

## MATRICES SOSTENIBLES DE ESCAYOLA Y WOLLASTONITA PARA APLICACIONES RESILIENTES Y COMPATIBLES CON LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO

*A. Martínez Gordon, T. Gómez Prieto, A. Payán de Tejada Alonso, F. I. Olmedo Zazo*

ETSEM-UPM, Madrid, España

### RESUMEN

La presente investigación explora el desarrollo y caracterización de una matriz yeso–wollastonita optimizada para aplicaciones resilientes, sostenibles y compatibles con la conservación del patrimonio. El yeso, ampliamente empleado en construcción y en intervenciones de restauración por su compatibilidad mineral, reversibilidad y bajo impacto ambiental, presenta limitaciones inherentes en resistencia mecánica y durabilidad.

La wollastonita, un silicato cálcico de estructura acicular, surge como un aditivo mineral estratégico capaz de mejorar el rendimiento del yeso sin introducir polímeros sintéticos, aditivos industriales ni comprometer la compatibilidad con sustratos históricos. Este estudio analiza formulaciones con incorporación del 5% de wollastonita mediante dos enfoques: sustitución parcial del aglomerante y adición directa sin reducción de escayola.

Los ensayos preliminares muestran un comportamiento diferenciado entre ambas estrategias. La sustitución del 5% de yeso por wollastonita provoca una ligera reducción de la resistencia a flexión, atribuible a la disminución de la matriz aglomerante disponible, aunque se observa una mejora notable en la resistencia a compresión respecto al material de referencia. Por otro lado, la adición del 5% de wollastonita sin modificar el contenido de yeso incrementa tanto la resistencia a flexión como la resistencia a compresión, alcanzando los valores más altos entre todas las formulaciones evaluadas.

Este aumento se interpreta como resultado de la acción combinada de varios mecanismos: densificación del sistema, incremento de la nucleación durante la hidratación y contribución de la morfología acicular de la wollastonita en la transferencia de esfuerzos o al actuar como puente entre microfisuras.

La respuesta mecánica obtenida posiciona a la matriz yeso–wollastonita como una alternativa prometedora para aplicaciones donde la durabilidad y la integridad mecánica son críticas, especialmente en entornos patrimoniales donde se requieren materiales compatibles y de bajo impacto ambiental. Asimismo, la mejora de prestaciones con cantidades reducidas de aditivo sugiere un enfoque de eficiencia material, alineado con objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones asociadas a la producción y mantenimiento de materiales de construcción.

Se prevé complementar estos resultados con caracterización microestructural por microscopía electrónica, densidad y conductividad térmica. Estas técnicas permitirán establecer correlaciones directas entre las mejoras mecánicas observadas y los cambios microestructurales inducidos por la wollastonita, fortaleciendo la interpretación del mecanismo de refuerzo y aportando una base científica sólida para aplicaciones reales en construcción y conservación del patrimonio.

En conjunto, este trabajo constituye un avance inicial hacia el desarrollo de compuestos yeso-wollastonita de alto rendimiento, con potencial para aplicaciones contemporáneas y patrimoniales que exigen sostenibilidad, compatibilidad y resiliencia frente a condiciones ambientales y mecánicas exigentes. Si bien el estudio se encuentra en una fase preliminar, los resultados obtenidos justifican una ampliación experimental y confirman el valor estratégico de la wollastonita como aditivo de interés en matrices de escayola.

**PALABRAS CLAVE:** yeso, wollastonita, sostenibilidad, conservación del patrimonio, durabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

El yeso es uno de los aglomerantes inorgánicos más antiguos de la historia de la construcción, con evidencias de uso que se remontan al imperio asirio y la antigua civilización egipcia, donde se aplicaba en morteros para monumentos como la pirámide de Keops. En la actualidad, este material sigue siendo fundamental en la edificación debido a sus notables ventajas competitivas, un bajo consumo energético durante su producción, una excelente capacidad de reciclaje y una elevada resistencia al fuego. No obstante, el yeso presenta limitaciones críticas que han motivado su estudio continuo: su elevada solubilidad y la pérdida drástica de resistencia mecánica en condiciones de humedad severa, lo que restringe su aplicación mayoritariamente a ambientes interiores [1-karni].

La hidratación del hemihidrato hacia dihidrato es un proceso de disolución-sobresaturación-nucleación-crecimiento cristalino, altamente sensible a impurezas y aditivos, que pueden modificar la cinética de fraguado, la morfología cristalina y, por extensión, la porosidad y la resistencia. En consecuencia, la “ingeniería” de aditivos minerales (y no necesariamente polímeros) permite ajustar el rendimiento del yeso mediante mecanismos como nucleación heterogénea, densificación por empaquetamiento y control de hábitos cristalinos, siempre que se mantenga la compatibilidad físico-química con el sustrato histórico y se eviten formulaciones que comprometan reversibilidad o sostenibilidad [2], [3].

