

ESTUDIO DE LA EFICACIA DE TRATAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN DE MADERA CARBONIZADA DE ORIGEN ARQUEOLÓGICO

TRABAJO FINAL DE MÁSTER. CURSO 2017/2018

Alumna: Lucía del Olmo Cabero

Tutora: María Teresa Domènech Carbó

Cotutora: Laura Osete Cortina

Cotutor: José Manuel Melchor Monserrat



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



FACULTAT DE BELLES ARTS DE SANT CARLES

RESUMEN

El presente trabajo se centra en la evaluación de una selección de métodos de consolidación aplicados sobre fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico procedentes de Sagunto. En dicho estudio se han evaluado un total de seis consolidantes diferentes, Paraloid® B-72, Polivinil butyral, Cosmoloid® H 80 y Mowilith® en tres de sus formulaciones (20, 30 y 50). Estos consolidantes se han aplicado mediante inmersión e impregnación, sobre los fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico y sobre probetas realizadas en el laboratorio.

Tras la aplicación de los consolidantes se han analizado propiedades ópticas como el brillo y el color sirviéndose del uso de espectrofotómetros. Se ha efectuado un estudio morfológico con microscopio estereoscópico a bajos aumentos y un estudio micromorfológico mediante Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FESEM). También se han llevado a cabo ensayos para el análisis de las propiedades mecánicas y finalmente se ha estimado el grado de penetración de cada consolidante usando Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

El procesado y comparación de todos los datos obtenidos ha permitido determinar cómo interactúa cada consolidante con la madera carbonizada. Estos resultados ayudarán además a estimar la idoneidad del uso de los consolidantes estudiados para la conservación de fragmentos de madera carbonizada.

PALABRAS CLAVE

Madera carbonizada, madera arqueológica, consolidación, espectroscopía FTIR, FESEM

RESUM

El present treball es centra en l'avaluació d'una selecció de mètodes de consolidació aplicats sobre fragments de fusta carbonitzada d'origen arqueològic procedents de Sagunt. En aquest estudi s'han avaluat un total de sis consolidants diferents, Paraloid® B-72, Polivinil butyral, Cosmoloid® 80 H i Mowilith® en tres de les seues formulacions (20, 30 i 50). Aquests consolidants s'han aplicat mitjançant immersió i impregnació, sobre els fragments de fusta carbonitzada d'origen arqueològic i sobre provetes realitzades al laboratori.

Després de l'aplicació dels consolidants s'han analitzat propietats òptiques com la brillantor i el color servint-se de l'ús d'espectrofotòmetres. S'ha efectuat un estudi morfològic amb microscopi estereoscòpic a augments baixos i un estudi micromorfològic mitjançant Microscòpia Electrònica de Rastreig d'Emissió de Camp (FESEM). També s'han dut a terme assajos per a l'anàlisi de les propietats mecàniques i finalment s'ha estimat el grau de penetració de cada consolidant usant Espectroscòpia Infraroja per Transformada de Fourier (FTIR).

El processat i comparació de totes les dades obtingudes ha permès determinar com interactua cada consolidant amb la fusta carbonitzada. Aquests resultats ajudaran a més a estimar la idoneïtat de l'ús dels consolidants estudiats per a la conservació de fragments de fusta carbonitzada.

PARAULES CLAU

Fusta carbonitzada, fusta arqueològica, consolidació, espectroscòpia FTIR, FESEM

ABSTRACT

The present work focuses on the evaluation of different methods of consolidation that have been applied on fragments of archaeological charcoal which coming from an archaeological site of Sagunto. In this research, 6 different consolidants have been evaluated, Paraloid® B-72, Polyvinyl butyral, Cosmoloid® H 80 and Mowilith® (20, 30 and 50). These consolidants have been applied by immersion and impregnation, on the archaeological fragments of charcoal and on pieces of charred wood made in the laboratory.

After the application of consolidants, optical properties such as brightness and color have been analyzed using spectrophotometers. Morphological study was executed with stereoscopic microscopy and a micromorphological analysis using Electronic Emission Field Scanning Microscopy (FESEM). Mechanical properties have been also studied. Finally, the degree of penetration of each of the consolidants has been estimated by Infrared Spectroscopy by Fourier Transformation (FTIR).

The analysis of results have determined their interaction with charcoal. These results allow to evaluate the suitability of the application of these consolidants for the conservation of archaeological charcoal fragments.

KEY WORDS

Charcoal, archaeological wood, consolidation, FTIR spectroscopy, FESEM.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Motivación	7
1.2. Introducción a la madera carbonizada	8
2. OBJETIVOS	10
3. METODOLOGÍA	11
4. MATERIALES Y TÉCNICAS	13
4.1. Descripción del material arqueológico estudiado	13
4.2. Preparación de probetas de laboratorio	16
4.3. Consolidantes	17
4.4. Consolidación de los fragmentos	19
4.5. Instrumentación	21
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.1. Estudio micromorfológico.	25
- Microscopía óptica.	26
- Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FESEM)	29
5.2. Evaluación de las características ópticas	32
- Colorimetría	33
- Fotometría	37
5.3. Propiedades reológicas de las disoluciones de polímero	36
5.4. Evaluación de las propiedades mecánicas (Tensile test)	37
5.5. Análisis químico-mineralógico Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).	40
6. CONCLUSIONES	47
7. BIBLIOGRAFÍA	50
AGRADECIMIENTOS	54
ANEXO	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

La madera ha sido uno de los materiales más usados a lo largo de la historia, por su abundancia, fácil obtención y versatilidad. Se ha empleado tanto para la creación de utensilios, como para la elaboración de objetos artísticos, así como con fines estructurales.

En contextos arqueológicos estos objetos han llegado hasta nuestros días en diferentes condiciones de alteración, entre ellas carbonizados¹. Entre los restos de madera y madera carbonizada que pueden hallarse en los yacimientos arqueológicos, se encuentran algunos objetos tallados, con formas definidas y valorados desde el punto de vista artístico y funcional², pero mayoritariamente se encuentran restos de este material en los que no se distinguen sus formas, y que no por ello son menos importantes³.

Estos restos, de madera arqueológica y carbón, se estudian a través de la antracología, la cual aporta mucha información entre la que cabe destacar:

- Cronológica: permite datar el material recuperado.
- Botánica: determina el tipo de madera que se usaba en esa época.
- Traceológica: en aquellos objetos de madera menos deteriorados, que conservan las huellas superficiales ocasionadas por las herramientas de trabajo. Estas marcas aportarán información sobre las herramientas y la forma de trabajar utilizadas.

Toda esta información obtenida sobre la madera y carbones arqueológicos recuperados, constituye la base para el conocimiento paleoetnográfico y paleoecológico, que nos ayuda a entender el uso dado a los recursos vegetales de la zona y el paisaje vegetal que rodeaba los grupos humanos en un momento histórico, permitiendo a su vez, deducir las condiciones medioambientales y climáticas⁴.

Plasmada la importancia de la madera carbonizada procedente de contextos arqueológicos, se plantea la necesidad de su conservación. Entre las intervenciones conservativas que deben llevarse a cabo para asegurar la perdurabilidad de este material, la consolidación es, sin duda, una de las operaciones más necesarias y frecuentemente realizadas⁵.

¹ DE CAROLIS, E. *I legni carbonizzati di Ercolano: storia delle scoperte e problematiche conservative*, p. 43-57.

² British Museum, *The Lion Man: an Ice Age masterpiece*.

³ CARRIÓN, Y., PÉREZ JORDÁ, G. *Análisis de los restos vegetales*, p. 49-51.

⁴ *Ibid.*

⁵ MINISTERIO DE EDUCACIÓN CULTURA Y DEPORTE. *Proyecto Coremans. Criterios de intervención en retablos y escultura policromada*, p. 42-44.

Respecto a la idoneidad de los productos utilizados en la conservación de este tipo de objetos, y más específicamente en su consolidación, cabe señalar que se han realizado escasos estudios^{6,7,8}, siendo muy reducida la información disponible al respecto, y es en este punto desde dónde parte la inquietud por llevar a cabo la presente investigación.

Con este estudio, por tanto, se pretende evaluar la idoneidad y eficacia de diferentes productos aplicados para a la consolidación de este tipo de material.

1.2. INTRODUCCIÓN A LA MADERA CARBONIZADA

El fuego es uno de los principales agentes de deterioro de origen abiótico de la madera⁹, y puede llegar a provocar su completa destrucción. La estructura de la madera y sus características, van a ser determinantes en su comportamiento frente a este agente de deterioro. Por esta razón, se iniciará esta sección introductoria describiendo las características estructurales más relevantes de la madera.

En líneas generales, se denomina madera al conjunto del xilema, que da lugar al tronco, las raíces y las ramas de las plantas leñosas, excluyendo la corteza. La madera, dependiendo de la especie, puede proceder de coníferas y frondosas.

Al profundizar en la descripción de su anatomía, a nivel microscópico, la madera está formada por un complejo sistema de tejidos con funciones diversas, que permiten a la planta llevar a cabo los procesos metabólicos. Todos estos tejidos confieren a la madera un carácter heterogéneo, denominado anisotropía. Esta propiedad es la responsable de que la madera no presente las mismas propiedades físicas y mecánicas en todas sus direcciones, distinguiéndose por tanto tres cortes: radial, tangencial y transversal¹⁰.

Otra particularidad de la madera que cabe destacar es su contenido en humedad. Ésta se presenta en el interior de su estructura en varias formas, como son el agua de constitución, el agua de saturación y el agua libre. La proporción de agua contenida puede variar gracias a la capacidad de la madera de absorber y ceder humedad, propiedad que se denomina higroscopicidad y que va a ser determinante en el proceso de carbonización por su relación con la temperatura.

⁶ CULLEN, K. *Charred Wood Consolidated with Thermoplastic Resins*, pp. 1-20.

⁷ PIZZO, B., et al. *On site consolidation of burnt and partially charred Wood in dry conditions*, pp. 19-27.

⁸ DILOLI, J., et al. *El pilar de madera de L'Assunt. Conservación y restauración de una viga de madera arqueológica de origen terrestre*, pp. 179-185.

⁹ RODRÍGUEZ, J. A. *Patología de la madera*, p. 57.

¹⁰ CAPUZ, R. *Materiales orgánicos: maderas*, p. 22.

PROCESO DE CARBONIZACIÓN

A medida que se incrementa la temperatura la madera sufre diversos cambios, e independientemente de la mayor o menor resistencia al fuego, todos los tipos de madera experimentan una serie de etapas durante el proceso de carbonización, que son:

1. **Fase de deshidratación:** a temperaturas inferiores a los 200°C. En esta fase la madera se deshidrata desprendiendo dióxido de carbono, vapor de agua, ácido acético, ácido fórmico y otras sustancias. El resultado es una pérdida rápida de peso.
2. **Fase de torrefacción:** se produce a temperaturas comprendidas entre los 200 y 280°C. En este momento, se desencadenan reacciones de oxidación exotérmicas, que provocan la aparición de llamas al alcanzar los 280°C aproximadamente, llegando entonces al punto de inflamación de la madera.
3. **Calcinación o carbonización:** fase comprendida en el intervalo de temperaturas entre 280 y 500°C. Se ocasiona el desprendimiento de grandes cantidades de gases y vapores. Aparecen las llamas, creándose una capa superficial carbonosa que se va expandiendo, llegando a las capas más internas de la madera.
4. **Cumburación:** se produce de manera inmediata y sucesiva tras la etapa anterior a temperaturas superiores a los 500°C. En este momento el aporte de oxígeno continúa provocando llamas y produciendo la desintegración química de la celulosa y la lignina que componen la madera.

Teniendo en cuenta las anteriores etapas, si en la fase de calcinación se interrumpe el aporte de oxígeno y el proceso de combustión se detiene, se produce la pirólisis y la formación de carbones. La madera conserva su estructura interna cuando está carbonizada o torrefactada, de manera que la identificación botánica es posible. Por el contrario, si la temperatura alcanza los 700°C, el proceso se completa con la cumburación, reduciendo la madera a cenizas¹¹ y haciendo, por tanto, imposible su estudio.

¹¹ CARRIÓN, Y. *Dendrocronología y arqueología: las huellas del clima y de la explotación humana de la madera*, p. 273.

2. OBJETIVOS

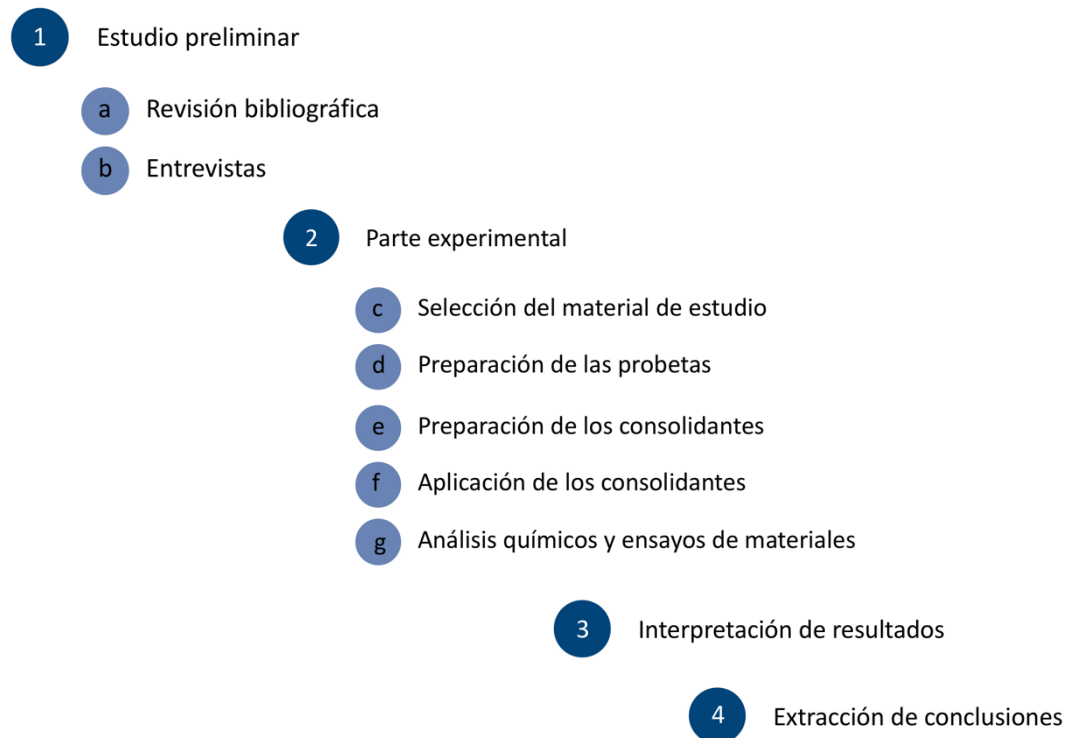
El **objetivo principal** de la presente investigación es seleccionar un método de consolidación que sea adecuado para tratar madera carbonizada de origen arqueológico, que incluya entre otros aspectos el producto consolidante y la metodología de aplicación.

Este objetivo principal permite, a su vez, establecer los siguientes **objetivos específicos**:

- Evaluar la eficiencia de los diferentes productos consolidantes y métodos de aplicación mediante una serie de técnicas químico-analíticas y ensayos de materiales.
- Determinar la dosificación óptima de cada producto consolidante evaluado.
- Comprobar si la utilización de productos consolidantes impide el estudio de otras características de la madera, como es la identificación de la especie botánica.

3. METODOLOGÍA

Para la obtención de los objetivos antes mencionados se ha definido la siguiente metodología, que comprende varias etapas, desde la investigación documental hasta la obtención y discusión de los resultados tras el desarrollo experimental:



1. Estudio preliminar:

- a. Revisión bibliográfica sobre los tratamientos de consolidación aplicados a madera carbonizada. Debido a que la información existente sobre este tema es muy escasa, se ha realizado también una búsqueda bibliográfica sobre los materiales consolidantes más empleados para tratar objetos de madera sin carbonizar. Todo ello ha permitido realizar una selección de aquellos productos considerados apropiados para la realización del estudio.

- b. Reuniones con el Director del Museo Arqueológico de Burriana, José Manuel Melchor, el cual se encuentra al cargo de la salvaguardia del material arqueológico estudiado. Él ha facilitado información sobre las características del yacimiento y las condiciones de conservación del material arqueológico.

También se han llevado a cabo una reunión con Yolanda Carrión Marco, investigadora en el departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Valencia. Ella ha aportado información acerca de la importancia de la madera carbonizada de origen arqueológico e información sobre el proceso antracológico.

2. Parte experimental:

- c. Selección del material de estudio: fragmentos de madera arqueológica carbonizada.
- d. Preparación de probetas de laboratorio.
- e. Selección y preparación de los productos consolidantes y elección del método de aplicación.
- f. Aplicación de los consolidantes.
- g. Evaluación de la eficiencia de los métodos de consolidación mediante análisis químicos y ensayos de materiales, a través de la aplicación de:
 - **Espectrofotometría:** con el fin de evaluar los cambios de color y brillo que sufren los fragmentos de madera tras la aplicación de los consolidantes.
 - **Ensayos mecánicos:** test de flexión, que permite comprobar la variación de las propiedades mecánicas de los fragmentos tras el proceso de consolidación.
 - **Análisis micromorfológico:** observación con **microscopio estereoscópico** y Microscopio Electrónico de Barrido por Emisión de Campo (**FESEM**): con el fin de observar cambios o variaciones en la estructura interna de la madera.
 - **Estudio de la capacidad de penetración de los consolidantes:** Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (**FTIR**).

3. Interpretación de resultados.

4. Extracción de conclusiones.

4. MATERIALES Y TÉCNICAS

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL ARQUEOLÓGICO ESTUDIADO

4.1.1. Contexto histórico del yacimiento

Parte de las piezas utilizadas para llevar a cabo este estudio, han sido fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico, provenientes de un hallazgo urbano en la *Saguntum* romana.

