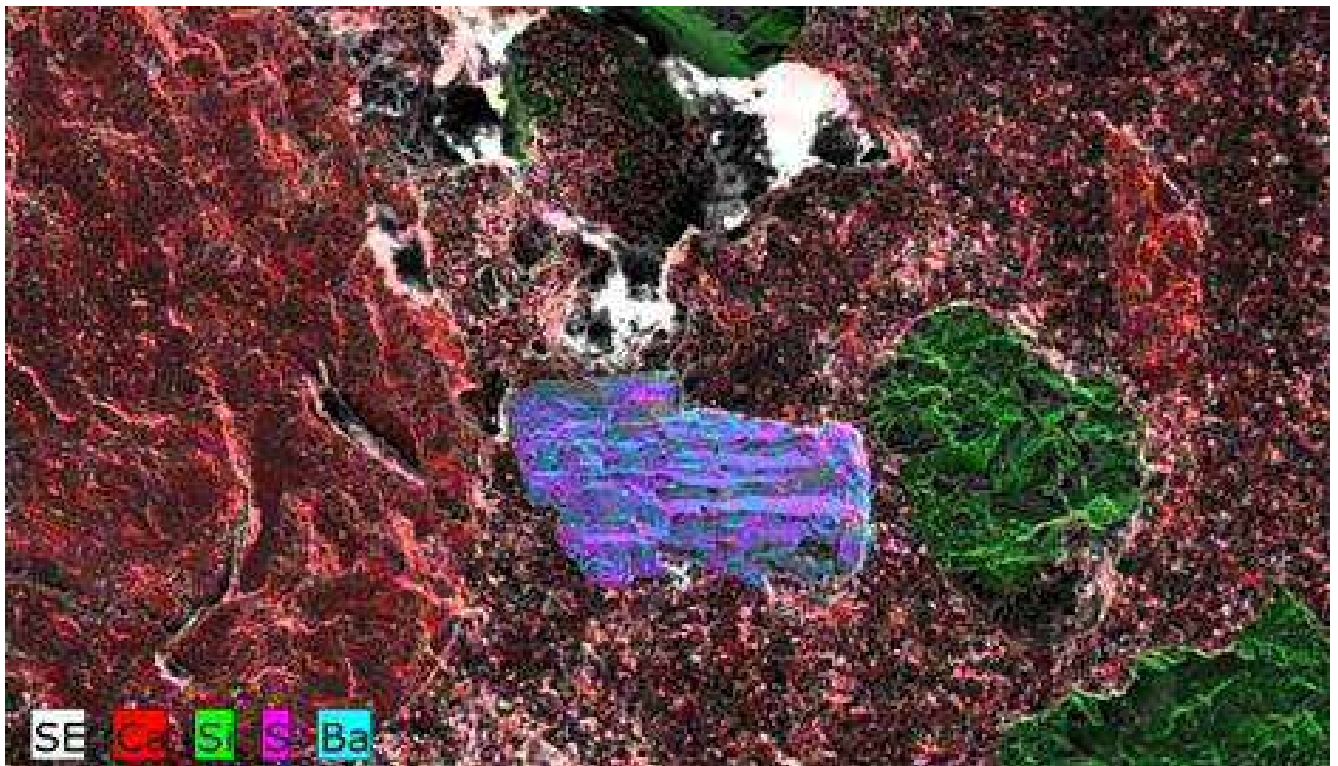


Material-ES

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MATERIALES



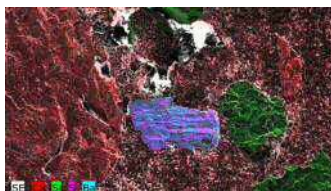


Imagen de Portada:

Cristal de barita (BaSO_4) observado por SEM en una muestra de mortero romano del yacimiento de Agrigento.

“Caracterización de morteros romanos del yacimiento de agrigento (Sicilia)”

A. González-Moreira; F. D. Sanz-Arauz; S. López-Andrés; A. Ridruejo

Editor

Rodrigo Moreno. *Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. Madrid. España.*

Secretaría

Anna Muesmann. *SOCIEMAT. Madrid. España.*

Junta Directiva de SOCIEMAT

Presidente:

Rodrigo Moreno Botella

Vicepresidente:

Daniel Sola Martínez

Secretaria:

Gloria Patricia Rodríguez Donoso

Tesorera:

Anna M^a Muesmann Torres

Presidente saliente:

Juan José de Damborenea González

Vocales:

Francisco Javier Barriga Berrocal

José Calaf Chica

Francisca García Caballero

Irene García Cano

Teresa Guraya Díez

Marta Mohedano Sánchez

Alberto Palmero Acebedo

Ana Romero Gutiérrez

Ángel de la Rosa Velasco

M^a Isabel Santacruz Cruz

URL: <http://sociemat.es>

Correo electrónico: info@sociemat.es / sociemat1996@gmail.com

Tel.: 618 170 493

Sociedad Española de Materiales SOCIEMAT

Entidad inscrita en el R^o Nacional de Asociaciones del

Ministerio del Interior, Grupo 1, Sección 1, Número Nacional 161428

ÍNDICE

ARTÍCULOS

Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo de Fin de Grado en ingeniería en Materiales 2025

Caracterización de morteros romanos del yacimiento de agrigento (Sicilia)

A. González-Moreira; F. D. Sanz-Arauz; S. López-Andrés; Á. Ridruejo 1

Desarrollo de aditivos funcionales encapsulados para su uso en la industria agroalimentaria

N. Albalaejo; C. Salgado; J. F. Fernández 5

Nuevas aleaciones de aluminio anodizables para lámparas: fabricación y estudio a corrosión

A. Méndez de la Peña; J. Bedmar; J. P. Fernández-Hernán 9

Efecto de la densidad de relleno sobre las propiedades mecánicas de piezas de PLA 3D850 fabricadas por impresión 3D mediante modelado por deposición fundida

L. M. Cabrera Martín; F. Rivera López 13

Desarrollo de una base de datos de aleaciones de alta entropía para su aplicación en sistemas TES

I. Utrero Requena; C. Barreneche; L. Betancor; S. Dosta 17

EDITORIAL

Iniciamos este nuevo volumen con una selección de trabajos presentados por jóvenes investigadoras al Premio SOCIEMAT Fundación Caja de Ingenieros al Mejor Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería en el área de Materiales en su edición de 2025. Desde SOCIEMAT nos complace seguir constatando el elevado nivel de la investigación en materiales desarrollada por las nuevas generaciones y felicitamos a todas las participantes por la calidad de los trabajos presentados. Damos nuestra más cordial enhorabuena a la ganadora de esta edición, Aitana González-Moreira, por el trabajo en colaboración entre el Departamento de Ciencia de Materiales de la ETSICCP y el Departamento de Construcción y tecnologías arquitectónicas de la ETSAM, ambas de la Universidad Politécnica de Madrid, y la Facultad de Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid..