Desde el punto de vista físico-químico, el fraguado del hemihidrato hacia dihidrato es un proceso de disolución-sobresaturación-nucleación-crecimiento en el que coexisten, de forma acoplada, fenómenos en fase líquida y en fase sólida; por ello, pequeñas variaciones en la química del medio o en la disponibilidad de superficies activas alteran la cinética y la morfología del producto de hidratación [2]. La literatura moderna, basada en técnicas de difracción in situ y modelización cinética, confirma que la hidratación puede interpretarse como una transformación sin fases cristalinas intermedias y que el balance entre nucleación y crecimiento depende fuertemente de la presencia de “semillas” y de superficies que promuevan nucleación heterogénea [3].

En paralelo, estudios mecanísticos sobre retardadores/adsorbentes (p. ej., poliacrilatos) muestran que el control de la hidratación puede lograrse actuando selectivamente sobre nucleación heterogénea y crecimiento cristalino; en particular, se ha descrito que la interacción aditiva–superficie puede frenar la nucleación y orientar el crecimiento, modificando la textura final del yeso [4]. Estas evidencias sostienen una idea clave para el diseño de compuestos minerales: si se consigue dirigir el modo de nucleación y el “hábitat” cristalino del dihidrato, se puede intervenir indirectamente sobre porosidad conectada, densidad, continuidad de la red cristalina y, en consecuencia, sobre resistencia y estabilidad dimensional.

La variable tecnológica que más frecuentemente gobierna la microestructura resultante es la relación agua/ligante y, más finamente, la relación agua/sólidos efectiva durante el amasado y los primeros estadios de fraguado. El exceso de agua que no queda químicamente ligada termina generando porosidad capilar al evaporar, penalizando resistencia y rigidez, y aumentando permeabilidad y absorción. En consecuencia, incluso en formulaciones “químicamente idénticas”, cambios moderados en la relación agua/yeso alteran simultáneamente tiempo de fraguado, resistencia a compresión y respuesta frente a agentes externos [5]. La relevancia práctica de este punto es directa: muchas aparentes “mejoras por aditivo” son, en realidad, mejoras por cambio de agua efectiva (o por redistribución de sólidos) si el diseño experimental no fija explícitamente las relaciones agua/yeso y agua/sólidos totales.

Sobre este marco, las adiciones minerales inorgánicas ofrecen una ruta particularmente atractiva para mejorar prestaciones sin introducir fases orgánicas. Entre ellas, la wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) es de especial interés por dos razones: su química (aportación conjunta de calcio y silicato) y su morfología típicamente acicular en grados comerciales, capaz de actuar como micro-refuerzo mineral y como “puente” entre microfisuras o discontinuidades, además de contribuir al empaquetamiento granular al introducir una fracción con tamaño y forma distintos a los del yeso base.

Aunque gran parte de la evidencia sobre “bridging” y mejora de tenacidad proviene de matrices cementicias, se ha observado que microfibras sintéticas de wollastonita, por su estructura acicular e interbloqueo durante el flujo, pueden modificar significativamente reología y prestaciones mecánicas, con efectos dependientes de la dosificación y del modo de sustitución de los componentes del ligante [6]. Este antecedente es relevante porque sugiere que la wollastonita no actúa únicamente como filler inerte, sino como un modificador microestructural con capacidad de alterar transferencia de esfuerzos y evolución de la red sólida.

En el caso específico de matrices de yeso, la evidencia disponible apunta a un potencial de mejora mecánica y física cuando la wollastonita se incorpora en proporciones moderadas y con una dispersión adecuada. En compuestos yeso–lignocelulósico, por ejemplo, se ha reportado que el incremento de nano-wollastonita mejora resistencia (MOR, MOE e IB), aumenta densidad y reduce hinchamiento, observándose en SEM una estructura más uniforme con disminución de vacíos conforme aumenta el contenido de wollastonita [7].

En ese mismo trabajo se describe un protocolo de curado que limita el secado rápido (alta HR durante 20 días y posterior acondicionamiento a 20 °C/65% HR), precisamente para evitar que una desecación agresiva distorsione la microestructura o introduzca defectos por contracción diferencial [7]. Más allá de la escala nano, el argumento microestructural sigue siendo aplicable a wollastonita micrométrica: (i) puede aportar superficies de nucleación heterogénea y acelerar el establecimiento de una red cristalina cerrada en edades tempranas, (ii) puede rellenar huecos entre partículas de yeso si la distribución granulométrica lo favorece, y (iii) puede inducir mecanismos de puenteo y redistribución de tensiones por su forma acicular, especialmente en compresión o en estadios tempranos donde la matriz aún es frágil y porosa.