El yacimiento del que proceden dichos fragmentos (Fig. 1), fue excavado entre los años 2002 y 2005 en el casco histórico de la localidad de Sagunto, más concretamente, los restos carbonizados se encontraron en la unidad estratigráfica (UE) 1119, dentro del monumento funerario del “Solar de la Morería” (Sagunto). Este sitio arqueológico tiene un carácter funerario, data de la época romana alto imperial y fue recuperado junto a un tramo de calzada muy importante, tanto por su extensión como por la cantidad y calidad de los materiales encontrados^{12,13,14}.

El tramo de calzada que recorre el solar era el punto en torno al cual se organizaba la ciudad de *Saguntum*. La vía presenta una anchura de 5,40 metros y se orienta en dirección Norte-Sur en trayectoria al cerro del castillo.

Las estructuras funerarias localizadas al Este de la calzada son de planta rectangular. Su importancia radica en que en ellas se habría practicado el rito de la incineración y es la primera vez que se excava un recinto de estas características, datado en época romana y con este ritual en el núcleo de la población¹⁵. Respecto a la UE 1119, en la que se encontraron abundantes restos de carbón además de los analizados en este trabajo, corresponde con una fosa de morfología rectangular, con unas dimensiones aproximadas de (1,84 x 0,49) m. Esta fosa se había rellenado de cenizas y carbones y se encontraba muy afectada por las cimentaciones de la domus, la cual se construyó sobre este espacio durante el bajo imperio¹⁶. Actualmente los materiales de esa excavación se encuentran en depósito en el Museo Arqueológico de Sagunto.



FIGURA 1. Calzada y monumentos funerarios del yacimiento arqueológico de Sagunto.

¹² MELCHOR, J. M., et al. *El monumento funerario del “Solar de la Morería” (Sagunto)*, p. 113.

¹³ MELCHOR, J. M., Y BENEDITO, J. *La excavación del Solar de la Plaça de la Morería Vella (Sagunto València) y la Saguntum romana*, pp. 11-34.

¹⁴ MELCHOR, J. M., Y BENEDITO, J. *Materials per a l'estudi de l'àrea sacra del Solar de la Plaça de la Morería de Sagunt*, pp. 111-119.

¹⁵ MELCHOR, J. M., et al. *Op. Cit.*, pp. 113-114.

¹⁶ *Ibid.*, p. 115.

4.4.2. Fragmentos de madera arqueológica carbonizada

Los fragmentos de madera carbonizada encontrados han sido almacenados temporalmente en el laboratorio de restauración del Museo Arqueológico de Burriana, la mayoría de los fragmentos se encuentran en buen estado de conservación, sin embargo, algunos de ellos presentan cierto grado de descohesión y pulverización. Para el estudio llevado a cabo se han seleccionado algunos de los fragmentos que presentaban un estado de conservación más desfavorable. Dichos fragmentos poseen dimensiones que varían desde (1 x 2) cm para los más pequeños a (2 x 4) cm para los más grandes como se muestra en la Figura 2.



FIGURA 2. Fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico procedentes del Museo Arqueológico de Burriana. a) fragmento control. b) Fragmento usado para ser consolidado por inmersión con Mowilith® 50. c) Fragmento usado para ser consolidado por impregnación con Polivinil butyral. d) Fragmento usado para ser consolidado por impregnación con Paraloid® B-72.

4.4.3. Materiales ensayados

La heterogeneidad de los fragmentos de madera de origen arqueológico disponibles, constituye una limitación para realizar algunos de los ensayos planificados, en concreto la evaluación de las propiedades mecánicas.

El estudio de las propiedades mecánicas tiene como finalidad, evaluar la capacidad que posee cada producto consolidante de aportar resistencia mecánica al material sobre el que se realice el tratamiento de consolidación. Para realizar este ensayo es imprescindible que las piezas a evaluar presenten unas características y dimensiones concretas, según las especificaciones del equipo y del ensayo a efectuar, y con el propósito de obtener resultados comparables y reproducibles.

Por ello, en paralelo a los ensayos llevados a cabo sobre fragmentos originales, se han preparado en el laboratorio probetas de madera que han sido sometidas a calentamiento controlado para su carbonización.

En la Tabla 1 se indican los ensayos efectuados con las probetas de laboratorio preparadas y aquellos otros que se han podido llevar a cabo sobre fragmentos originales de procedencia arqueológica.

TABLA 1. Resumen de los análisis realizados en cada tipo de fragmento de madera carbonizada.

TIPO DE MUESTRA	MADERA CARBONIZADA DE ORIGEN ARQUEOLÓGICO	PROBETA DE LABORATORIO
ANÁLISIS REALIZADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio morfológico • Espectrofotometría • Estimación del grado de penetración 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos mecánicos

4.2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS DE LABORATORIO

Para la elaboración de las probetas de laboratorio se ha seleccionado madera de pino, comercializada en forma de listones (Fig. 3a), con un corte tangencial y de dimensiones de (1 x 0,01 x 0,01) m. Estos listones se han cortado con sierra y se han desbastado mecánicamente hasta formar las probetas (Fig. 3b-c), con unas dimensiones de (4,1 x 1 x 0,4) cm.

A continuación, las probetas han sido sometidas a un proceso de calentamiento controlado, usando para ello una placa calefactora eléctrica (Fig. 3d). La temperatura media a la que éstas probetas han sido sometidas ha sido de 250°C, sin superar los 280°C, temperatura a partir de la cual se inicia el proceso de ignición¹⁷.

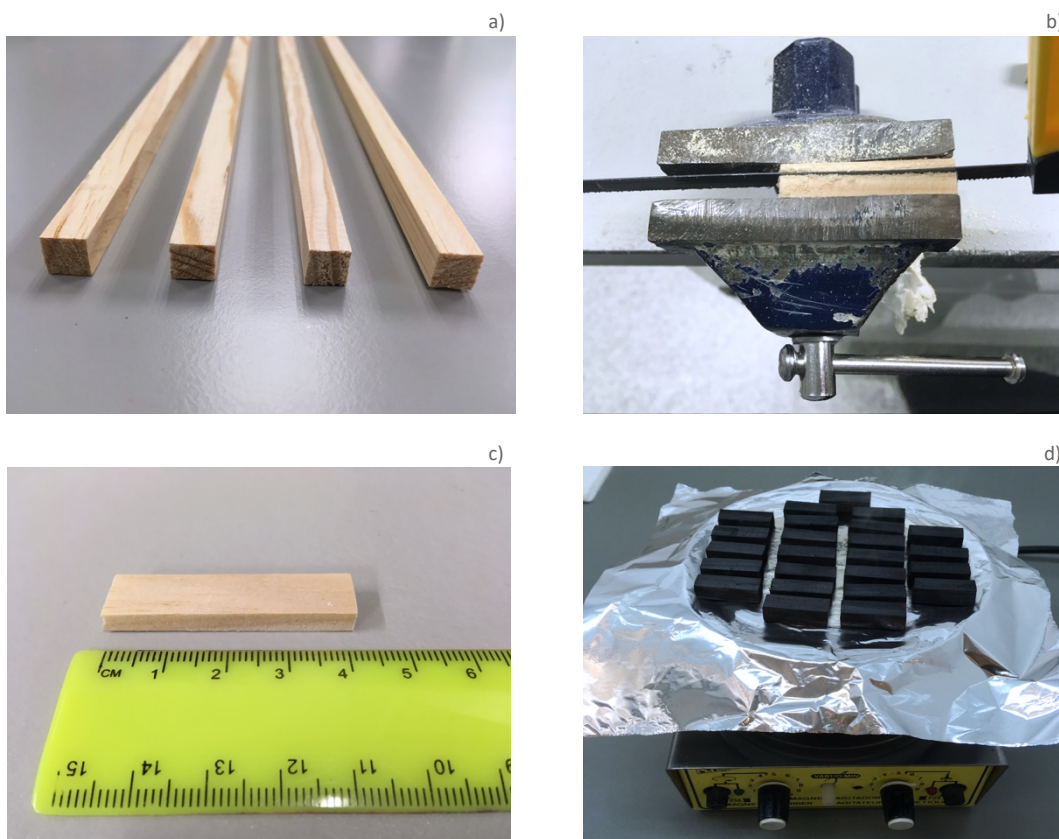


FIGURA 3. Proceso de preparación de las probetas de laboratorio. a) Listones de madera utilizados para la realización de las probetas. b) Proceso de corte de los listones de madera que formarán las probetas. c) Dimensiones de la probeta antes de su carbonización. d) Proceso de carbonización de las probetas sobre placa eléctrica.

¹⁷ CARRIÓN, Y. *Op Cit.*, p. 273.

4.3. CONSOLIDANTES

4.3.1. Selección y propiedades de los productos consolidantes y disolventes

Como se ha explicado en el apartado de metodología, para llevar a cabo la selección de los consolidantes, se ha realizado una exhaustiva búsqueda de la bibliografía existente relativa a los tratamientos de consolidación aplicados sobre madera carbonizada^{18,19,20}, así como de los tratamientos utilizados en madera sin carbonizar.

El estudio de toda esta documentación ha permitido realizar la selección de un total de seis consolidantes:

- **Cosmoloid® H 80**²¹: es una cera microcristalina, tradicionalmente utilizada para la protección de metales, pero también usada en la consolidación de soportes orgánicos como textiles, cuero y madera²², y en algunos estudios también se evalúa su eficacia como consolidante de madera carbonizada²³.
- **Mowilith®**²⁴: presenta gran cantidad de formulaciones²⁵, las cuales se sintetizan a partir de acetato de polivinilo. Para el estudio se han seleccionado Mowilith® 20, Mowilith® 30 y Mowilith® 50. Todas ellas son homopolímeros de acetato de vinilo y se diferencian entre sí por su peso molecular.
- **Polivinil butyral**²⁶: pertenece también a la familia de los acetatos de polivinilo, se sintetizan a partir de la hidrólisis de éste y posteriormente se trata el alcohol polivinílico resultante con un aldehído en condiciones ácidas. El polímero resultante es un terpolímero de vinil butyral, vinil alcohol y acetato de vinilo²⁷.
- **Paraloid® B-72**²⁸: se trata de un copolímero de Metacrilato de etilo y Acrilato de metilo (EMA y MA) en proporción 70:30²⁹. Desde mediados del siglo XX se popularizó y extendió su uso en diversos tratamientos de restauración de obras de arte, siendo ampliamente utilizado para la protección y consolidación de soportes de madera³⁰.

¹⁸ CULLEN, K. *Op. Cit.*, p. 1-20.

¹⁹ DILOLI, J.; *et al. Op. Cit.*, pp. 179-185.

²⁰ PIZZO, B., *et al., Op. Cit.*, p. 19-27.

²¹ Adquirida en la casa Kremer con referencia: 62800.

²² HORIE, V. *Materials for conservation*, p. 128.

²³ PIZZO, B., *et al., Op. Cit.*, p. 19-27.

²⁴ Las tres formulaciones de Mowilith® se han adquirido en la casa Kremer, con las siguientes referencias: Mowilith® 20: 67000, Mowilith® 30: 67020, Mowilith® 50: 67040.

²⁵ Actualmente las emulsiones de Mowilith® son comercializadas por Celanese.

²⁶ Para el estudio se ha utilizado Polivinil butyral comercializado por Sigma-Aldrich®.

²⁷ *Ibid*, p. 78.

²⁸ El producto utilizado durante el estudio ha sido adquirido a través de Productos de Conservación, con referencia 67400.

²⁹ BORGIOLO, L., CREMONESI, P. *Le resine sintetiche usate nel trattamento di opere policrome*, p. 36.

³⁰ DOWN, J. L. *Adhesive compendium for conservation*, p. 74.

Otro de los aspectos a tener en cuenta a la hora de evaluar la efectividad de un consolidante es su peso molecular, el cual viene determinado por la masa molecular de los monómeros que integran el polímero y por el grado de polimerización de éste³¹. En la Tabla 2 se especifica el peso molecular de cada uno de los productos utilizados.

TABLA 2. Resumen del peso molecular de cada producto consolidante.

PRODUCTO CONSOLIDANTE	COMPOSICIÓN	PESO MOLECULAR (G/MOL)
Cosmoloid® H 80	Cera microcristalina constituida por una mezcla de hidrocarburos	600 ³² g/mol
Mowilith® 20	Homopolímeros de acetato de vinilo	82000 ³³ g/mol
Mowilith® 30		110000 ³⁴ g/mol
Mowilith® 50		260000 ³⁵ g/mol
Polivinil butyral	Terpolímero de vinil butyral, vinil alcohol y acetato de vinilo	90000 g/mol
Paraloid® B-72	Resina acrílica de Copolímeros de metacrilato y acrilato	105000 g/mol

4.3.2. Preparación de los consolidantes

Para cada producto consolidante se ha seleccionado un disolvente, teniendo en cuenta aquellos más afines.

- **Acetona:** o dimetil cetona, cuya fórmula química es: CH_3COCH_3 . Es un compuesto químico del grupo de las cetonas, a temperatura ambiente es un líquido incoloro, inflamable y de olor penetrante.
- **Etanol:** o alcohol etílico, con fórmula $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ³⁶. Pertenece a la familia de los alcoholes, es un líquido incoloro, volátil e inflamable, soluble en agua y en la mayor parte de los disolventes hidrocarburos³⁷.
- **White Spirit:** se trata de un derivado del petróleo, obtenido de la destilación fraccionada de éste³⁸.

³¹ DOMÈNECH, M. T. *Principios físico-químicos de los materiales integrantes de los bienes culturales.*, p. 265.

³² HORIE, V. *Op. Cit.*, p. 128.

³³ FOUNDATION OF THE AMERICAN INSTITUTE FOR CONSERVATION OF HISTORIC AND ARTISTIC WORKS (FAIC) COOL, CONSERVATION ONLINE. *Conservation DistList*.

³⁴ BARNA ART. Resina vinílica Lascaux Mowilith 30.

³⁵ BARNA ART. Resina vinílica Lascaux Mowilith 50.

³⁶ SAN ANDRÉ, M., DE LA VIÑA, S. *Fundamentos de química y física ara la conservación y restauración*, p. 208.

³⁷ MINISTERIO DE EDUCACIÓN CULTURA Y DEPORTE. *Tesoros del Patrimonio Cultural de España*.

³⁸ SAN ANDRÉ, M., DE LA VIÑA, S. *Op. Cit.*, p. 359.

Cada uno de los productos consolidantes seleccionados ha sido preparado con el disolvente y de acuerdo a las dosificaciones descritas en la Tabla 3.

TABLA 3. Resumen de los consolidantes, su composición y su preparación.

POLÍMERO	DISOLVENTE	DOSIFICACIÓN (%MASA)
Cosmoloid® H 80	White Spirit	5
Mowilith® 20	Acetona	10
Mowilith® 30	Acetona	10
Mowilith® 50	Acetona	10
Polivinil butyral	Etanol	10
Paraloid® B-72	Acetona	10

4.4. CONSOLIDACIÓN DE LOS FRAGMENTOS

La consolidación, tanto de los fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico como de las probetas, se ha llevado a cabo utilizando dos métodos de aplicación diferentes:

- **Consolidación por impregnación** (Fig. 4): el producto consolidante se ha aplicado con pincel sobre cada cara del fragmento de madera carbonizada. En total se han realizado dos aplicaciones entre las que se ha dejado un tiempo de secado de 24 horas.
- **Consolidación por inmersión** (Fig. 5): cada uno de los consolidantes se ha colocado en un vaso de precipitados en el que se han sumergido los fragmentos correspondientes durante 24 horas. Estos vasos de precipitados se han mantenido cerrados herméticamente con Polyfilla® durante ese tiempo para evitar la evaporación del disolvente.

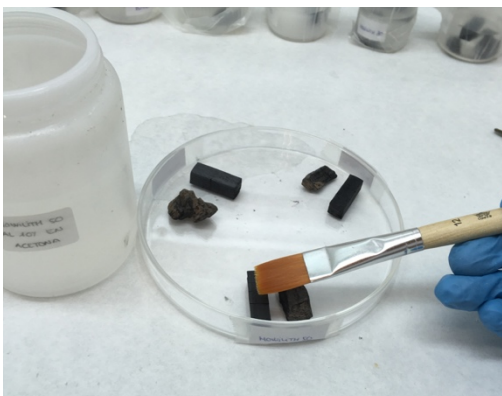


FIGURA 5. Consolidación mediante impregnación con pincel.

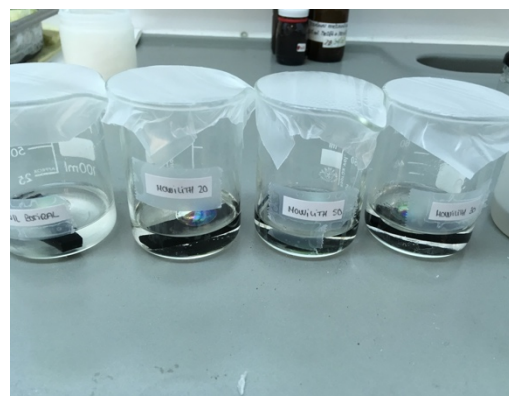


FIGURA 4. Consolidación mediante inmersión.

4.4.1. Sumario de fragmentos originales y probetas ensayadas

La Tabla 4 resumen el conjunto de fragmentos y probetas ensayados según el producto consolidante, el método de aplicación utilizado y el tipo de fragmento (madera carbonizada de origen arqueológico y probeta de laboratorio), y la referencia empleada para su identificación.

TABLA 4. Resumen de fragmentos originales y probetas ensayadas.

MÉTODO DE APLICACIÓN	INMERSIÓN		IMPREGNACIÓN CON PINCEL	
	Madera arqueológica	Probeta de laboratorio	Madera arqueológica	Probeta de laboratorio
Consolidante				
Cosmoloid® H 80	C80-I-P	C80-I-G	C80-P-P	C80-P-G
Mowilith® 20	M20-I-P	M20-I-G	M20-P-P	M20-P-G
Mowilith® 30	M30-I-P	M30-I-G	M30-P-P	M30-P-G
Mowilith® 50	M50-I-P	M50-I-G	M50-P-P	M50-P-G
Polivinil butyral	BT-I-P	BT-I-G	BT-P-P	BT-P-G
Paraloid® B-72	PB72-I-P	PB72-I-G	PB72-P-P	PB72-P-G
Muestras control	C-P	C-G	C-P1	C-G1

4.5. INSTRUMENTACIÓN

4.5.1. Viscosímetro

Viscosímetro digital Visco Star Plus R, suministrado por (Fungilab, España) (Fig. 6). Se trata de un viscosímetro rotacional de tipo Brookfield capaz de medir la viscosidad de líquidos de acuerdo con la norma ISO 2555 “Plásticos. Resinas en estado líquido o en emulsión o dispersión. Determinación de la viscosidad aparente por el método de ensayo Brookfield.”.

