

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TEMPLADO CON ACEITE PARA LA OBTENCIÓN DE TABLEX APTO PARA SU USO EN AMBIENTES EXTERIORES

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN QUÍMICA Y
QUÍMICA INDUSTRIAL

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

REALIZADO EN BETANZOS HB

Autor: Pedro García Álvarez

Director: Andrés Manuel de Blas Varela

Directora: Rosa María Arcas González

Índice

Resumen	2
Resumo	2
Summary.....	3
1. Introducción.....	4
1.1 La empresa	4
1.1.1 Estructura de la empresa	4
1.1.2 Principales características	5
1.2 Tablex	5
Tipos de Tablex (HB):.....	6
1.2 Proceso industrial para la fabricación del Tablex [1]	7
1.3.1 Etapas de fabricación	7
1.3.2 Mecanismo de unión en la fabricación del Hardboard [2]:.....	9
1.3.3 Reacciones de entrecruzamiento en el tratamiento térmico	11
1.3.4 Oil tempering (templado con aceite) [3]:	14
2. Planteamiento y objetivos	15
3. Trabajo experimental.....	16
3.1 Antecedentes	16
3.2 Estado del arte.....	16
3.3 Ensayos de calidad:.....	18
3.3.1 Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad [8]:.....	18
3.3.2 Resistencia a la tracción [9]:.....	20
3.3.3 Ensayo de cocción [11]:.....	21
3.3.4 Tratamiento de cocción [11]:	22
3.3.5 Determinación del hinchamiento en espesor tras inmersión en agua [12]:	22
4. Resultados y discusión	24
4.1 Introducción	24
4.2 Selección del producto más adecuado para el tratamiento	25
4.2.1 Hinchamiento	25
4.2.2 Resistencia a la tracción:	26
4.2.3 Resistencia a la tracción tras cocción	29
4.2.4 Conclusiones	29
4.3 Optimización del Compuesto 1:.....	31
4.3.1 Hinchamiento	32
4.3.2 Resistencia a la tracción	33
4.3.3 Resistencia a la tracción tras cocción	34
4.3.4 Flexión y módulo de elasticidad	35
4.4.5 Conclusiones	38
5. Análisis cualitativos	40
5.1 Lavadero.....	40
5.2 Pruebas en ambiente exterior.....	41
6. Tratamiento de residuos [13]:.....	42
6.1 Conclusión:.....	44
Conclusiones.....	45
Conclusións	45
Conclusions	46
Bibliografía	47

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Máster de la Facultad de Ciencias de la Universidad de la Coruña (UDC), realizado mediante convenio de cooperación con Betanzos HB, se lleva a cabo una investigación sobre la viabilidad de la fabricación de un tablero cuyo uso sea apto para ambiente exterior.

En él se lleva a cabo un desarrollo de tableros con propiedades mejoradas a partir del adhesivo basado en lignina analizando el cumplimiento de la normativa.

La base de la investigación se centra en el análisis de ciertos compuestos sostenibles que, aplicados en el tablero, permitan mejorar sus propiedades hidrófugas y aumentar su fuerza de enlace tanto intra como entre fibras. A través de los resultados obtenidos mediante los ensayos de calidad realizados, se seleccionan aquellos compuestos apropiados para el desarrollo del tablero. Tras demostrar su viabilidad, se realiza un estudio cuyo objetivo consiste en la optimización del proceso productivo del *Tablex* apto para uso exterior.

Resumo

No presente Traballo de Fin de Máster da Facultade de Ciencias da Universidade da Coruña (UDC), desenvolvido mediante convenio de cooperación con Betanzos HB, lévase a cabo una investigación sobre a viabilidade da fabricación dun taboleiro cuxo uso sexa apto para ambiente exterior.

Nel lévase a cabo un desenvolvemento de taboleiros con propiedades melloradas a partir do adhesivo baseado na lignina analizando o cumprimento da normativa de aplicación.

A base da investigación céntrase na análise de certos compostos sostibles que, aplicados no taboleiro, permitan mellorar a súas propiedades hidrófugas e aumentar a súa forza de enlace tanto intra coma entre fibras. A través dos resultados obtidos mediante os ensaios de calidade realizados, selecciónanse aqueles compostos apropiados para o desenvolvemento do taboleiro. Tras demostrar a súa viabilidade, realízase un estudo

cuxo obxectivo consiste na optimización do proceso produtivo do *Tablex* apto para uso exterior.

Summary

In the following Master's Thesis of the Faculty of Sciences at the University of A Coruña (UDC), developed by agreement in cooperation with Betanzos HB, a research is conducted on the feasibility of manufacturing a board suitable for outdoor environments.

The thesis focuses on the development of boards with improved properties using a lignin-based adhesive with applicable regulations examination.

The research is based on the analysis of certain sustainable compounds that, when applied to the board, enhance its water resistance and increase the bonding strength both within and between fibers. By evaluating the results obtained from quality tests, appropriate compounds for board development are determined. Once their viability is demonstrated, a study is conducted with the aim of optimizing the production process of the exterior-use *Tablex*.

1. Introducción

El siguiente Trabajo de Fin de Máster ha sido realizado en las instalaciones de Betanzos HB y tiene como objetivos principales poner en práctica la metodología de trabajo y participar en el desarrollo de proyectos de investigación industrial, llevando a cabo de inicio a fin una línea de trabajo para entender la complejidad y resultados de la investigación industrial con sus beneficios de aplicación. En concreto, el trabajo se centra en el desarrollo de tableros (Tablex) con propiedades mejoradas a partir del estudio químico del proceso: recopilación de bibliografía, estado del arte, normativa de aplicación, etc.

1.1 La empresa

Betanzos HB [1] es una empresa europea situada en el municipio de Betanzos (A Coruña, España) dedicada principalmente a la fabricación de tableros de fibras de alta densidad (Tablex), a partir de madera de eucalipto procedente de bosques sostenibles de proximidad (certificación *FSC* Y *PEFC*, sistemas que promueven la correcta gestión y preservación de la biodiversidad del entorno). La planta fue construida en 1975 e inició su actividad, bajo el nombre de Betanzos HB, en 2015 tras adquirir los activos industriales propiedad del grupo Sonae. Cuenta con una superficie de 245.000 m², un área cubierta de aproximadamente 20.000 m² y tiene una capacidad de producción de 75.000 m³/año.

1.1.1 Estructura de la empresa

La empresa se divide principalmente en los siguientes departamentos:

- i. Departamento de ventas: que se encarga principalmente de las operaciones comerciales de la compañía.
- ii. Departamento de calidad: realiza los ensayos rutinarios y asegura que la fabrica se mantiene en los estándares establecidos por las normas aplicables.
- iii. Departamento de producción: se centra en las actividades derivadas de la fabricación del tablero. Se ocupa del correcto funcionamiento de la planta.
- iv. Departamento de i+D: encargado del desarrollo tecnológico de la empresa, buscando nuevas formas de aumentar el rendimiento del tablero, o

encontrar nuevas utilidades a través de él. Es el departamento donde se ha realizado el trabajo de investigación.

1.1.2 Principales características

En el proceso de fabricación se emplean como materias primas únicamente agua y madera, esto lo convierte en un proceso limpio y sostenible, en el que cabe destacar la ausencia de compuestos derivados del petróleo tales como resinas o determinados adhesivos comúnmente empleados en la fabricación de tableros.

Betanzos HB destaca por su compromiso por una industria más sostenible y el aprovechamiento de recursos. La planta utiliza la biomasa forestal como combustible renovable, del que obtiene la energía necesaria para el correcto funcionamiento de la fábrica. Resulta una opción de energía limpia, segura y eficiente que contribuye al mantenimiento del entorno.

Además, la compañía cuenta con un sistema de gestión ambiental integrado de acuerdo con la norma *ISO 14001*, en la que se tiene en cuenta la prevención y protección del medio ambiente, siguiendo la normativa legal y las necesidades socioeconómicas requeridas para su cumplimiento.

El hecho de que en el proceso de fabricación del Tablex no se emplee ningún tipo de adhesivo químico, deriva en una gran ventaja competitiva puesto que es un tablero libre de formaldehído (excepto el procedente de la madera natural), al contrario que otros tableros de madera tales como el contrachapado, aglomerado o el MDF (tablero de fibra de media densidad). Por tanto, no es necesaria su certificación y no le son aplicables las normas *CARB2* y *TSCA Title IV*. El tablero actúa como sumidero de carbono, lo que ayuda a mitigar los efectos del cambio climático.

1.2 Tablex

El tablero está compuesto por fibras de madera sobre el que se han aprovechados las propiedades termoplásticas de la lignina como adhesivo natural. Se clasifica técnicamente como Hardboard (HB) para utilización general en ambiente seco.

Características básicas:

- Alta resistencia, densidad y flexibilidad.
- Buen comportamiento frente a la humedad.

- Elevada durabilidad, sus propiedades mecánicas y elevada densidad lo convierten en un tablero con un gran tiempo de vida útil.

Tipos de Tablex (HB):

- i. **Estándar ST-A2:** Uso no estructural para ambiente en seco.
- ii. **H1 Hydro-tempered:** Uso no estructural hidrófugo, que deriva en un menor hinchamiento y absorción de agua tras 24h.
- iii. **Superlac SL-A1:** uso no estructural para utilización en ambiente seco, calidad superficial apropiada para lacado.
- iv. **Mobelpan:** uso no estructural para ambiente en seco, pintado a rodillo con base de agua, con acabado UV para proteger la superficie frente a agentes químicos, rayas y rozaduras.
- v. **Perforado PF:** uso no estructural de ambiente seco, perforado.
- vi. **Flooring Underlay:** tablero lijado, especial para suelos en ambiente seco.

A modo de ejemplo incluyo las características técnicas del tablex tipo ST - Standard

Tabla 1: Especificaciones técnicas Tablex tipo ST - Standard [1]

<i>Propiedad</i>	<i>Ensayo de Referencia</i>	<i>Unidades</i>	<i>Espesor</i>		
			$\leq 3,5$	$> 3,5$ a $5,5$	$> 5,5$
Contenido en humedad	EN 322	%	4-9	4-9	4-9
Resistencia a la flexión	EN 310	N/mm ²	≥ 30	≥ 30	≥ 30
Resistencia a la tracción	EN 319	N/mm ²	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$
Hinchamiento en espesor	EN 317	%	≤ 37	≤ 30	≤ 25

A su vez cada tablero cuenta con diferentes espesores (2-6 mm) y dimensiones.

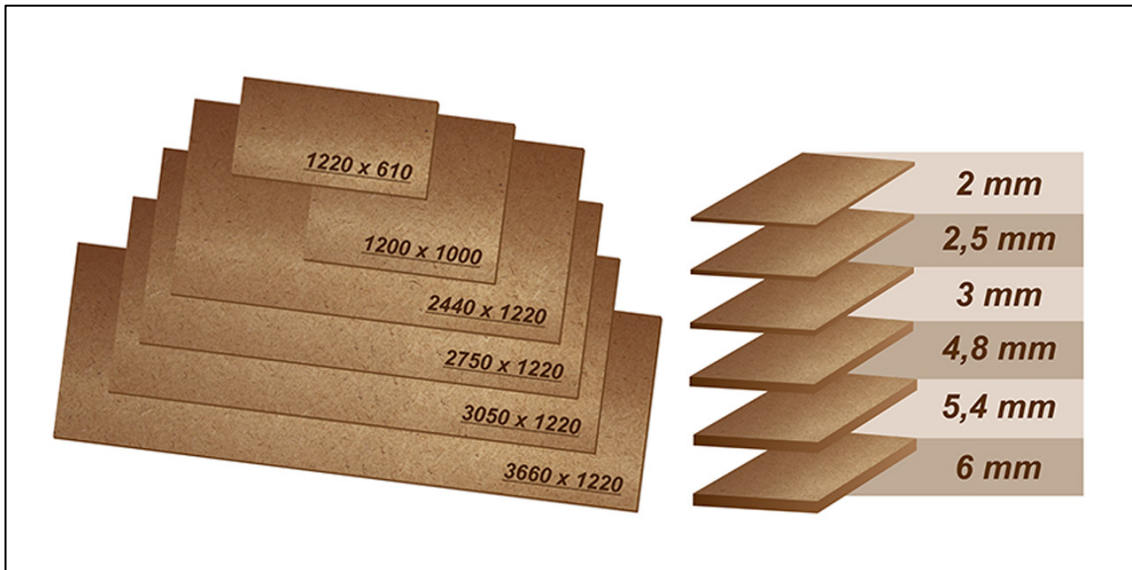


Figura 1: Espesores y dimensiones del Tablex [1]

1.2 Proceso industrial para la fabricación del Tablex [1]

El tablero de fibras se obtiene por la unión natural de las fibras de la madera, debido a sus propiedades termoplásticas y sin la adición de encolantes artificiales, ni aditivos químicos, empleando temperatura y presión en el proceso.

Las principales etapas de fabricación del Tablex son las siguientes:

1.3.1 Etapas de fabricación

i. Obtención de las fibras:

La madera (obtenida a partir de bosques de proximidad (<50km) se almacena en las instalaciones. Los troncos se transportan a las tolvas desde las cuales se alimentan los desfibradores, previo paso por un precalentador donde se somete a la madera a un tratamiento con vapor a una presión elevada, con una temperatura equivalente a 180 °C, durante 5 minutos. En esta operación se consigue el ablandamiento de la lámina media de la madera, de carácter lignoso y facilita su posterior desfibrado mecánico.

ii. Formación de la manta húmeda:

Tras la obtención de las fibras, se les añade agua, que sirve para formar la pulpa. Después de tres etapas de dilución se obtiene una concentración del 4%. Desde los tanques de pulpa se alimenta a una máquina formadora, donde la pulpa entra

con una concentración del 1% y se obtiene una hoja con una concentración de fibras de aproximadamente el 35%, que se corta transversalmente a medida de la prensa mediante el empleo de agua a presión para la obtención de las mantas. El agua empleada en esta etapa se recircula de nuevo al proceso, con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de las materias primas empleadas.

iii. Prensado:

Las mantas se colocan sobre unas mallas metálicas para introducirlas en la prensa, en la que se aplica una presión específica de 50 kg/cm² y una temperatura de 200 °C. En esta etapa tiene lugar el escurrido del agua y la unión de las fibras por medio de la lignina, dando lugar a la formación del tablero. La cara rugosa del Tablex, en contacto con la malla metálica, se forma en esta etapa.

iv. Tratamiento térmico:

El tablero se almacena en vagonetas y es sometido a un tratamiento térmico a 165 °C durante 4 - 5 horas. Este proceso es de vital importancia puesto que determina los enlaces formados y por tanto las propiedades fisicoquímicas del tablero (hidrofobicidad, resistencia mecánica, módulo de elasticidad...).

v. Clasificación:

Tras el tratamiento térmico se deja enfriar el tablero y se clasifica para separar aquellos que presenten ciertos defectos de calidad (roturas, deformaciones, etc.).

vi. Humectado:

El tablero se pasa por la máquina humectadora con el objetivo de alcanzar un grado de humedad en equilibrio con el de la atmósfera, consiguiendo su estabilizado. Este proceso es clave para evitar el doblamiento de este, puesto que, no captaría la humedad de forma equitativa debido a su estructura irregular (cara rugosa y lisa) y a la mayor exposición a esta de los bordes del tablero.

vii. Serrado y embalaje:

El tablero ya terminado se cantea, se corta en distintos tamaños o incluso se lija a petición del cliente. Posteriormente se embala y almacena hasta su salida de fábrica.