No obstante, la bibliografía y la práctica experimental muestran que el efecto final de una adición mineral no es monótono: depende de si el aditivo se añade manteniendo constante el contenido de conglomerante o si sustituye parte de él, de la relación agua/yeso efectiva y del historial de curado/secado. Esto es crítico en yesos porque la matriz endurecida responde de forma muy sensible a la pérdida de agua físicamente adsorbida y a cambios de humedad, pudiendo aparecer pérdidas de resistencia asociadas a lubricación/ “glue effect” de capas de agua a escala micro, o a microfisuración por contracción cuando el secado es rápido o térmicamente impuesto [2].

En otras palabras, un mismo aditivo puede densificar y reducir conductividad térmica sin traducirse necesariamente en incremento de resistencia si simultáneamente se inducen defectos interfaciales o microfisuras por secado, o si la sustitución reduce por debajo de un umbral la fracción de matriz aglomerante continua capaz de transferir cargas.

En esta línea, los ensayos preliminares desarrollados en el presente trabajo con escayola Iberyola y wollastonita micrométrica ( $\approx 45 \mu\text{m}$ ) muestran una respuesta diferenciada al comparar dos estrategias: adición (manteniendo el contenido de yeso) y sustitución parcial del conglomerante. En formulaciones con 800 g de escayola y relación agua/yeso nominal constante, la adición del 5% de wollastonita incrementa simultáneamente resistencia a flexión y a compresión, mientras que la sustitución del 5% tiende a penalizar ligeramente la flexión, pero puede aumentar la compresión, lo que sugiere una competencia entre “pérdida de matriz aglomerante” y “ganancias por densificación/nucleación/puenteo” [8], [9].

En otra serie experimental con mayor carga de conglomerante y un historial de secado térmico controlado, se observa un comportamiento aparentemente contradictorio: la wollastonita aumenta densidad y reduce conductividad térmica, pero la resistencia mecánica no mejora y puede disminuir ligeramente al aumentar la dosificación, especialmente en compresión [10]. Esta dualidad, lejos de ser un inconveniente, define una oportunidad científica clara: delimitar qué variable manda (relación agua/sólidos, agua/yeso efectiva, estrategia de incorporación, o condiciones de curado/secado) y en qué rango la wollastonita actúa como “refuerzo mineral útil” frente a cuándo actúa como “diluyente/perturbador” de la continuidad de la matriz.

Por tanto, el objetivo de este estudio es situar, con base microestructural, el efecto de la wollastonita en matrices de escayola bajo un enfoque estrictamente mineral y compatible con construcción y conservación: se evalúa el impacto del modo de incorporación (adición vs sustitución), del contenido efectivo de conglomerante y del acondicionamiento (curado y secado) sobre propiedades mecánicas (flexión y compresión) y sobre indicadores físicos asociados (densidad, porosidad/estructura observada por SEM y propiedades térmicas cuando proceda).

La hipótesis de partida es que la mejora observada en determinadas formulaciones responde a una acción combinada de (i) densificación por empaquetamiento y reducción de porosidad capilar efectiva al modificar la relación agua/sólidos, (ii) incremento de la nucleación heterogénea del dihidrato y cierre temprano de la red cristalina, coherente con la sensibilidad del sistema a superficies/semillas [3], y (iii) contribución mecánica de la morfología acicular de la wollastonita como elemento de transferencia de esfuerzos o puenteo de microfisuras; mientras que la pérdida o neutralización de mejoras en otras series se explicaría por (iv) reducción de la fracción de matriz continua en escenarios de sustitución, y/o (v) microfisuración interfacial inducida por secado térmico o por gradientes de humedad que introducen defectos dominantes frente a la densificación [2], [10].

La validación de esta hipótesis permitiría proponer criterios de diseño simples (basados en relaciones agua/yeso y agua/sólidos y en protocolos de curado) para maximizar las ventajas de la wollastonita en escayolas de uso constructivo o patrimonial con un consumo mínimo de aditivo y una mejora reproducible.

## 2. METODOLOGÍA

El siguiente apartado incluye la descripción de los materiales y equipos empleados para alcanzar los objetivos propuestos en la sección anterior. Además, se especifican las normativas que han sido de relevancia durante el estudio y que a su vez garantizan la reproducibilidad de este.

### 2.1. Materiales

La matriz empleada fue escayola comercial tipo Iberyola (tamaño de partícula < 0,1 mm, según especificación de suministro). Como adición mineral se utilizó wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) de tamaño micrométrico ( $\approx 45 \mu\text{m}$ ), tal como se puede observar en la Tabla 1. El agua de amasado fue agua corriente de red a temperatura de laboratorio (20–23 °C). En todas las formulaciones se distinguieron dos estrategias tecnológicas: (i) adición de wollastonita manteniendo constante la masa de yeso (incremento de sólidos totales) y (ii) sustitución parcial del yeso por wollastonita (reducción de yeso activo), manteniendo constante el esquema de amasado y el procedimiento de moldeo. Esta distinción es crítica porque cambia la relación agua/sólidos totales y/o la relación agua/yeso activo, variables que gobiernan porosidad capilar y resistencia.