Para el ensayo se han utilizado los husillos R2 y R4 con diámetros de 2,7 y 4,8 cm respectivamente, a una velocidad de 200 rpm.



FIGURA 6. Viscosímetro Visco Star Plus⁴¹.

4.5.2. Espectrofotometría y medición de brillo

Espectrofotómetro CM-2000d de KONICA MINOLTA® (Fig. 7), está diseñado para medir factores de reflectancia o transmitancia espectral de un objeto. A partir de estas funciones y a través de una base de datos, el aparato aporta las coordenadas cromáticas del color según el sistema elegido⁴⁰.

Para realizar las mediciones del color en este estudio se ha utilizado iluminante D65, observador patrón 10º y componente especular excluido (SCE).



FIGURA 7. Espectrofotómetro CM-2000d de KONICA MINOLTA®.

³⁹ INSTRUMENTAL PASTEUR. Viscosímetro “Fungilab”.

⁴⁰ CAPILLA, P., et al. *Fundamentos de colorimetría*, p. 125.

Medidor de brillo Multi Gloss 268 de KONICA MINOLTA® (Fig. 8). Se trata de un medidor portátil compacto, cuenta con tres ángulos de medición, en conformidad con las normas ISO, ASTM, DIN, BS y JIS⁴¹.

Al realizar las mediciones se han obtenido dos valores, que corresponden con el tamaño de la zona de medición: 60° (9 x 15) mm y 85° (5 x 38) mm.



FIGURA 8. Medidor de brillo Multi Gloss 268 de KONICA MINOLTA®.

4.5.3. Ensayos mecánicos

Tensile Tester DEBEN MICROTTEST (Fig. 9), con una carga de 150N⁴². Fabricante: Gafan, con software de datos: Deben Microtest V5.3.53.

Consta de varios módulos intercambiables que permiten analizar distintas propiedades mecánicas. Para este estudio se ha evaluado la resistencia a la flexión, utilizando una mordaza que aplica fuerza sobre tres puntos de la muestra (Fig. 10).

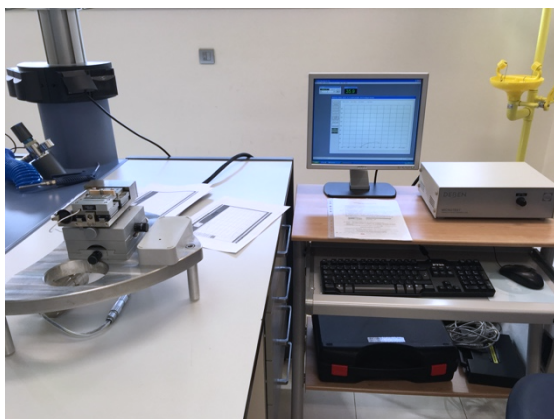


FIGURA 10. Tensile Tester DEBEN MICROTTEST.

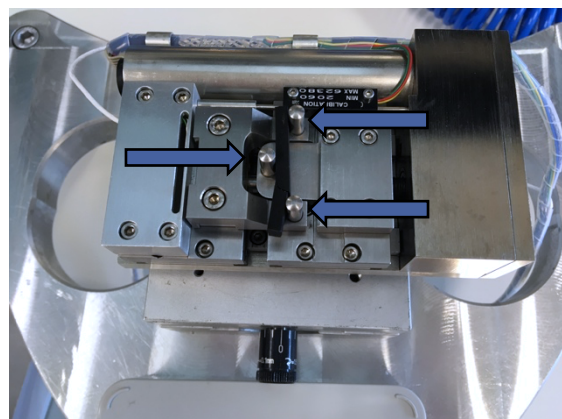


FIGURA 9. Detalle de la mordaza utilizada. Se indican con flechas los puntos que aplican fuerza sobre la muestra.

⁴¹ KONICA MINOLTA. *Multi Gloss 268 Plus*.

⁴² Se realizaron ensayos previos con la célula de carga de 2kN, pero dada la escasa flexibilidad del material estudiado se optó por la célula de 150N.

4.5.4. Microscopio estereoscópico

Microscopio estereoscópico Leica S8AP0, X10-X80, con sistema fotográfico digital acoplado (Fig. 11). El equipo permite la observación y la adquisición de fotografías a distintos aumentos entre (10X – 80X). Con esta instrumentación se realizaron observaciones y se adquirieron imágenes de la superficie a varios aumentos de todas las muestras, antes y después de la consolidación, así como en sección transversal tras la consolidación.



FIGURA 11. Lupa binocular Leica S8AP0.

4.5.5. Estudio micromorfológico. Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FESEM)

Microscopio FESEM modelo Zeiss ULTRA 55 (Fig. 12). Se empleó un voltaje de alteración de la fuente de electrones de 0,8 kV. Las imágenes son adquiridas con un detector de electrones secundarios modelo Everhart-Thornley. Las muestras se sombrearon previamente con carbono para su observación. Otras condiciones de operación fueron: distancia de trabajo del detector 2,9-4,0 mm, presión en la cámara de muestra, $6.4 \cdot 10^{-5}$ Pa, presión de la pistola, $9.2 \cdot 10^{-8}$ Pa.

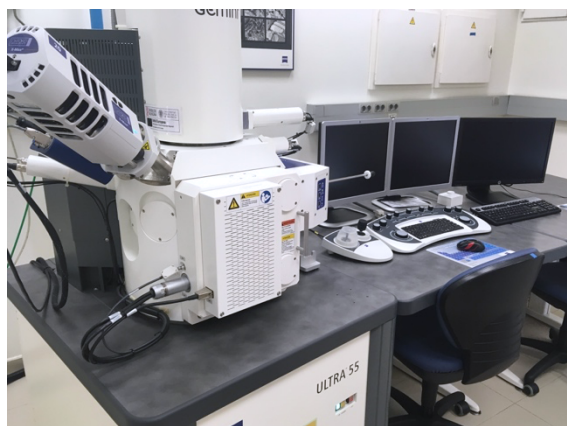


FIGURA 12. Microscopio FESEM modelo Zeiss ULTRA 55.

4.5.6. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Equipo Vertex 70, Bruker Optics (Fig. 13), con sistema de reflexión total atenuada (ATR) y con un detector FR-DTGS con recubrimiento para estabilización de temperatura. Número de barridos acumulados: 32, resolución: 4 cm^{-1} . La integración de bandas IR se ha llevado a cabo con el software OPUS 7.2.

Tras la consolidación de los fragmentos de madera arqueológica carbonizada, se han tomado muestras para su análisis tanto de la superficie como de la sección transversal a diferentes profundidades. Se han extraído un mínimo de 5 muestras por cada fragmento.



FIGURA 13. Equipo Vertex 70, Bruker Optics.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ESTUDIO MICROMORFOLÓGICO

5.1.1. Microscopía Óptica

Las fotografías adquiridas del fragmento control sin consolidar (Fig. 14), muestran el estado inicial del material arqueológico de estudio. Se observan las concreciones y depósitos terrosos en superficie (Fig. 14a), así como la textura original, de aspecto heterogéneo y abundante porosidad, y los elementos anatómicos propios de la madera (radios medulares, secciones celulares, etc.). También se aprecia cierto grado de fisuración asociado al proceso de carbonización.

Las imágenes obtenidas de la sección tangencial y transversal muestran la morfología y el estado del interior del fragmento antes de la consolidación. En la Figura 14c pueden diferenciarse además los vasos de la madera en su corte transversal.

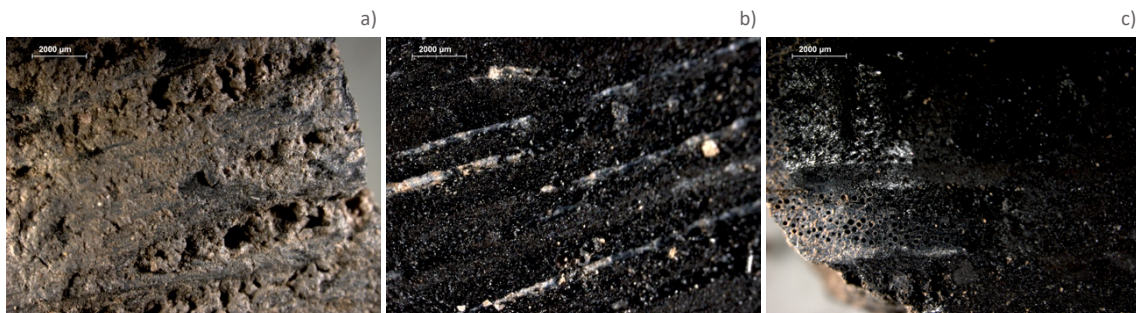


FIGURA 14. Muestra control. Microfotografía adquirida de la superficie de un fragmento a 10X. a) Imagen de la superficie de la muestra. b) Imagen de la sección tangencial. c) Imagen de la sección transversal.

Las imágenes obtenidas después del proceso de consolidación han aportado información acerca de los cambios de brillo, textura y color producidos en la madera carbonizada como consecuencia de la aplicación de cada producto consolidante.

En general, los cambios observados no difieren significativamente de un método de aplicación a otro, observándose escasas diferencias entre los diferentes consolidantes.

Los cambios más evidentes se aprecian en el fragmento consolidado con Cosmoloid® H 80 mediante impregnación, tanto en superficie (Fig. 15a) como en sección transversal (Fig. 15b), donde se observa que los vasos y las fisuras se han rellenado parcialmente con el consolidante, (Fig. 15b). Destacar que, el producto consolidante ha ocasionado un emblanquecimiento de la madera carbonizada. Este emblanquecimiento es igualmente apreciable en el fragmento consolidado con este mismo producto

mediante inmersión (Fig. 44 anexo). El interior del fragmento no presenta este velo blanquecino, lo que evidencia la escasa penetración del producto (Fig. 15c).



FIGURA 15. Muestra C80-P-P, microfotografías adquiridas con lupa binocular. a) Microfotografía a 12,5X antes de la consolidación, en superficie. b) Microfotografía a 10X después de la consolidación, en superficie. c) Microfotografía a 10X después de la consolidación, en sección transversal.

El fragmento en el que los cambios son menos apreciables, es el que ha sido consolidado con Mowilith® 20 independientemente de su forma de aplicación, inmersión (Fig. 16) o impregnación (Fig. 45 anexo). El aspecto tanto de su superficie como de su sección transversal tras el proceso de consolidación no se aprecia alterado significativamente.



FIGURA 16. M20-I-P. Microfotografías adquiridas con lupa binocular a 10X. a) Microfotografía antes de la consolidación, en superficie. b) Microfotografía después de la consolidación, en superficie. c) Microfotografía después de la consolidación, en sección transversal.

Los fragmentos consolidados con la formulación de Mowilith® 30 (Fig. 17 y Fig. 46 anexo), muestran un ligero aumento del brillo, apreciable en la fotografía de la superficie del fragmento (Fig. 17b).



FIGURA 17. Muestra M30-I-P, microfotografías adquiridas con lupa binocular a 10X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.

Este aumento del brillo es más evidente en los fragmentos consolidados con Mowilith® 50 independientemente del método de aplicación empleado, a pincel (Fig. 18) y mediante inmersión (Fig. 47 anexo).

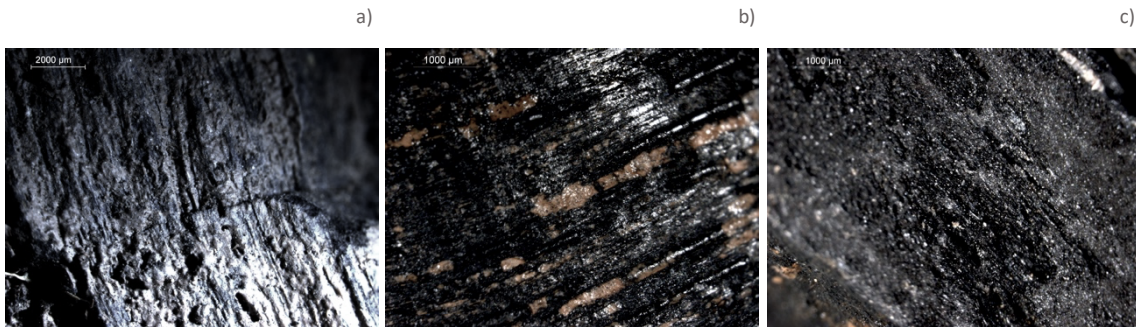


FIGURA 18. Muestra M50-P-P, microfotografías adquiridas con lupa binocular. a) Microfotografía a 10X antes de la consolidación, en superficie. b) Microfotografía a 25X después de la consolidación, en superficie. c) Microfotografía a 25X después de la consolidación, en sección transversal.

El consolidante Polivinil butyral provoca también un ligero aumento del brillo (Fig. 19), algo menos acusado que el originado por las formulaciones de Mowilith® 30 y 50. Este aumento del brillo es también apreciable en el fragmento consolidado con este mismo producto mediante inmersión (Fig. 48 anexo).



FIGURA 19. BT-P-P. Microfotografías adquiridas con lupa binocular a 10X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.

En la Figura 20 se observa el fragmento consolidado con Paraloid® B-72 mediante inmersión. Es apreciable cómo el aumento del brillo es notablemente más evidente. Este efecto es también apreciable en el fragmento consolidado con pincel (Fig. 49 anexo).



FIGURA 20. PB72-I-P. Microfotografías adquiridas con lupa binocular a 25X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.

5.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido por Emisión de Campo (FESEM)

El examen micromorfológico llevado a cabo con el Microscopio Electrónico de Barrido por Emisión de Campo (FESEM), permite observar y adquirir imágenes de las muestras a grandes aumentos con gran poder de resolución. De este modo se logra apreciar de forma muy precisa la morfología interna de los fragmentos de madera arqueológica carbonizada antes del tratamiento de consolidación, así como evaluar los cambios producidos tras dicha intervención.

Las muestras control observadas con el FESEM ilustran la anatomía interna de la madera y contribuyen a realizar una aproximación de su caracterización botánica.

En la Figura 21a se pueden observar los tres cortes de la madera y su estructura tridimensional, que tras compararse con modelos de estructura microscópica⁴³, es posible concluir que se trata de una madera de frondosa. En la imagen de electrones secundarios se percibe un elemento muy distintivo de este tipo de madera, los vasos⁴⁴ (Fig. 21a-4), éstos se pueden observar distribuidos de forma difusa a través del plano transversal.

Con más detalle, puede observarse el corte tangencial de este mismo fragmento (Fig. 21b), donde se aprecia el corte longitudinal de los vasos (Fig. 21b-1), así como las fibrotraqueidas (Fig. 21b-3).

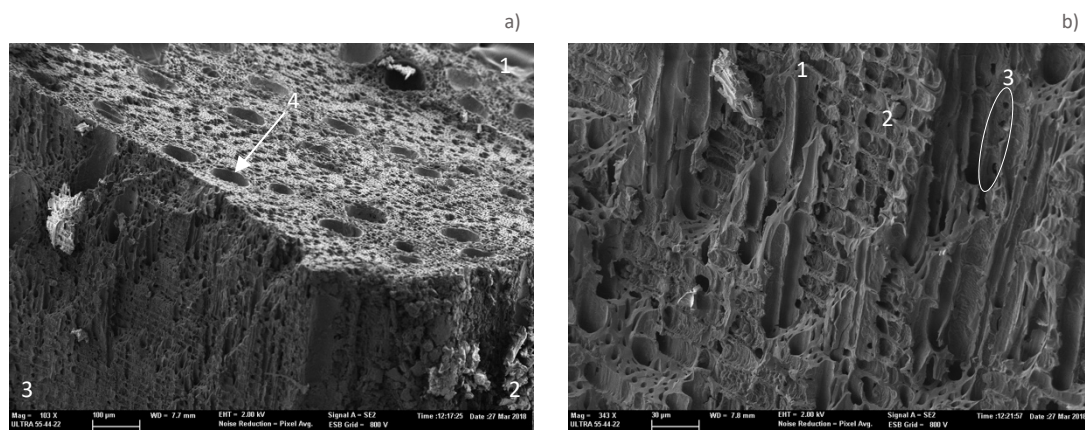


FIGURA 21. Muestra control. a) Imagen de electrones secundarios a 103X, escala 100µm. Se observan los cortes, transversal (1), radial (2) y tangencial (3). b) Imagen del corte tangencial a 343X, escala 30µm. Se observa, elemento vasal o porción de un vaso (1), corte tangencial de un radio leñosos multiseriado (2) y fibrotraqueidas (3).

Analizando los resultados obtenidos tras la consolidación de los fragmentos, se observa que aquellos consolidados con el producto Cosmoloid® H 80 muestran su superficie con una capa de textura muy rugosa que recubre totalmente la superficie del material (Fig. 22a), que corresponde con la capa que crea el consolidante aplicado. Ésta presenta delaminación (Fig. 22a-1) llegándose a observar un efecto de “pelado” en algunas zonas (Fig. 22b). Se puede observar también en el corte transversal que el consolidante no ha penetrado en el soporte leñoso (ya que la microestructura de la madera no se ha visto

⁴³ GARCÍA, L., GUINDEO, A. *Anatomía de las frondosas españolas*, p. 16.

⁴⁴ *Ibid*, p. 14.

modificada). Además se puede apreciar que el producto ha formado una capa gruesa en la superficie (Fig. 20a).

Este comportamiento de delaminación y “pelado” del consolidante, es consecuencia de que el producto no se adhiere adecuadamente al soporte, ni penetra en el interior del mismo, y por tanto, no cumple los requisitos deseados para este tipo de sustancias, que han de proporcionar un efecto reintegrador en el material sin acumulaciones indeseadas en la superficie.