Un año más, ha dado comienzo el nuevo Ciclo de Conferencias online de SOCIEMAT, que en su VI edición, nos ofrece un apasionante programa que ha iniciado con la conferencia de la Prof.^a Ángela Gallardo, y que continuará con las presentaciones de la Prof.^a M^a Ángeles Gómez de la Torre, el Prof. Joaquín Rams, la Prof.^a Carmen Álvarez y el Dr. José Calaf, que cerrará el ciclo.

Este año tendrá lugar la XVIII edición del Congreso Nacional de Materiales en Portugalete del 16 al 19 de junio. Ya está a punto de cerrar el plazo de envío de resúmenes, por lo que os animamos a enviar los vuestros ya. Esta es una cita obligada para todas las personas interesadas en la ciencia y tecnología de materiales, además de un foro de discusión excepcional y un punto de encuentro distendido para compartir con colegas y amigos.

En lo que respecta al ámbito internacional, destacamos la celebración del próximo congreso FEMS JUNIOR EUROMAT 2026 en Trikala, Grecia, del 12 al 16 de julio. Animamos a nuestros jóvenes investigadores a participar en este evento enfocado a la interacción y establecimiento de lazos de cooperación dentro de la comunidad investigadora joven.

Finalmente, es un placer anunciar que Rodrigo Moreno, actual Presidente de SOCIEMAT, ha asumido la vicepresidencia de FEMS, lo que respaldará el ya relevante papel que ejerce nuestra sociedad en el ámbito internacional.

Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería en Materiales 2025**CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS ROMANOS DEL YACIMIENTO DE AGRIGENTO (SICILIA)**

A. González-Moreira¹, F. D. Sanz-Arauz², S. López-Andrés³, Á. Ridruejo¹

¹Departamento de Ciencia de Materiales. ETSICCP. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Profesor Aranguren 3, 28040 Madrid; aitana.gonzalez@upm.es y alvaro.ridruejo@upm.es

²Departamento de Construcción y tecnologías arquitectónicas ETSAM Universidad Politécnica de Madrid Av Juan de Herrera 4, 28040 Madrid; david.sanz.arauz@upm.es

³CAI Técnicas geológicas Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas. C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid; antares@ucm.es

Resumen: Este trabajo estudia morteros romanos de cal aérea procedentes de una vivienda en el barrio helenístico-romano de Agrigento (Sicilia). Se aplicaron técnicas de caracterización química y mineralógica (XRF, XRD, WAXS, SAXS), análisis microestructural (microscopía óptica y electrónica), ensayos mecánicos (nanoindentación) y térmicos, (TGA/DSC) y simulaciones numéricas mediante el método de campo de fases. Los resultados muestran composiciones dominadas por calcita con cuarzo, aragonito y yeso en proporciones variables, así como microestructuras heterogéneas con porosidad interconectada. Estos hallazgos permiten avanzar en el conocimiento del comportamiento de los morteros históricos tras largos procesos de envejecimiento natural.

Palabras clave: morteros romanos, cal aérea, caracterización, simulación numérica, patrimonio.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

La cal aérea constituyó uno de los materiales fundamentales en la arquitectura romana, utilizada en morteros, revestimientos y elementos decorativos. Su fabricación, basada en la calcinación de calizas y posterior apagado y carbonatación, permitió levantar estructuras de gran durabilidad, muchas de las cuales se conservan tras casi dos milenios [1]. El estudio de estos morteros ofrece una doble vertiente de interés: por un lado, contribuye al conocimiento de las tecnologías constructivas antiguas y de la selección de materias primas; por otro, proporciona información sobre los procesos de envejecimiento a largo plazo, difícilmente reproducibles en condiciones de laboratorio.

El barrio helenístico-romano de Agrigento (Sicilia), declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, constituye un marco excepcional para este análisis. En particular, el estudio se centró en fragmentos de morteros procedentes de muros y cornisas de una domus del siglo I d.C., seleccionados por carecer de valor decorativo y permitir ensayos destructivos.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la composición química y mineralógica, la microestructura y las propiedades mecánicas y térmicas de los morteros, complementando el análisis experimental con simulaciones numéricas del crecimiento cristalino de carbonato cálcico. De este modo, se busca comprender los criterios técnicos que guiaron a los constructores romanos y aportar información relevante para la conservación del patrimonio construido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Las muestras objeto de estudio proceden del barrio helenístico-romano de Agrigento (Sicilia, Italia), un conjunto urbano datado entre los siglos I a.C. y I d.C. Se seleccionaron fragmentos de **muros y cornisas interiores y exteriores**, en todos los casos sin valor decorativo, lo que permitió realizar ensayos destructivos (Figura 1). La codificación de las piezas siguió un sistema que identifica el tipo de elemento (muro/cornisa), su localización (interior/exterior) y la presencia o ausencia de pigmento.



Figura 1. Conjunto de fragmentos del muro moldurados en mortero de cal.

2.1. Preparación de muestras.

Cada fragmento fue dividido en submuestras destinadas a diferentes técnicas. Se elaboraron **láminas delgadas petrográficas** para microscopía óptica, probetas pulidas para nanoindentación y polvos finos para análisis

químicos y difracción de rayos X. El acondicionamiento buscó preservar la heterogeneidad original del material.

2.2. Caracterización química y mineralógica.

La fluorescencia de rayos X (XRF) [2] permitió determinar la composición elemental, identificando los principales óxidos constituyentes. La difracción de rayos X en polvo (XRD) [2], complementada con WAXS (Figura 2) y SAXS [3], se utilizó para identificar fases cristalinas y estimar parámetros como el tamaño de cristalito y la fracción amorfa.

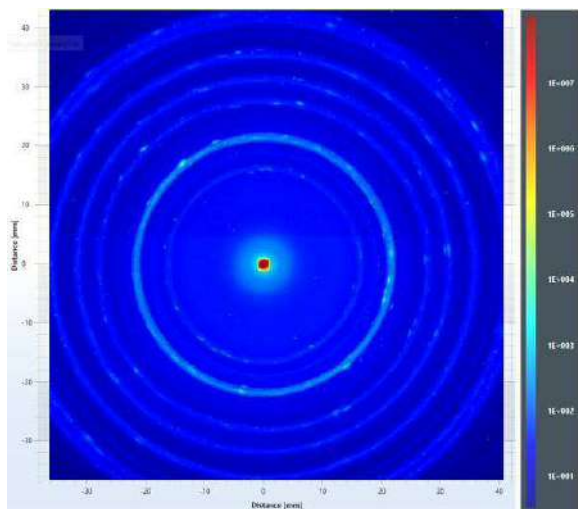


Figura 2. Empleo de un patrón de difracción 2D obtenido por WAXS para una muestra de mortero.

