en la aleta [43].

En cuanto a la selección de materiales TPS, existen algunas preferencias, como bajo peso, formabilidad, respeto al medio ambiente, bajos costos, tarifas de mantenimiento bajas y sin restricciones de exportación. Por ello, se ha elegido el corcho infiltrado como el material TPS más utilizable según estos requisitos. En otras partes de nuestra investigación, se explicará el NORCOAT LIEGE.

Por la presente, NORCOAT LIEGE es la principal preferencia del mercado de la UE como producto semiacabado. El proceso de fabricación de componentes de TPS a partir de materiales de corcho consta de varios pasos esenciales: preparación de la superficie, implementación de la unión estructural, aplicación del recubrimiento de TPS, envasado al vacío y curado. En la Figura 5.8 se demuestra el proceso de preparación de la estructura VSB-30 FNC con NORCOAT LIEGE.

Tras el exitoso desarrollo del proceso de producción en una superestructura VSB-30 FNC, se ha aplicado a estructuras adicionales relacionadas con TPS, como conjuntos de protección térmica, adaptadores de motor y aletas (Figura 5.9).

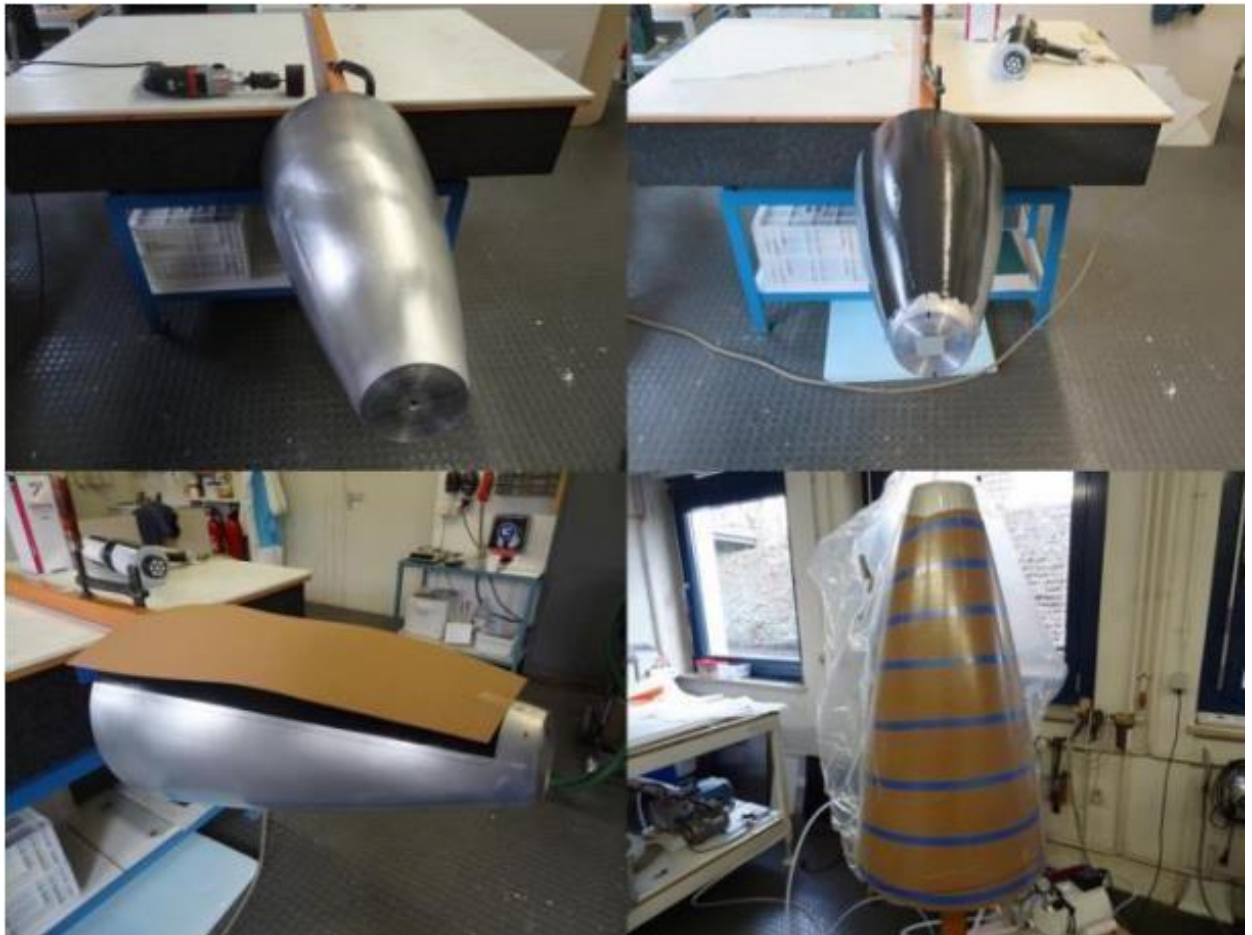


Figura 5.8 Estructura VSB-30 FNC con NORCOAT LIEGE [43].



Figura 5.9 Implementación de NORCOAT LIEGE en varias partes de estructuras de cohetes [43].

5.3.2 Proyectos sobre el Uso del Corcho en Estructuras Aeroespaciales: Proyecto Aerocork

Con el inicio del siglo XXI, las industrias vitivinícolas tienden a utilizar tapones de plástico y metal con el impulso tecnológico. Por lo tanto, la utilización de materiales de corcho cae gradualmente. Por este motivo, los productores de corcho han iniciado investigaciones y estudios para que los materiales y productos de corcho puedan utilizarse en áreas alternativas. En 2008, Dyn'Aero Industrie (DAI), un fabricante portugués de aviones ligeros, solicitó ayuda de la industria y el mundo académico para reemplazar los componentes derivados del petróleo con compuestos de corcho en sus modelos de aviones. Como resultado, se creó una colaboración y se autorizó y otorgó una subvención de I+D de QREN al consorcio a fines de 2008. El proyecto tiene como objetivo eliminar tantos componentes hechos de sustancias derivadas del petróleo como sea posible. Los materiales y esferas a base de PVC son ejemplos de componentes suministrados con aceite. La eliminación de estos materiales daría como resultado un importante ahorro de costes a lo largo del proceso de fabricación. Los componentes derivados del petróleo corren el riesgo de volverse más caros a medida que los precios del petróleo aumentan con la demanda mundial.