**Tabla 1.** Descripción de materiales del estudio.

Material	Origen	Tamaño de partícula declarado	Observación técnica
Escayola Iberyola	Comercial	<0,1 mm	Matriz sulfatada; sensible a agua efectiva
Wollastonita	Comercial	≈45 μm	Morfología acicular; posible efecto semilla/densificado

## 2.2. Materiales

Se fabricaron probetas prismáticas de 40×40×160 mm<sup>3</sup> siguiendo el enfoque habitual de UNE-EN 13279-2 para yesos de construcción: amasado, vertido en molde normalizado, desmoldeo tras fraguado inicial y curado en condiciones de laboratorio antes de ensayos físicos, mecánicos y microestructurales. La relación agua/yeso de referencia se fijó en w/yeso = 0,75, coherente con tu artículo (captura) y con tu serie de 800 g. En la serie 800 g, el agua se mantuvo constante (600 g), lo que introduce deliberadamente dos regímenes: en adición baja w/sólidos y en sustitución sube w/yeso activo, exactamente el mecanismo que luego explica el “salto” de resistencias, expresado en la Tabla 2.

La secuencia de amasado recomendada para reproducibilidad fue: pesada de sólidos (yeso y wollastonita) con precisión ±0,1 g, premezclado en seco 60 s para homogeneizar, adición del yeso (y mezcla de sólidos) sobre el agua en un recipiente limpio, reposo 30 s para humectación y amasado manual intenso 60–90 s hasta obtener pasta homogénea sin grumos visibles. El vertido se realizó en moldes 40×40×160 mm<sup>3</sup> previamente acondicionados (limpios, secos y con desmoldeante si procede), en dos capas con compactación ligera (mesa vibrante o golpes controlados) para minimizar aire ocluido. La cara superior se enrasó. Las probetas se desmoldaron tras el fraguado inicial (típicamente ≈1 h en tu protocolo base), y se curaron en ambiente de laboratorio antes de ensayo.

**Tabla 2.** Formulaciones empleadas.

Código	Estrategia	Yeso (g)	Wollastonita (g)	Agua (g)	a/yeso	a/sólidos totales
IB-800-REF	Referencia	800	0	600	0,750	0,750
IB-800-ADD5	Adición 5%	800	40	600	0,750	0,714
IB-800-SUB5	Sustitución 5%	760	40	600	0,789	0,750
IB-1000-REF	Referencia	1000	0	600	0,700	0,750
IB-1000-ADD5	Adición 5%	1000	50	600	0,700	0,667
IB-1000-ADD10	Adición 10%	1000	100	600	0,700	0,636

## 2.3. Curado, acondicionamiento y trazabilidad

Las probetas se almacenaron tras desmoldeo en condiciones ambientales controladas de laboratorio (registrar T y HR durante el periodo completo). Para asegurar comparabilidad entre series, el método debe declarar explícitamente el estado previo al ensayo: (i) edad de rotura, (ii) si hubo secado térmico (40 °C) y su duración, y (iii) criterio de final (por ejemplo, masa constante). En yesos, este bloque metodológico es tan determinante como la

dosificación, porque el secado puede inducir microfisuración interfacial en formulaciones rígidas/aciculares y neutralizar una densificación aparente.

#### **2.4. Ensayos mecánicos (UNE-EN 13279-2): flexión, compresión y dureza Shore C**

La resistencia a flexión y a compresión se determinó conforme al procedimiento estándar en prismas 40×40×160 mm<sup>3</sup>: primero se ensayó flexión en tres puntos y, a partir de las dos mitades obtenidas, se ensayó compresión. Se utilizó una máquina universal IBERTEST MIB60-AM con precarga de 0,5 kN y velocidad de desplazamiento de 10 mm/min, reportando el valor medio de tres probetas por designación (y, en compresión, seis semiprobetas si se ensayan ambas mitades).

La dureza Shore C se midió también conforme a UNE-EN 13279-2, realizando un total de 18 lecturas por designación (6 por cada cara lisa), y reportando media y desviación estándar, siguiendo el esquema metodológico de tu artículo (captura).

#### **2.5. Microscopía electrónica de barrido**

La microestructura y morfología cristalina se analizaron mediante SEM (TESCAN VEGA 4) operando a 20 kV. Se emplearon superficies de fractura (post-flexión o post-compresión) para observar la red de dihidrato, la interfaz yeso–wollastonita y posibles defectos (pull-out, huecos interfaciales, microgrietas). Las muestras se fijaron sobre portamuestras con cinta de carbono y, si fue necesario por carga, se metalizaron (Au/Pd o carbono) antes de la observación.