2.3. Caracterización microestructural.

La microscopía óptica sobre lámina delgada permitió describir la textura del mortero, la distribución de áridos y la presencia de restos fósiles marinos. La microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) [2] (Figura 3) aportó información a mayor resolución sobre interfaces árido-matriz, microfisuras, pigmentos y porosidad interconectada, cuantificada mediante análisis digital de imagen.

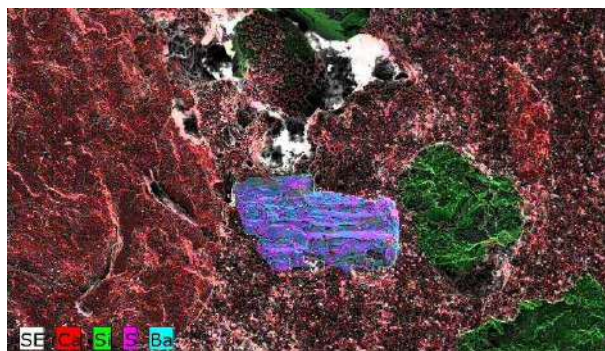


Figura 3. Cristales de barita (BaSO_4) observados en el análisis por SEM.

2.4. Propiedades mecánicas y térmicas.

La nanoindentación instrumentada [4] se aplicó sobre áreas seleccionadas de la matriz calcítica y de los áridos silíceos, obteniéndose valores locales de dureza y módulo de elasticidad. Este método permitió evaluar la heterogeneidad del material a escala micrométrica. El

análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC) [2] se emplearon para estudiar la estabilidad térmica de las fases y determinar el grado de carbonatación.

2.5. Simulación numérica.

Con el fin de complementar los resultados experimentales, se implementó un modelo de campo de fases mediante el entorno FEniCSx. [5,6] Se consideraron dos condiciones iniciales: (i) crecimiento a partir de un único núcleo y (ii) nucleación múltiple aleatoria. Se evaluó el efecto de parámetros como la anisotropía de la energía interfacial y la fuerza motriz sobre la cinética y morfología de los cristales de carbonato cálcico.

3. RESULTADOS.

3.1. Composición química y mineralógica.

El análisis por XRF mostró una composición dominada por CaO (65–72 %), acompañado de SiO_2 , Al_2O_3 y MgO en proporciones menores (Figura 4). La presencia de MgO en varias muestras sugiere el empleo de calizas dolomíticas como materia prima. Los difractogramas de XRD confirmaron la calcita como fase mayoritaria (74–87 %), junto con cuarzo (5–10%), aragonito y trazas de yeso. En algunos casos se identificaron restos fósiles carbonatados y áridos de origen marino, evidenciando la utilización de recursos locales.

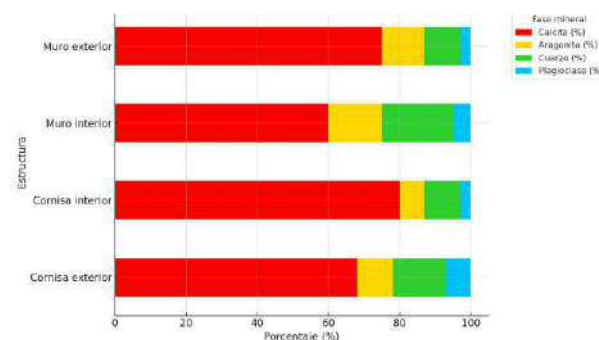


Figura 4. Composición mineralógica promedio según la procedencia arquitectónica de las muestras

3.2. Microestructura y porosidad.

Las observaciones en lámina delgada revelaron una matriz calcítica heterogénea con áridos de cuarzo de granulometría variable y distribución irregular. La microscopía electrónica puso de manifiesto la existencia de microfisuras interconectadas y porosidad global entre 7 y 13 %, con mayor densidad en muros interiores frente a cornisas exteriores (Figura 5). Se detectaron capas superficiales con pigmentos a base de óxidos de hierro y aluminio.

3.3. Propiedades mecánicas

Las medidas obtenidas por nanoindentación evidenciaron una elevada variabilidad entre zonas de matriz y áridos. La dureza osciló entre 0,06 y 0,55 GPa, mientras que el módulo de elasticidad se situó entre 2 y 26 GPa. En términos comparativos, las cornisas exteriores mostraron valores superiores de dureza y módulo respecto a los muros interiores, en concordancia con su menor porosidad y mayor fracción de cuarzo.

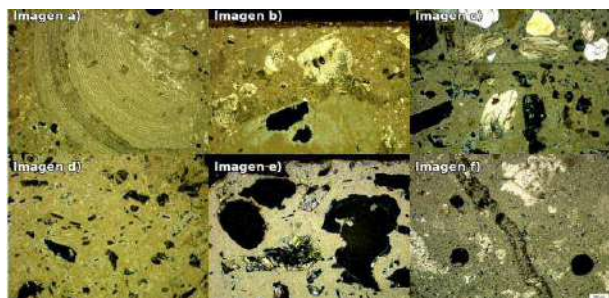


Figura 5. Ejemplos de microfotografías a escala de 200 μm en luz transmitida

3.4. Comportamiento térmico.

El análisis TGA/DSC mostró la descomposición de la calcita entre 645 y 800 °C, con pérdidas de masa atribuibles a la liberación de CO₂ (Figura 6). Estos resultados son coherentes con un elevado grado de carbonatación, propio de morteros antiguos. La presencia de aragonito en algunos difractogramas confirma transformaciones secundarias asociadas a procesos de recristalización.

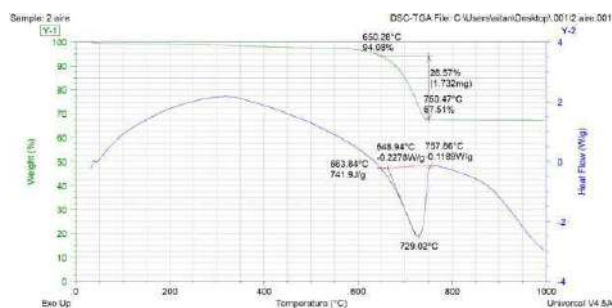


Figura 6. Ejemplo de la curva TGA-DSC del carbonato de calcio en atmósfera de aire.

4. DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos permiten establecer una interpretación coherente sobre la tecnología constructiva romana en Agrigento y los procesos de envejecimiento a largo plazo de los morteros. La composición mayoritariamente calcítica, combinada con áridos silíceos y fósiles marinos, confirma el uso de materias primas locales y un proceso de fabricación basado en la cal aérea, en concordancia con otras investigaciones sobre morteros romanos.

Las diferencias observadas entre muros interiores y cornisas exteriores sugieren un ajuste deliberado de la mezcla en función de la función arquitectónica. Las cornisas, más expuestas a la intemperie, presentan menor porosidad y mayor proporción de cuarzo, lo que se traduce en propiedades mecánicas superiores. Este patrón refleja un conocimiento empírico de la durabilidad de los materiales y un cierto grado de control técnico en la obra.

La microestructura heterogénea y la porosidad interconectada concuerdan con el carácter artesanal de la preparación de la cal y la mezcla, pero también pueden haber favorecido procesos de recarbonatación secundaria a lo largo de los siglos, contribuyendo a la consolidación

del material. La identificación de aragonito y yeso apunta a transformaciones post-deposicionales, posiblemente asociadas a variaciones ambientales y a la interacción con sales solubles.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la elevada dispersión de valores obtenidos por nanoindentación refleja la heterogeneidad intrínseca de estos morteros históricos. Sin embargo, la diferencia sistemática entre muros y cornisas confirma la influencia de la composición y la microestructura sobre el comportamiento mecánico.

Finalmente, los análisis térmicos corroboran el elevado grado de carbonatación, coherente con la edad de los materiales, y validan la resistencia del sistema calcítico frente a la degradación ambiental prolongada. Estos hallazgos ofrecen una base sólida para comprender tanto la tecnología original como los mecanismos de durabilidad a escala milenaria.

5. SIMULACIONES NUMÉRICAS.

Con el fin de complementar los resultados experimentales y explorar los mecanismos de cristalización, se implementó un modelo de campo de fases mediante elementos finitos en el entorno FEniCSx. Este enfoque permitió simular la nucleación y el crecimiento de cristales de carbonato cálcico bajo distintas condiciones iniciales y parámetros de control. Se consideraron dos escenarios principales: (i) crecimiento a partir de un único núcleo inicial (Figura 7) y (ii) nucleación múltiple aleatoria. En ambos casos, los cálculos reprodujeron patrones de crecimiento anisotrópico característicos de la calcita, influenciados por la anisotropía de la energía interfacial y por la magnitud de la fuerza motriz aplicada.

Los resultados muestran que un único núcleo favorece la formación de estructuras radiales con dominios cristalinos bien definidos, mientras que la nucleación múltiple genera una microestructura más homogénea, comparable a la observada en cornisas exteriores. Asimismo, el aumento de la anisotropía condujo a formas alargadas y facetadas, en coherencia con los patrones cristalográficos detectados mediante microscopía.

La comparación entre simulaciones y observaciones experimentales respalda la hipótesis de que la morfología final de los morteros romanos resultó de la combinación entre procesos de nucleación heterogénea y la evolución microestructural durante la carbonatación prolongada. Este marco numérico ofrece, además, un instrumento predictivo para estudiar la influencia de variables físico-químicas en la durabilidad de morteros históricos.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.

El estudio de los morteros romanos procedentes del barrio helenístico-romano de Agrigento permite extraer varias conclusiones relevantes:

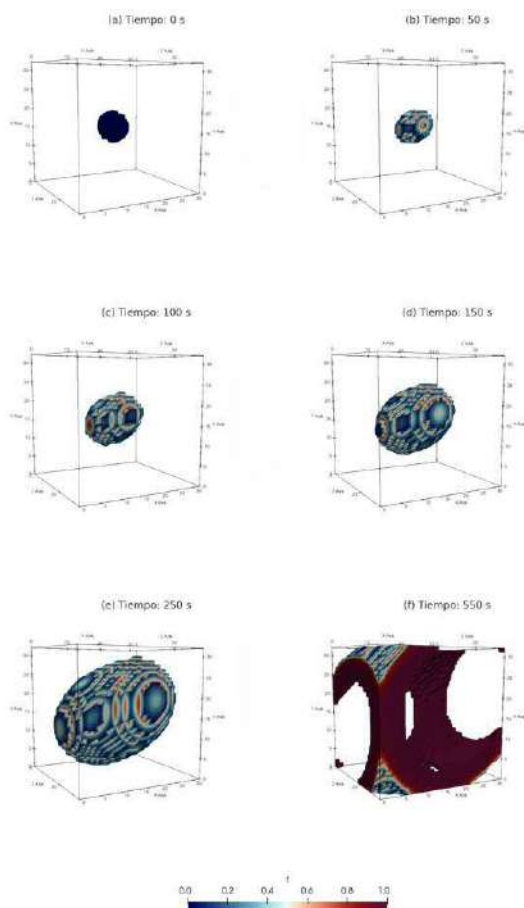


Figura 7. Evolución temporal de la fase sólida.

1. Los morteros presentan una composición mayoritariamente calcítica, acompañada de cuarzo, aragonito y yeso, lo que confirma el empleo de cal aérea con áridos de origen local, incluidos fósiles marinos.
2. La microestructura heterogénea y la porosidad interconectada evidencian técnicas artesanales de preparación, aunque también procesos de recarbonatación y consolidaciones posteriores.
3. Se observaron diferencias sistemáticas entre muros y cornisas, siendo estas últimas más compactas y resistentes, lo que sugiere un control intencional de la mezcla en función de la función arquitectónica.
4. Los ensayos mecánicos y térmicos confirmaron la elevada dispersión de propiedades locales, pero también la notable estabilidad de los morteros tras dos milenios de envejecimiento natural.
5. Las simulaciones de campo de fases reprodujeron patrones de nucleación y crecimiento coherentes con las observaciones experimentales, ofreciendo un marco predictivo para la comprensión de los procesos microestructurales.

Como conclusión el enfoque desde múltiples técnicas de caracterización llevado a cabo ha permitido observar y corroborar los resultados adquiridos aumentando su fiabilidad (Figura 8).