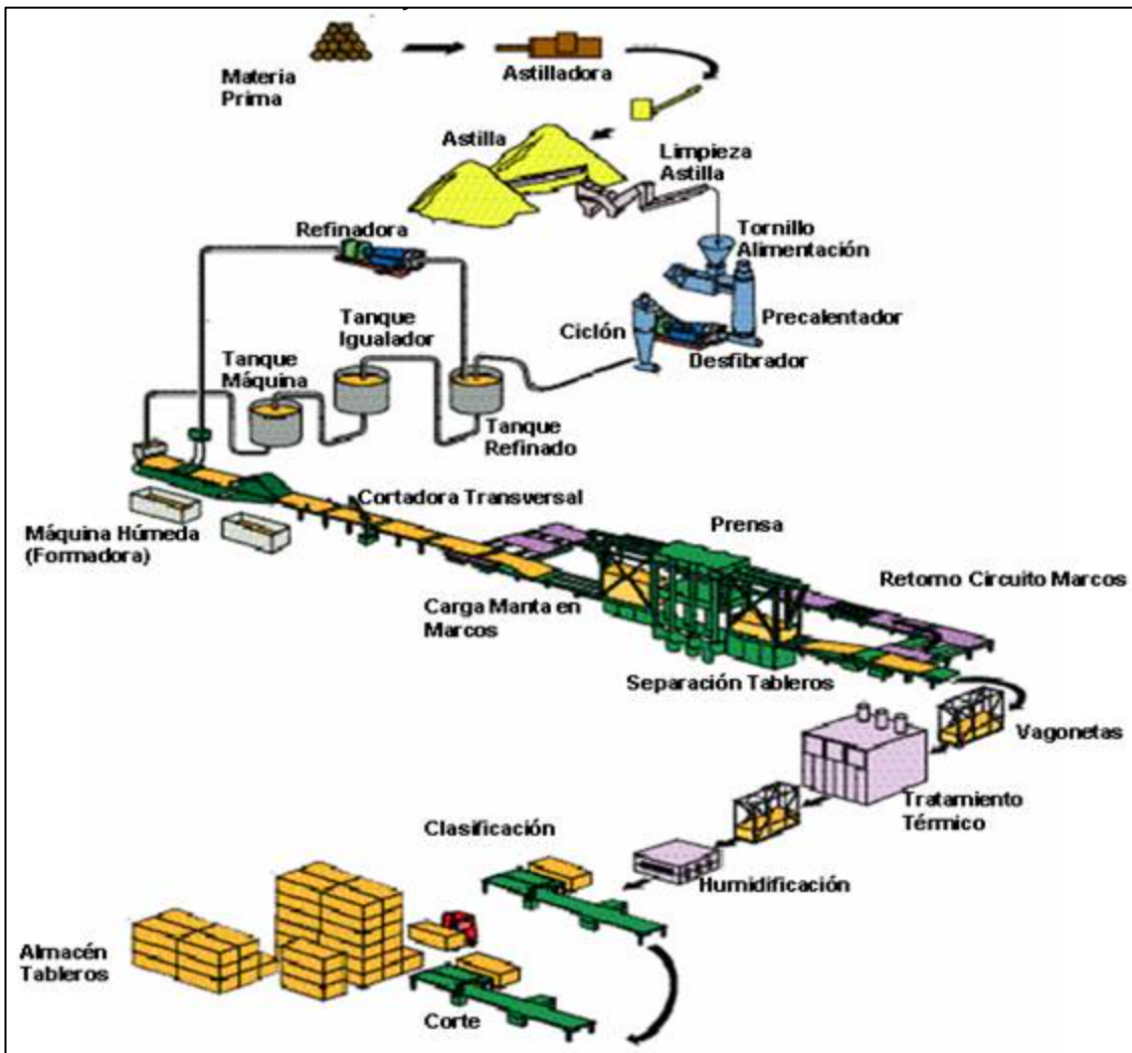


Figura 2: Esquema del proceso industrial. Elaboración propia.

1.3.2 Mecanismo de unión en la fabricación del Hardboard [2]:

En el tablero, los conjuntos de fibras y los paquetes de estas adquieren una determinada distribución dimensional. Los parámetros que expresan la fortaleza del tablero se ven afectados por el área de unión efectiva (cuanto mayor es, más fuerte es el enlace), los enlaces químicos o físicos formados (enlaces covalentes más fuertes que los de hidrógeno) y la orientación direccional de las fibras (el orden ayuda a maximizar el área de enlace).

El hardboard se produce a partir de fibras individuales o paquetes de las mismas. Tanto el enlace entre las fibras como el enlace interno de las mismas influyen en la fortaleza del tablero. Se considera que el enlace entre fibras es el más crítico de ambos debido a que estas se orientan principalmente en el plano del tablero y el enlace entre ellas

domina la fuerza de tensión perpendicular a ellas (dirección z). La mayor parte de este enlace se produce debido a enlaces secundarios, principalmente enlace de hidrógeno, que se forma entre cadenas de hemicelulosa adyacentes o cadenas de celulosa amorfas que contienen un importante número de grupos hidroxilo (-OH). La fortaleza de estos enlaces decae significativamente cuando la humedad penetra en el área de unión. En las áreas amorfas se rompen los enlaces secundarios por efecto de las capas de agua. Se prevé que los enlaces covalentes se formen entre los distintos polímeros de la madera en el área entre las fibras. Esto ocurre en mayor medida en la operación de tratamiento térmico y no tanto en la de prensado. El polímero más reactivo en la formación de este tipo de enlaces químicos es la lignina.

En la fabricación de tablero es esencial la optimización del área de enlace entre fibras. Es posible fortalecer la muestra controlando el tipo de enlaces formados en la interfase, lo que mejora la resistencia a la humedad. Otros factores determinantes serían la lisura, la densidad, la distribución de las áreas de unión y la minimización de las áreas no enlazantes.

La fuerza de enlace interna de los polímeros es inversamente proporcional al aumento de la temperatura, a la temperatura de transición vítrea los enlaces intermoleculares se reducen significativamente al mismo tiempo que las cadenas poliméricas aumentan su movilidad. Este aumento permite la rotación de las cadenas a lo largo de sus ejes y, 50 °C por encima de la temperatura de transición vítrea, la viscosidad se reduce adquiriendo el compuesto propiedades de un fluido. En estas condiciones la difusión entre las cadenas de un polímero y sus extremos en la interfase está muy favorecida, lo que permite la maximización del área de unión, este efecto se ve a su vez incrementado por el uso de presiones elevadas. Al enfriarse, los enlaces se consolidan. La degradación química de los polímeros a altas temperaturas se considera despreciable durante los periodos de prensado implicados en la fabricación del hardboard debido al corto espacio de tiempo entre los mismos.

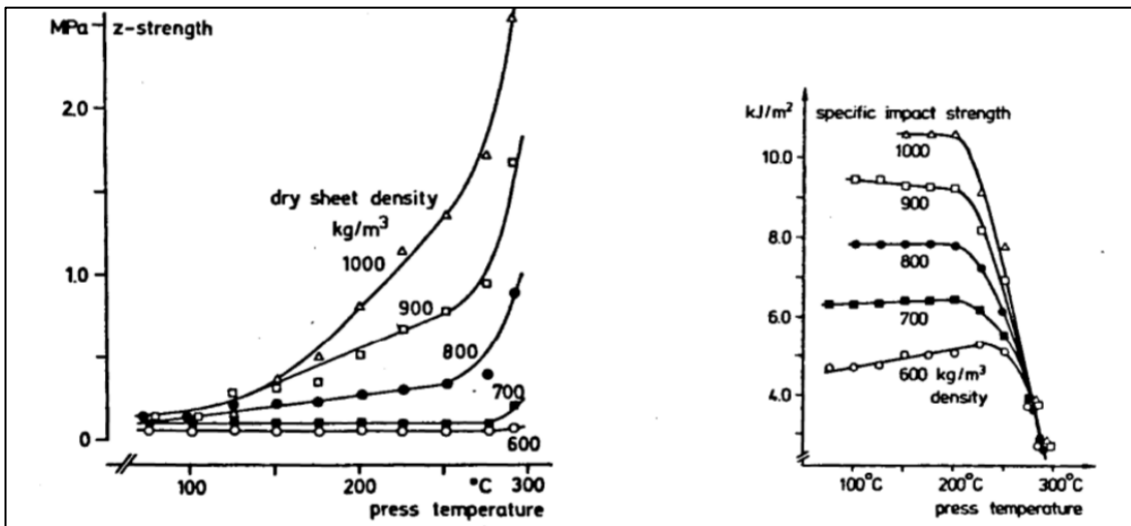


Figura 3: Efecto de la temperatura de las planchas de la prensa sobre la resistencia en el eje z y la resistencia al impacto [2]

El pH afecta a la velocidad de las reacciones de entrecruzamiento que producen los enlaces covalentes y por tanto a la resistencia al agua y la resistencia adquirida durante la operación de prensado. La resistencia a la tracción (dirección z) se incrementa en mayor medida que la resistencia en el plano (xy) del tablero. Esto es debido a que la mayoría de las fibras se alinean en el plano del tablero, lo que provoca que la mayoría de los enlaces interfibras, de carácter covalente, se produzcan en la dirección del eje z.

1.3.3 Reacciones de entrecruzamiento en el tratamiento térmico

El proceso se lleva a cabo mediante el uso de aire caliente recirculado a alta velocidad como medio de transmisión de calor. Se realiza a través de lotes dispuestos en vagonetas que permitan el paso del aire a través de estas. Las reacciones de entrecruzamiento se producen en el tratamiento térmico en dos etapas.

- i. El calor produce la activación y formación de radicales que producen la peroxidación de los polímeros. En esta etapa se forman los grupos carbonílicos presentes, preferentemente en la lignina y en los componentes oleofílicos insaturados.
- ii. Se produce el entrecruzamiento que da lugar a la formación de enlaces hemiacetálicos (se completa la autocondensación de la lignina). Es posible que también se formen acetales por escisión de moléculas de bajo peso molecular. Este tipo de reacciones se ven catalizadas por ácidos, comúnmente se utiliza sulfato de aluminio como ácido de Lewis.

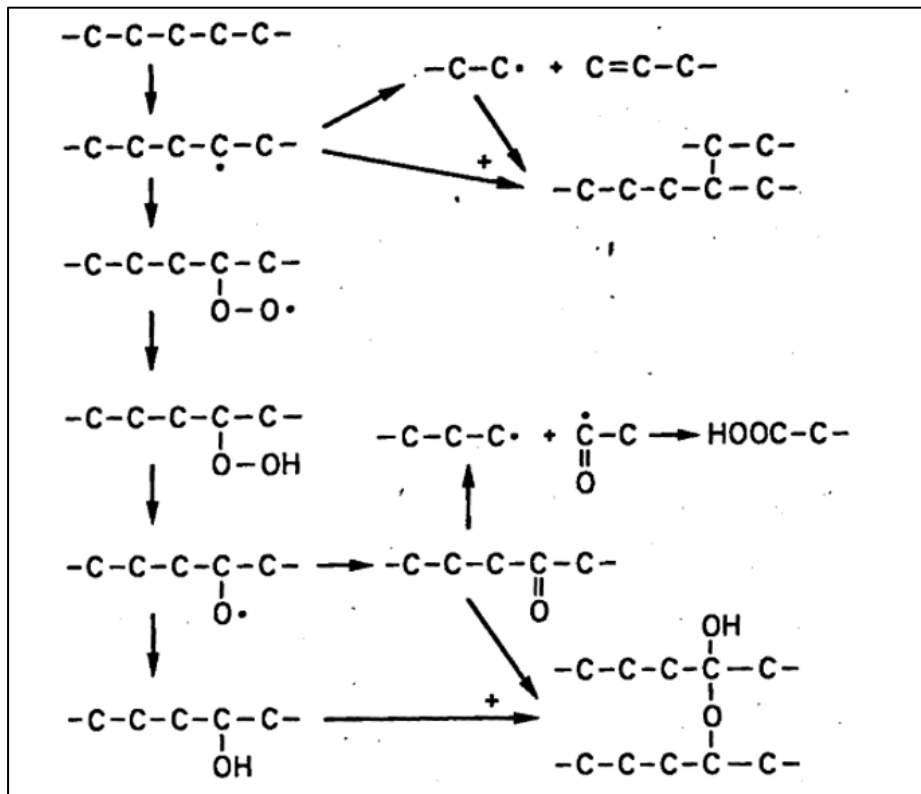


Figura 4: Ejemplo de posibles reacciones de entrecruzamiento. Formación hemiacetales [2]

Durante el tratamiento térmico, ocurren además dos cambios significativos en el tablero. En primer lugar, se produce la redistribución del material oleofílico de bajo peso molecular que da lugar a las superficies de baja energía en las fibras capaces de repeler el agua. El segundo cambio se debe a la degradación hidrolítica de los polímeros presentes en la madera que conlleva a una reducción del tamaño de cadena (efecto reflejado en la relación tensión/deformación del tablero, la resistencia a la flexión (MOR) y en el módulo de elasticidad tanto transversal como longitudinal).

Las reacciones de entrecruzamiento pueden implicar material de bajo peso molecular, como carbohidratos coloidales solubles retenidos en la manta. La caramelización de los azúcares es una reacción de entrecruzamiento secundaria producida en el tratamiento térmico. Con respecto a las fibras, el efecto de este tipo de reacciones proporciona una restricción adicional al hinchamiento (aumento del espesor de la muestra tras un periodo de tiempo determinado) y a la reducción de humedad en el equilibrio. El agua, el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y determinados aldehídos como el furfural son los principales productos liberados en forma de gases. Estos aldehídos pueden contribuir a las reacciones de entrecruzamiento.