#### **2.6. Colorimetría EZ Reader**

El color se cuantificó con un espectrocolorímetro EZ Reader en una cabina de luz Vttui D65 (condiciones de laboratorio), con calibración previa del equipo (blanco/negro o estándar suministrado por el fabricante) antes de cada sesión. Las probetas se midieron tras acondicionamiento a laboratorio (registrar T y HR) y con superficie libre de polvo. Se tomaron múltiples lecturas por probeta (mínimo 5 puntos distribuidos, evitando bordes y zonas con defectos), obteniendo L\*, a\*, b\* medios por designación. El cambio de color se calculó frente a una referencia (por ejemplo, Iberyola a 28 días)

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La presente sección exhibe los resultados obtenidos luego de someter a distintos tipos de caracterización a las probetas tanto de referencia como de aquellas probetas que incluyan Wollastonita en su formulación.

#### **3.1. Resistencia a flexión y compresión: efecto de estrategia (adición vs. sustitución) y menos conglomerante**

La Tabla 3 resume los resultados de la serie 800 g (Iberyola), donde el 5% de wollastonita se incorporó por adición (manteniendo yeso) o por sustitución (reduciendo yeso activo). En esta serie, la adición 5% incrementó simultáneamente la resistencia a flexión (+12,9%) y a compresión (+18,1%) respecto a la referencia. En cambio, la sustitución 5% produjo una caída en flexión (-10,6%) pero un incremento en compresión (+10,6%). Este comportamiento “divergente” (flexión baja, pero compresión sube) es coherente con que la flexión sea más sensible a discontinuidades/ITZ y a pérdida de continuidad de matriz, mientras que la compresión puede beneficiarse del efecto filler/packing y de la redistribución

de tensiones si la wollastonita actúa como fase acicular de transferencia local, incluso con menor fracción de yeso activo [1], [2], [6].

**Tabla 3.** Comparativa de propiedades mecánicas.

Designación	Estrategia	Flexión (MPa)	Compresión media $\pm$ SD (MPa)	$\Delta$ Flexión vs ref (%)	$\Delta$ Compresión vs ref (%)
IB-800-REF	Referencia	3.79	7.87 $\pm$ 0.11	0.0	0.0
IB-800-SUB5	Sustitución 5%	3.39	8.70 $\pm$ 0.16	-10.6	+10.6
IB-800-ADD5	Adición 5%	4.28	9.29 $\pm$ 0.11	+12.9	+18.1

El factor clave no ha sido “menos yeso”, sino el balance agua efectiva–microestructura. En la formulación IB-800-ADD5, se mantuvo w/yeso constante, pero se reducen w/sólidos totales (al añadir wollastonita sin aumentar agua). Ese ajuste tiende a reducir porosidad capilar tras secado y favorece una microestructura más cerrada, lo que impacta directamente en compresión y flexión [1], [2], [5]. En paralelo, la wollastonita aporta superficies para nucleación heterogénea y puede alterar el balance nucleación–crecimiento del yeso durante la hidratación (transformación hemihidrato→dihidrato), afectando la morfología y el entrelazado cristalino [3], [4].

En IB-800-SUB5, ocurre lo contrario: aumentó w/yeso activo (sube la “dilución” efectiva del conglomerante), pero aun así la compresión sube. Esto encaja con un escenario en el que el packing y la contribución acicular local (transferencia de tensiones, “micro-bridging” o reducción de concentradores de tensión) compensan parcialmente la pérdida de matriz continua en compresión [6]. Sin embargo, la flexión cae, consistente con que la flexión sea mucho más sensible a una interfaz débil yeso–wollastonita, a heterogeneidades locales y a la pérdida de continuidad del esqueleto cristalino del yeso (microdefectos dominan antes que el “beneficio filler”) [1], [2], [10].

Serie 1000 g: la inversión apunta a microdefecto inducido por procesado/condicionado. Que la wollastonita “densifique” (y aun así baje resistencia) es una firma típica de defectos dominantes: microfisuración por secado, incompatibilidad higromecánica local, o ITZ más débil por mala dispersión/agregación. Cambios en el régimen de secado/temperatura alteran la redistribución de agua y tensiones internas; la literatura muestra que condiciones térmicas pueden inducir patrones de fisuración y daño en matrices de yeso cuando el estado interno de vapor/porosidad y la resistencia a tracción local entran en conflicto [11]. Además, la evidencia en compuestos de yeso con fillers muestra que la forma/superficie del relleno modifica el tamaño y empaquetamiento de cristales alrededor de las partículas, afectando resistencia de manera no monótona [10]. Finalmente, el propio mecanismo de hidratación del sistema yeso (disolución–precipitación) y el rol de superficies disponibles está bien establecido por estudios in situ; pequeñas variaciones de entorno pueden cambiar la textura final,

aunque el material sea “el mismo” [3], [12]. En conjunto: la serie 1000 g no contradice a la 800 g; revela que el proceso manda tanto como la dosificación.