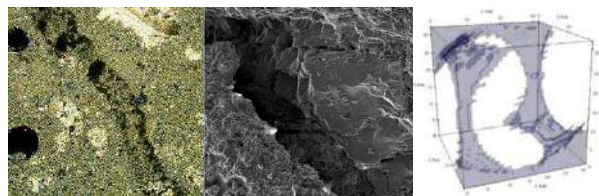


Figura 8. Estructuras con canales observadas mediante diferentes técnicas

En conjunto, este trabajo demuestra la sofisticación tecnológica de la construcción romana y aporta datos útiles para la conservación y restauración del patrimonio edificado. Como perspectiva futura, la integración de técnicas analíticas avanzadas con modelos numéricos más complejos permitirá evaluar la influencia de factores ambientales (humedad, sales, temperatura) en la degradación a largo plazo de los morteros históricos.

6. REFERENCIAS.

- [1] Moropoulou, A. B. A., & Bakolas, K. B. (2001). Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 2(1), 45–58. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(01)01108-2)
- [2] Universidad Complutense de Madrid. (2023). *Metodología de Técnicas de Identificación y Caracterización Mineral (TICM) 2023–2024*. CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría.
- [3] Gutiérrez Moreno, A. (2011). *Microscopía óptica y electrónica aplicada a materiales de construcción patrimoniales*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC.
- [4] Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564–1583.
- [5] Moelans, N., Blanpain, B., & Wollants, P. (2008). An introduction to phase-field modeling of microstructure evolution. *Calphad*, 32(2), 268–294. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2007.11.003>
- [6] FEniCS Project. (2023). *DOLFINx API Docs*. *NewtonSolver.solve*. https://docs.fenicsproject.org/dolfinx/v0.6.0/python/_modules/dolfinx/nls/petsc.html#NewtonSolver.solve

DESARROLLO DE ADITIVOS FUNCIONALES ENCAPSULADOS PARA SU USO EN LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA

N. Albalaejo¹, C. Salgado², J.F. Fernández²

¹Departamento de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Madrid, 28049, Madrid, España.

nerea.albalaejo@estudiante.uam.es

²Instituto de Cerámica y Vidrio, ICV-CSIC, 28049, Madrid, España.

Resumen: Ante la necesidad de encontrar alternativas más seguras y sostenibles a los fitosanitarios sintéticos en la industria agroalimentaria, los aditivos basados en sistemas arcilla/aceite esencial se presentan como alternativa prometedora para la conservación postcosecha. En su síntesis se emplearon arcillas laminares esmectíticas (Sepigel® y Bentolit Super) y aceites esenciales de *Mentha arvensis*, canela, orégano y clavo, obteniendo materiales por amasado en forma de polvo. Se caracterizaron mediante TGA, FTIR y microscopía, confirmando la incorporación efectiva de aceites en la matriz mineral. Los ensayos de envejecimiento evidenciaron mayor estabilidad y menor evaporación de los aceites bajo refrigeración. Además, se evaluó la sedimentación en suspensión acuosa, destacando las mejores prestaciones para Bentolit Super. Finalmente, se estudió la vida útil de fresas postcosecha mediante diferentes aplicaciones del producto. El tratamiento mejora la conservación visual y prolonga la vida útil de las fresas, posicionándose como alternativa eficaz y sostenible en la industria agroalimentaria.

Palabras clave: Arcilla, aceite esencial, encapsulación, conservación postcosecha, vida útil, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN.

En el contexto actual, la calidad y seguridad alimentaria representan una prioridad global. Estadísticas proporcionadas por la OMS y la FAO señalan una relevante incidencia de enfermedades por alimentos en mal estado y una exigencia de producción incrementada, mientras que se enfatiza la reducción del desperdicio alimentario como factor crítico para la sostenibilidad. En respuesta, la industria agroalimentaria ha implementado estrictas medidas en calidad, trazabilidad y seguridad, adoptando nuevas tecnologías y regulaciones para cumplir con políticas mundiales. Ejemplo de ello es la estrategia “De la Granja a la Mesa”, impulsada por la Unión Europea y orientada a mejorar la salud y la sostenibilidad de los alimentos [1].

En la industria agroalimentaria, la innovación se centra en el desarrollo de aditivos funcionales, sustancias añadidas a los alimentos con funciones tecnológicas específicas para mejorar características como vida útil, textura, color y sabor. Regulados estrictamente por la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), estos aditivos pueden ser de origen natural, animal, mineral o sintético, y se clasifican en distintas familias según su función técnica. Los aceites esenciales de plantas aromáticas constituyen aditivos funcionales naturales con propiedades antifúngicas, antivirales y antioxidantes, que contribuyen a prolongar la conservación y calidad de los alimentos [2]. Por las limitaciones de su incorporación directa sobre la matriz alimentaria (alteraciones organolépticas, seguridad alimentaria o volatilidad), la encapsulación de los aceites

se presenta como método preferente para su incorporación, mejorando la estabilidad, la protección frente a agentes ambientales y la liberación controlada [3]. Se puede realizar mediante matrices orgánicas (polisacáridos, proteínas) o inorgánicas, destacando las arcillas naturales por su inercia química, estabilidad térmica, alta superficie específica y compatibilidad ambiental [4].

Las arcillas, biomateriales naturales de bajo costo y alta disponibilidad, cumplen requisitos regulatorios para su uso en contacto con alimentos y aporte funcional. Su estructura laminar compuesta por sílice y alúmina permite interacciones químicas y físicas adecuadas para adsorción y liberación controlada de compuestos activos. Algunas arcillas laminares de la familia de esmectitas, son ejemplos destacados de matrices con propiedades de adsorción, intercambio iónico y estabilidad térmica. La purificación y modificación superficial de estas arcillas optimizan sus propiedades adsorbentes y funcionales, orientadas a la encapsulación eficiente de aceites esenciales. Esta técnica contribuye a extender la vida útil y calidad de alimentos frescos, como las fresas, altamente perecederas y susceptibles a hongos postcosecha, donde el aceite esencial de menta se destaca por sus propiedades antifúngicas y tolerancia organoléptica favorable [5].

El tratamiento con arcillas aditivadas puede aplicarse en fases pre o postcosecha, por vías seca (espolvoreado) o húmeda (espray, inmersión, recubrimiento), debiendo considerarse protocolos de aplicación y seguridad para el consumidor.

El objetivo principal de este estudio es la síntesis y caracterización de arcillas aditivadas como vehículo de liberación controlada de aceites esenciales. Se trabajará en maximizar la capacidad de adsorción de las arcillas, asegurando al mismo tiempo su inocuidad y compatibilidad con superficies alimentarias. Además, se evaluará la estabilidad de los materiales encapsulados en suspensión acuosa, así como el envejecimiento de las arcillas aditivadas a lo largo del tiempo. Finalmente, se llevará a cabo un estudio de vida útil en fresas tratadas con el producto, con el fin de validar su eficacia en condiciones reales de aplicación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1. Materiales y métodos.