Durante el prensado y el tratamiento térmico se obtienen determinados productos de degradación que afectan principalmente a las hemicelulosas. Esta conclusión se obtiene mediante el análisis de las fuerzas de enlace con respecto al tiempo que las muestras han sido sometidas al tratamiento. La resistencia a la tracción del eje z (relacionada con los enlaces covalentes) se incrementa en un 60%, mientras que la resistencia a la tracción en el eje x mejora un 30%.

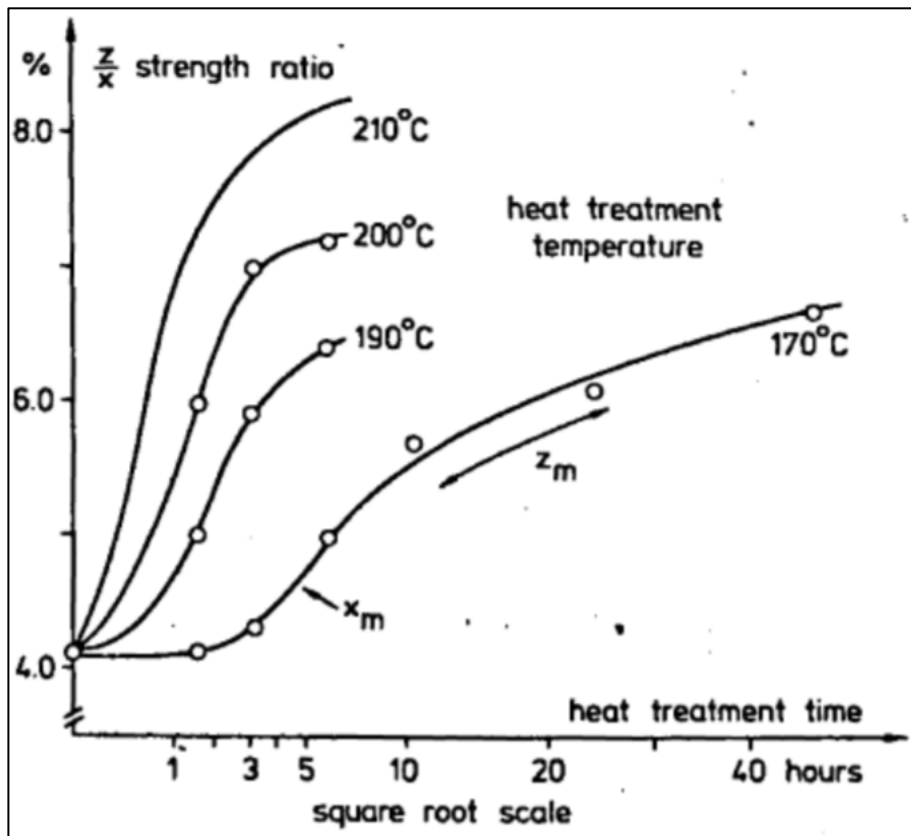


Figura 5: Relación entre la resistencia a la tracción entre los ejes z y ejes x del tablero. [2]

Durante la operación de secado en la prensa, se generan tensiones derivadas del secado. La manta se comprime en dirección perpendicular al plano del tablero (eje z), lo que evita el encogimiento habitual obtenido en el secado al aire. Por tanto, en operaciones sucesivas de captación y pérdida de humedad el tablero hincha considerablemente en espesor a la vez que se contrae en las direcciones del plano. Las reacciones de entrecruzamiento tienen lugar cuando el tablero está en un ambiente seco y en sus mínimas dimensiones.

1.3.4 Oil tempering (templado con aceite) [3]:

Las propiedades de un tablero de fibras a menudo pueden ser modificadas de múltiples formas, por ejemplo, mediante el uso de aceites secantes de origen vegetal (aceite de linaza, soja, talloil...), que son aquellos que se endurecen y se convierten en una película dura y sólida tras su exposición al aire durante un tiempo determinado. El aceite curado aglutina a las fibras y actúa como agente dimensionante, reduciendo la succión por capilaridad. El tratamiento con aceites puede tener 2 principales objetivos:

- i. Incremento de las propiedades mecánicas (densidad, rigidez) e hidrófobas del tablero
- ii. Incremento de las propiedades superficiales (resistencia frente a agentes químicos y físicos, brillo, color).

Los tres principales métodos para introducir el aceite en la madera son:

- i. Método dimensionante (“sizing method”): consiste en añadir una emulsión de aceite a las fibras en suspensión y precipitar las fibras con alúmina. Este es el procedimiento empleado en la industria papelera. El pH ha de ser ajustado sobre un valor de 4,5.
- ii. Método de inmersión: en el que el tablero, preferiblemente caliente proveniente de la prensa, se sumerge y se impregna en el aceite para posterior tratamiento térmico. Permite una adecuada distribución del recubrimiento por el conjunto de toda la superficie.
- iii. Método de espray: un aceite o emulsión es pulverizada en la manta húmeda recién formada. Es el método más versátil, puesto que permite regular el gramaje aplicado al tablero, una fácil instalación en el proceso y reduce el riesgo de incendio con respecto al método de inmersión.

El proceso de oil tempering puede variar en función de diferentes factores, como el tipo de madera empleada, la duración y temperatura del tratamiento, así como el tipo de aceite utilizado.

2. Planteamiento y objetivos

Tras comprender las principales reacciones que tienen lugar en el proceso mediante el prensado en manta húmeda y el posterior tratamiento térmico llevado a cabo e introducir el concepto de *oil tempering* (templado con aceite) se plantean una serie de procedimientos a llevar a cabo con el objetivo principal de que el hardboard (Tablex) alcance los valores establecidos por la norma (EN 622-2:2004) [4], y en caso de no satisfacer estos límites, ser capaces de hacer un tablero que satisfaga los valores de la norma para ambiente húmedo (Tipo HB.H).

Tabla 2: Especificaciones de los tableros Tipo HB.E para utilización general en ambiente exterior (según norma EN 622-2:2004) [4]

Propiedad	Método de ensayo	Unidades	Rangos de espesor nominal (mm)		
			< 3,5	>3,5 a 5,5	> 5,5
Hinchazón en espesor 24h	EN 317	%	12	10	8
Resistencia a la tracción perpendicular a las caras	EN 319	N/mm ²	0,70	0,6	0,5
Resistencia a la flexión	EN 310	N/mm ²	40	35	32
Módulo de elasticidad en flexión	EN 310	N/mm ²	3600	3100	2900
Resistencia a la tracción perpendicular a las caras después del ensayo de cocción	EN 319 EN 1087-1	N/mm ²	0,5	0,42	0,35

Conociendo los valores requeridos para su utilización en ambiente exterior (Tabla 2), y mediante el estudio de los datos proporcionados por el departamento de calidad de los últimos 3 años (2019-2020-2021) se fijan que propiedades se deben mejorar y en qué medida lo deben de hacer.

3. Trabajo experimental

Todas las **gráficas** presentes en el siguiente apartado se presentan **sin ejes ni unidades** con el objetivo de mantener la **confidencialidad** de la investigación. El **eje x** siempre aumentará de **izquierda a derecha** y el **eje y** lo hará desde **abajo hacia arriba**. Así mismo, no se detalla información ni caracterización sobre los compuestos empleados en la investigación.

3.1 Antecedentes

Como se refleja en el apartado de planteamiento y objetivos, el primer paso en el estudio consiste en establecer la situación actual del tablero, para comprender en que grado deben de mejorar las propiedades y ser capaz de determinar cuáles de ellas son críticas para el desarrollo de la investigación.

De esta forma se llegó a la conclusión de que los valores más determinantes son los de hinchamiento tras 24h, flexión y módulo de elasticidad (para muestras de bajos espesores <3,5 mm) y los valores de tracción tras cocción, ensayo que permite determinar el nivel de envejecimiento del tablero, que cobra gran importancia al tratarse de un tablero que debe de soportar de forma constante condiciones cambiantes de humedad y temperatura. Los valores de tracción del Tablex fueron satisfactorios incluso antes de aplicar ningún tratamiento adicional, esto es debido a la elevada densidad del tablero que incrementa la fuerza de enlace en el eje z (perpendicular a la muestra).

Los valores del tablero H1 (Hydro Tempered), hidrófugo, proporcionan valores que se aproximan más a la normativa (EN 622-2:2004), favoreciendo los valores de hinchamiento y tracción tras cocción (ensayos en los que evitar el agua y las filtraciones posee gran relevancia) aunque perjudicaba levemente a los valores proporcionados por los ensayos de flexión.

3.2 Estado del arte

Con el propósito de elaborar un tablero de fibras de alta densidad apto para uso exterior se ha realizado una revisión bibliográfica, tanto de tablero de alta densidad como de otro tipo de tableros (MDF, aglomerados, etc.) para contextualizar la posible viabilidad del proyecto, así como para conocer las últimas técnicas empleadas en su elaboración.

A la hora de realizar la búsqueda es de vital importancia cerciorarse de que el tablero cumple estrictamente con la normativa europea que permita el empleo en ambiente exterior, puesto que, en los principales portales de venta de internet, como por ejemplo *Leroy Merlin*, se anuncian tableros como aptos para este fin, sin embargo, en la ficha técnica del producto se establece que solo se pueden emplear en ambiente “exterior cubierto”.

El principal objetivo de la siguiente investigación consiste en el análisis de las diferentes técnicas de fabricación de tableros de madera que incrementen en gran medida sus propiedades hidrófobas, y por tanto permitan el uso exterior del mismo, cumpliendo con los estándares proporcionados de acuerdo con la normativa europea.

La elaboración de un tablero HB (hardboard) de aplicación en ambiente exterior proporcionaría un producto resistente al agua y a condiciones húmedas y completamente respetuoso con el medio ambiente. Un tablero que generaría una huella de carbono negativa. El auge de los productos derivados del petróleo en el siglo XX y los grandes beneficios derivados del empleo de resinas sintéticas, limitaron enormemente el desarrollo del hardboard, ya que resulta un método menos eficiente tanto en términos de fabricación como energéticos. Por tanto, actualmente en el mercado no se encuentra de manera comercial ningún tablero de fibras de alta densidad apto para uso exterior, sin que se la hayan aplicado resinas fenólicas (polímeros sintéticos que surgen de la reacción entre fenol y formaldehído, que dan lugar a materiales más rígidos e hidrófugos). [5]

El principal tablero empleado para este fin es el contrachapado de abedul u ocume (también llamado tablero fenólico o tablero marino), empleado habitualmente en náutica y en la construcción de embarcaciones. Es un tablero fabricado en su totalidad con chapas de madera entrecruzadas, siempre de número impar, lo que le confiere mayor estabilidad al tablero, a las que se le aplica una resina de fenol-formaldehído para mejorar sus propiedades. Además, con el objetivo de aumentar su resistencia a la erosión se puede añadir papel film en cada cara (contrachapado de carrocería) así como proteger con algún tipo de lasur o producto adecuado.

Es reseñable el producto fabricado por la empresa “Fundermax”. Esta empresa se dedica a la fabricación y suministro de materiales de revestimiento y soluciones arquitectónicas de alta calidad para aplicaciones exteriores e interiores. A partir del hardboard y

empleando HPL (High Pressure Laminate), que consiste en un laminado compuesto por un papel decorativo y varias hojas de papel Kraft saturado con resinas fenólicas, obtiene un tablero con la certificación para uso exterior pero con un uso muy limitado de estas resinas. [6]

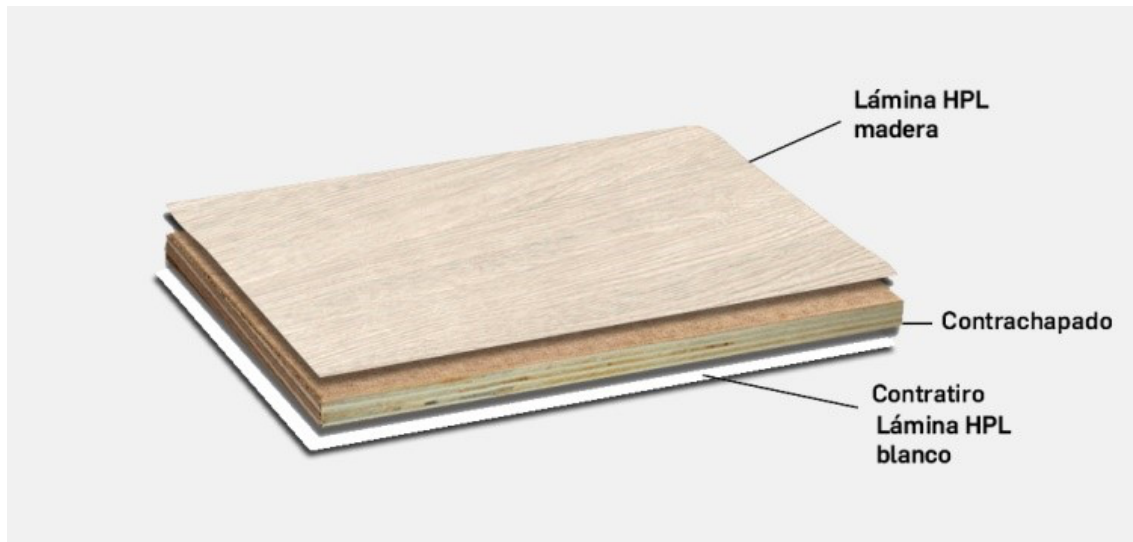


Figura 6: Esquema contrachapado con HPL [7]

3.3 Ensayos de calidad:

Las especificaciones de los tableros han de corresponderse con el percentil del 5% (95% en caso de la hinchazón en espesor) basado en los valores medios de tableros tomados individualmente y calculados según la normativa EN 326-1, es decir, a la hora de tomar un valor, este será mayor al valor mínimo establecido por la norma en el 95% de las ocasiones. Para el caso de la hinchazón en espesor, los valores deben ser iguales o menores, y para el resto de las propiedades, deben ser mayores o iguales a los valores de las tablas. Así mismo, los valores de las tablas para la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad deben aplicarse a los resultados de ensayo obtenidos en cualquier dirección del plano del tablero (transversal y longitudinal).

Con la excepción de la hinchazón en espesor, la resistencia a la tracción perpendicular a las caras después del ensayo de cocción y la resistencia a la flexión después del ensayo de cocción, los valores establecidos en las tablas se caracterizan por una humedad en el material correspondiente a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65%

3.3.1 Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad [8]:

El ensayo de flexión consiste en la combinación de fuerzas de tracción y compresión desarrolladas en la sección transversal de un elemento estructural (probeta) para resistir una fuerza transversal. A su vez también se establece el módulo de elasticidad, constante elástica que indica la rigidez de un material determinado, en este caso del tablero.