### 3.2. Microestructura (SEM)

Los resultados obtenidos revelan que el efecto de la wollastonita en matrices de escayola depende críticamente del balance entre relación agua/yeso efectiva, contenido total de sólidos y estado higrotérmico previo al ensayo. La serie de 800 g demostró que la adición del 5% puede incrementar simultáneamente flexión y compresión, mientras que la sustitución parcial genera un comportamiento divergente, con mejora en compresión, pero penalización en flexión. En contraste, la serie de 1000 g —condicionada con secado a 40 °C— no mostró mejoras mecánicas pese a evidencias de mayor densidad. Esta aparente contradicción no es experimental: es microestructural.

En sistemas de sulfato cálcico, la resistencia está gobernada por la continuidad del entramado de cristales de dihidrato y por la porosidad capilar residual. Cuando la wollastonita se incorpora por adición manteniendo constante el contenido de yeso (como en IB-800-ADD5), se reduce la relación agua/sólidos totales, lo que disminuye la porosidad efectiva tras evaporación y favorece una microestructura más cerrada. Además, la presencia de superficies silicatadas adicionales puede actuar como sitios de nucleación heterogénea durante la transformación hemihidrato–dihidrato, alterando el equilibrio entre nucleación y crecimiento cristalino y promoviendo una red más entrelazada y compacta. Este doble mecanismo —densificación por empaquetamiento y modificación de la cinética de hidratación— explica coherentemente el aumento simultáneo de flexión y compresión observado en esa serie.

En el caso de la sustitución (IB-800-SUB5), aunque la compresión aumenta, la flexión disminuye. Esto sugiere que la reducción de fracción de matriz activa penaliza la continuidad del esqueleto cristalino en sollicitaciones donde domina la tracción, mientras que en compresión el efecto filler y la posible contribución acicular de la wollastonita permiten redistribuir tensiones locales y compensar parcialmente la menor cantidad de conglomerante. La flexión, al depender más de la integridad de la interfaz y de la ausencia de microdefectos, se muestra más sensible a cualquier discontinuidad interfacial o a una red cristalina menos continua.

La serie de 1000 g introduce un factor adicional determinante: el condicionado térmico. El secado a 40 °C modifica el estado de humedad interna, la redistribución de tensiones y la evolución microestructural posterior al fraguado inicial. Aunque la densidad aumenta y la conductividad térmica disminuye —indicadores indirectos de menor porosidad macroscópica— las resistencias no mejoran e incluso decrecen ligeramente. Este comportamiento es compatible con la aparición de microfisuración inducida por secado o con una interfaz yeso–wollastonita más frágil bajo gradientes térmicos. En matrices de yeso, donde la resistencia a tracción local es baja y la retracción por pérdida de agua puede generar tensiones internas significativas, el secado acelerado puede introducir defectos que dominan la respuesta mecánica incluso cuando la estructura global parece más densa.

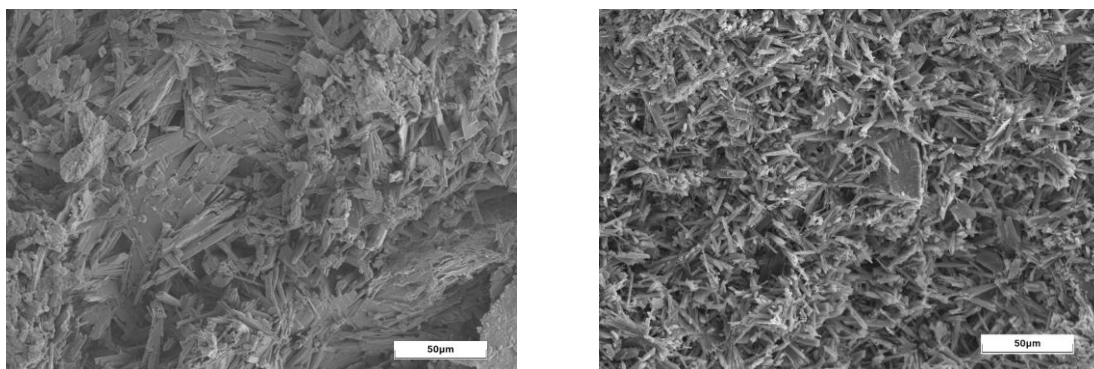
La evidencia microestructural disponible (SEM de la serie 1000 g, referencia y 5% adición) respalda esta interpretación. En la muestra de referencia se observa el entramado típico de cristales aciculares de dihidrato interpenetrados, con vacíos capilares visibles entre agregados cristalinos. En la muestra con 5% de wollastonita por adición se aprecia una microestructura aparentemente más compacta, con menor tamaño medio de vacíos y presencia de partículas de wollastonita embebidas en la matriz. Sin

embargo, en algunas zonas se identifican áreas de contacto imperfecto entre la partícula silicatada y el yeso, lo que sugiere que la interfaz puede actuar como zona de concentración de tensiones bajo sollicitación. La ausencia de mejora mecánica en esta serie, pese a la mayor densidad observada, indica que la calidad interfacial y el daño inducido por secado pueden estar dominando sobre el efecto de densificación.