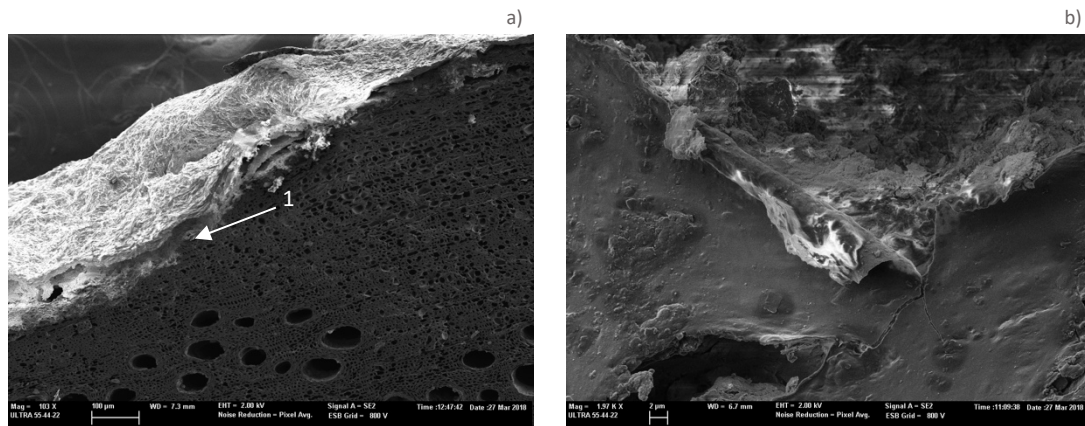


FIGURA 22. Fragmentos consolidados con Cosmoloid® H 80. a) C80-P-P. Imagen de electrones secundarios a 103X de la sección transversal del fragmento, escala 100µm. Delaminación de la capa de consolidante (1). b) C80-I-P. Imagen de electrones secundarios a 1970X de la superficie, escala 2µm.

El consolidante Mowilith® 20, en comparación con sus otras dos formulaciones (30 y 50), crea una capa superficial de consolidante más fina, que se adapta a las formas y rugosidades de la superficie de la madera respetando parcialmente su textura (Fig. 23a), y que no obtura totalmente los vasos (Fig. 23b) lo que posibilitaría la identificación de la especie botánica tras el tratamiento de consolidación. Los resultados son similares independientemente de su método de aplicación, inmersión (Fig. 23b) e impregnación con pincel (Fig. 23a).

La capa de consolidante se puede apreciar en las imágenes porque suaviza las formas, y además presenta un aspecto filmógeno (Fig. 23b-1).

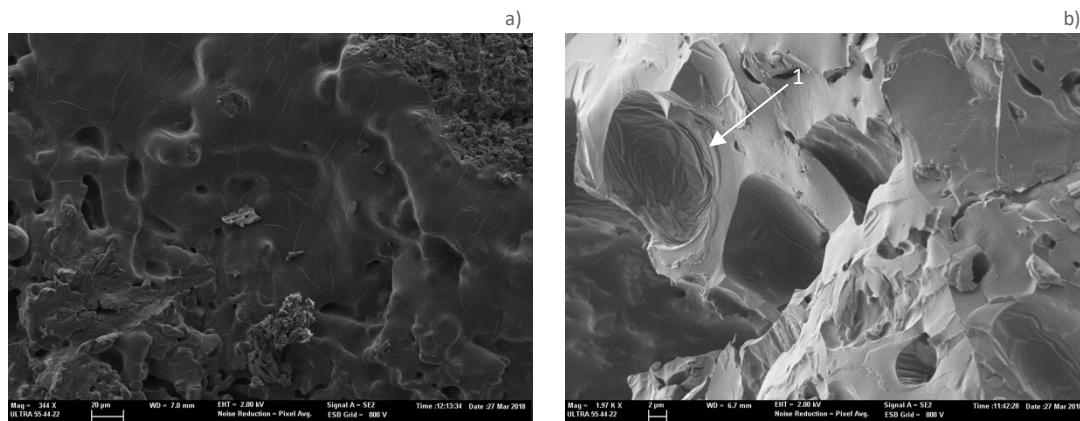


FIGURA 23. Fragmentos consolidados con Mowilith® 20. a) M20-P-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 144X, escala 20µm. b) M20-I-P, imagen de electrones secundarios de la sección transversal 1970X, escala 2µm.

En los fragmentos consolidados con las formulaciones de Mowilith® 30 tanto aplicado mediante impregnación con pincel (Fig. 24a) como aplicado mediante inmersión (Fig. 24b) y Mowilith® 50 aplicado mediante impregnación con pincel (Fig. 25a) y aplicado mediante inmersión (Fig. 25b), se puede observar cómo este polímero crea una capa superficial gruesa (Fig. 24a-1), y algunos de los vasos se obturan y rellenan de consolidante (Fig. 25b-1). Al contrario de lo que ocurre con la formulación de Mowilith® 20, que al tener un peso molecular menor y menor viscosidad es capaz de penetrar mejor y no rellena los canales ni forma capas tan gruesas como ocurre con estas otras dos formulaciones.

En ambas formulaciones puede observarse además que el comportamiento es similar para los dos métodos de aplicación utilizados.

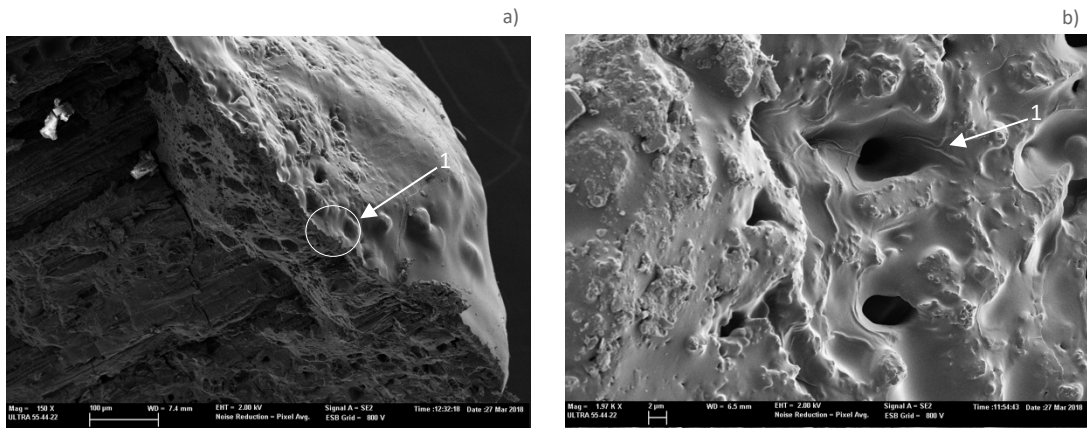


FIGURA 24. a) Fragmento M30-P-P, imagen de electrones secundarios de la sección transversal 150X, escala 20µm. b) Fragmento M30-I-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 1970X, escala 2µm. Se observan algunas líneas de tensión (1).

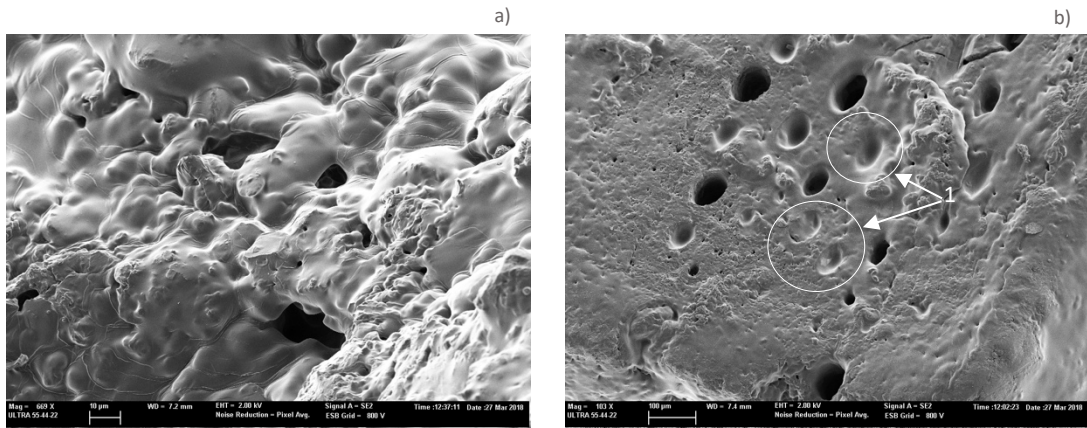


FIGURA 25. a) Fragmento M50-P-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 669X, escala 10µm. b) Fragmento M50-I-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 103X, escala 100µm. Algunos poros se obstruyen de consolidante (1).

El consolidante Polivinil butyral, muestra un film bastante grueso en superficie que oculta parcialmente las formas y parte de la morfología de la madera (Fig. 26). En contraposición a los anteriores productos, en este caso, no se observan líneas de tensión ni fisuras, lo que denota la flexibilidad y adaptabilidad del consolidante a la superficie del material. En la aplicación mediante impregnación con pincel (Fig. 26a) puede observarse un aspecto más heterogéneo del film, en comparación con la imagen obtenida del fragmento consolidado mediante impregnación (Fig. 26b).

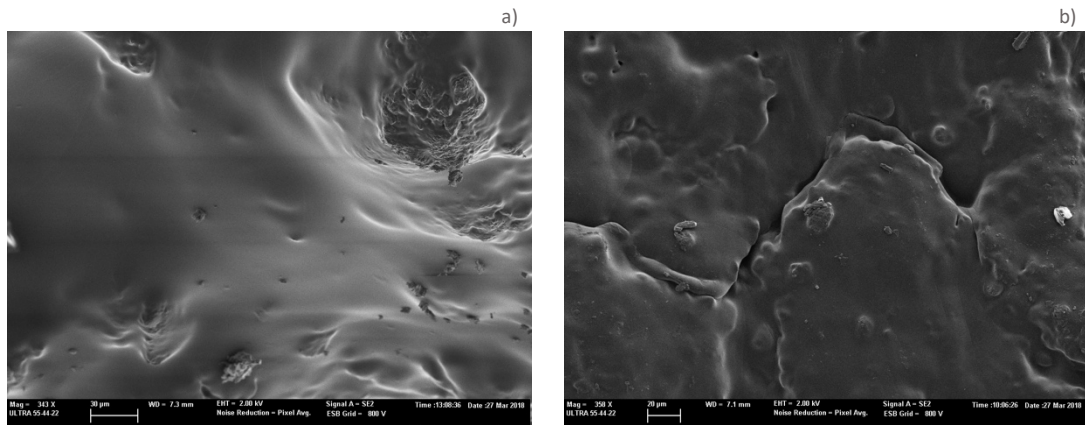


FIGURA 26. a) Fragmento BT-P-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 343X, escala 30µm. b) Fragmento BT-I-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 358X, escala 30µm.

En cuanto al fragmento consolidado con Paraloid® B-72 (Fig. 27) crea en la superficie de los fragmentos de madera carbonizada un film grueso, que oculta muchas de las formas y rugosidades propias de la madera. En el fragmento consolidado con este producto mediante impregnación con pincel (Fig. 27a) se observan fisuras en la misma capa del consolidante (Fig. 27a-1), derivadas de la rigidez del mismo y de las tensiones provocadas cuando el disolvente de éste evapora.

El fragmento consolidado mediante inmersión (Fig. 27b) muestra una superficie mucho más heterogénea y desigual.

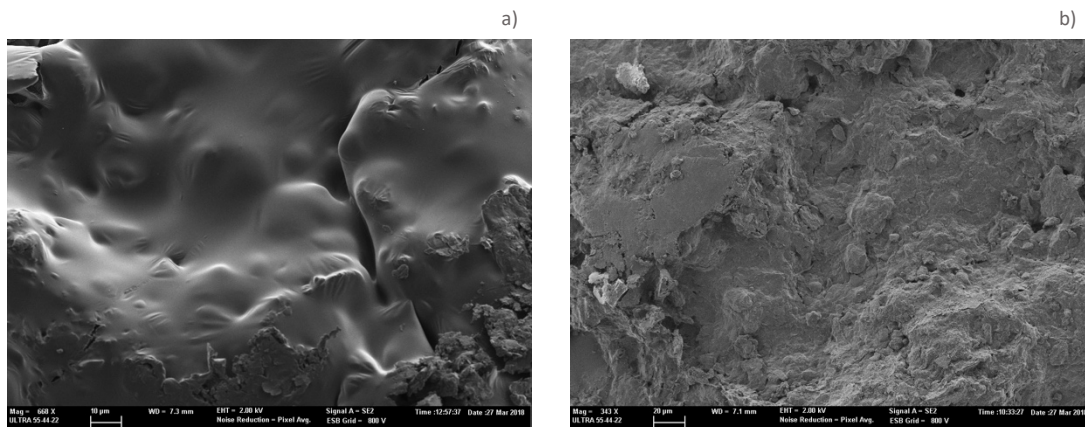


FIGURA 27. a) Fragmento PB72-P-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 668X, escala 10µm. Se observan las líneas de tensión del consolidante (1). b) Fragmento PB72-I-P, imagen de electrones secundarios de la superficie 343X, escala 30µm.

5.2. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS

5.2.1. Colorimetría

En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos tras las mediciones colorimétricas con el sistema CIEL*a*b* con SCE/100⁴⁵ de los fragmentos, antes de realizarse la consolidación (a) y después de someterse a este tratamiento (d), así como el incremento correspondiente de cada valor (ΔL^* , Δa^* y Δb^*) y el incremento del color total (ΔE). Los cambios apreciables para el ojo humano son aquellos que presentan un $\Delta E > 3$. Este es el caso de todos los fragmentos consolidados por inmersión, observándose que este método de aplicación provoca mayores cambios, en general, que la aplicación a pincel. Esto puede deberse a que al aplicar con pincel se estimula la penetración del consolidante, mientras que en la aplicación por inmersión el consolidante tiende a formar una capa superficial independientemente del producto consolidante utilizado.

En particular, los cambios más significativos se observan en los fragmentos consolidados con los productos Cosmolid® H 80, Mowilith® 50 y Polivinil butyral. Siendo el que produce mayores variaciones, con bastante diferencia, el Cosmolid® H 80.

En referencia a los valores obtenidos para el Polivinil butyral cabe destacar el valor tan bajo que se obtiene en el fragmento consolidado por impregnación a pincel y el valor tan alto obtenido al aplicar el mismo producto mediante inmersión.

Según los valores obtenidos, el método de aplicación podría ser en parte determinante a la hora de producir cambios colorimétricos, produciéndose mayores cambios mediante la aplicación por inmersión independientemente del método de aplicación. Sin embargo es más determinante el producto consolidante, siendo los mayores valores de ΔE los obtenidos en los fragmentos consolidados con Cosmolid® H 80.

TABLA 5. Variación de las coordenadas cromáticas L* a* b* y variación total (ΔE) de los fragmentos de madera arqueológica carbonizada, antes y después del tratamiento de consolidación con pincel.

NOMBRE	L*(a)	L*(d)	ΔL^* (d-a)	a*(a)	a*(d)	Δa^* (d-a)	b*(a)	b*(d)	Δb^* (d-a)	ΔE_{ab}^*
C80-P-P	16,75	31,76	15	3,090	3,22	0,1	9,14	6,68	-2,5	15,0
M20-P-P	27,0	28,24	1,3	1,16	0,897	-0,3	2,42	3,7133	1,3	1,82
M30-P-P	35,9	29,47	-6,4	1,79	0,83	-0,96	4,610	4,74	-0,1	6,50
M50-P-P	33,33	29,40	-3,9	1,8	1,17	-0,6	3,837	3,983	0,1	3,98
BT-P-P	26,01	26,5	0,5	1,26	1,19	-0,1	2,88	4,25	1,4	1,45
PB72-P-P	25,63	28,0	2,3	0,75	0,77	0,0	0,8	2,98	2,2	3,18

⁴⁵ SCE: brillo excluido.

TABLA 6. Variación de las coordenadas cromáticas L a* b* y variación total (ΔE) de los fragmentos de madera arqueológica carbonizada, antes y después del tratamiento de consolidación por inmersión.*

NOMBRE	L*(a)	L*(d)	ΔL^* (d-a)	a*(a)	a*(d)	Δa^* (d-a)	b*(a)	b*(d)	Δb^* (d-a)	ΔE_{ab^*}
C80-I-P	32,867	42,997	10,1	2,583	3,720	1,1	6,123	7,45	1,3	10,28
M20-I-P	26,64	23,8	2,8	0,99	0,99	0,0	2,36	3,8	1,5	3,25
M30-I-P	22,83	25,780	3,0	1,28	0,947	-0,3	2,26	3,72	1,5	3,31
M50-I-P	21,49	28,31	6,8	1,13	0,87	-0,3	2,09	3,09	1,0	6,89
BT-I-P	22,92	31,1	8,2	1,45	1,7	0,2	2,23	4,6	2,3	8,55
PB72-I-P	21,69	25,2	3,5	1,327	0,89	-0,4	2,36	3,47	1,1	3,67

Los gráficos representados en las Figuras 28 y 29 muestran de un modo más visual, la variación en las coordenadas cromáticas L*, a* y b* de los fragmentos de madera arqueológica carbonizada antes y después de someterlos al proceso de consolidación mediante inmersión (Fig. 28) e impregnación con pincel (Fig. 29).

En los resultados que muestran ambos gráficos se puede observar que el cambio más significativo se ha producido en el fragmento consolidado con Cosmoloid® H 80.

En concreto, en el fragmento consolidado con Cosmoloid® H 80 mediante inmersión (Fig. 28), en el que se produce una mengua muy significativa en el valor b*, que evidencia una disminución del componente cromático amarillo, hecho derivado de la acumulación de consolidante en la superficie del fragmento tras el proceso de consolidación.

El resto de los consolidantes experimentan virajes al amarillo mucho menores y siendo en todos ellos la variación del valor a* despreciable.