En las aeronaves de DAI había dos tipos de materiales, núcleo de PVC (sándwich) y Esfera (micro-sándwich). Estos materiales son derivados del petróleo y sus topologías son láminas frontales de carbono. ACC declaró que podría ser posible reemplazar estos materiales con sándwiches a base de corcho, por lo que iniciaron experimentos para lograr la sostenibilidad.

Durante la investigación, se esperaba que los materiales y compuestos de corcho se usaran para crear secciones de aviones sujetas a cargas relativamente modestas y consideradas aceptables para rayos. Se probaron unidades como el asiento del piloto, los bordes de ataque de las alas y las estructuras de las costillas de las alas. Las piezas producidas en el Proyecto AEROCORK se representan en las siguientes figuras (Figs. 5.10-5.11).



Figura 5.10 El material compuesto de corcho AEROCORK [44].



Figura 5.11 Aeronave MCR UL de Dyn'Aero [44].

5.4 Aplicaciones potenciales de compuestos de corcho en estructuras aeronáuticas/espaciales

El polvo de corcho, los compuestos y otros productos derivados se pueden utilizar en diferentes formas para protección, resistencia térmica y anti-impacto en la industria aeroespacial. A lo largo de este apartado se analizarán varias posibles aplicaciones del material de corcho.

5.4.1 Compuesto de corcho y matriz cerámica en aplicaciones aeronáuticas/espaciales

En primer lugar, la combinación de materiales de matriz de corcho y cerámica es uno de los principales temas de investigación. El corcho es preferible para aplicaciones gracias a su elasticidad no lineal, resistencia a la fractura y capacidades únicas de recuperación dimensional. Actualmente, se están realizando varios estudios sobre estructuras laminares adheridas que se producen a partir de un compuesto de matriz cerámica C/C-SiC y un material ablativo a base de corcho. Es ampliamente conocido que la unión adhesiva es el método más utilizado para combinar dos tipos diferentes de materiales. Para resistir el estrés cíclico, el esfuerzo cortante y la resistencia a la fatiga, la unión adhesiva muestra más vida útil, durabilidad y comodidad que las técnicas de unión mecánica [45]. El material ablativo para esta combinación se utiliza para programas de reingreso durante el proceso de