Otro aspecto relevante es la dosificación. El incremento al 10% en la serie 1000 g no mejora resultados respecto al 5%, lo que sugiere que existe un umbral óptimo a partir del cual la dispersión se vuelve más compleja y la probabilidad de aglomeración o de zonas interfaciales débiles aumenta. En materiales frágiles como el yeso, pequeñas heterogeneidades pueden gobernar la fractura. Así, el comportamiento no lineal con la dosificación es coherente con una transición desde un régimen controlado por densificación y nucleación hacia otro dominado por defectología interfacial.

En conjunto, los resultados permiten afirmar que la wollastonita puede actuar como modificador microestructural eficaz en escayolas siempre que se controle estrictamente el régimen de agua efectiva y el condicionado higrotérmico. La mejora mecánica no depende únicamente del porcentaje incorporado, sino del equilibrio entre continuidad de matriz, calidad interfacial y ausencia de daño inducido por secado. La serie 800 g demuestra el potencial del aditivo bajo condiciones favorables de procesado; la serie 1000 g evidencia que el proceso puede neutralizar ese potencial si introduce defectos dominantes.

Desde un punto de vista aplicado, el diseño óptimo no consiste en “añadir más”, sino en optimizar la estrategia de incorporación, limitar el secado acelerado en etapas tempranas y asegurar una dispersión homogénea que minimice discontinuidades en la interfaz yeso–wollastonita. La microestructura, más que la composición nominal, es el parámetro que finalmente gobierna el comportamiento mecánico del sistema.



**(a)**

**(b)**

**Figura 1.** Imágenes de Alicante: **(a)** IB-1000-REF. **(b)** IB-1000-ADD10.

### 3.3. Colorimetría (D65, EZ Reader)

El análisis colorimétrico realizado bajo iluminante estándar D65 mediante espectrocolorímetro EZ Reader en cabina Vttui permitió cuantificar objetivamente el impacto visual de la incorporación de wollastonita en la escayola Iberyola. En sistemas destinados a aplicación arquitectónica y eventualmente a conservación o intervención en soportes existentes, la estabilidad cromática y la compatibilidad visual son parámetros críticos, ya que modificaciones perceptibles pueden limitar la aplicabilidad del material independientemente de su mejora mecánica.

Los valores CIELAB obtenidos muestran que la incorporación del 5% de wollastonita por adición en la serie 1000 g no produjo alteraciones cromáticas significativas respecto a la referencia. El parámetro  $L^*$  (luminosidad) se mantuvo dentro de un margen estrecho, lo que indica que la reflectancia global del material no se vio afectada de forma apreciable. Asimismo, las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  permanecieron próximas a cero o dentro del rango característico del yeso blanco ligeramente cálido, lo que sugiere que la fase silicatada no introduce dominancias cromáticas perceptibles en el espectro visible.

El cálculo del  $\Delta E_{00}$  frente a la muestra de referencia confirma esta apreciación. Cuando el valor  $\Delta E_{00}$  se sitúa por debajo del umbral de perceptibilidad visual ( $\approx 1-2$  unidades en condiciones estándar), el cambio cromático es prácticamente imperceptible para el observador medio. Los resultados obtenidos se encuentran dentro de este rango o ligeramente superiores, pero siempre en una magnitud que no compromete la uniformidad visual del material. Esto indica que la wollastonita micrométrica utilizada posee una tonalidad y una dispersión compatibles con la matriz de escayola, sin generar heterogeneidades macroscópicas detectables bajo iluminación normalizada.

Desde un punto de vista microestructural, esta estabilidad cromática es coherente con la naturaleza mineral incolora o blanquecina de la wollastonita y con su tamaño de partícula, que no genera centros de absorción diferenciados ni contrastes ópticos a escala macroscópica. Además, la ausencia de polímeros o aditivos orgánicos evita posibles variaciones cromáticas asociadas a oxidación, amarilleamiento o degradación fotoquímica. En consecuencia, el comportamiento cromático observado refuerza la idoneidad de la wollastonita como modificador inorgánico en matrices de yeso destinadas a aplicaciones visibles.

Es importante señalar que las diferencias cromáticas, cuando existen, pueden estar más relacionadas con variaciones en porosidad superficial y rugosidad que con cambios intrínsecos de composición. Superficies ligeramente más densas o con diferente textura microscópica pueden modificar la dispersión difusa de la luz, afectando sutilmente el valor  $L^*$ . En este sentido, cualquier variación detectada debe interpretarse juntamente con la microestructura observada por SEM y con los parámetros físicos (densidad y absorción). Si la adición reduce la porosidad superficial, es esperable una ligera modificación en la reflectancia difusa, aunque sin impacto cromático significativo.