En la Figura 29, en la que se representan los resultados obtenidos en los fragmentos consolidados mediante impregnación con pincel, se observan comportamientos cromáticos similares. El consolidante Cosmoloid® H 80 sigue presentando la variación más pronunciada, pero ésta es menor que en el caso anterior (mediante consolidación por inmersión). Por el contrario, los incrementos de b* para el resto de consolidantes son mayores y son muy similares para todos los productos en este tipo de aplicación.

En los gráficos de luminosidad (L*) pueden advertirse también que las variaciones más acentuadas se originan en los fragmentos consolidados con Cosmoloid® H 80, en ambos métodos de aplicación se evidencia un aumento de la luminosidad, del 30% en la aplicación por inmersión y del 20% en la aplicación mediante impregnación con pincel. Este aumento de luminosidad es consecuencia del blanqueamiento superficial de los fragmentos después del proceso de consolidación con dicho producto.

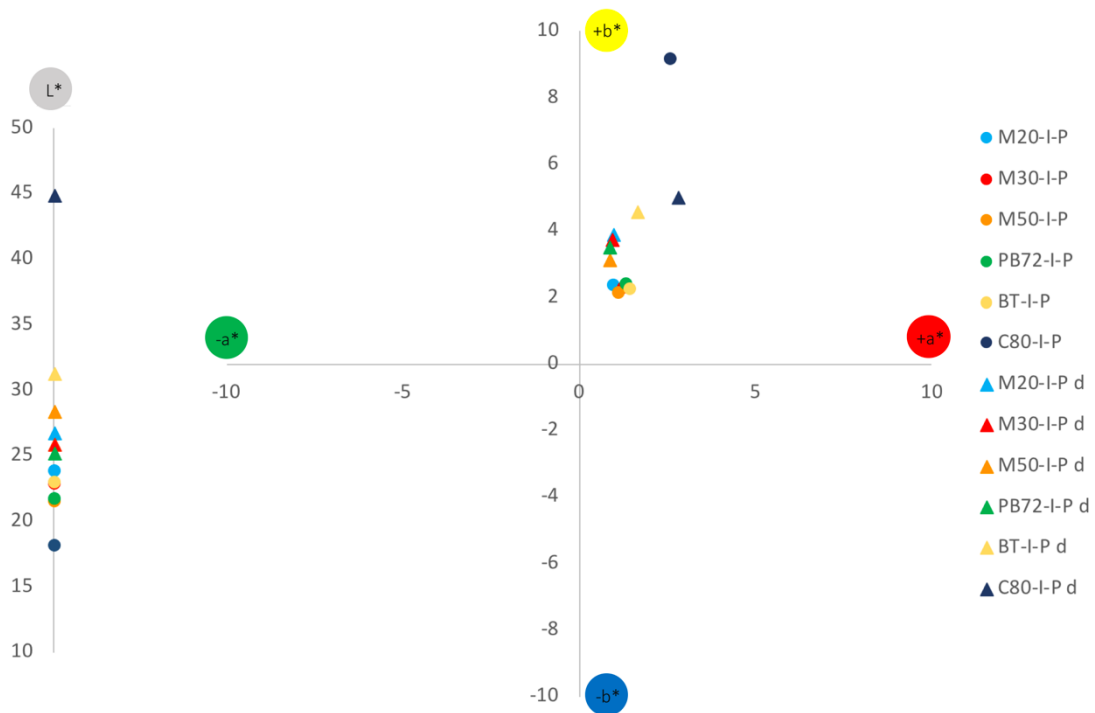


FIGURA 28. Gráfico L*, a* y b* en el que se muestran los valores cromáticos de los fragmentos de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación por inmersión.

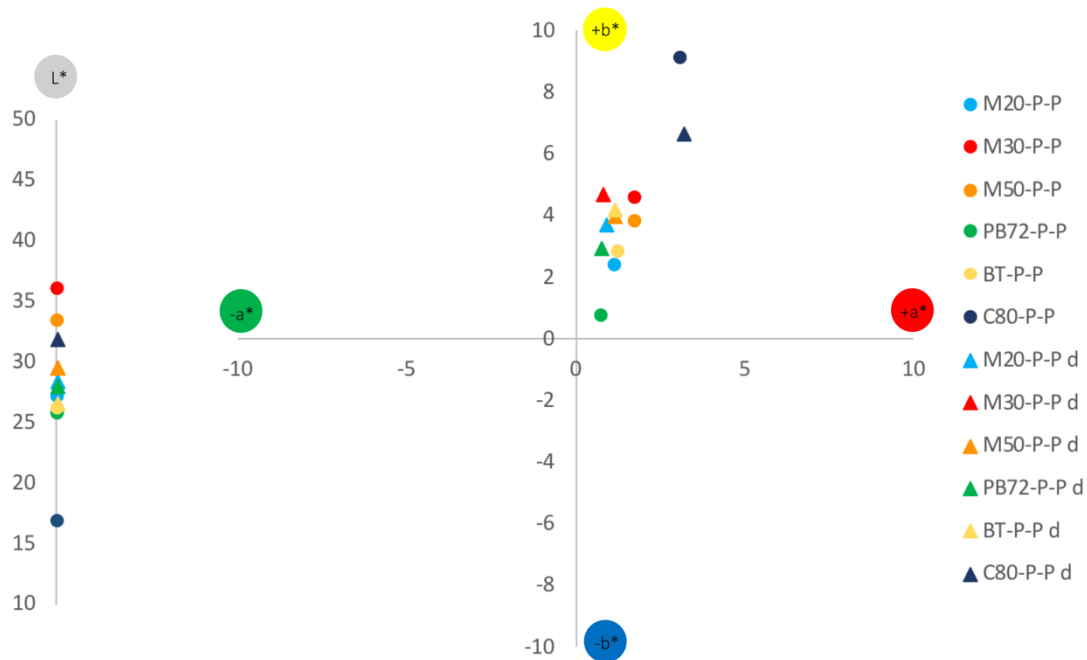


FIGURA 29. Gráfico L*, a* y b* en el que se muestran los valores cromáticos de los fragmentos de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación por impregnación con pincel.

Los valores de variación de las coordenadas cromáticas L^* , C^* , h y su equivalencia en términos de claridad, croma y tono⁴⁶ obtenidos en el conjunto de fragmentos analizados se listan en la Tabla 7. Los resultados obtenidos revelan que los fragmentos de madera carbonizada poseen cromas grisáceos y claridades oscuras. Las tonalidades iniciales de los fragmentos estudiados eran anaranjadas, color asociado a los restos de depósitos de tierra que se encontraban depositados sobre los fragmentos. Las tonalidades viran hacia el amarillo tras el proceso de consolidación.

TABLA 7. Valores de variación de las coordenadas cromáticas L^* C^* h con SCE y equivalencia en términos de claridad, croma y tono. En la tabla se presentan los valores de antes de la consolidación (a) y los de después del tratamiento (b).

NOMBRE	$L^*(a)$	CALIDAD	$L^*(d)$	CLARIDAD	$C^*(a)$	CROMA	$C^*(d)$	CROMA	$h(a)$	TONO	$h(d)$	TONO
C80-P-P	16,75	Muy oscuro	31,76	Oscuro	6,70	Grisáceo	6,90	Grisáceo	68,2	Naranja amarillento	69,24	Naranja amarillento
C80-I-P	32,867	Oscuro	42,997	Medio	6,647	Grisáceo	8,327	Débil	67,12	Naranja amarillento	63,44	NARANJA
M20-P-P	27,0	Oscuro	28,24	Oscuro	2,69	Grisáceo	3,820	Grisáceo	64,3	Naranja amarillento	76,4	Naranja-amarillo
M20-I-P	26,64	Oscuro	23,8	Oscuro	2,56	Grisáceo	4,0	Grisáceo	67,2	Naranja amarillento	75,617	Naranja-amarillo
M30-P-P	35,9	Medio	29,47	Oscuro	7,31	Grisáceo	4,94	Grisáceo	67,27	Naranja amarillento	68,8	Naranja amarillento
M30-I-P	22,83	Oscuro	25,780	Oscuro	2,60	Grisáceo	3,84	Grisáceo	60,44	NARANJA	75,73	Naranja-amarillo
M50-P-P	33,33	Oscuro	29,40	Oscuro	4,223	Grisáceo	4,153	Grisáceo	65,27	Naranja amarillento	73,6	Naranja-amarillo
M50-I-P	21,49	Oscuro	28,31	Oscuro	2,38	Grisáceo	3,21	Grisáceo	61,7	NARANJA	74	Naranja-amarillo
BT-P-P	26,01	Oscuro	26,5	Oscuro	3,14	Grisáceo	4,41	Grisáceo	66,4	Naranja amarillento	74,39	Naranja-amarillo
BT-I-P	22,92	Oscuro	31,1	Oscuro	2,663	Grisáceo	4,8	Grisáceo	57,1	NARANJA	70,13	Naranja amarillento
PB72-P-P	25,63	Oscuro	28,0	Oscuro	1,103	Grisáceo	3,08	Grisáceo	47,0	Rojo-naranja	75,59	Naranja-amarillo
PB72-I-P	21,69	Oscuro	25,2	Oscuro	2,71	Grisáceo	3,58	Grisáceo	60,7	NARANJA	75,7	Naranja-amarillo

⁴⁶ Ver anexo, sistema de nominación cromática.

5.2.2. Fotometría

Los datos obtenidos tras la medición del brillo de los fragmentos, antes y después de su consolidación, evidencian los distintos comportamientos que tienen los consolidantes entre sí y según el método de aplicación.

Como se puede observar en la Figura 30, los consolidantes que producen un aumento más significativo del brillo superficial de la madera, son los productos Mowilith® 30 y 50 y Paraloid® B-72, todos ellos aplicados mediante impregnación con pincel.

Cabe destacar también el comportamiento del Cosmoloid® H 80, éste en ambos métodos de aplicación hace que el brillo de la muestra disminuya, debido a que la capa blanquecina que crea en la superficie de los fragmentos produce un efecto “matificante”, disminuyendo por tanto el brillo.

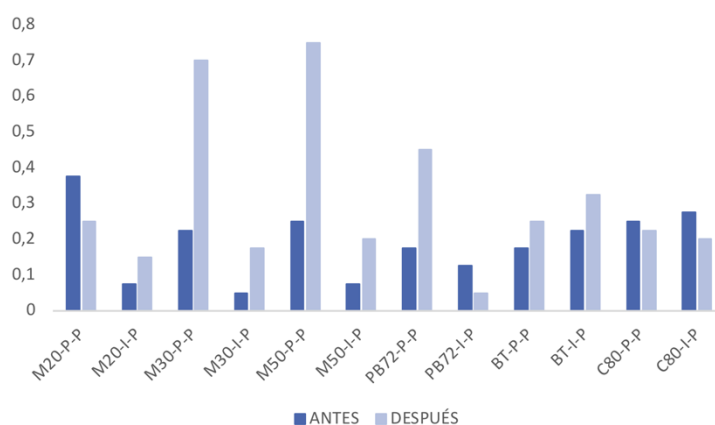


FIGURA 30. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en la medición del brillo de los fragmentos de madera carbonizada antes y después de la consolidación.

5.3. PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS DISOLUCIONES DEL POLÍMERO

La Tabla 8 muestra los valores de viscosidad medidos a 20°C para las diferentes disoluciones preparadas con los polímeros seleccionados como productos consolidantes.

Se observa que excepto la disolución preparada con Polivinil butyral con una viscosidad superior a 100 mPa el resto de disoluciones consolidantes poseen una viscosidad muy baja, por debajo de 100 mPa, lo cual debería garantizar un buen comportamiento reológico durante el proceso de aplicación.

TABLA 8. Viscosidad de las disoluciones de polímero. Condiciones operativas específicas.

CONSOLIDANTE	VISCOSIDAD (mPa)	TIPO DE HUSILLO UTILIZADO
Cosmoloid® H 80	23,3	R2
Mowilith® 20	25	R2
Mowilith® 30	29,9	R2
Mowilith® 50	51,1	R2
Polivinil butyral	138	R4
Paraloid® B-72	28,5	R2

5.4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS (TENSILE TEST)

Con este ensayo se ha medido el comportamiento mecánico de los fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico tras la consolidación, con el fin de observar el efecto producido por cada consolidante.

Las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas (Fig. 31) permiten comparar el comportamiento de los diferentes consolidantes estudiados. Se observa que todas ellas se caracterizan por incluir un tramo horizontal que corresponde a la distancia recorrida por la máquina de ensayos hasta que las mordazas comienzan a transmitir fuerza de empuje a la probeta. Una vez la fuerza comienza a ejercerse sobre la probeta, ésta experimenta una variación lineal con la deformación, indicando un comportamiento elástico. La pendiente de dicha recta, por consiguiente, indicará el mayor o menor grado de flexibilidad conferido a la probeta del consolidante aplicado.

Al observar las gráficas obtenidas tras realizar el ensayo, se puede apreciar que todas ellas presentan únicamente un comportamiento elástico y no se aprecia un tramo plástico, este comportamiento es característico de la madera carbonizada y lo adquiere tras sufrir este proceso de alteración. Excepto la gráfica correspondiente al fragmento consolidado con Mowilith® 30 mediante pincel, las gráficas presentan pendientes parecidas entre ellas. Este comportamiento tan semejante entre los diferentes productos indica que, con las cantidades de consolidante aplicado en los fragmentos, ni el producto consolidante ni el método de aplicación, son determinantes sobre las propiedades mecánicas de las probetas.

La gráfica correspondiente al fragmento consolidado con Mowilith® 30 mediante impregnación con pincel muestra una pendiente superior al resto, este fragmento además, no llega a romper al aplicar la fuerza máxima ofrecida por la mordaza (150N). Este hecho es consecuencia de que el fragmento presentaba un grosor superior al resto y conjuntamente su grado de carbonización era menor, por consiguiente, su resistencia mecánica era superior.

En el caso del fragmento consolidado con Mowilith® 50 por inmersión, ocurre el caso contrario, éste presentaba un grosor inferior y su grado de carbonización, por tanto, era mayor, por lo que el fragmento ha roto al aplicarle una fuerza menor.

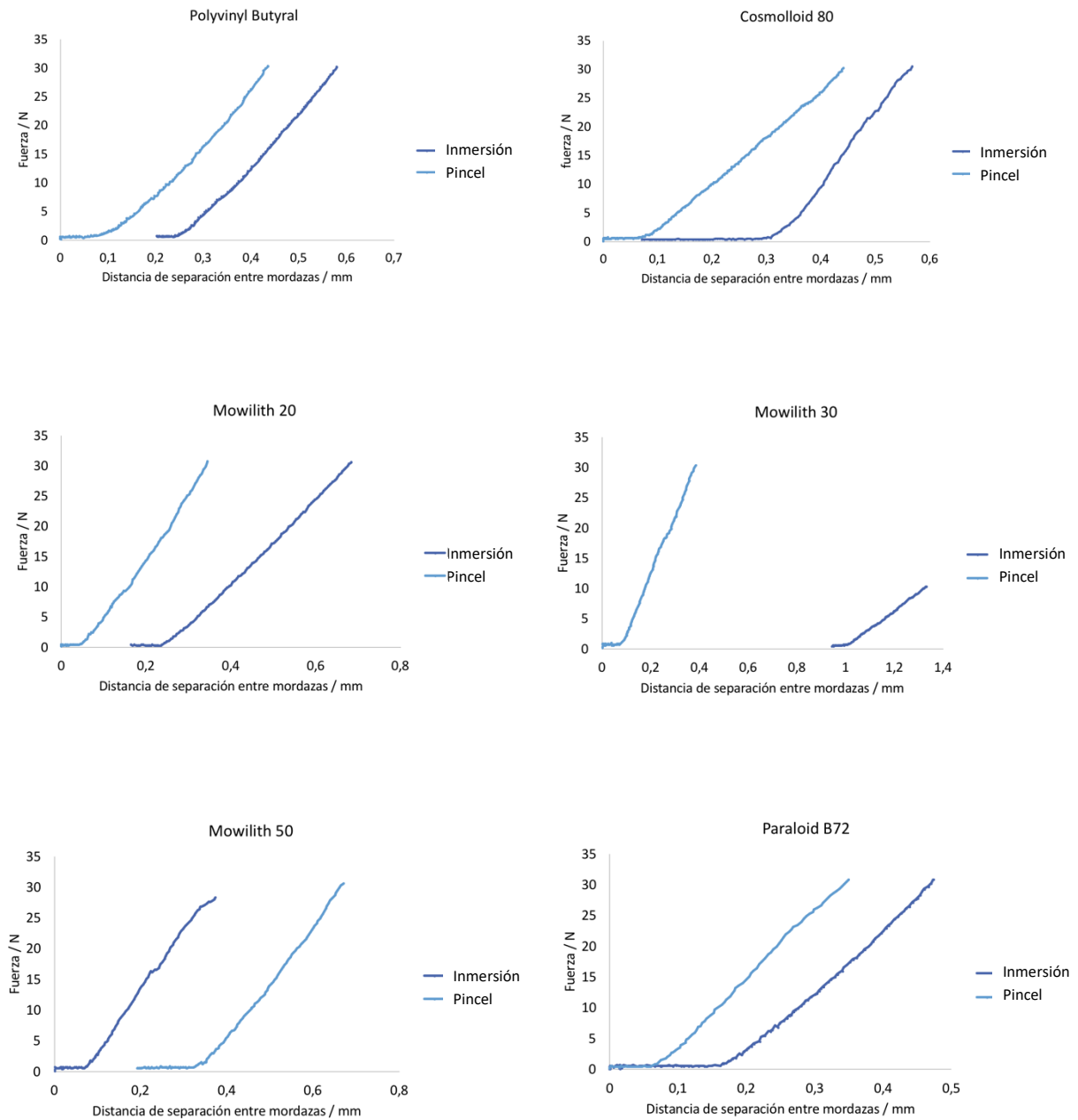


FIGURA 31. Gráficas esfuerzo-deformación obtenidas de los fragmentos consolidados con cada producto tanto en inmersión (azul claro) como por impregnación con pincel (azul oscuro).