Para el estudio de aditivos funcionales encapsulados, se emplearon 2 arcillas comerciales: Sepigel® (SEP) y Bentolit Super (BNT), junto a cuatro aceites esenciales (orégano, *Mentha arvensis*, canela y clavo) y ácido cítrico que actúa como retardante de liberación. Los procesos de síntesis necesitaron de amasador (Kenwood Kmix 750BK de 2,5 L), estufa (DryBig de P-Selecta 2002972), molinos de cuchillas (Pulverisette 11-Retsch) y ultracentrífugo (Retsch ZM300, luz de malla 200µm) y tamizadora automática (AS200 digit de Retsch). La caracterización de los productos comprendió técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX) para la composición elemental, SSA por BET, análisis termogravimétrico (TGA) para la estabilidad térmica, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) para el análisis estructural, microscopía óptica, microscopia electrónica de barrido (FE-SEM) y de transmisión (TEM) para la caracterización morfológica y estructural y cromatografía de gases (GC-MS) para la composición de los aceites. Además, se evaluó la estabilidad de los aditivos en suspensión acuosa mediante turbidimetría, y se realizó un estudio de vida útil de fresa, mediante colorimetría CIELAB, índice de marrón, refractometría (°Brix), pH, contenido de humedad y textura, usando protocolos definidos en la literatura [6].

2.2. Obtención de los materiales activos.

La síntesis de arcillas funcionalizadas con aceite esencial se realizó mediante un proceso reproducible y controlado en condiciones semi-húmedas. Se mezclaron 1,5 kg de arcilla seca (80 °C durante 12 h) con 300 g de aceite esencial (20 % p/p) durante 5 min en un molino de cuchillas, seguido de una etapa de gestación a 60 °C durante 12 h en contenedor cerrado para optimizar la adsorción superficial. Posteriormente, la masa se homogeneizó en la amasadora con 77 g de ácido cítrico (5 % p/p) disueltos en 1,15 L de agua, incorporando la disolución de forma gradual bajo agitación continua. La masa obtenida se secó a 80 °C durante 4 h y posterior reposo a temperatura ambiente durante la noche. Finalmente, el material se micronizó y se tamizó (<63 µm). Se obtuvieron 1,43 kg (rendimiento del 93%)

de un polvo fino, estable y con encapsulación eficiente del aceite esencial para liberación controlada como muestra la Figura 1.

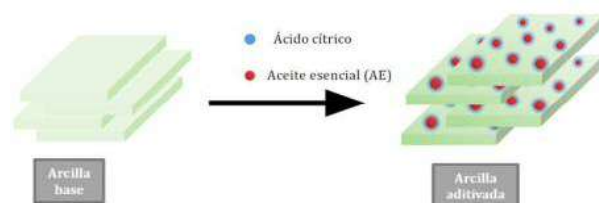


Figura 1. Esquema visual del producto sintetizado.

A continuación, se llevó a cabo la caracterización de las arcillas aditivadas utilizando diversas técnicas analíticas para evaluar su composición química, propiedades térmicas y morfológicas.

2.3. Ensayos funcionales.

Se estudió el envejecimiento del material expuesto al aire en dos condiciones: temperatura ambiente (22 °C) y refrigeración (4 °C), cuantificando la pérdida del aceite por TGA. Se dispusieron 2 g de cada muestra en placas de Petri, monitoreando la pérdida de masa en el rango 100-300 °C a intervalos temporales entre 0 y 52 días.

Se evaluó la estabilidad de las suspensiones acuosas de las arcillas SEP-Menta y BNT-Menta al 0,1% en peso en agua destilada mediante turbidimetría con un analizador Turbiscan-Lab durante 24 h, evaluando la transmitancia como indicador de sedimentación y homogeneidad, clave para manejo y aplicación en formulaciones líquidas.

Finalmente, se realizó un ensayo de vida útil en fresas postcosecha divididas en tres grupos experimentales (A: sin tratamiento, B: tratadas con arcilla base y C: tratadas con arcilla con aceite esencial), aplicando tratamientos de inmersión, espolvoreado y rociado con spray. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos y organolépticos cada 3-4 días durante 14 días: pérdida de masa, aspecto visual, índice de marrón, firmeza, acidez, humedad y contenido en azúcares (°Brix).

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.1. Caracterización de los materiales activos.

La caracterización físico-química de las arcillas revela diferencias significativas entre las dos muestras, especialmente en el contenido de MgO, siendo mayor en Sepigel®, que también presentó una SSA siete veces superior a la de Bentolit Super. Estos parámetros son fundamentales para la capacidad de encapsulación de aceites esenciales.

El TGA permitió evaluar la cantidad de aceite esencial presente en las arcillas aditivadas y su estabilidad térmica. En la Figura 2 se puede observar que el aceite esencial de orégano puro se evapora completamente a 100 °C, mientras que cuando está encapsulado en arcillas, la estabilidad térmica aumenta, alcanzando una evaporación completa a 220 °C. Además, la mayor adsorción del aceite en SEP en comparación con BNT fue

atribuida a su mayor superficie específica. Diferentes aceites (menta, canela y clavo) mostraron variaciones en las pérdidas de masa y temperaturas máximas de degradación, derivadas de su composición química e interacción con la superficie arcillosa.

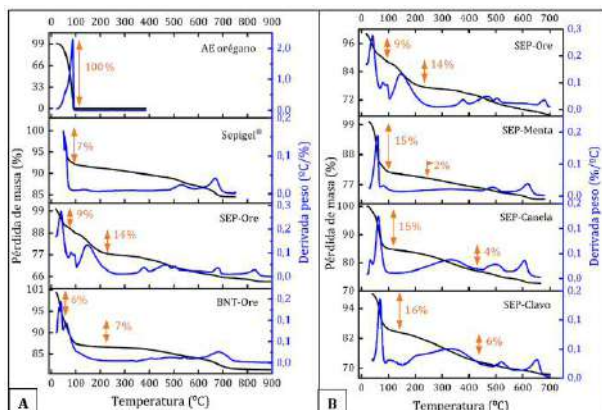


Figura 2. Perfil de pérdida de masa y su derivada de las muestras: AE orégano, Sepigel, SEP-Ore y BNT-Ore (A) y SEP-Ore, SEP-Menta, SEP-Canela y SEP-Clavo (B).