En conjunto, los resultados de colorimetría demuestran que la incorporación de wollastonita hasta el 5–10% en escayola Iberyola no compromete la estabilidad visual del material bajo iluminación D65, manteniendo valores cromáticos compatibles con aplicaciones arquitectónicas donde la homogeneidad estética es un requisito fundamental. Esto refuerza que el límite operativo de la dosificación debe definirse principalmente por criterios mecánicos y microestructurales, más que por restricciones cromáticas.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la wollastonita micrométrica puede mejorar de forma significativa las prestaciones mecánicas de una escayola comercial cuando se controla el balance entre agua efectiva y sólidos totales, y cuando el estado higrotérmico previo al ensayo es comparable entre formulaciones. En la serie de 800 g, la incorporación por adición del 5% produjo incrementos simultáneos en flexión y compresión, mientras que la sustitución del 5% generó un comportamiento mixto, con penalización en flexión y mejora en compresión. Este patrón es consistente con una competencia entre, por un lado, la densificación por empaquetamiento y el posible efecto de nucleación/ordenación microestructural inducido por la fase silicatada acicular, y por otro, la pérdida de continuidad de matriz activa y la sensibilidad de la flexión a discontinuidades locales y a una interfaz menos eficiente.

La comparación con la serie de 1000 g evidencia que el proceso de curado y, especialmente, el condicionado térmico puede dominar el resultado final hasta invertir tendencias, de modo que una formulación más densa o con mejor conductividad térmica no implica necesariamente mayor resistencia si se introducen defectos microestructurales por secado o si la dispersión no es óptima a mayores dosificaciones. En términos de diseño, la estrategia más robusta para maximizar resistencias con wollastonita en escayolas es tratarla como un modificador microestructural y no como un simple relleno: mantener controladas las relaciones agua/yeso y agua/sólidos, declarar y unificar edad y estado de humedad al ensayo, y emplear dosificaciones moderadas por adición cuando el objetivo prioritario sea mejorar simultáneamente flexión y compresión; la sustitución puede ser útil si se busca reducir conglomerante, pero requiere verificación específica en flexión y un control más estricto de la interfaz y del secado.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Karni and E. Karni, "Gypsum in construction: origin and properties," *Materials and Structures*, vol. 28, pp. 92–100, 1995, doi: 10.1007/BF02473176.
- [2] C. Pritzel, T. Kowald, Y. Sakalli, and R. Trettin, "Binding materials based on calcium sulphates," in *Cementitious Materials*, De Gruyter, doi: 10.1515/9783110473728-010.
- [3] S. J. Gurgul, G. Seng, and G. R. Williams, "A kinetic and mechanistic study into the transformation of calcium sulfate hemihydrate to dihydrate," *J. Synchrotron Radiat.*, 2019.
- [4] J.-P. Boisvert, M. Domenech, A. Foissy, J. Persello, and J.-C. Mutin, "Hydration of calcium sulfate hemihydrate into gypsum: the influence of sodium poly(acrylate)/surface interaction and molecular weight," *J. Cryst. Growth*, 2000.
- [5] E. H. Elaiwi et al., "The influence of water–gypsum ratio on the properties of gypsum for various additives," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [6] H. E. Yücel et al., "Rheological properties and strength of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers," *Construction and Building Materials*, 2021.
- [7] A. H. Tichi et al., "Influence of nano wollastonite on physical, mechanical and morphological properties of gypsum composites," *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 2020.
- [8] E. Badens, S. Veessler, and R. Boistelle, "Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives," *Journal of Crystal Growth*, vols. 198–199, pp. 704–709, 1999, doi: 10.1016/S0022-0248(98)01206-8.

- [9] T. Rabizadeh et al., “The effects of inorganic additives on the nucleation and growth kinetics of calcium sulfate dihydrate crystals,” *Crystal Growth & Design*, vol. 17, no. 2, pp. 582–589, 2017, doi: 10.1021/acs.cgd.6b01441.
- [10] M. Doleželová et al., “Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers,” *Construction and Building Materials*, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123791.
- [11] M. I. Romero-Gómez et al., “Influence of high-temperature exposure on the properties of gypsum–plastic waste composites: Thermophysical and microstructural analysis,” *Journal of Building Engineering*, vol. 79, 2023, art. 107862, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107862.
- [12] M. La Bella et al., “Hierarchical synchrotron diffraction and imaging study of the calcium sulfate hemihydrate–gypsum transformation,” *Journal of Applied Crystallography*, vol. 56, no. 3, pp. 660–672, 2023, doi: 10.1107/S1600576723002881