Como se ha indicado anteriormente, las probetas de laboratorio con las que se ha realizado el ensayo, al elaborarse manualmente, presentaban diferencias de grosor entre ellas. Estas diferencias, aunque mínimas, han podido interferir en los resultados, ofreciendo más resistencia aquellas probetas más gruesas independientemente del incremento en la resistencia mecánica producido por el consolidante. Con el fin de minimizar este error, se han procesado los datos y se ha recalculado, de forma proporcional al espesor de cada una de las probetas, el valor de la pendiente. Se ha calculado, por tanto, el valor que presentaría cada muestra si ésta tuviera un grosor de 1 mm, de este modo los valores resultantes ya normalizados, pueden ser comparables entre sí.

En la Tabla 9 se muestra el grosor medio⁴⁷ de las probetas, y el valor de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en el tramo elástico normalizada a un espesor de probeta de 1 mm.

Analizando dichos valores de pendiente se observa que éstos son muy similares entre sí para todos los productos así como para las dos formas de aplicación.

Puede observarse un ligero aumento de la pendiente en el fragmento consolidado con Mowilith® 50 por inmersión y un resultado anómalamente bajo en el fragmento consolidado con Mowilith® 30 por inmersión. Ambas excepciones, como se ha señalado anteriormente, coinciden con el hecho de que el primero de los fragmentos poseía un grosor mayor y un menor grado de carbonización y el segundo de ellos, por el contrario, poseía un grosor menor y un mayor grado de carbonización.

TABLA 9. Grosor medio de las probetas y valor de pendiente normalizado a 1 mm.

NOMBRE	GROSOR MEDIO (mm)	PENDIENTE (N.mm ⁻¹)
C80-I-G	3,54	19,24
C80-P-G	3,91	19,61
M20-I-G	3,22	19,67
M20-P-G	4,62	20,46
M30-I-G	3,17	8,65
M30-P-G	4,09	18,86
M50-I-G	4,38	30,04
M50-P-G	3,55	21,31
PB72-I-G	3,74	18,49
PB72-P-G	4,17	17,35
BT-I-G	4,15	18,77
BT-P-G	4,01	18,21

⁴⁷ El valor representado es una media aritmética de un total de 3 mediciones en cada probeta.

5.5. ANÁLISIS QUÍMICO – MINERALÓGICO. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Para llevar a cabo el seguimiento del grado de penetración del consolidante en los fragmentos de madera carbonizada, se ha procedido al cálculo de los cocientes de intensidad de una banda IR diagnóstica seleccionada para el consolidante (I_p) y una banda IR de referencia de la madera carbonizada (I_c). Como banda IR de referencia en la madera carbonizada se ha escogido la correspondiente a la vibración de tensión -C=C- con máximo a 1555 cm^{-1} . La Tabla 10 resume las bandas IR diagnósticas seleccionadas para cada uno de los consolidantes sometidos a ensayo.

TABLA 10. Bandas IR seleccionadas para cada producto consolidante.

CONSOLIDANTE	BANDA IR	POSICIÓN DE LA BANDA IR (cm^{-1})
Paraloid® B-72	Tensión C=O	1720
Cosmoloid® H 80	Tensión antisimétrica CH ₂	2914
Mowilith® 20, 30, 50	Tensión C=O	1728
Polyvinyl Butyral	Tensión antisimétrica CH ₂	2940

A continuación, se presentan los espectros IR obtenidos en la serie de muestras extraídas de los fragmentos de madera carbonizada tras ser consolidados y en el fragmento control sin consolidar. En cada figura se exponen, para cada producto consolidado sometido a estudio, toda la serie de espectros IR obtenidos a diferentes profundidades en los que se han señalado las bandas IR seleccionadas para ambos, consolidante y sustrato de carbón, con el propósito de semicuantificar la concentración de consolidante a diferente profundidad. Se puede apreciar cómo a medida que aumenta la profundidad la intensidad de la banda IR del consolidante disminuye de manera relativa a la banda de referencia del sustrato.

Muy representativa es la serie de espectros obtenida del fragmento consolidado con Cosmoloid® H 80 mediante inmersión (Fig. 32a). El espectro correspondiente a la muestra tomada en superficie exhibe una banda de intensidad muy elevada a 2914 cm^{-1} , lo que indica un contenido alto de Cosmoloid® H 80, es decir, una acumulación superficial del producto. Sin embargo, esta misma banda es prácticamente inexistente en los espectros correspondientes a las muestras tomadas a mayores profundidades, lo que demuestra la poca penetración del producto en el interior del material. En la secuencia adquirida en el fragmento consolidado con el mismo consolidante mediante impregnación con pincel (Fig. 32b), se observa que la banda seleccionada para el consolidante se mantiene a medida que se profundiza, aunque ésta sin embargo es muy poco pronunciada con respecto a la banda de referencia de la madera.

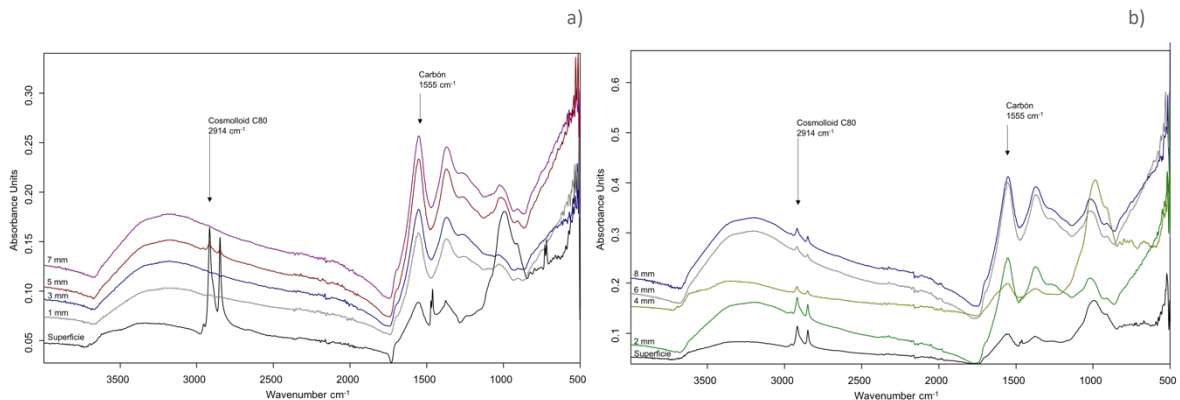


FIGURA 32. Secuencias de espectros IR obtenidos a diferentes profundidades en los fragmentos consolidados con Cosmolid® H 80, a) por inmersión. b) por impregnación con pincel.

Comparando la serie de espectros obtenidos mediante la consolidación de los fragmentos de madera carbonizada con Mowilith® 20 mediante inmersión (Fig. 33a) e impregnación con pincel (Fig. 33b) se puede apreciar que en ambos métodos de aplicación la banda seleccionada para el consolidante, a 1728 cm^{-1} , aparece en todas las profundidades, disminuyendo ésta su intensidad respecto a la banda de referencia de la madera carbonizada a medida que se profundiza en la muestra. También cabe destacar que esta disminución es más acusada en la muestra consolidada mediante inmersión, penetrando, por tanto, más el producto en el fragmento en el que se aplica con pincel.

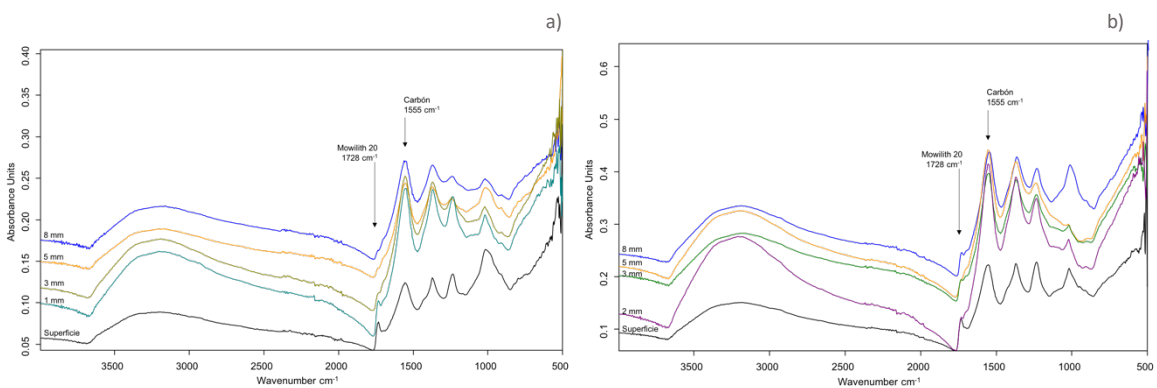


FIGURA 33. Secuencias de espectros IR obtenidos a diferentes profundidades en los fragmentos consolidados con Mowilith® 20, a) por inmersión. b) por impregnación con pincel.

El mismo comportamiento se vuelve a presentar en los fragmentos consolidados con Mowilith® 30, en la serie de espectros adquiridos del fragmento consolidado mediante impregnación con pincel (Fig. 34a), se observa cómo la banda a 1728 cm^{-1} , correspondiente al Mowilith® 30, se mantiene en todas las muestras tomadas a diferentes profundidades, mientras que en la serie de espectros correspondiente al fragmento consolidado por inmersión (Fig. 34b) esta banda desaparece a menor profundidad.

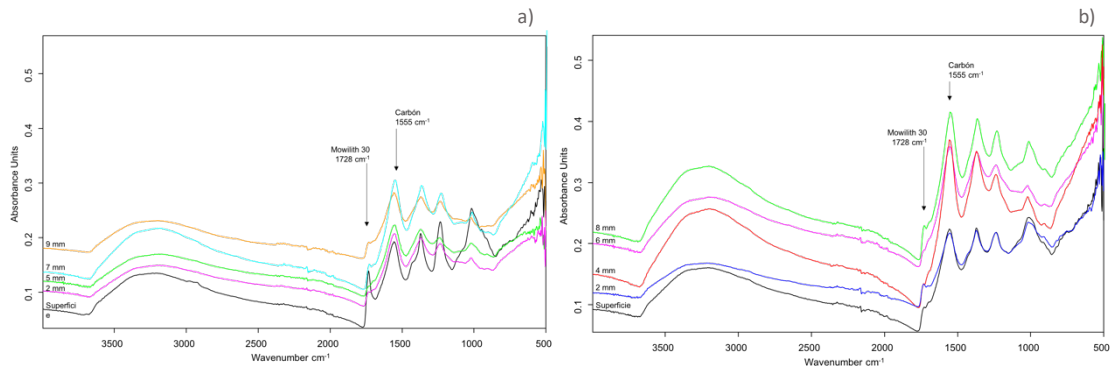


FIGURA 34. Secuencias de espectros IR obtenidos a diferentes profundidades en los fragmentos consolidados con Mowilith® 30. a) por inmersión. b) por impregnación con pincel.

En cuanto a la formulación más viscosa y de mayor peso molecular del producto anterior, Mowilith® 50, se puede apreciar cómo en el espectro obtenido de la muestra en superficie del fragmento consolidado mediante inmersión (Fig. 35a), aparece la banda correspondiente al producto consolidante, y ésta ya no se identifica en el resto de espectros obtenidos a diferentes profundidades. Esta banda tan intensa y la ausencia de la misma en profundidad, sugiere que el consolidante se ha acumulado en superficie creando una capa más o menos gruesa y no ha penetrado en el interior del material.

La serie de espectros procedente del fragmento consolidado mediante impregnación (Fig. 35b), muestra este mismo comportamiento, por el cual la banda correspondiente con el consolidante Mowilith® 50 sólo se aprecia en la muestra tomada en superficie.

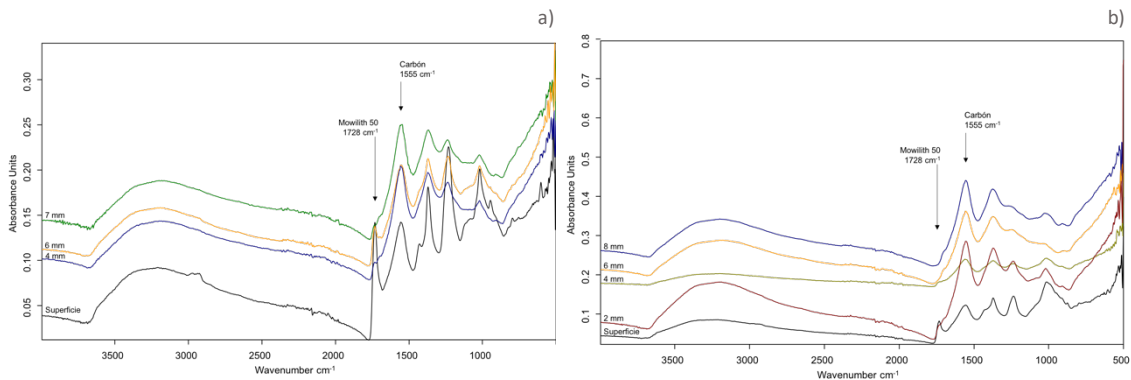


FIGURA 35. Secuencias de espectros IR obtenidos a diferentes profundidades en los fragmentos consolidados con Mowilith® 50. a) por inmersión. b) por impregnación con pincel.

Si se comparan las series de espectros de absorción IR de la Figura 36 correspondientes a la secuencia obtenida para el consolidante Polivinil butyral por inmersión (Fig. 36a) y mediante impregnación con pincel (Fig. 36b), se aprecia que la banda IR característica del Polivinil butyral a 2940 cm^{-1} , se reduce más en el espectro obtenido del fragmento consolidado mediante inmersión, que en el fragmento tratado a pincel.

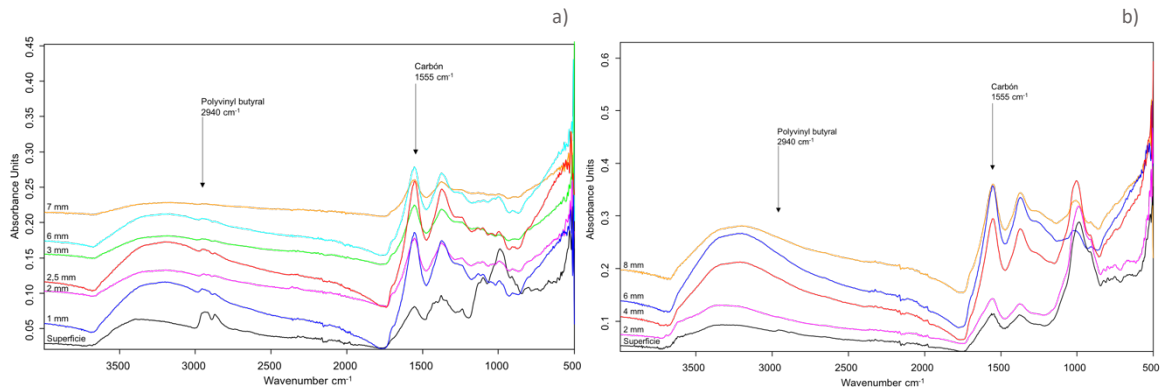


FIGURA 36. Secuencias de espectros IR obtenidos a diferentes profundidades en los fragmentos consolidados con Polivinil butyral. a) por inmersión. b) por impregnación con pincel.

Por último, se presentan la serie de espectros correspondientes a los fragmentos consolidados con Paraloid® B-72 en inmersión (Fig. 37a) e impregnación con pincel (Fig. 37b).

La banda IR característica del Paraloid® B-72 se encuentra a 1720 cm^{-1} , dicha banda se mantiene en todas las muestras tomadas a diferentes profundidades en el fragmento consolidado por inmersión. En el espectro obtenido del fragmento consolidado mediante impregnación con pincel esta banda es menor, llegando a ser nula, lo que sugiere que el consolidante ha penetrado mejor aplicándolo mediante inmersión.

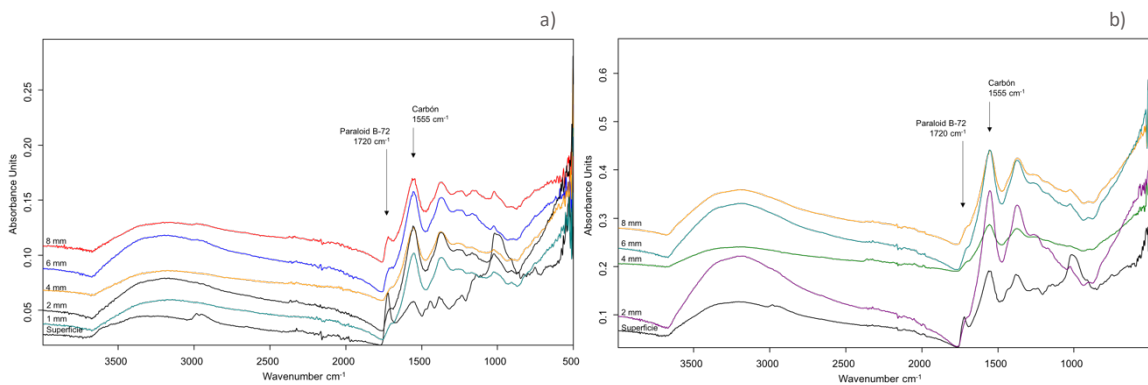


FIGURA 37. Secuencias de espectros IR obtenidos a diferentes profundidades en los fragmentos consolidados con Paraloid® B-72.. a) por inmersión. b) por impregnación con pincel

Con el fin de evaluar la profundidad de penetración de los diferentes productos ensayados, se calculó el cociente de las intensidades de las bandas de absorción IR correspondientes al consolidante y a la banda de referencia de la madera carbonizada.

Estas bandas de absorción se representan los gráficos con los valores del cociente I_P / I_C de todos los consolidantes utilizados en el estudio, aplicados sobre los fragmentos de madera arqueológica

carbonizada mediante inmersión e impregnación con pincel. Todos estos valores revelan que, independientemente del método de aplicación, el contenido de todos los consolidantes utilizados se reduce drásticamente en el primer milímetro de profundidad, sin embargo algunos de ellos penetran en mayor medida que otros.

En el fragmento consolidado con Cosmoloid® H 80 mediante impregnación con pincel (Fig. 38b), se muestra contenido de producto hasta una profundidad de 4 mm, sin embargo, el contenido de producto en el fragmento aplicado mediante inmersión (Fig. 38a) se reduce a 1 mm de profundidad.