Ambas propiedades son determinadas aplicando una carga en el centro de la pieza, soportada en dos puntos. El módulo de elasticidad se calcula mediante la pendiente de la región lineal de la curva de tensión-deformación. El valor calculado es el módulo de elasticidad aparente, debido a que el ensayo incluye tensión cortante además de la correspondiente a la flexión.

El instrumento de medida debe contener los siguientes componentes esenciales:

- i. Dos soportes cilíndricos paralelos cuya longitud no exceda la anchura de la pieza de medida y de $15 \pm 0,5$ mm de diámetro. La distancia entre los cilindros deberá de ser ajustable.
- ii. Una cabeza cilíndrica de la misma longitud y $30 \pm 0,5$ mm de diámetro, situada paralela y equidistantemente de los soportes.
- iii. Un instrumento capaz de medir la desviación de la muestra en el medio del espacio con una precisión de 0,1 mm
- iv. Un sistema de medida adecuado capaz de medir la carga aplicada a la muestra con una precisión del 1% del valor medido.

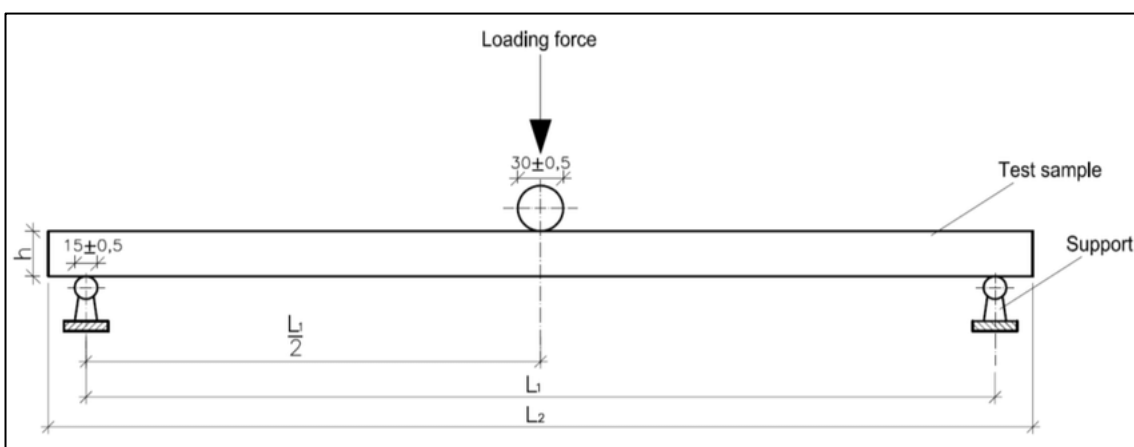


Figura 7: Esquema del instrumento empleado en el ensayo de flexión.

En la figura XX se representa de forma esquemática la disposición de los cilindros, en la que la longitud (L_1) debe ser 20 veces el ancho de la muestra ($L_1 = 20 \times A$) y la longitud (L_2) debe ser 50 mm más grande que L_1 , con un máximo de 1050 mm y un mínimo de 150 mm ($L_2 = L_1 + 50$).

Con respecto a la expresión de los resultados, el módulo de elasticidad (MPa) se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{L_t^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)}$$

donde:

L_t : es la distancia al centro de los soportes, en mm;

b : es el ancho de la muestra, en mm;

$F_2 - F_1$: es el incremento de la carga en la fracción lineal de la curva tensión-deformación (aproximadamente $F_2 = 40\%$ y $F_1 = 10\%$ de la carga máxima aplicada);

$a_2 - a_1$: es el incremento de la deformación a la mitad de la muestra (correspondiente a $F_2 - F_1$).

Cálculo de la resistencia a la flexión (N/mm^2): $Fm = \frac{3F_{max}L_t}{2bt^2}$ donde:

F_{max} : fuerza máxima aplicada, en newtons.

3.3.2 Resistencia a la tracción [9]:

Determinación de la resistencia a la fuerza de tensión, uniformemente distribuida, aplicada en el plano perpendicular al tablero (eje z), hasta provocar la ruptura. La tensión perpendicular empleada se determina mediante la máxima carga aplicada en relación con el área superficial de la muestra.

Instrumentación empleada en el análisis:

- i. Pie de rey: en orden de tomar las medidas apropiadas de la muestra.
- ii. Máquina de medida: capaz de aplicar la tensión perpendicular y medir la fuerza con una precisión del 1%.
- iii. Placas de metal: compatibles con la máquina, que, pegadas a la muestra mediante el uso de un adhesivo adecuado, (tipo sándwich) permiten la determinación de la tensión de forma totalmente uniforme.



Figura 8: Instrumentación empleada en el ensayo de tracción. [10]

Las dimensiones de la muestra deben de ser las de un cuadrado con una longitud de lado de 50 ± 1 mm. Las muestras deben ser cortadas con precisión, los ángulos deben de ser de 90° y los bordes rectos y limpios.

Cálculo de la resistencia a la tracción (N/mm^2): $F_{tr} = \frac{F_{max}}{l \times l}$ donde:

l: longitud de los lados de la muestra cuadrada, en mm.

3.3.3 Ensayo de cocción [11]:

El ensayo de tracción tras cocción nos permite evaluar la calidad del encolado de tableros de partículas, destinados a usos en condiciones húmedas.

Instrumentación requerida:

- i. Calibre, según se especifica en la norma EN 325.
- ii. Baño de agua: con regulador de temperatura y capaz de elevar el contenido hasta el punto de ebullición, a una velocidad determinada, y de mantenerla durante dos horas.
- iii. Máquina de ensayo (norma EN 319), misma que para el ensayo de tracción.
- iv. Placas de apoyo del ensayo: placas metálicas encoladas a las probetas.

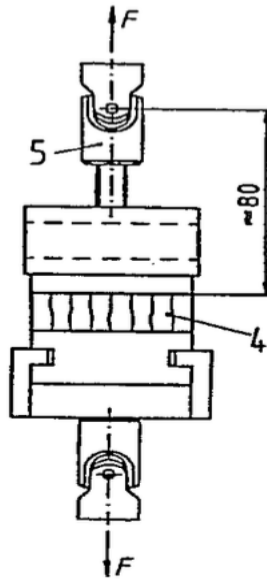


Figura 9: Esquema máquina de ensayo: 4; Probeta, 5; Junta articulada de autoalineación

3.3.4 Tratamiento de cocción [11]:

Se colocan las probetas en el baño de agua y se cubren con agua limpia a una temperatura de $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y un pH de 7 ± 5 . La separación de unas y otras y de los lados y del suelo deberá ser siempre mayor de 15 mm con el objetivo de permitir la libre circulación de agua. Esta distancia se deberá mantener durante todo el tratamiento.

Se calienta el agua hasta el punto de ebullición en 90 ± 10 min. La ebullición deberá continuar durante 120 ± 5 min. Tras el tratamiento térmico se dejan las muestras sumergidas aproximadamente 60 min en agua a temperatura ambiente $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente las probetas se secan en estufa a una temperatura de $70 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 16 horas. Tras la cocción se realiza el ensayo de tracción previamente explicado.

3.3.5 Determinación del hinchamiento en espesor tras inmersión en agua [12]:

El objetivo del ensayo consiste en determinar la diferencia (%) de espesor que experimenta una muestra cuadrada de dimensiones de 50 ± 1 mm por lado tras una inmersión en agua, a una temperatura de $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, mediante el empleo de gradillas que garanticen una mínima separación entre muestras y el fondo, durante 24 h.

Expresión de los resultados:

$$\text{Hinchamiento (\%)} = \frac{t_2 - t_1}{t_2} \times 100$$

donde:

t_2 : Espesor tras inmersión, en mm

t_1 : Espesor inicial, en mm

A su vez, también podría determinarse el porcentaje de absorción de agua, midiendo el peso antes y después de la inmersión y estableciendo la siguiente relación:

$$\text{Absorción agua (\%)} = \frac{p_2 - p_1}{p_1} \times 100 \text{ donde:}$$

p_2 : peso tras la inmersión, en g

p_1 : peso inicial, en g

4. Resultados y discusión

4.1 Introducción

Tras el análisis de las características inherentes al tablero, a través de los datos proporcionados por el departamento de calidad mediante los ensayos de calidad rutinarios, se hace evidente la necesidad del uso de algún compuesto que mejore sus propiedades. Este compuesto ha de aumentar la rigidez del tablero, en particular debe favorecer la resistencia a la flexión en tableros de bajo espesor y además debe aumentar sus propiedades hidrófugas (evitando que el agua penetre y se absorba), lo que favorece un menor hinchamiento así como una mayor resistencia al ensayo de cocción.

Para que un compuesto sea admisible para este uso debe de ser respetuosos con el medio ambiente, estar libre de compuestos derivados del petróleo, debe ser de origen completamente natural (bien sea vegetal, animal o mineral), y finalmente ser compatible con la operación de tratamiento térmico, así como abarcar el concepto de *oil tempering*. Es decir, un compuesto que permita magnificar las reacciones de entrecruzamiento con la lignina presente en las fibras de madera, generando un compuesto más apolar, que permita repeler al agua, y con unos enlaces más fuertes.

Teniendo en cuenta estas premisas, en primer lugar, se seleccionan una serie de 5 compuestos con el propósito de evaluar su comportamiento sobre el tablero, mediante un tratamiento aplicado a brocha/rodillo, y establecer una hoja de ruta sobre que recubrimiento sería más apropiado y proporcionaría una notable mejoría en las propiedades. Las muestras evaluadas han sido de tablero de elevado espesor.

Posteriormente, tras establecer aquellos compuestos que cumplen con las propiedades deseadas, se procede a la optimización de la aplicación del mismo, con el objetivo de obtener un método con la mayor eficiencia posible.

4.2 Selección del producto más adecuado para el tratamiento

4.2.1 Hinchamiento

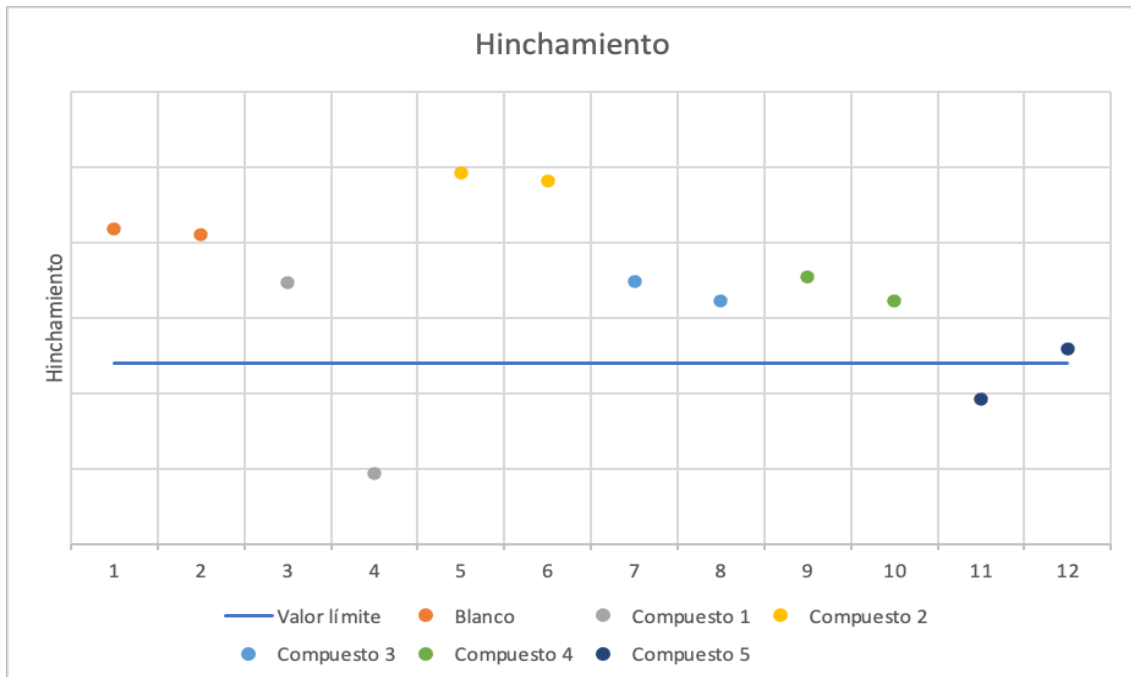


Figura 10: Valores medios obtenidos tras el ensayo de hinchamiento. Elaboración propia.

En la siguiente gráfica se representan los valores medios obtenidos del ensayo de hinchamiento tras 24 h. Para cada muestra tenemos dos valores, los valores impares se corresponden con una aplicación tras el tratamiento térmico y los valores pares con una aplicación antes de llevar a cabo el templado de las muestras. La línea expresa un valor máximo aceptable que define un valor considerado como apropiado para determinar la viabilidad del compuesto empleado. Cuanto más abajo de la línea se encuentre el valor, mayor hidrofugacidad de la muestra. El *Compuesto 1* ha resultado ser el más adecuado puesto que tras la operación de tratamiento térmico experimenta una notable mejoría, que implica una mayor repelencia al agua. El compuesto 5 a pesar de no experimentar una mejoría mediante el tratamiento térmico muestra unas propiedades a tener en cuenta, muy próximas al valor deseado con respecto a este ensayo. Los demás compuestos experimentan una leve mejoría tras el tratamiento térmico, pero no muestran un gran incremento con respecto al blanco, llegando incluso a mostrar valores mayores de hinchamiento en el *Compuesto 2*.

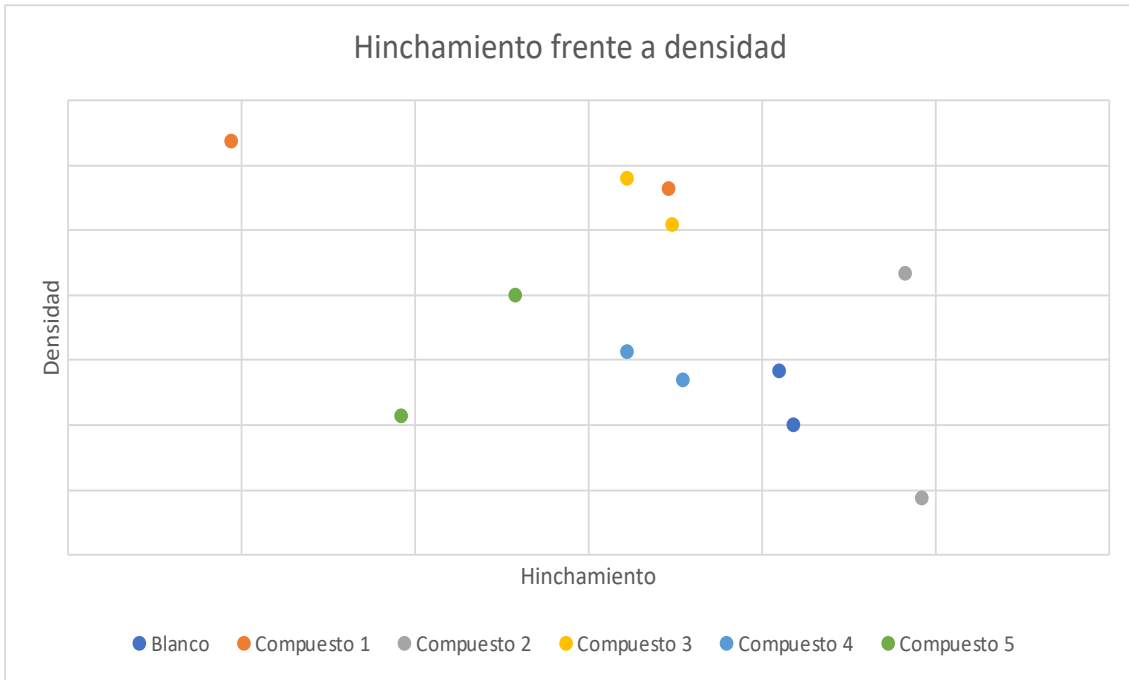


Figura 11: Representación de los valores medios de hinchamiento obtenidos frente a la densidad del tablero. Elaboración propia.