lanzamiento. NORCOAT LIEGE se aplicó en 2003 a la sonda Beagle 2, que entró en la atmósfera de Marte, y en 1998, el Demostrador de Reentrada Atmosférica volvió a entrar en la Tierra [46]. Es un material de corcho ablador que ha sido probado en el espacio. Además, el C/C-SiC fue mejorado por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR). Para obtener SiC en esta matriz, necesitamos tomar el producto de la reacción del carbón residual y el silicio líquido. En cuanto a asegurar una combinación adhesiva de C/C-SiC con el NORCOAT LIEGE, se pueden utilizar tres glutinosos inorgánicos comerciales para brindar resistencia hasta la temperatura de 1650°C. Los criterios de selección de este adhesivo se basan en los requisitos de temperatura de las superficies de unión. En otras palabras, este material de matriz de cerámica de corcho se puede utilizar en posibles aplicaciones aeroespaciales para garantizar la resistencia al calor y la absorción de impactos. Antes del uso industrial común del mismo, se pueden realizar varios tipos de pruebas para comprobar la adaptabilidad de las condiciones.

En otras palabras, este material de matriz de cerámica de corcho se puede utilizar en posibles aplicaciones aeroespaciales para garantizar la resistencia al calor y la absorción de impactos. Antes del uso industrial común del mismo, se pueden realizar varios tipos de pruebas para comprobar la adaptabilidad de las condiciones. En la Figura 5.12 se muestra una configuración esquemática de compuestos de corcho y matriz cerámica.



Figura 5.12. Una configuración esquemática de compuestos de corcho y matriz cerámica [47].

5.4.2 Aislamientos del sistema de lanzamiento espacial

El Sistema de Lanzamiento Espacial, el nuevo cohete de carga pesada de la NASA, enfrenta enormes cambios de temperatura durante los viajes espaciales, que van desde -423 grados Fahrenheit hasta más de 200 grados Fahrenheit. Según la NASA, nuevos modelos han sido diseñados por científicos con tecnología de punta para brindar protección térmica. Las piezas de estos nuevos modelos consistían en materiales ecológicos como el corcho y piezas más pequeñas fabricadas con una impresora 3D. Estas partes se pueden combinar para la nave espacial ORION de la NASA, que debe ser robusta para transportar astronautas a la Luna y Marte.

El aislamiento de espuma en aerosol y otros materiales de aislamiento clásicos como el corcho ofrecerán protección térmica para todos los componentes del cohete. El Sistema de Lanzamiento Espacial acelera de 0 a 17,400 millas por hora y vuela a más de 100 millas sobre la Tierra en menos de 8 minutos, y el aislamiento es lo suficientemente flexible para moverse con el cohete pero lo suficientemente fuerte para soportar las tensiones aerodinámicas. El combustible criogénico que impulsa el cohete se compone de hidrógeno líquido, y el oxígeno líquido debe permanecer extremadamente frío para permanecer líquido. La temperatura del hidrógeno debe permanecer a menos 423 grados Fahrenheit, mientras que la temperatura del oxígeno debe permanecer a menos 298 grados Fahrenheit. El combustible se convierte en gas si las temperaturas aumentan demasiado [48].

El líder del equipo del sistema de protección térmica para la etapa central del Sistema de Lanzamiento Espacial de la NASA, Michael Alldredge, describió que "A medida que el Sistema de Lanzamiento Espacial vuela, acumula un calor tremendo. Sin aislamiento, el calor del lanzamiento afectaría la estabilidad de los propulsores criogénicos, y la integridad estructural del cohete se vería comprometida. La NASA está pidiendo este material de espuma único para hacer un trabajo increíble en la protección de los sistemas de cohetes críticos, que varían desde grandes estructuras hasta la electrónica y las líneas de combustible, en un entorno de lanzamiento implacable con temperaturas extremas y presiones."

La NASA decidió utilizar espuma en lugar de corcho para este revestimiento. Dado que la espuma se aplica más fácilmente a mano y es fácil de encontrar en todas partes, utilizaron moldes impresos en 3D para el posicionamiento de la aviónica. Aunque el corcho es más denso que la espuma, asegura una conservación más retentiva para varias implementaciones. Se podrían usar láminas de corcho en la sección del motor de la etapa central (Figura 5.13).