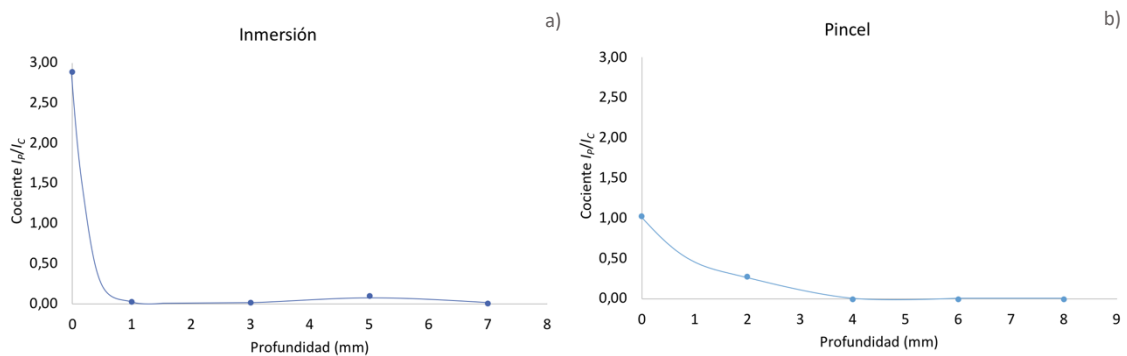


FIGURA 38. Representación de los cocientes I_p/I_c para el Cosmoloid® H 80, a) aplicado mediante inmersión. b) aplicado mediante impregnación con pincel.

El fragmento consolidado con Mowilith® 20 mediante impregnación con pincel (Fig. 39b) muestra contenido de producto hasta una profundidad de 2 mm, resultado algo inferior al obtenido en el fragmento consolidado por impregnación (Fig.39a), que muestra contenido de producto hasta los 4 mm.

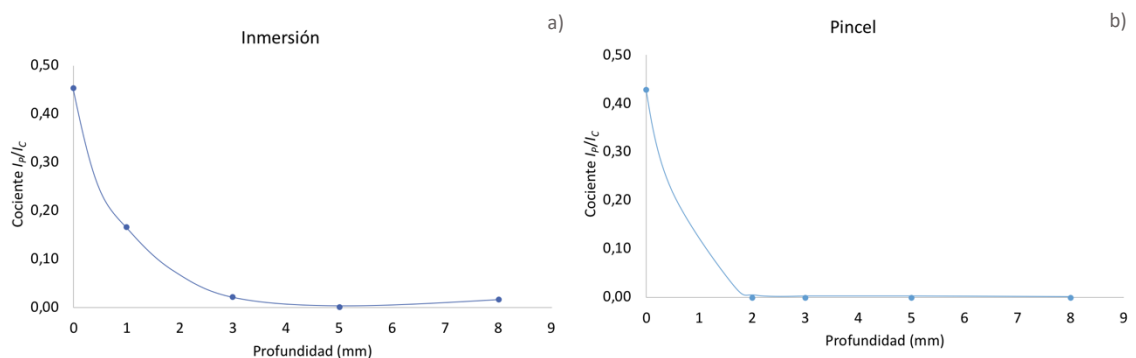


FIGURA 39. Representación de los cocientes I_p/I_c para el Mowilith® 20, a) aplicado mediante inmersión. b) aplicado mediante impregnación con pincel.

La formulación de Mowilith® 30, penetra más en el fragmento en el que el polímero se ha aplicado con pincel (Fig. 40b), apareciendo contenido del mismo hasta una profundidad de 5 mm. En el fragmento en

el que este consolidante se aplica por inmersión (Fig. 40a), el contenido de polímero deja de detectarse a una profundidad de 2 mm y vuelve a detectarse contenido de producto a los 7 y 9 mm, este hecho se puede deber a la mayor presencia de grietas por las que haya podido penetrar más el consolidante, impregnando el interior de una forma irregular.

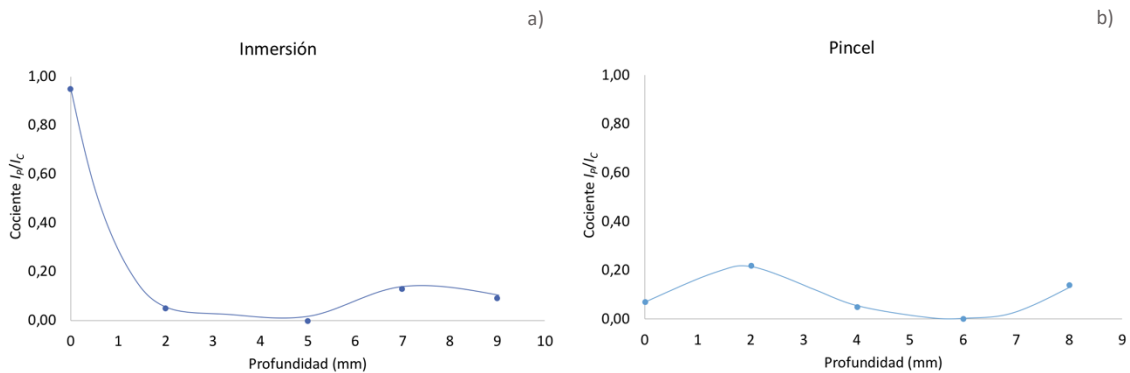


FIGURA 40. Representación de los cocientes I_p/I_c para el Mowilith® 30, a) aplicado mediante inmersión. b) aplicado mediante impregnación con pincel.

En cuanto a la formulación más densa del producto mencionado, Mowilith® 50, su contenido se reduce a 2 mm de profundidad en el fragmento consolidado con pincel (Fig. 41b). Por el contrario, en el fragmento consolidado mediante inmersión (Fig. 41a) el contenido de consolidante está presente hasta los 6 mm.

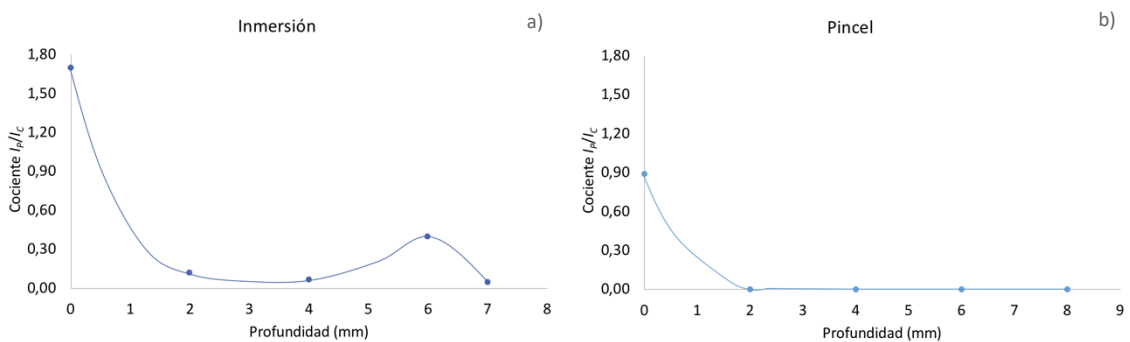


FIGURA 41. Representación de los cocientes I_p/I_c para el Mowilith® 50, a) aplicado mediante inmersión. b) aplicado mediante impregnación con pincel.

Cabe destacar cómo en el fragmento consolidado por inmersión con Polivinil butyral (Fig. 42a) se detecta material consolidante hasta una profundidad de 6 mm, aunque en muy pequeña proporción. Este hecho sugiere que, aunque parte del producto se acumule en la superficie del material, éste penetra hasta una

profundidad de 6 mm. No ocurre lo mismo en el fragmento consolidado con este mismo producto aplicado mediante impregnación con pincel (Fig. 42b), en el cual, a una profundidad de 2 mm deja de detectarse contenido de producto.

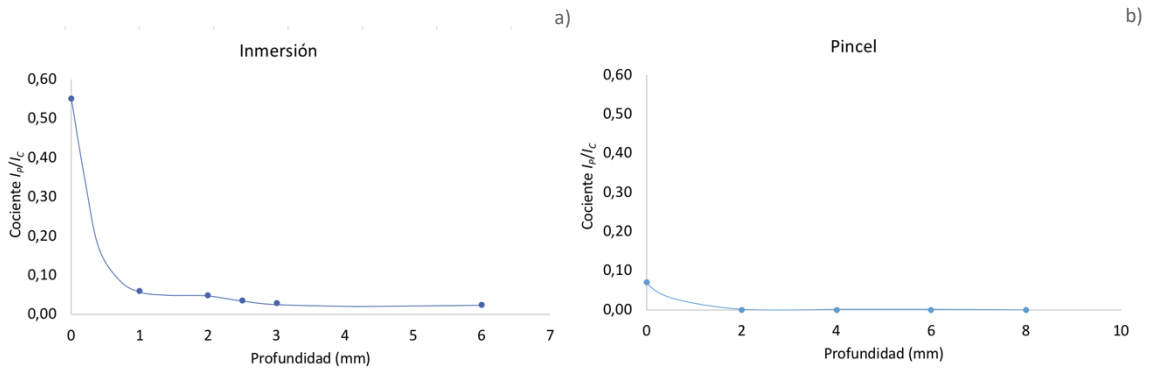


FIGURA 42. Representación de los cocientes I_p/I_c para el Polivinil butiral, a) aplicado mediante inmersión. b) aplicado mediante impregnación con pincel.

El consolidante Paraloid B-72 presenta un comportamiento bastante similar independientemente de su forma de aplicación (Fig. 43), éste crea una capa en superficie y no penetra en el interior del fragmento más de 2 mm en la aplicación con pincel y 1 mm en la aplicación por inmersión.

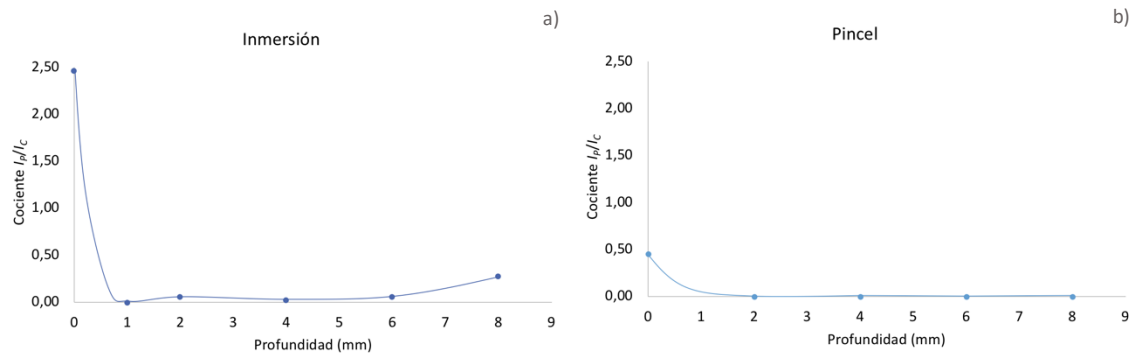


FIGURA 43. Representación de los cocientes I_p/I_c para el Paraloid® B-72, a) aplicado mediante inmersión. b) aplicado mediante impregnación con pincel.

6. CONCLUSIONES

A continuación se procede a relacionar todos los datos previamente expuestos con el fin de realizar una valoración global del conjunto de resultados y obtener unas conclusiones finales.

En primer lugar, se hace necesario destacar el marcado carácter anisótropo de la madera, que además ha estado sometida a un proceso incontrolado de combustión. El desconocimiento de las condiciones en las que tuvo lugar el proceso de carbonización ha conferido a los fragmentos un carácter heterogéneo, por lo que los ensayos realizados sobre ellos tienen desde un inicio un margen amplio de incertidumbre. Sin embargo, y teniendo en consideración esta dificultad, se ha decidido trabajar con fragmentos originales, ya que se considera que se trata de las muestras más adecuadas a fin de obtener resultados representativos de las propiedades de esta tipología de materiales, y de evaluar su comportamiento en los procesos de consolidación.

También se ha de señalar que el estudio llevado a cabo ha abarcado los análisis que han permitido las limitaciones de tiempo y equipamiento técnico. Si bien se podría continuar profundizando en el estudio, ampliando las variables a tener en cuenta durante el proceso de consolidación e incluso ampliando el elenco de materiales propuestos para la consolidación del material estudiado.

El estudio realizado ha combinado el uso de varias técnicas instrumentales de análisis que han permitido, por un lado dar a conocer la morfología y anatomía de la madera estudiada, así como los cambios morfológicos en la textura del material arqueológico tras el proceso de consolidación con los diferentes productos testados (microscopía óptica y FESEM). Por otro lado, el estudio colorimétrico de los fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico ha permitido evaluar los cambios en sus propiedades ópticas como consecuencia de la aplicación de los productos consolidantes. También se ha evaluado el grado de penetración de cada producto consolidante estudiado y según cada método de aplicación propuesto (espectroscopía FTIR), y por último se ha valorado la contribución de los productos consolidantes sobre las propiedades mecánicas de las probetas de laboratorio de madera carbonizada.

Por un lado las variaciones en el **aspecto superficial** son determinantes a la hora de seleccionar un producto que vaya a ser utilizado durante un tratamiento de restauración, ya que uno de los requisitos que ha de cumplir dicho tratamiento es que no varíe significativamente el aspecto visual del material tratado. Ésta es una de las razones por las que tras el estudio realizado se podría desaconsejar el uso del producto Cosmoloid® H 80, que además de producir cambios sustanciales en el aspecto de la superficie

en forma de emblanquecimiento, se acumula en superficie en forma de capa gruesa, irregular y con baja adherencia al material, tal y como lo evidencian los resultados de la espectrofotometría, microscopía óptica y electrónica y la caracterización química por espectroscopía infrarroja.

Otro de los consolidantes que genera cambios relevantes en la superficie del material arqueológico es el Paraloid® B-72. Este consolidante aumenta el brillo superficial, se aprecia en las microfotografías adquiridas mediante el microscopio óptico y se confirma a través de las mediciones de brillo. Además, se puede observar el cambio textural producido en la superficie a través de las imágenes obtenidas con el FESEM.

Otro de los aspectos importantes que se ha de tener en cuenta, es que el consolidante respete la morfología y anatomía de la madera, aspectos importantes en caso de que sea preciso realizar una identificación botánica tras un tratamiento de estas características.

Por todo ello y, teniendo en cuenta tanto las alteraciones en el aspecto superficial como la posibilidad de que se mantenga la estructura anatómica de la madera, los productos que mejores resultados han proporcionado a los fragmentos de madera carbonizada, han sido el Polivinil butyral y el Mowilith® 20, ya que ninguno de los dos produce cambios en el aspecto superficial de los fragmentos, lo que se puede observar tanto en las imágenes obtenidas con microscopio óptico como en las imágenes obtenidas con FESEM.

Los resultados obtenidos por otra parte, han proporcionado los datos de viscosidad, propiedad que podría influir, en términos generales, en el grado de **penetración del producto consolidante**. Sin embargo, se han de tener en cuenta otros factores que son también determinantes en gran medida de la capacidad de migración de los consolidantes, como son la tensión superficial, el comportamiento capilar o el peso molecular entre otros. Relacionando la tensión superficial con el peso molecular, se ha comprobado que estas magnitudes no varían de forma directamente proporcional, ya que, la viscosidad también viene determinada por la geometría de la molécula. Teniendo en cuenta esta premisa, una molécula puede presentar una geometría ramificada o contar con grupos polares que creen enlaces más o menos fuertes con el material con el que entran en contacto y que mejoren, o por el contrario, dificulten la penetración de dichos productos.

Esto explicaría por qué, por ejemplo, el Polivinil butyral, que es el consolidante de mayor viscosidad con un valor muy superior respecto al resto de los productos analizados, aplicado por inmersión ha dado el mejor valor de penetración. Este hecho podría también deberse a que el disolvente utilizado para este producto ha sido el etanol, que es un disolvente con mayor grado de polaridad y que podría presentar una mayor afinidad con la estructura molecular del sustrato de madera carbonizada, y que podría potenciar su comportamiento capilar. Este mismo consolidante aplicado a pincel ha presentado un peor grado de penetración, que se asocia a que sus propiedades reológicas van a variar progresivamente durante el proceso de aplicación del producto, a medida que evapora el disolvente.

Sin embargo, como se ha apuntado anteriormente, sería idóneo estudiar el resto de variables responsables de la penetración, tensión superficial y comportamiento capilar, que estaría relacionados con el comportamiento exhibido por el consolidante Cosmoloïd® H 80, que aunque presenta el valor más bajo de viscosidad penetra mejor aplicado mediante impregnación con pincel, mientras que aplicado mediante inmersión el producto permanece completamente en superficie.

En cuanto a las diferentes formulaciones de Mowilith®, el grado de viscosidad no da el comportamiento de penetración que cabría esperar, es decir, que penetrase más la formulación con una viscosidad menor (Mowilith® 20). Además se puede observar cómo las curvas de penetración de estos consolidantes son desiguales y no descienden ni se mantienen de una forma regular, hecho que podría estar más relacionado con la heterogeneidad textural de la madera.

En cuanto al consolidante Paraloid® B-72, en ambos métodos de aplicación se aprecia la escasa penetración del producto, resultados confirmados por las imágenes obtenidas mediante FESEM, que muestran la acumulación de producto en superficie.

Estos atípicos comportamientos observados pueden asociarse principalmente que el grado de penetración está considerablemente condicionado por el grado de porosidad y fisuración de los fragmentos a consolidar. Debido a la heterogeneidad de los fragmentos, anteriormente mencionada, estas características pueden variar de unos fragmentos a otros, proporcionando las variaciones de las propiedades observadas.

Se ha de tener en cuenta también que el estudio se ha realizado con productos consolidantes preparados a una concentración del 10%, concentración esta ciertamente elevada. A la vista de los resultados obtenidos se considera que la penetración podría verse favorecida realizando varias aplicaciones o etapas de inmersión, con el producto consolidante a diferentes concentraciones, comenzando con concentraciones bajas (2-3%) y concluyendo el tratamiento con disoluciones más o menos concentradas según las necesidades específicas del objeto. Una disolución mayor del producto consolidante mejoraría en cierta medida el grado de penetración.