La morfología y distribución de partículas se analizaron por microscopía óptica, observándose estructuras laminares propias de Sepigel® con aglomerados de hasta 50 μm , y una posible migración parcial del aceite durante la preparación de la suspensión acuosa. Estudios más detallados mediante SEM y TEM (Figura 3) revelaron una mayor aglomeración y rugosidad en las arcillas aditivadas, además de presencia de nano-gotas con tamaño hasta 100 nm, asociadas al aceite esencial depositado en espacios interlaminares. Fue corroborado por análisis de dispersión energética (EDS) que mostró mayor contenido de carbono en dichas regiones.

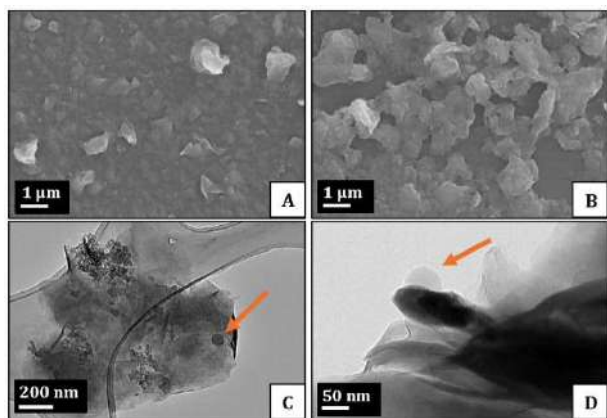


Figura 3. Micrografías SEM de las muestras SEP puro (A) y SEP-Clavo (B) y TEM de SEP-Clavo (C, D).

Mediante FTIR-ATR se confirmó la presencia de aceites esenciales en las arcillas, identificando bandas características de los compuestos mayoritarios de cada aceite. En la Figura 4 se muestra el espectro FTIR de la arcilla sintetizada en el rango 1800-1100 cm^{-1} . Se pueden observar las bandas correspondientes a la deformación del grupo metileno (1454 y 1367 cm^{-1}) y la vibración del enlace C-O, perteneciente al grupo carbonilo a 1708 cm^{-1} [7]. Esta vibración se desplaza a 1680 cm^{-1} en el espectro de la muestra SEP-Menta, sugiriendo una

posible interacción entre los grupos polares del aceite con la superficie hidrófila de la arcilla.

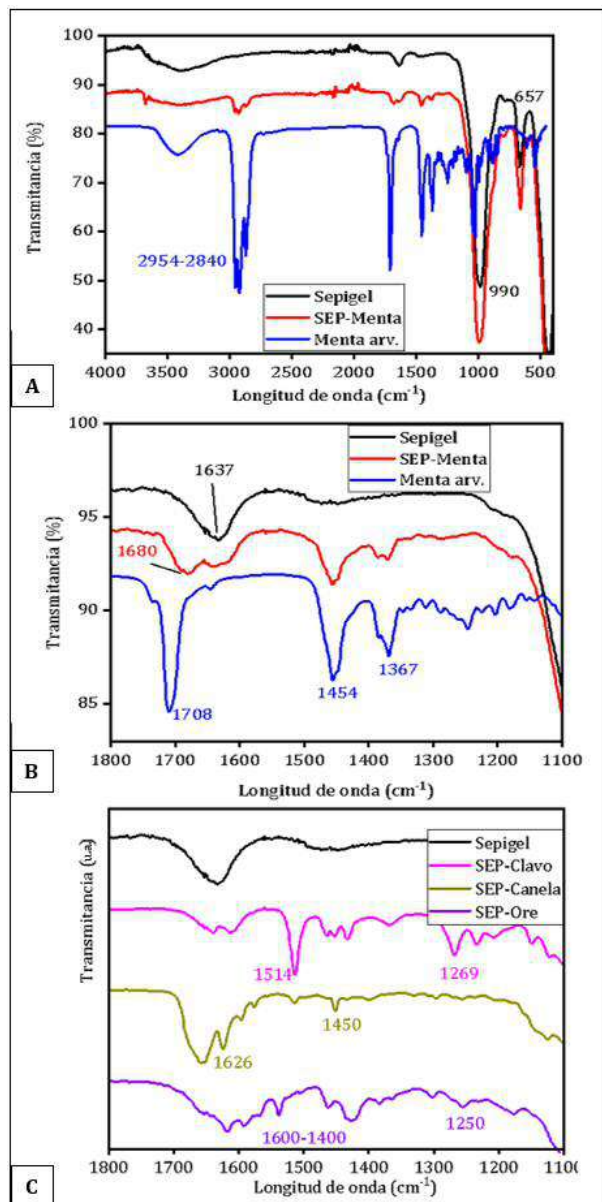


Figura 4. Espectros FTIR de las muestras: A) SEP, SEP-Menta y AE *Mentha arvensis* en el rango de 4000-400 cm^{-1} ; B) SEP, SEP-Menta y AE *Mentha arvensis* en el rango de 1800-1100 cm^{-1} ; C) SEP, SEP-Clavo, SEP-Canela y SEP-Ore en el rango de 1800-1100 cm^{-1} .

3.2. Ensayos funcionales.

Se evaluó la capacidad de las arcillas aditivadas con aceite esencial de *Mentha arvensis* en aplicaciones de conservación de fresas frescas. El envejecimiento de la muestra SEP-Menta mostró que la mayor volatilización del aceite esencial ocurre durante los primeros días de exposición, con una pérdida más marcada en condiciones ambientales (22 $^{\circ}\text{C}$), alcanzando el 35 % a los 30 días. En refrigeración (4 $^{\circ}\text{C}$), la evaporación fue menor (15 % después de 52 días), lo que evidencia la importancia de la temperatura sobre la retención del compuesto volátil. Cabe destacar que el aroma de *Mentha arvensis* permanece en la arcilla tras el periodo de evaluación, mientras que el aceite puro se evapora completamente en

pocas horas, resaltando la acción protectora de la matriz SEP-Menta.

Se midió el grado de turbidez de las suspensiones acuosas al 0,1% de arcilla aditivada durante 24h. La muestra SEP-Menta mostró mayor sedimentación y menor estabilidad coloidal, mientras que BNT-Menta evidenció una dispersión homogénea y baja sedimentación. Ello se atribuye a las diferencias mineralógicas: la bentonita presentó estructura más expandible y mayor capacidad de hidratación, favoreciendo la estabilidad en medio líquido.

Se escogió la arcilla BNT-Menta para un estudio de vida útil por inmersión, espolvoreado y rociado. Los resultados de espolvoreado indicaron que el tratamiento con arcilla aditivada (C) permitió que un 27 % de los frutos se conservaran mejor estado visual al día 14 (Figura 5), frente al 5 % y 4 % observados en los grupos control y bentonita base, respectivamente. También se obtuvo menor proporción de frutos en estado avanzado de deterioro (45 % en C, frente a 70 % en control y 58 % en bentonita base).