Figura 5.13 Aislamiento térmico de espuma en aerosol en el adaptador de escenario del vehículo de lanzamiento [48].

5.4.3 Corcho en la Misión de Marte

El corcho se combinó con ingeniería innovadora para crear una nueva cápsula de reingreso a la Tierra para que la Agencia Espacial Europea (ESA) lleve muestras de Marte a la Tierra. El consorcio creado por Critical Materials, ISQ, PIEP y Amorim Cork Composites creó la cápsula para la NASA. El desafío era un concepto de cápsula de reentrada para la Tierra, con propiedades termomecánicas óptimas para garantizar la reentrada pasiva en la atmósfera terrestre. No habrá paracaídas u otro sistema auxiliar de atenuación de impactos cuando el contenedor, con muestras de suelo de Marte, entre en contacto con la superficie terrestre.

Los revestimientos utilizados para proteger las cápsulas transportadas al espacio son otra aplicación fundamental de los materiales de corcho. Cuando las cápsulas espaciales entren en la atmósfera del planeta, aterrizarán; y calentará rápidamente. Las temperaturas pueden alcanzar los 1600°C, especialmente en la superficie de la cápsula. Los materiales que pueden sobrevivir a altas temperaturas, como el metal o la cerámica, serán significativamente más pesados que el corcho. Además, estos materiales no exhiben la capacidad de conducción de calor requerida. Los materiales de corcho son adecuados para distribuir altas temperaturas en una superficie y evitar que el calor llegue al cuerpo.

Aquí se utiliza una solución única para integrar varios materiales en el diseño y la construcción de la cápsula, junto con una configuración geométrica definida, que cumple con todas las especificaciones de la ESA para su programa de exploración de Marte. La solución ofrece un sistema multifuncional que puede soportar las altas cargas térmicas y dinámicas asociadas con el reingreso a la atmósfera terrestre mientras cumple con todos los requisitos predefinidos. Además de la reducción de peso respecto a las condiciones iniciales de la Agencia Espacial Europea, esta nueva solución elimina los sistemas auxiliares y reduce los costes de producción. Se espera que una cápsula de reingreso llegue a la Tierra en 2026 para transportar muestras. En la Figura 5.14 [49] se muestra una cápsula de aterrizaje en Marte recubierta de compuesto de corcho.



Figura 5.14 Cápsula de aterrizaje en Marte recubierta de compuesto de corcho [49].

5.5 Conclusiones

Este estudio revisa las características mecánicas y térmicas de los compuestos de corcho y sus aplicaciones existentes y futuras en los campos aeroespacial, militar y otros. La investigación ha demostrado que los compuestos de corcho se han utilizado para transbordadores espaciales y cohetes como aislantes térmicos para sus caparazones. Además, el documento analiza las distinciones entre materiales de espuma, diversas formas de compuestos de corcho. Aunque se da prioridad a las aplicaciones aeroespaciales de los sándwiches de corcho, los hallazgos pueden tener relación con las industrias de vehículos. La falta de información del estudio sobre las posibles aplicaciones de este material en la aviación y el conocimiento del uso actual del corcho como aislante térmico probablemente se deba a las políticas de privacidad. A pesar de sus limitaciones, el estudio contribuye a nuestra comprensión de las propiedades sostenibles y favorables al medio ambiente del corcho en la fabricación aeronáutica. Si se pudiera investigar más para endurecer este lado mezclando aglomerados de corcho con materiales adicionales y la producción de compuestos, se debe desarrollar una mejor experiencia de absorción de fuerza. Estos conocimientos se pueden utilizar para desarrollar intervenciones específicas destinadas a la renovabilidad en las industrias y establecer una mentalidad ambiental entre los fabricantes gracias a los compuestos de corcho para un futuro mejor.

Referencias

- [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 Biodeteration 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., Karbowski, 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
- [41] Amorim Cork Composites. Available: 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/
- [43] Drescher, O., Hörschen-Eggers, M., Pinaud, G., Podeur, M. (2017). Cork based thermal protection system for sounding rocket applications-development and flight testing. 23rd ESA Symposium, Sweeden.
- [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 4th 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/>