En referencia al método de aplicación, la impregnación con pincel ha proporcionado mejores resultados, pero se podría usar uno u otro dependiendo de las necesidades y limitaciones de cada objeto.

Por último se quiere mencionar que la evaluación de las **propiedades mecánicas** no ha proporcionado resultados relevantes, debido en gran medida a las características heterogéneas del material y de las condiciones de combustión a las que ha sido sometido. Para obtener unos resultados significativos el ensayo debería repetirse muchas veces y las probetas utilizadas deberían contar con exactamente las mismas medidas y llevando a cabo un proceso de carbonización más controlado.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE 23093-1:1998. *Ensayo de resistencia al fuego*. ESPAÑA 1998.
- BARNA ART. Resina vinílica Lascaux Mowilith 30. Brcelona. [Consulta: 2018-04-24]. Disponible en: <<https://www.barna-art.com/lascaux-productos-de-conservacion/resina-vinilica-lascaux-mowilith-30>>
- BORGIOLI, L., CREMONESI, P. *Le resine sintetiche usate nel trattamento di opere policrome*. Padova: il prato©, 2005.
- BRITISH MUSEUM. *The Lion Man: an Ice Age masterpiece*. [Consulta: 2018-02-09]. Disponible en: <<https://blog.britishmuseum.org/the-lion-man-an-ice-age-masterpiece/>>
- CANEVA, G., NUGARI, M. P., SALVADORI, O. *La biología en restauración*. Madrid: Nerea, 2000.
- CAPILLA, P., ARTIGAS, J. M., PUJOL, J. *Fundamentos de colorimetría*. Valencia: Universitat de València, 2002.
- CAPUZ LLADRÓ, R. *Materiales orgánicos: maderas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2005.
- CARRIÓN, Y., PÉREZ JORDÁ, G. Análisis de los restos vegetales. En: *SAGVNTVM. Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia*. Valencia: Univesitat de València, 2014, vol. 16, ISSN 2254-0512. [consulta: 2018-02-10]. Disponible en: <<https://ojs.uv.es/index.php/saguntumextra/article/view/4420/4099>>
- CARRIÓN MARCO, Y. Dendrocronología y arqueología: las huellas del clima y de la explotación humana de la madera. En: *Avances de Arqueometría. Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría*, Universitat de Girona, 16-19 noviembre 2005. [Consulta 2018-02-19]. Disponible en: <https://www.sapac.es/actas/VI_Congreso_2005.pdf>
- CELANESE. *Mowilith® Emulsions*. [Consulta 2018/04/24]. Disponible en: <<https://www.celanese.com/emulsion-polymers/products/Mowilith.aspx>>
- CREMONESI. P. *L'uso dei solventi organici nella pulitura di opere policrome*. Padova: il prato, 2000.
- CREMONESI. P. *Materiali e Metodi per la Pulitura di Opere Policrome*. Florencia: Phase, 1997.
- CREMONESI. P. *Un approccio alla pulitura dei dipinti mobili*. Padova: il prato, 2012.

- DE CAROLIS, E. I legni carbonizzati di Ercolano: storia delle scoperte e problematiche conservative. En: *Pompei. Archeologia uomo territorio*. Pompeya: Soprintendenza Archeologica di Pompei, 1998, n. 17. [Consulta: 2018-02-10]. Disponible en: <<http://docplayer.it/docview/24/3714468/#file=/storage/24/3714468/3714468.pdf>>
- DERRICK, M.R.; STULIK, D., Y LANDRY J.M. *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*. Los Angeles: Getty conservation Institute, 1999.
- CULLEN, K. Charred Wood Consolidated with Thermoplastic Resins. En: *Anagpic*. Buffalo: Buffalo State College Art Conservation Department, 2005. [Consulta: 2018-02-10]. Disponible en: <<http://resources.conservation-us.org/anagpic-student-papers/anagpic-2005-student-papers/>>
- DILOLI, J., *et al.* El pilar de madera de L'Assunt. Conservación y restauración de una viga de madera arqueológica de origen terrestre. En: *Unicum*. Barcelona: ESCRBCC, 2014, nº 13.
- DOMÈNECH CARBÓ, M. T. *Principios físico-químicos de los materiales integrantes de los bienes culturales*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2013.
- DOWN, J. L. *Adhesive compendium for conservation*. Canadá: Canadian Conservation Institute, 2015.
- FOUNDATION OF THE AMERICAN INSTITUTE FOR CONSERVATION OF HISTORIC AND ARTISTIC WORKS (FAIC) *COOL, CONSERVATION ONLINE. Conservation DistList*. Washington DC: 2017 [Consulta: 2018-03-11]. Disponible en: <<http://cool.conservation-us.org/byform/mailling-lists/cdl/>>
- GARCÍA FORTES, S., FLOS TRAVIESO, N. *Conservación y restauración de bienes arqueológicos*. Madrid: Síntesis, 2008.
- GARCÍA, L., GUINDEO, A. *Anatomía de las frondosas españolas*. Madrid: Coimpress, 1990.
- GÓMEZ, M. L. *Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*. Madrid: Cátedra, 2008.
- HORIE, V. *Materials for conservation*. New York: Routledge, 2011.
- INSTRUMENTAL PASTEUR. *Viscosímetro "Fungilab"*. Buenos Aires. [Consulta: 2018-03-14]. Disponible en: <<http://www.instrumentalpasteur.com.ar/catalogo/popups/imprimir-ficha.php?producto=5009>>
- KONICA MINOLTA. *Multi Gloss 268 Plus*. U.S.A.: Konica Minolta Business Solutions, ©2017-2018. [Consulta: 2018-02-21]. Disponible en: <<http://sensing.konicaminolta.com.mx/products/micro-tri-gloss-268-gloss-meter/>>
- KROUSTALLIS, STEFANOS K. *Diccionario de materiales y técnicas (I)*. Madrid: Ministerio de Cultura, 2008.

- LEARNER, T. J. S. *Analysis of Modern Paints*. Los Angeles: Getty conservation Institute, 2004.
- LIOTTA, G. *Los insectos y sus daños en la madera*. Madrid: Nerea, 2000.
- MARCHESSAULT, R.H. Application of infra-red spectroscopy to cellulose and wood polysaccharides. En: *Wood Chemistry, Proceedings of the Wood Chemistry Symposium*, London. Butterworth, 1962.
- MARTÍNEZ BAZÁN, M. L. *Colorimetría aplicada al campo de la conservación y restauración*. [Curso: máster/doctorado]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2007.
- MATTEINI, M., MOLES, A. *Ciencia y restauración*. Madrid: Nerea, 2001.
- MATTEINI, M., MOLES, A. *La química en la restauración*. Madrid: Nerea, 2008.
- MELCHOR MONSERRAT, J. M., *et al.* El monumento funerario del “Solar de la Morería” (Sagunto). En: *Avance arqueológico y antropológico, ARSE*. Valencia: Centro Arqueológico Saguntino, 2004, num. 38.
- MELCHOR MONSERRAT, J. M., Y BENEDITO I NUEZ, J. La excavación del Solar de la Plaça de la Morería Vella (Sagunto València) y la Saguntum romana. En: *Avance arqueológico y antropológico, ARSE*. Valencia: Centro Arqueológico Saguntino, 2005, num. 39. [Consulta 2018-03-29]. Disponible en: <http://www.centroarqueologicosaguntino.es/uploads/descargas/381_03_la_excavacion_del_solar.pdf>
- MELCHOR MONSERRAT, J. M., Y BENEDITO I NUEZ, J. Materials per a l'estudi de l'àrea sacra del Solar de la Plaça de la Morería de Sagunt. En Alapont Martín, L., y Martí Oltra, J. (eds). III Jornades d'Arqueologia de València i Castelló. Museu d'Història de València, 10-12 de diciembre de 2010, Valencia, Museu d'Història de València, pp. 111-119.
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN CULTURA Y DEPORTE. *Proyecto Coremans. Criterios de intervención en retablos y escultura policromada*. Madrid: @Secretaría General Técnica, 2017.
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN CULTURA Y DEPORTE. *Tesoros del Patrimonio Cultural de España*. Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2018. [Consulta 2018-04-24]. Disponible en: <<http://tesoros.mecd.es/tesoros/materias/1015099.html>>
- MONCRIEFF, A., *et al.* *Ciencia para los restauradores*. Londres: Archetype publications, 2012.
- PIZZO, B., *et al.* *On site consolidation of burnt and partially charred Wood in dry conditions*. En: *Journal of Cultural Heritage*. Mayenne: 2011, vol. 12. . [Consulta 2018-03-26]. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207410000993>>

RODGERS, B. A. *The archaeologist`s manual for conservation*. New York: Kluwer Academic, 2004.

RODRÍGUEZ BARREAL, J. A. *Patología de la madera*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar, 1998.

ROIG PICAZO, P. *Estudio técnica, analítico y estilístico de obras de arte*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2005.

SAN ANDRÉS MOYA, M., DE LA VIÑA FERRER, S. *Fundamentos de química y física para la conservación y restauración*. Madrid: Síntesis, 2009.

VALGAÑÓN, V. *Biología aplicada a la conservación y restauración*. Madrid: Síntesis, 2008.

YUSÁ MARCO, D. J. *Estudio químico analítico de obras de arte. Un enfoque práctico*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2015.

AGRADECIMIENTOS

A Cdca. María Teresa Domènech Carbó, directora de esta Tesis de Fin de Máster, le agradezco toda la dedicación que ha mostrado, su profesionalidad, todos los medios que ha puesto a mi alcance para la realización de esta investigación y sobre todo su paciencia.

A la Dra. Laura Osete Cortina, codirectora de esta tesina, gracias por estar siempre dispuesta para ayudarme en el desempeño de este trabajo.

Al codirector de esta tesina, José Manuel Melchor, arqueólogo del Museo Arqueológico de Burriana, por cederme las piezas utilizadas para la realización de los ensayos propuestos en esta investigación.

A Yolanda Carrión Marco, investigadora en el departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Valencia, le agradezco la información que me ha aportado sobre el proceso antracológico y sobre la importancia de la madera carbonizada de origen arqueológico.

A Manuel Planes y José Luis Moya responsables del servicio de microscopia de la UPV.

Cabe también incluir esta investigación, como una parte del plan de trabajo del proyecto CTQ2017-C2-1-P financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y cofinanciado con fondos FEDER y por la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

Y por último mi mayor agradecimiento a mis padres por apoyarme siempre y hacer que confíe en hacer de cualquier objetivo una realidad. Y a mis amigos/as, aquellos/as que día a día con su apoyo me animan a continuar en los momentos de flaqueza.

ANEXO



FIGURA 44. Muestra C80-I-P, fotografías tomadas con Lupa Binocular a 10X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.

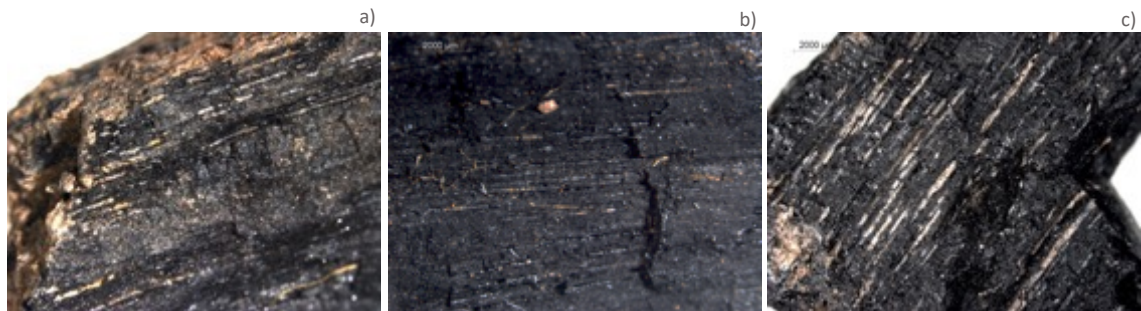


FIGURA 45. Muestra M20-P-P, fotografías tomadas con Lupa Binocular a 10X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.

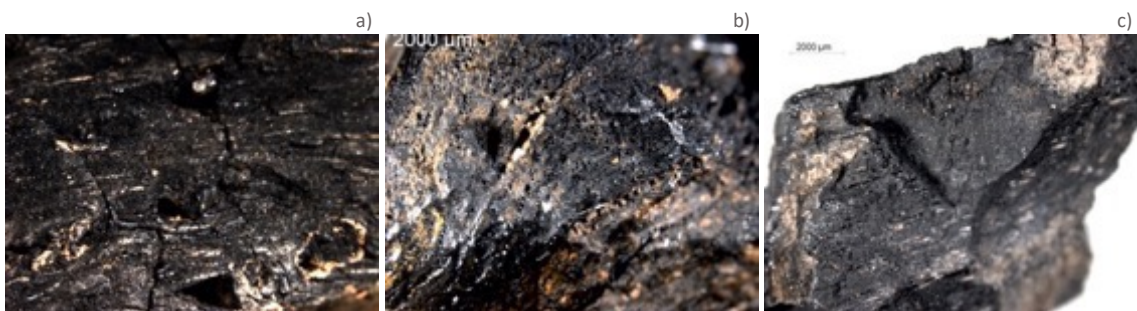


FIGURA 46. Muestra M30-P-P, fotografías tomadas con Lupa Binocular a 10X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.



FIGURA 47. Muestra M50-I-P, fotografías tomadas con Lupa Binocular a 10X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.



FIGURA 48. Muestra BT-I-P, fotografías tomadas con Lupa Binocular a 10X. a) Antes de la consolidación, en superficie. b) Después de la consolidación, en superficie. c) Después de la consolidación, en sección transversal.

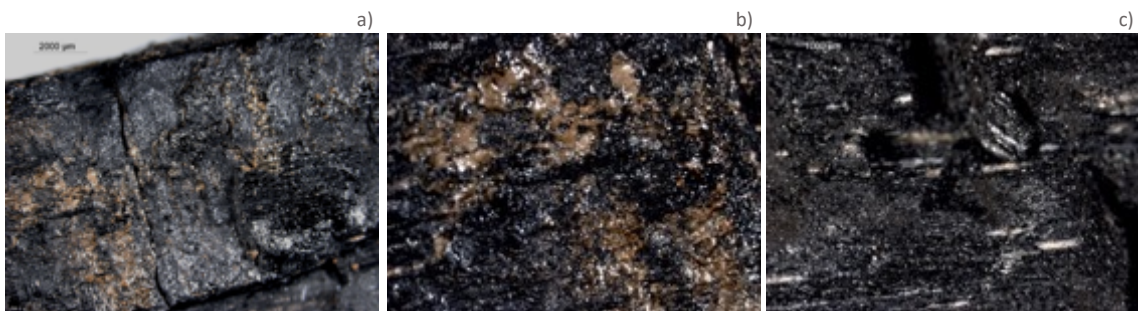


FIGURA 49. Muestra PB72-P-P, fotografías tomadas con Lupa Binocular. a) Fotografía a 10X antes de la consolidación, en superficie. b) Fotografía a 25X después de la consolidación, en superficie. c) Fotografía a 25X después de la consolidación, en sección transversal.

**SISTEMA DE NOMINACIÓN CROMÁTICA
(Tesis M^a Luisa Martínez Bazán)**

CLARIDAD (L*)

CLARIDADES	
L = Claridad	Nomenclatura
86-100	BLANCO
75-86	Muy claro
56-75	Claro
35-56	Medio
20-35	Oscuro
11-20	Muy oscuro
0-11	NEGRO

CROMA (C*) [Varia con los tonos]

ROJO / VERDE / PURPURA	
Croma	Léxico
1-7	Grisáceo
7-25	Débil
25-45	Medio
45-65	Vivo
65-80	Puro

AMARILLO	
Croma	Léxico
1-7	Grisáceo
7-25	Débil
25-45	Medio
45-65	Fuerte
65-80	Vivo
80-100	Puro

CYAN	
Croma	Léxico
1-7	Grisáceo
7-25	Débil
25-45	Medio
45-60	Vivo
60-80	Puro

AZUL	
Croma	Léxico
1-9	Grisáceo
9-25	Débil
25-45	Medio
45-65	Vivo
65-80	Puro

TONOS

TONOS	
Angulo en grados	Léxico
357-4	MAGENTA
4-11	Magenta rojizo
11-19	Magenta-Rojo
19-27	Rojo magentado
27-34	ROJO
34-41	Rojo anaranjado
41-49	Rojo-Naranja
49-57	Naranja rojizo
57-64	NARANJA
64-71	Naranja amarillento
71-79	Naranja-Amarillo
79-87	Amarillo anaranjado
87-94	AMARILLO
94-101	Amarillo limonado
101-109	Amarillo-Limón
109-117	Limón amarillento
117-124	LIMÓN
124-131	Limón verdoso
131-139	Limón-Verde
139-147	Verde limonado
147-153	VERDE
153-161	Verde esmeraldado
161-169	Verde-Esmeralda
169-177	Esmeralda verdoso
177-184	ESMERALDA
184-191	Esmeralda cyanado
191-199	Esmeralda-Cyan
199-207	Cyan esmeraldado
207-214	CYAN
214-221	Cyan turquesado
221-229	Cyan-Turquesa
229-237	Turquesa cyanado
237-243	TURQUESA
243-251	Turquesa azulado
251-259	Turquesa-Azul
259-267	Azul turquesado
267-273	AZUL
273-281	Azul violado
281-289	Azul-Violeta
289-297	Violeta azulado
297-304	VIOLETA
304-311	Violeta purpúreo
311-319	Violeta-Púrpura
319-327	Púrpura violado
327-334	PÚRPURA
334-341	Púrpura magentado
341-349	Púrpura-Magenta
349-357	Magenta purpúreo

GRISES (no tienen ni tono ni croma)

GRISES		
Croma 0	Claridad	Léxico
---	86-100	BLANCO
GRIS	75-86	Muy claro
	56-75	Claro
	35-56	Medio
	20-35	Oscuro
	11-20	Muy oscuro
---	0.11	NEGRO ¹