Representando de nuevo los pares valores obtenidos de hinchamiento frente a la densidad de la muestra, permite observar una pequeña tendencia, a mayor densidad, menor hinchamiento. El primer valor de cada compuesto se corresponde con la aplicación tras templado y el segundo valor con la aplicación antes del tratamiento térmico. Es especialmente notable el cambio de densidad en el Compuesto 1. También permite apreciar que el Compuesto 5 no ha disminuido su hinchamiento a través del tratamiento térmico.

4.2.2 Resistencia a la tracción:

El ensayo de tracción proporciona información sobre la fuerza de enlace entre fibras del tablero, es decir, si se han llevado a cabo nuevas reacciones de entrecruzamiento que hayan aumentado la fuerza de enlace en las muestras.

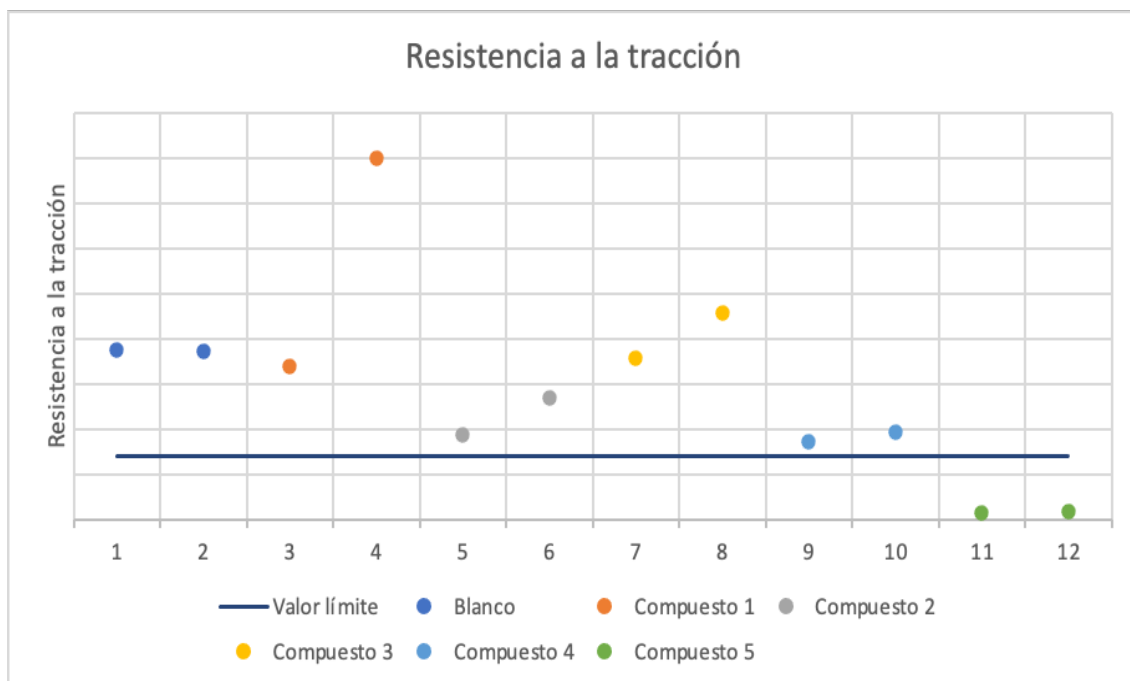


Figura 12: Representación de los valores medios de resistencia a la tracción. Elaboración propia.

El objetivo de este ensayo consiste en obtener la mayor resistencia a la tracción del tablero posible, obtenida tras la aplicación de cada compuesto. La línea representa aquel valor mínimo considerado como aceptable.

Se han representado en la siguiente figura los valores obtenidos tras el ensayo de tracción de los diferentes compuestos. Los compuestos impares son aquellos en los que la aplicación ha tenido lugar antes del tratamiento térmico y los pares aquellos en los que la aplicación ha sido previa a la operación de templado. Se observa una mejoría general en el conjunto de todos los compuestos, tras el tratamiento térmico, exceptuando el *Compuesto 5*. Este compuesto no ha generado una adherencia suficiente al tablero lo que ha derivado en una nula resistencia a la tracción, es decir, la rotura no ha sido producida a la muestra, sino que ha roto a través del recubrimiento (se ha despegado). De nuevo, el *Compuesto 1* ha resultado en un notable incremento de sus propiedades. Los *Compuestos 2 y 4* no han proporcionado mejoras sustanciales al tablero, comparado con los valores del blanco.

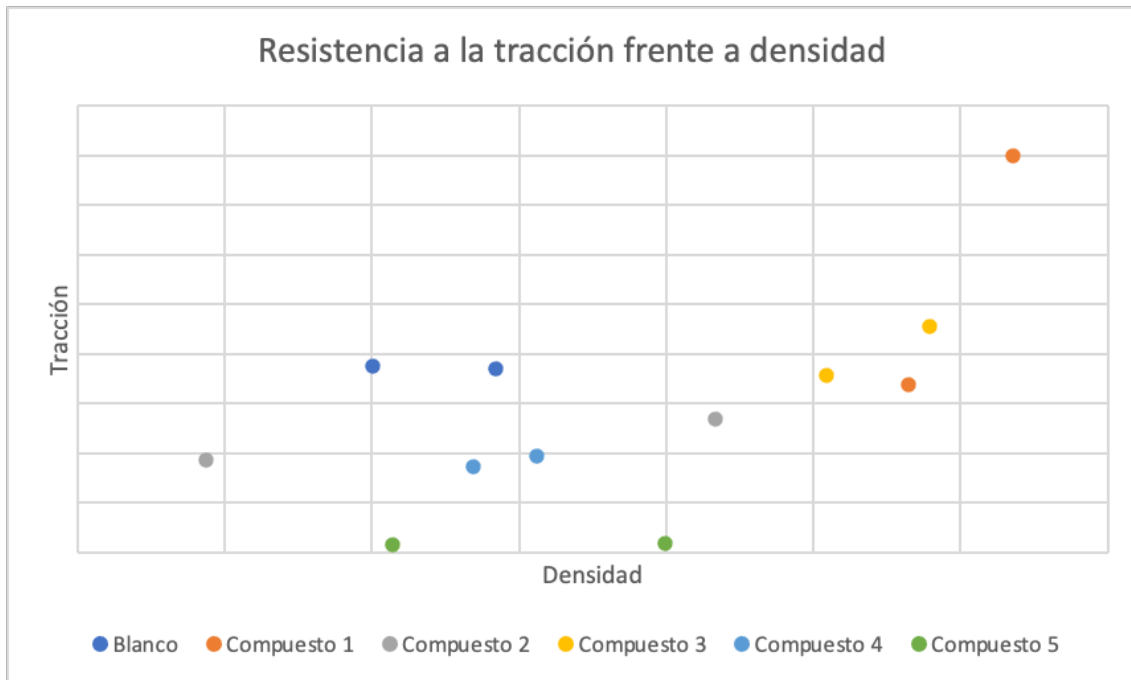


Figura 13: Relación entre resistencia a la tracción y densidad. Elaboración propia.

Se observa una cierta relación entre densidad y tracción. La resistencia a la tracción tiende a ser mayor cuando la densidad del compuesto es mayor. Es especialmente destacable el aumento de tracción y densidad, entre los compuestos 1-4, obtenido tras el tratamiento térmico comparando los valores ante el mismo compuesto con aplicación antes y tras temple. El compuesto 5, no experimenta ningún aumento en sus propiedades debido a la falta de adherencia muestra-compuesto que impide determinar de manera apropiada la resistencia a la tracción, como se ha explicado en la gráfica anterior.

4.2.3 Resistencia a la tracción tras cocción

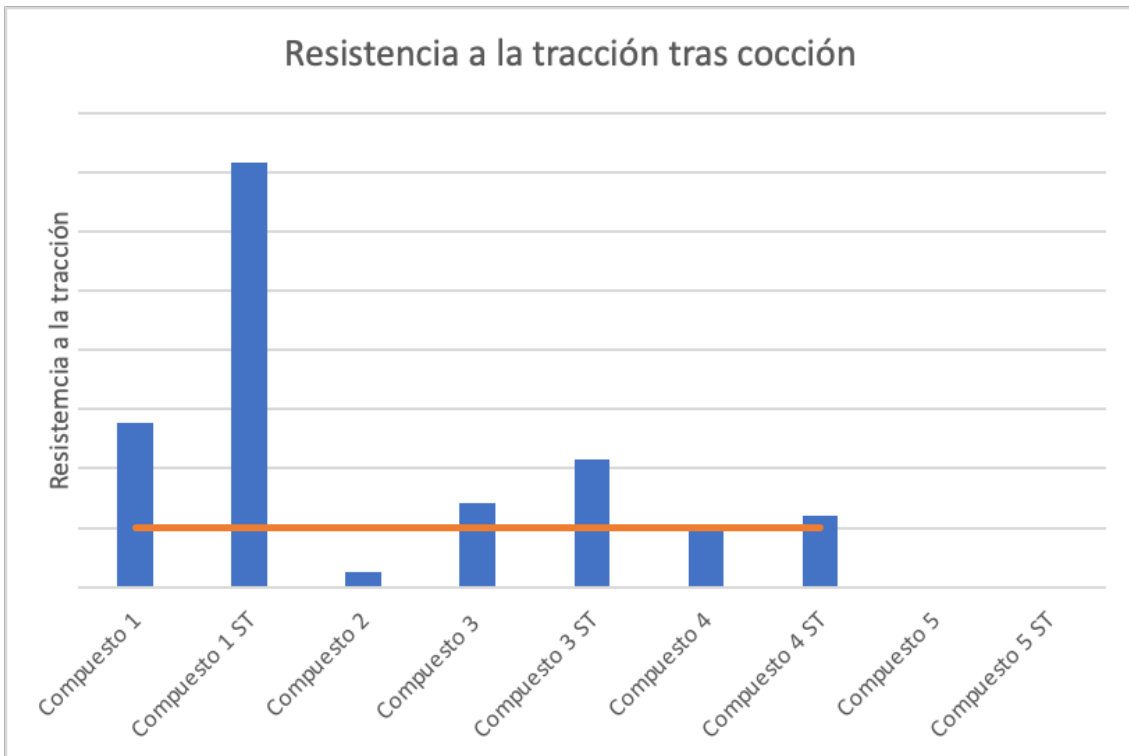


Figura 14: Valores obtenidos de resistencia a la tracción tras cocción. (ST: aplicación sin templado) Elaboración propia.

De igual forma que en el ensayo de resistencia a la tracción los *Compuestos 1 y 3* son aquellos que mejores propiedades obtienen, ambos superan el valor mínimo determinado como adecuado para la prueba. El compuesto 5 de nuevo muestra problemas de adherencia, y no ha llegado a ser sometido al ensayo de tracción, puesto que tras las 16h en estufa a 70°C, el recubrimiento se ha separado de la muestra (no tiene una fijación suficiente, ni parece penetrar en absoluto en el tablero). Los *Compuestos 2 y 4* han obtenido resultados mediocres de tracción, que reflejan la escasa mejora proporcionada en las propiedades del tablero.

4.2.4 Conclusiones

De los 5 compuestos diferentes estudiados el *Compuesto 1* ha sido el único que ha proporcionado resultados satisfactorios en el conjunto de todos los ensayos, y además ha proporcionando una mejora sustancial en todas las propiedades medidas. Cabe destacar, además, una mayor facilidad de aplicación y de obtención del compuesto, factores a considerar con respecto a una posterior aplicación a escala industrial. El compuesto 5 a pesar de haber obtenido buenos valores tras el ensayo de hinchamiento

en 24 h, no presenta mejoras sustanciales mediante el tratamiento térmico y no genera una buena adherencia en el tablero, probablemente necesite un mayor tiempo de curado que el que ha tenido, lo que dificulta gravemente su aplicación a escala industrial, por lo que se ha desechado su empleo pese a sus resultados. El *compuesto 3* aunque ha mejorado significativamente la rigidez del compuesto no proporciona una sustancial mejora de la hidrofugacidad de la muestra, lo que compromete su aplicación en ambiente exterior. Los *compuestos 2 y 4* no proporcionan ninguna mejora de propiedades tanto cualitativas como cuantitativas en el tablero.

Tras las primeras aproximaciones, y los resultados arrojados por las mismas, se ha decidido continuar la línea de investigación empleando el *Compuesto 1*. Por tanto, la investigación se ha de centrar en determinar qué cantidad de compuesto 1 (gramaje) es necesaria para alcanzar una mejora de propiedades óptima para cada determinado espesor del tablero.

Es necesario subrayar la mejora de propiedades general (mayor fuerza de enlace, principalmente producida en el eje z del tablero, mayor impermeabilidad y menor penetración del agua en la muestra) producida cuando los compuestos eran aplicados en el momento previo al tratamiento térmico, frente a aquellos en los cuales la aplicación se producía tras la operación de templado, que permite tener una idea general de las reacciones que se pueden estar llevando a cabo entre el *Tablex* y el compuesto empleado.

4.3 Optimización del *Compuesto 1*:

Una vez establecido el compuesto que va a ser objeto de estudio, se debe determinar en que condiciones desarrolla un incremento de las propiedades óptimo empleando la menor cantidad posible del mismo. Todos los ensayos se van a realizar aplicando el *Compuesto 1* en el momento previo al tratamiento térmico. Se ha de evaluar el comportamiento del tablero frente a diferentes gramajes, cómo estos afectan a su densidad y cómo actúa el compuesto frente a diferentes espesores de tablero. El espesor resulta ser un factor fundamental a la hora de determinar las cualidades aportadas por el compuesto. Esto se debe a que las propiedades del tablero no se mantienen constantes entre diferentes espesores, se producen diferencias de densidad, lo que afecta de forma directa a la fuerza de enlace interna y, por tanto, a la rigidez del tablero. Además, se ha observado que la migración del compuesto a través del tablero es un factor determinante, de manera que favorece al tablero de bajo espesor (necesita una menor aplicación para conseguir un incremento sustancial de sus propiedades hidrofugas), y limita la aplicación al tablero de alto espesor.

La aplicación del compuesto se ha realizado mediante el empleo de una brocha, en una o varias capas (en función del gramaje que se desea emplear). En caso de ser necesaria más de una aplicación se debe esperar un tiempo prudencial que permita al tablero absorber eficazmente el compuesto, para aplicar una capa posterior. La primera aplicación es la más determinante para establecer el gramaje definitivo puesto que el tablero en blanco muestra una mayor capacidad de absorción. Si se requiere un mejor acabado estético y además reducir un poco el gramaje de compuesto en el tablero, se puede emplear un paño de algodón que aporta una mayor uniformidad y suavidad al tablero. La cuantificación del gramaje de compuesto aplicado en el tablero se establece en húmedo, es decir, teniendo en cuenta los compuestos volátiles presentes en el mismo (un pequeño porcentaje del compuesto contiene isoalifáticos y un porcentaje inferior al 1% de limoneno). Además, ha de tenerse en cuenta el tratamiento de las emisiones que tendrán lugar en la cámara de tratamiento térmico, siendo necesario un sistema de tratamiento de residuos (principalmente compuestos orgánicos volátiles).

4.3.1 Hinchamiento

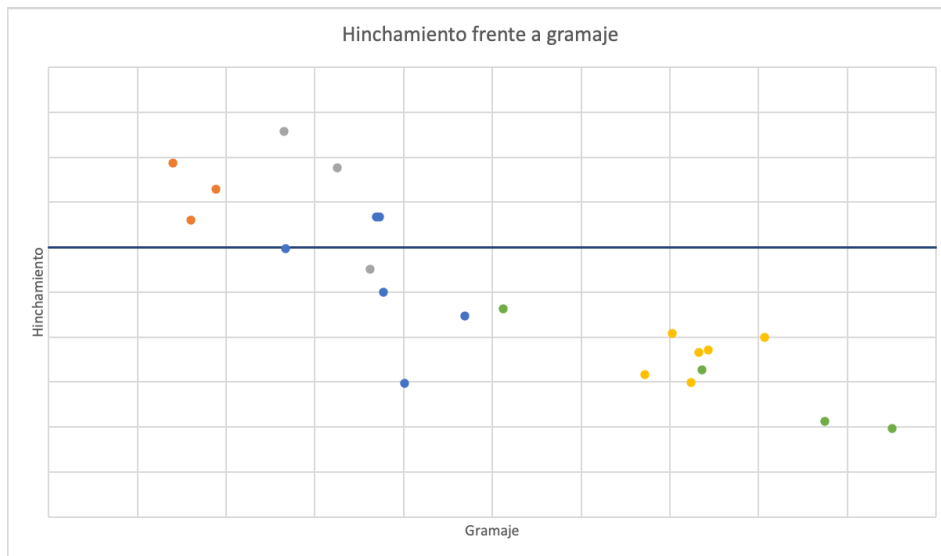


Figura 15: Representación de los valores obtenidos tras el ensayo de hinchamiento frente al gramaje aplicado en la muestra. Muestras de bajo espesor. Elaboración propia.

Mediante la determinación del hinchamiento y estableciendo una relación con el gramaje, en muestras de bajo espesor, se muestra como tendencia que a mayor gramaje (mayor cantidad de compuesto empleado por volumen de muestra), menor hinchamiento. Esta tendencia permite determinar la cantidad de compuesto necesario para cumplir con los valores determinados por la normativa europea. Los diferentes colores en la gráfica implican grupos diferentes de muestra provenientes de tableros obtenidos a partir de prensadas diferentes.

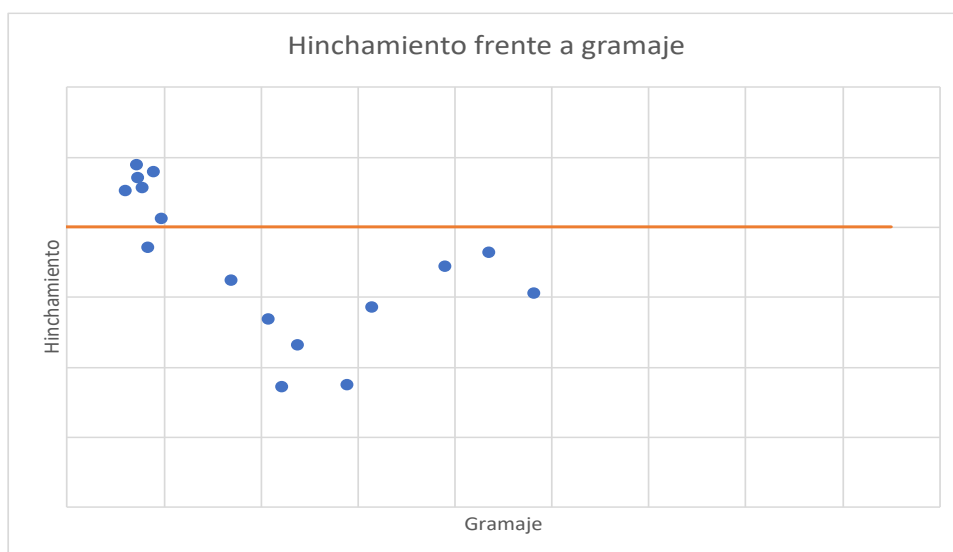


Figura 16: Valores de hinchamiento obtenidos frente al gramaje en muestras de alto espesor. Elaboración propia.

El hinchamiento para muestras con elevado espesor resultó ser el factor más determinante a la hora de alcanzar los valores máximos establecidos por la norma. Con gramajes bajos la muestra supera los valores de hinchamiento máximos tolerables, esto puede ser debido a la velocidad y/o capacidad de migración del compuesto en el Tablex. Por ende, el tablero requiere de un gramaje elevado para cumplir esta especificación. En la figura además se observa de nuevo una tendencia a la baja del hinchamiento cuando se aplica un mayor gramaje, sin embargo, se detecta una saturación del tablero cuando se aplica un gramaje especialmente elevado, en el que no sólo no se produce una mejora de propiedades, sino que incluso se llega a perder la hidrofugacidad previamente adquirida.

4.3.2 Resistencia a la tracción

La tracción se ha establecido como la propiedad de menor importancia en la investigación. El tablero de alta densidad posee una resistencia a la tracción elevada sin necesidad de añadir ningún tipo de recubrimiento. De todos modos, resulta interesante establecer en qué medida el *Compuesto 1* afecta a esta propiedad, puesto que, el ensayo de tracción indica la fuerza de enlace entre fibras (eje z) y sería indicativo de nuevas reacciones de entrecruzamiento formadas entre tablero y compuesto.

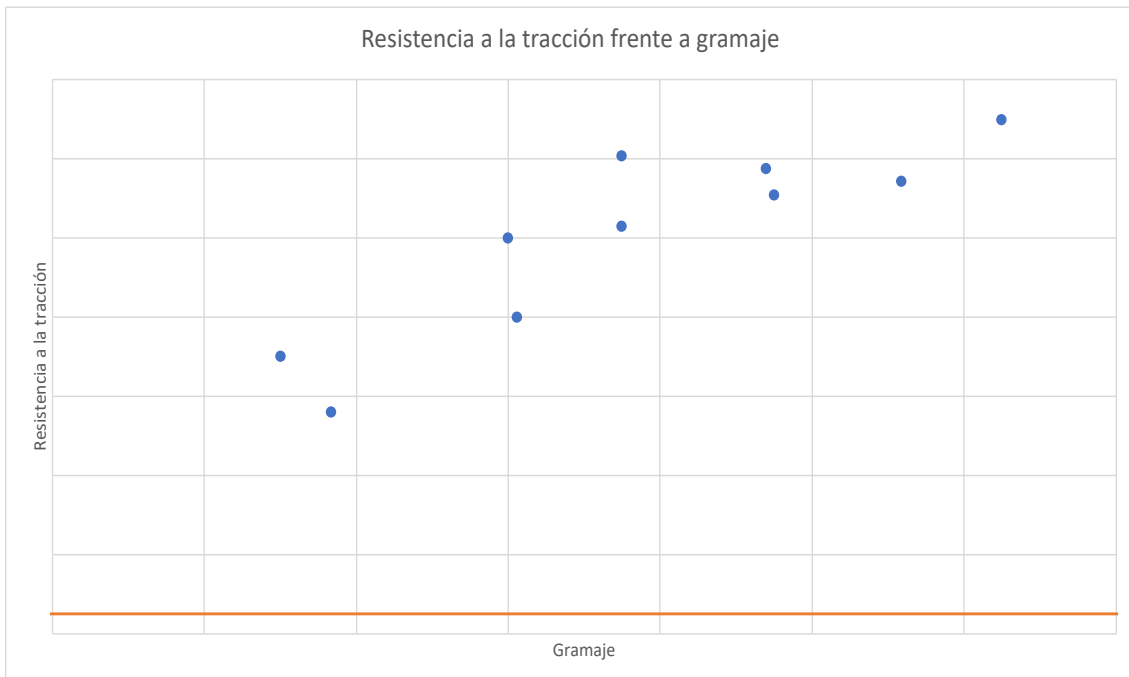


Figura 17: Valores medios obtenidos en los ensayos de resistencia a la tracción frente al gramaje empleado. Elaboración propia.

En todos los ensayos realizados la resistencia a la tracción obtenida fue superior al 80% con respecto al blanco de muestra empleado. En la figura se aprecia de nuevo una tendencia lineal de una propiedad con respecto al gramaje. Resulta claro, que cuanto más gramaje se emplee en la elaboración del tablero, mayor fuerza de enlace producida.

4.3.3 Resistencia a la tracción tras cocción

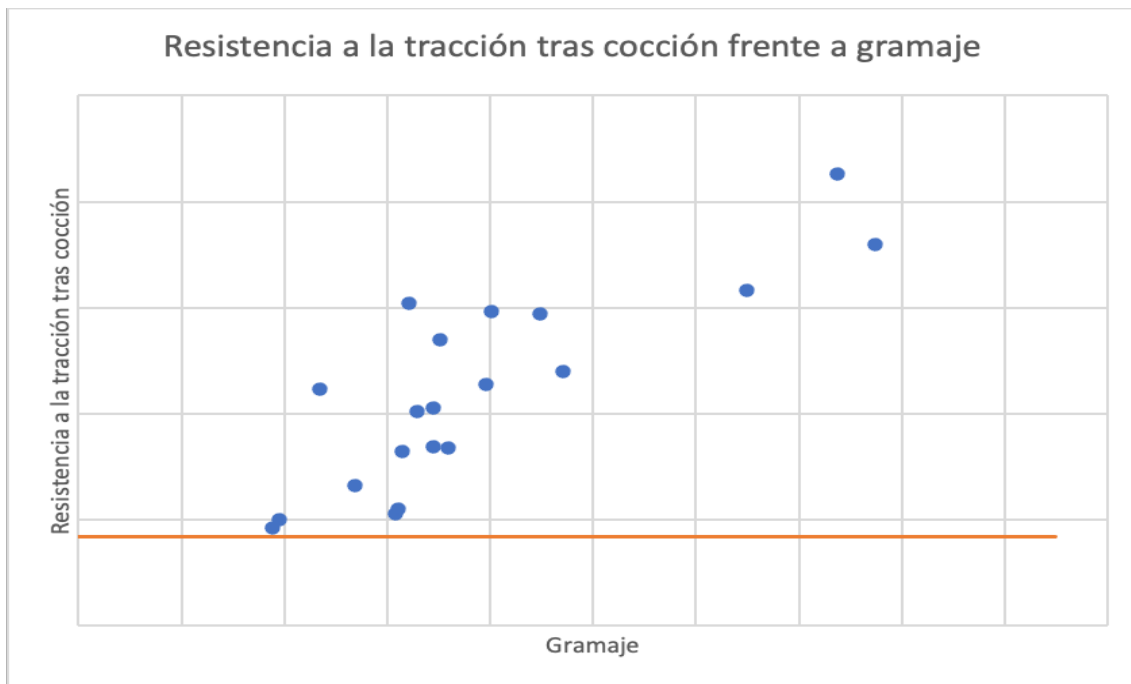


Figura 18: Valores obtenidos mediante ensayo de tracción tras cocción frente a gramaje. *Elaboración propia.*

Todo el conjunto estudiado cumplió con los valores mínimos que han sido establecidos como aceptables en el rango de gramaje establecido. Se vuelve a ver reflejada la tendencia al alza con respecto al gramaje, aunque no se considera una propiedad determinante (significativa) puesto que no limita el uso necesario de compuesto ya que una ligera aplicación es suficiente para obtener unos resultados apropiados. Esta determinación sirve para establecer una aproximación sobre el comportamiento del tablero a lo largo de su vida útil. Lo que refleja es una apropiada durabilidad en condiciones ambientales extremas (durante la cocción la muestra se sumerge en agua hirviendo durante 2,5 h y a mayores la hora y media que tarda en alcanzar el baño los 100 °C). Buscando un uso del tablero en ambiente exterior, es de esperar una gran durabilidad en condiciones cambiantes de humedad y/o humedad elevada.

4.3.4 Flexión y módulo de elasticidad

a) Resultados para muestras de bajo espesor:

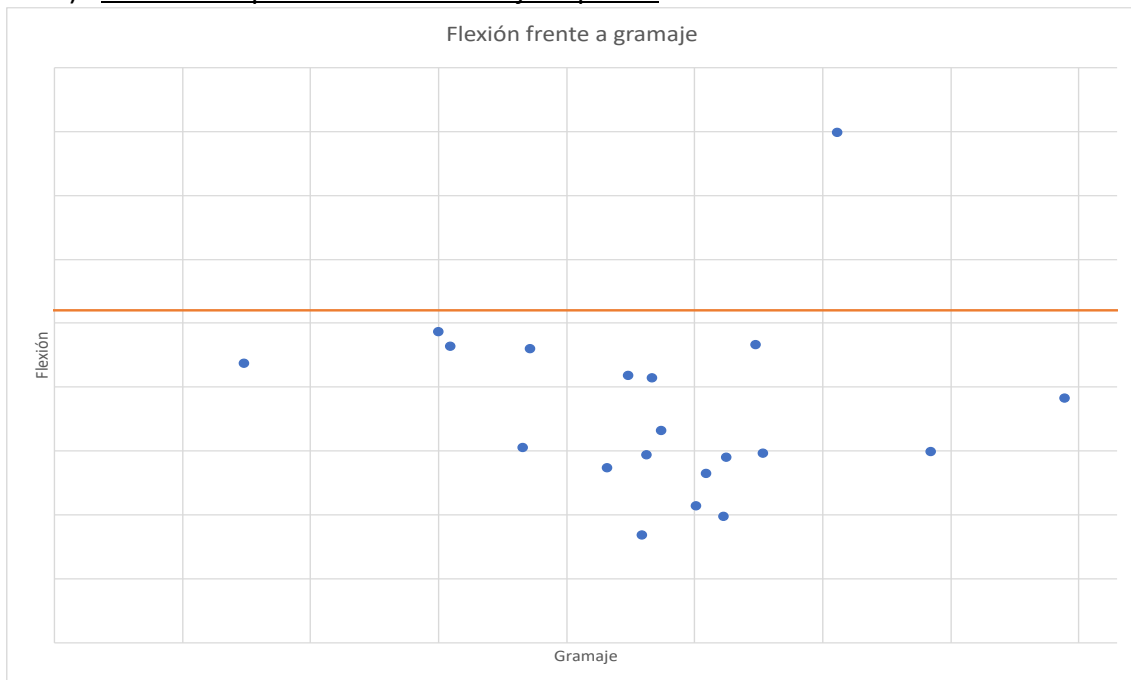


Figura 19: Valores de la resistencia a la flexión frente al gramaje empleado. Muestras de bajo espesor. Elaboración propia.

La Figura 19 muestra los resultados obtenidos del test de resistencia a la flexión en tableros de bajo espesor. Sólo en una ocasión se ha superado el valor fijado como mínimo. Este valor se debe a una imprecisión en el instrumento de medida en el que se ha representado un pico en la curva de tensión-deformación que ha modificado el valor máximo de tensión aplicada (la máquina anotó un valor de tensión máxima muy superior al real). Además, no se observa ningún tipo de mejora en las propiedades con el aumento del gramaje, los valores obtenidos de resistencia a la flexión no muestran una correlación frente a la variación de la cantidad de compuesto empleada. Por consiguiente, se ha rechazado la viabilidad del compuesto en muestras de bajo espesor, ya que no otorga la rigidez necesaria con respecto a los esfuerzos de flexión a los que han sido sometidas las muestras.

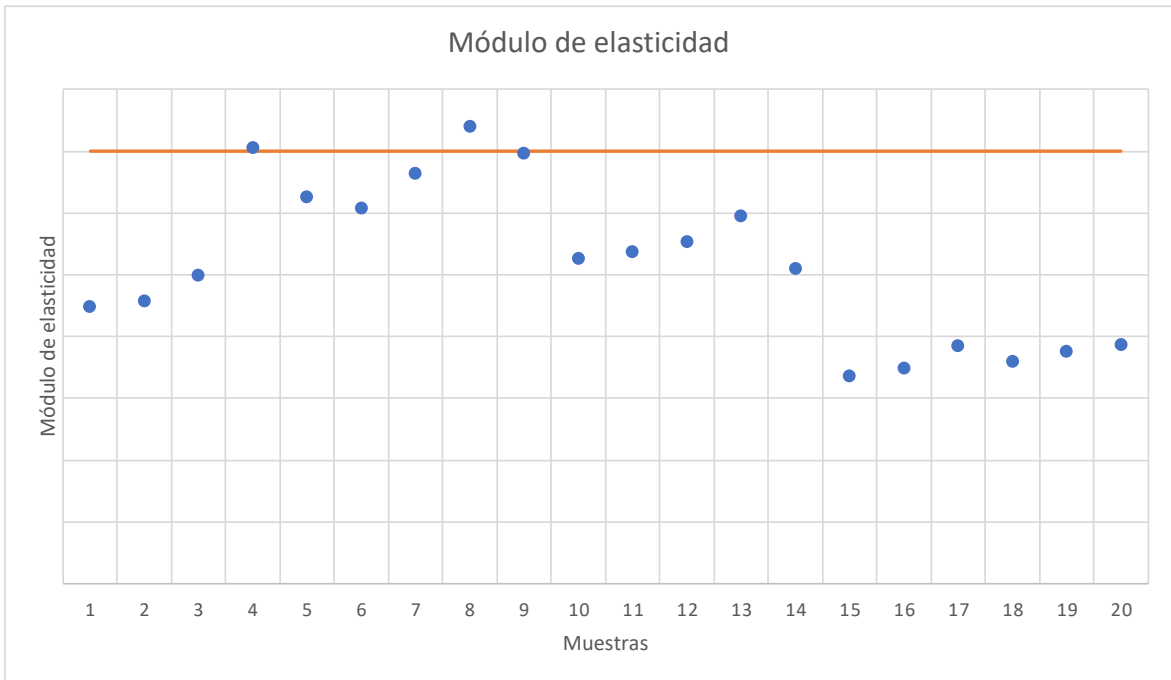


Figura 20: Valores del módulo de elasticidad obtenido para muestras de bajo espesor. *Elaboración propia.*

Los valores del módulo de elasticidad, factor que indica directamente la rigidez de un material, obtenidos tampoco han sido adecuados para tableros de bajo espesor, siendo una propiedad estrechamente relacionada con la resistencia a la flexión. Estos valores bajos se deben principalmente a que el tablero de bajo espesor muestra una gran flexibilidad y no soporta una tensión especialmente alta cuando se somete el tablero a un esfuerzo de flexión. Por tanto, el bajo grosor del tablero limita la curva de tensión/deformación, de forma tan notable que el compuesto no es capaz de aportar una rigidez suficiente al tablero para soportar un mayor esfuerzo.

b) Resultados para muestras de elevado espesor:

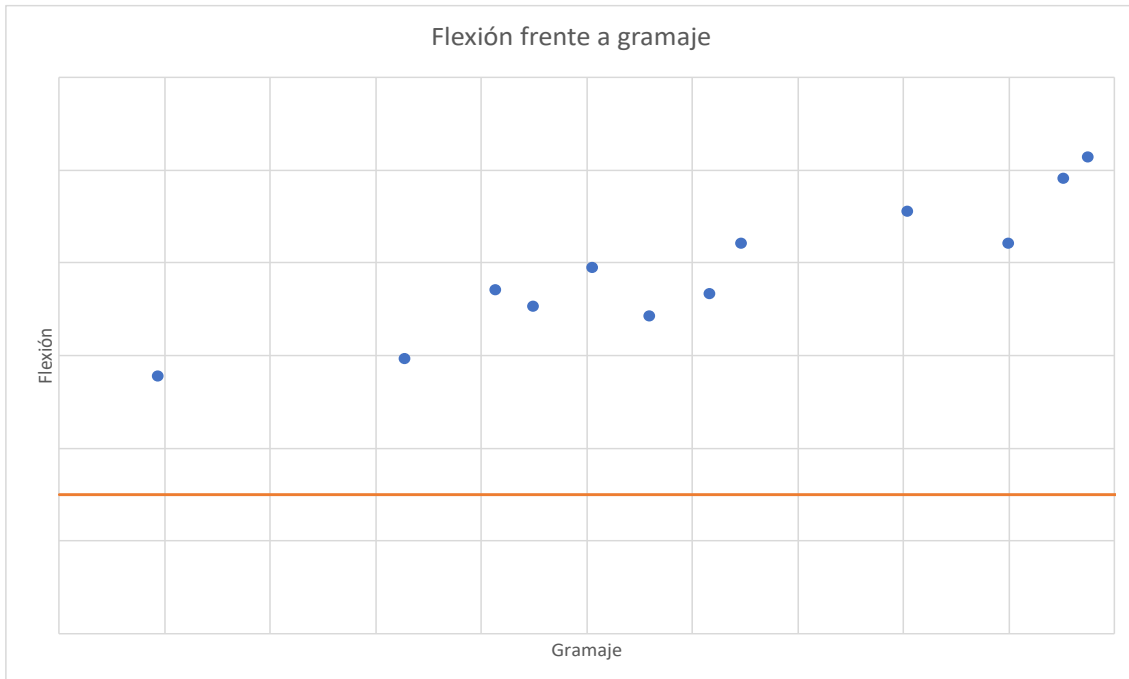


Figura 21: Valores de resistencia a la flexión obtenidos frente al gramaje empleado. Muestras de elevado espesor. Elaboración propia.

Al contrario de lo que sucedía en las muestras de bajo espesor, si se observa cierto incremento en las propiedades de resistencia a la flexión en muestras de elevado espesor, se establece una correlación positiva entre resistencia a la flexión y gramaje. Las muestras de mayor espesor poseen una mayor rigidez inherente al grosor de la muestra, aun así, los resultados mostraron una mejora sustancial en el comportamiento del tablero frente al blanco de muestra.

Al contrario que con el tablero de bajo espesor, la resistencia a la flexión no es un factor limitante en este caso, ni la cantidad de compuesto necesaria para alcanzar el valor mínimo establecido como aceptable.

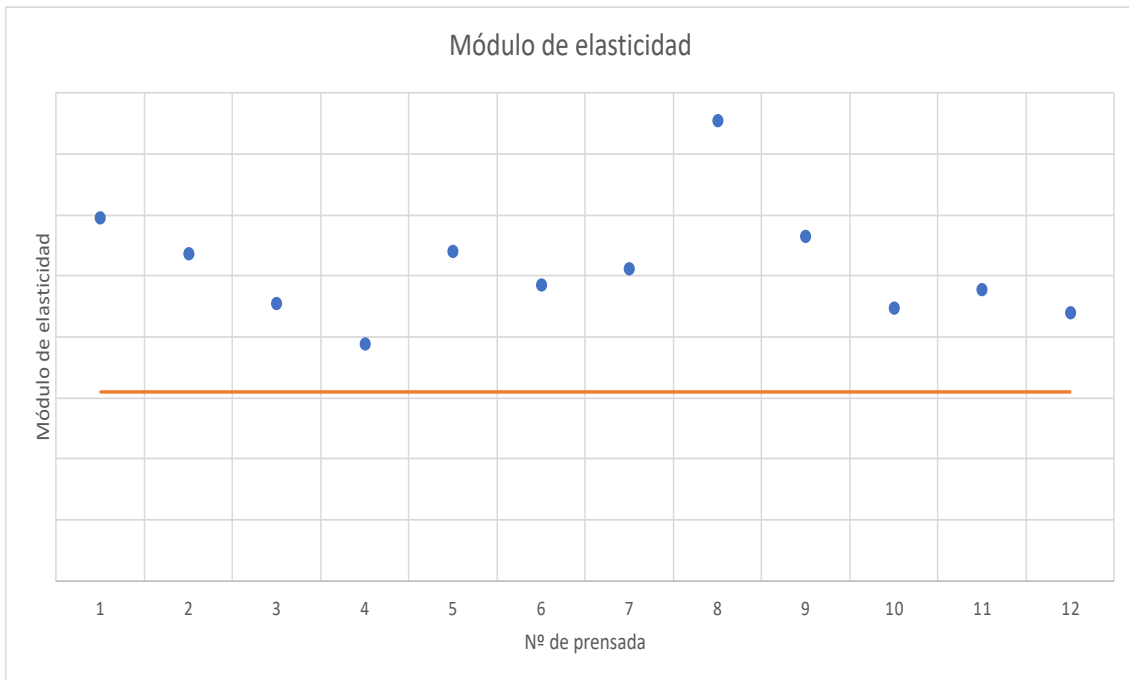


Figura 22: Valores medios obtenidos del módulo de elasticidad de diferentes tableros de espesor elevado. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de flexión muestran valores del módulo de elasticidad superiores al valor mínimo establecido. Estos valores se ven favorecidos por tratarse de muestras de elevado espesor. Se debe a que, a un mayor espesor, la muestra experimenta una menor deformación, además, es necesaria una mayor carga de tensión para que la muestra experimente rotura. La combinación de estos dos factores, junto con la aplicación del *Compuesto 1*, maximiza el valor del módulo de elasticidad, que se define como la pendiente de la curva tensión/deformación.

4.4.5 Conclusiones

La determinación de las diferentes propiedades adquiridas por el tablero mediante la aplicación del *Compuesto 1* mostró resultados completamente satisfactorios para muestras de elevado espesor. El ensayo de hinchamiento se establece como el ensayo más sensible a la cantidad de compuesto que es necesario aplicar. El empleo de una baja cantidad de compuesto no permitiría alcanzar una impermeabilidad suficiente para alcanzar un valor considerado como permisible. Este factor determina en gran medida la viabilidad del método al precisar de un mayor coste a la hora de la fabricación del tablero apto para ambiente exterior.

Con respecto al tablero de bajo espesor, no ha sido posible alcanzar las propiedades necesarias para obtener una certificación de uso en ambiente exterior. El tablero no es lo suficientemente rígido como para superar la prueba de flexión. Este factor está determinado por su gran deformación cuando se le aplica una carga de flexión. Al contrario que con el tablero grueso, este soporta una tensión menor y experimenta una mayor deformación, factores que a su vez justifican su bajo módulo de elasticidad.

5. Análisis cualitativos

Se diseñaron varios experimentos con el propósito de analizar de forma cualitativa el estado del tablero cuando se expone a condiciones ambientales cambiantes. El objetivo de estas pruebas consiste en analizar variaciones tanto estéticas (brillo, resistencia a agentes químicos, dureza...) como propiedades químico-físicas (principalmente hidrófugas).

5.1 Lavadero

Para analizar la resistencia al agua del tablero, se diseñó un tablero, con las mismas dimensiones que posee el lavadero del laboratorio de la planta para colocarlo en él. Esta ubicación se considera interesante puesto que es una ubicación en constante contacto con agua (durante el lavado y secado de los instrumentos empleados de forma rutinaria en el laboratorio) así como otros agentes de carácter químico.

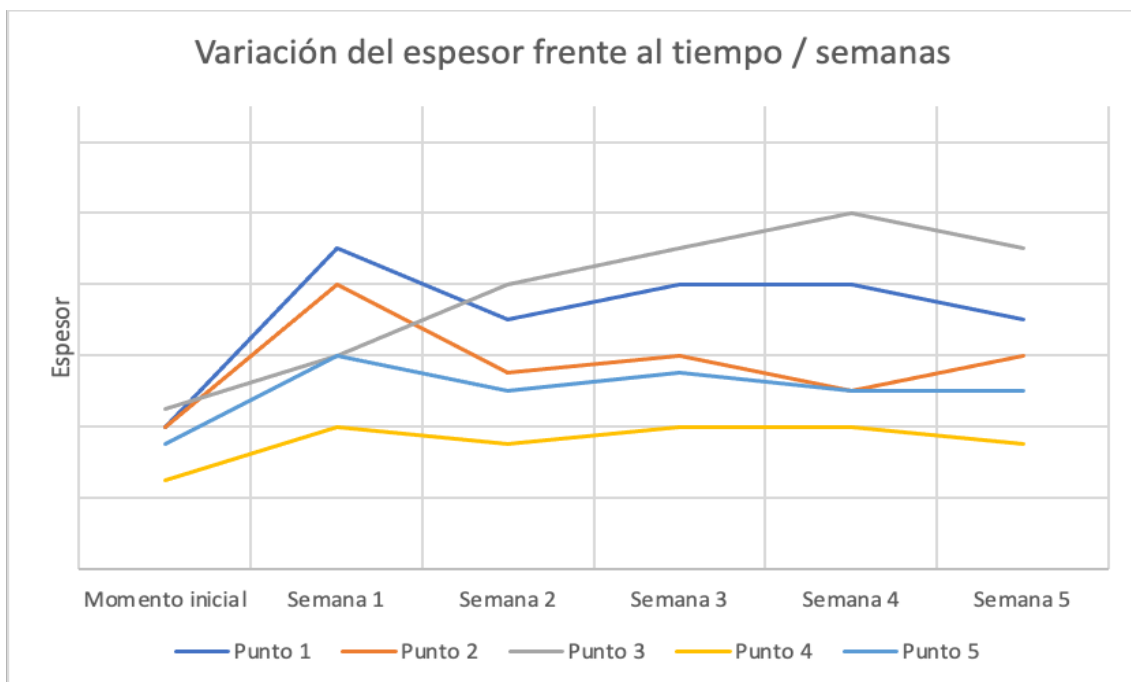


Figura 23: Variación del espesor en diferentes puntos del tablero colocado en el lavadero con el paso del tiempo. Elaboración propia.

Se midieron las variaciones del espesor del tablero con el transcurso de las semanas, con el objetivo de analizar el posible hinchamiento que experimenta el tablero con el contacto continuado con agua. La primera semana se observa un aumento considerable del espesor en los 5 puntos establecidos, que posteriormente se estabiliza y se mantiene prácticamente constante semana tras semana. El punto 5, correspondiente a la esquina

del tablero más apartada del grifo apenas varió en espesor, incluso siendo la primera semana la que obtuvo un valor de espesor más elevado. El punto 3, más próximo al grifo y en contacto continuado con agua es el punto con mayor variabilidad, justificada por su situación.

5.2 Pruebas en ambiente exterior

Para estudiar el comportamiento del tablero en ambiente exterior se han diseñado una serie de montajes, semejantes a los empleados en el sector de la construcción, de acuerdo a evaluar su viabilidad en un ambiente reproducible. Tras el transcurso del primer mes, el tablero se mostró prácticamente inalterado, sin modificaciones estéticas aparentes, y manteniendo un espesor constante.

6. Tratamiento de residuos [13]:

El empleo de compuestos que contienen un determinado porcentaje de disolventes orgánicos conlleva el planteamiento de un sistema que evite la emisión de estos compuestos orgánicos a la atmósfera. Para contemplar el uso a escala industrial del *Compuesto 1* es necesario establecer alternativas para el tratamiento de los compuestos orgánicos volátiles presentes en pequeñas proporciones en el mismo (al ser el proceso industrial un proceso continuo, pequeñas cantidades de un compuesto a lo largo del tiempo se magnifican). Debido a que la planta no cuenta con un sistema específico para el tratamiento de COVs (Compuestos Orgánicos Volátiles) es necesario establecer una serie de procedimientos que resultarían adecuados para su correcto tratamiento. Entre las posibles alternativas hemos analizado las siguientes:

i) Oxidación térmica recuperativa (RTO):

Consiste en una cámara de combustión con un quemador y un intercambiador de calor donde se calienta el aire de entrada y se enfría el aire depurado. Eficiencia de recuperación térmica estimada del 65%.

ii) Oxidación catalítica regenerativa (RCO):

La principal diferencia con respecto a la oxidación térmica consiste en que la combustión

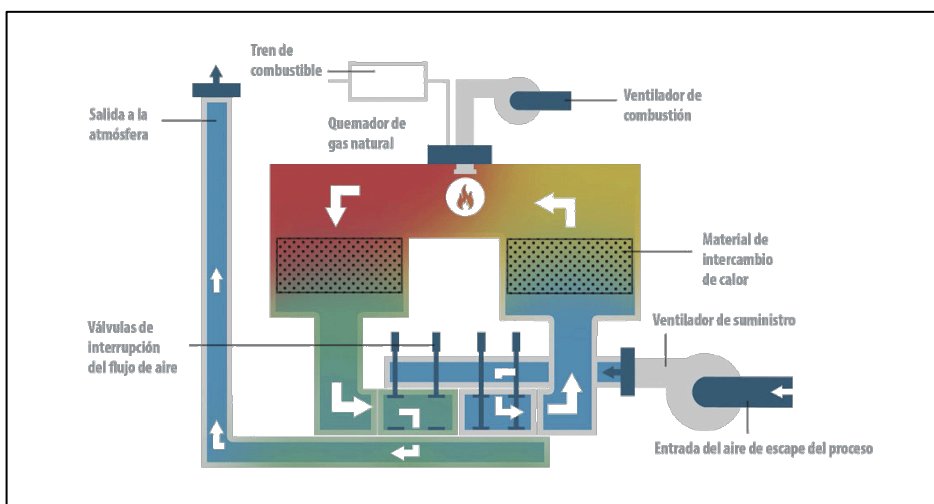


Figura 24: Esquema del funcionamiento de una cámara de combustión catalítica. [14]

ocurre a temperaturas más bajas (200 – 400 °C) debido a la presencia de un catalizador en la cámara de combustión. Conlleva un consumo de combustible menor y ocupa un

espacio menor (es más compacto). Esta tecnología requiere de una buena caracterización, con el objetivo de establecer el catalizador óptimo. El sistema presenta una eficiencia térmica estimada superior al 98% y se trata de una técnica especialmente idónea para concentraciones de COVs medias o bajas, presentando un bajo coste operativo.

iii) Adsorción en carbón activo

Es la tecnología más habitual. Consiste en un lecho de carbón activo sobre el que se transporta la corriente de aire emitida a la atmósfera. Cuando el carbón activo se satura (pierde su capacidad absorbente) se podría gestionar como residuo y sustituirlo por uno nuevo o regenerarlo mediante un gas inerte, por ejemplo, el nitrógeno, que permitiría recuperar los disolventes presentes en el aceite.

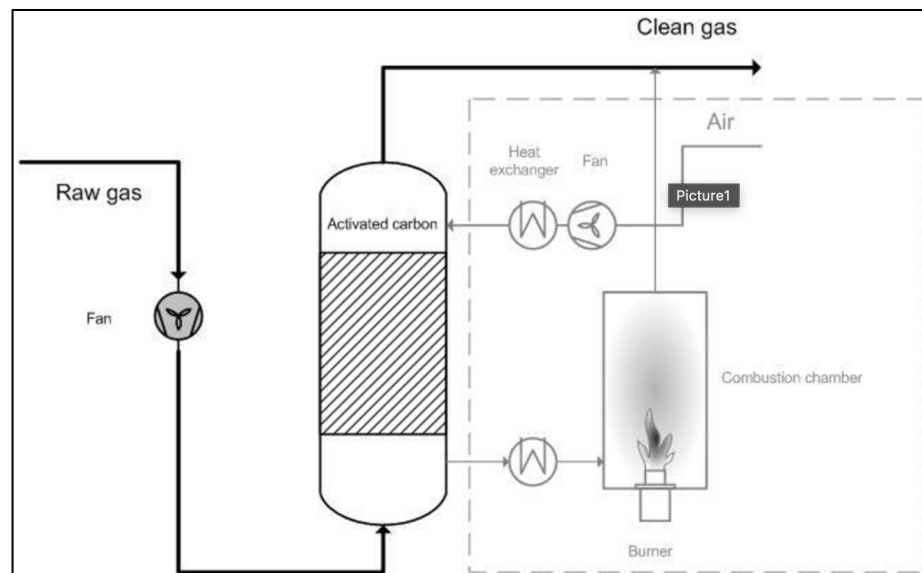


Figura 25: Diagrama de flujo del sistema de adsorción en carbón activo con un sistema de desorción mediante recuperación térmica. [15]

iv) Rotoconcentrador de Zeolita + RTO (Tecnología mixta):

Esta técnica se basa en el funcionamiento de un material poroso, zeolita (origen mineral, sostenible y además puede actuar como catalizador), en la que mediante un proceso de adsorción se acumulan los compuestos volátiles para obtener una concentración más elevada, que posteriormente serán tratados en una unidad de oxidación térmica regenerativa. Ideal para el tratamiento de caudales de aire muy elevados, con una

concentración de COVs muy baja, puesto que reduce considerablemente la cantidad de combustible consumido.

6.1 Conclusión:

El sistema más apropiado para las instalaciones de Betanzos HB sería la oxidación catalítica regenerativa (RCO), puesto que, mediante el uso de un catalizador, se reduciría exponencialmente el consumo energético, supone un sistema compacto y tiene una eficacia cercana al 100%, factor que permitiría cumplir los límites de emisiones de forma plenamente satisfactoria. Además, se trata de un sistema idóneo para concentraciones de COVs medias-bajas lo que se adapta a las emisiones del compuesto.

Conclusiones

Se ha puesto en práctica la metodología de trabajo y se ha participado en el desarrollo de un proyecto de investigación industrial, llevando a cabo de inicio a fin una línea de trabajo con el objetivo de entender la complejidad y resultados de la investigación industrial con sus beneficios de aplicación. Además, se ha profundizado en aspectos del sector industrial (tecnología del proceso productivo) y se han puesto en práctica conceptos de sostenibilidad.

Se ha analizado tanto el estado del arte, estudiando los principales tableros empleados en ambiente exterior, como las opciones comerciales del producto, analizando la posible viabilidad del Tablex cuando se expone a condiciones cambiantes de temperatura y humedad.

Mediante la aplicación de cierto compuesto se ha logrado obtener un tablero con una potencial aplicación en ambiente exterior, mejorando sus propiedades iniciales en las que se ha conseguido aumentar principalmente su rigidez e impermeabilidad. El tablero mostró una apropiada durabilidad así como ciertas mejoras estéticas (color, brillo y suavidad).

Conclusións

Púxose en práctica a metodoloxía de traballo e participouse no desenvolvemento dun proxecto de investigación industrial, levando a cabo de inicio a fin unha liña de traballo co obxectivo de entender a complexidade e resultados da investigación industrial cos seus beneficios de aplicación. Ademais, profundizouse en aspectos do sector industrial (tecnoloxía do proceso productivo) e puxéronse en práctica conceptos de sustentabilidade.

Analizouse tanto o estado da arte, estudando os principais taboleiros empregados en ambiente exterior, coma as opcións comerciais do produto, analizando a posible viabilidade do Tablex cando se expón a condicións cambiantes de temperatura e humidade.

Mediante a aplicación de certo composto logrouse obter un taboleiro cunha potencial aplicación en ambiente exterior, mellorando as súas propiedades iniciais nas que se conseguiu aumentar principalmente a súa rixidez e impermeabilidade. O taboleiro

amosou unha apropiada durabilidade así como certas melloras estéticas (color, brillo e suavidade).

Conclusions

The work methodology has been implemented and actively participated in the development of an industrial research project, carrying out a complete line of work from start to finish with the aim of understanding the complexity and outcomes of industrial research along with its application benefits. Furthermore, aspects of the industrial sector (process technology) have been explored in depth, and sustainability concepts have been put into practice.

Both the state of the art and the commercial options of the product have been analyzed. The main boards used in outdoor environments have been studied, and the potential viability of Tablex under changing temperature and humidity conditions has been examined.

By applying a specific compound, a board with potential application in outdoor environments has been achieved, improving its initial properties, primarily rigidity and impermeability. The board demonstrated appropriate durability as well as certain aesthetic enhancements (color, shine and smoothness).

Bibliografía

- [1] Betanzos HB. **(20-04-2023)**. Sitio web de Betanzos HB. Recuperado de <https://www.tablex.eu/wp-content/uploads/2022/03/Ficha-Tecnica-Tablex-Standard-ST-01.pdf>
- [2] Back, E. L. **(1987)**. The Bonding Mechanism in Hardboard Manufacture Review Report. *Holzforschung*, 41(4), 247–258.
- [3] Carll, C. **(1997)**. Review of Thickness Swell in Hardboard Siding. General technical report FPL, 96, 1-10.
- [4] Asociación Española de Normalización y Certificación. **(2004)**. Tableros de fibras. Especificaciones. Parte 2: Especificaciones para los tableros de fibras duros. (UNE-EN 622-2:2004).
- [5] Lee, W.-J., Chang, K.-C., & Tseng, I.-M. **(2011)**. Properties of phenol-formaldehyde resins prepared from phenol-liquefied lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, 4782-4788.
- [6] Fundermax. **(25-03-2023)**. Aplicaciones Exterior. Recuperado de <https://www.fundermax.com/en>
- [7] Tableros huertas. **(26-03-2023)**. Contrachapado con laminado HPL. Recuperado de <https://www.tableroshuertas.es/contrachapado-con-laminado-hpl.htm>
- [8] Asociación Española de Normalización y Certificación. **(1993)**. Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. (UNE-EN 310:1993)
- [9] Asociación Española de Normalización y Certificación. **(1993)** Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. (UNE-EN 319:1993)
- [10] Tensile Tester. **(21-04-2023)**. Nos Produits. Recuperado de <https://www.tensiletester.com/fr/nos-produits>
- [11] Asociación Española de Normalización y Certificación. **(1996)**. Tableros de partículas. Determinación de la resistencia a la humedad. Parte 1: Método de cocción. (UNE-EN 1087-1:1996)
- [12] Asociación Española de Normalización y Certificación. **(1996)**. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. (UNE-EN 317:1993).

- [13] Condorchem. **(15-05-2023)** Depuración de emisiones COV. Blog de Condorchem. Recuperado de <https://condorchem.com/es/blog/depuración-de-emisiones-cov/>
- [14] Condorchem. **(15-05-2023)**. Oxidación térmica regenerativa. Recuperado de <https://condorchem.com/es/oxidacion-termica-regenerativa/>
- [15] Observatorio del olos. **(16-05-2023)**. Adsorción. Recuperado de <https://odourobservatory.org/es/adsorption-2/>