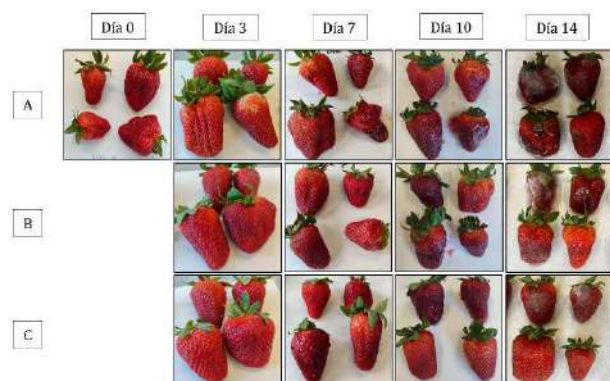


Figura 5. Imágenes del aspecto de las fresas tratadas mediante espolvoreado tras 0, 3, 7, 10 y 14 días.

Los parámetros fisicoquímicos (índice de marrón, firmeza, pH, acidez, humedad y sólidos solubles) no mostraron diferencias significativas por la alta variabilidad y superposición de intervalos de confianza. La pérdida de masa tras 14 días fue inferior en el grupo tratado con BNT-Menta (16%) frente a BNT base (18%) y al grupo control (21%), lo que sugiere capacidad higroscópica y barrera física que reduce la deshidratación. La acción sinérgica del aceite esencial, con propiedades antimicrobianas y antioxidantes, junto con la arcilla favorece la protección del tejido vegetal y limita el desarrollo de patógenos responsables del deterioro.

El método por rociado mostró que, tras 10 días de conservación, el 57% de las fresas tratadas conservaron buen estado, frente a sólo el 14% del grupo sin tratamiento, confirmando la eficacia del sistema frente a la pérdida de calidad visual y estructural (Figura 6).

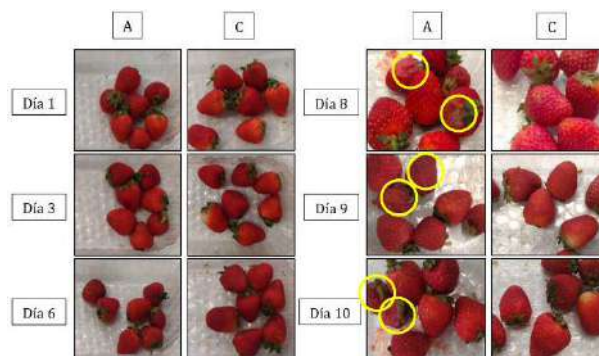


Figura 6. Imágenes del aspecto de las fresas tratadas mediante rociado por spray tras 1, 3, 6, 8, 9 y 10 días.

4. CONCLUSIONES.

Los sistemas arcilla/aceite esencial desarrollados en este trabajo funcionan como aditivos funcionales alternativos a los fitosanitarios convencionales. La síntesis por amasado es un proceso fácilmente escalable que garantiza una incorporación eficaz del aceite esencial en la matriz arcillosa. Su almacenamiento es más eficaz en condiciones de refrigeración y la estabilidad de la suspensión acuosa depende del tipo de arcilla, lo que puede optimizar futuras formulaciones.

Los ensayos postcosecha en fresas, tratadas mediante rociado y espolvoreado, mostraron reducción del deterioro visual y un aumento en la duración de conservación respecto a los controles. Estos sistemas proponen una solución sostenible y eficaz para prolongar la vida útil de frutas tras la cosecha. Sin embargo, para su escalado industrial es necesario seguir ajustando la aplicación según variables, además de validar su eficacia en diferentes cultivos y contextos industriales.

5. REFERENCIAS.

- [1] Consejo Europeo, 2020. De la granja a la mesa.
- [2] Hashemi et al., 2017. Antioxidant Activity of Essential Oils in Foods, Essential Oils in Food Processing: Chemistry, Safety and Applications.
- [3] Xu et al., 2024. The application of encapsulation technology in the food Industry: Classifications, recent Advances, and perspectives. Food Chemistry: X 21.
- [4] Saucedo-Zuñiga et al., 2021. Controlled release of essential oils using laminar nanoclay and porous halloysite / essential oil composites in a multilayer film reservoir. Microporous and Mesoporous Materials 316.
- [5] Kalembe et al., 2020. Agrobiological Interactions of Essential Oils of Two Menthol Mints: Mentha piperita and Mentha arvensis. Molecules 25, 59.
- [6] Sani et al., 2025. Improving Strawberry Shelf Life Using Chitosan and Zinc Oxide Nanoparticles from Ginger-Garlic Extracts. Applied Food Research.
- [7] Jayasekher et al., 2024. Authentication of Mentha arvensis essential oil using attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectrophotometry coupled with chemometrics. Journal of Food Composition and Analysis 135.

NUEVAS ALEACIONES DE ALUMINIO ANODIZABLES PARA LÁMPARAS: FABRICACIÓN Y ESTUDIO A CORROSIÓN

A. Méndez de la Peña, J. Bedmar, J. P. Fernández-Hernán, S. García-Rodríguez, B. Torres, J. Rams

Department of Applied Mathematics, Materials Science and Engineering and Electronic Technology,
Universidad Rey Juan Carlos (URJC), 28933 Móstoles, Spain, Andrea.m81113@gmail.com

Resumen: La lámpara es un dispositivo fundamental utilizado en prácticamente todas las industrias para proporcionar iluminación. En su fabricación se pueden emplear aleaciones de aluminio y silicio, destacando la aleación AA6082 modificada con aleantes en diferentes proporciones para encontrar la mejor combinación de colabilidad y capacidad de ser anodizada. A través de ensayos de corrosión, se determinó que la muestra 7 (Si, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn, Ti, Sr, Cr) era la más adecuada para la fabricación de lámparas. Aunque presenta propiedades mecánicas inferiores en algunos aspectos, su alto contenido de aleantes le otorga una mejor fluidez. Además, se ha desarrollado un diseño de la lámpara a través de un enfoque innovador, que permite una producción eficiente de hasta 220 unidades por hora, donde cada lámpara tiene un coste estimado de 19 €, siempre y cuando se fabriquen lotes de al menos 10000 lámparas.

Palabras clave: AA6082, lámpara, anodizado, corrosión.

1. INTRODUCCIÓN.

El aluminio es un metal cuyas principales propiedades son la buena conductividad térmica y eléctrica, su maleabilidad y su baja dureza. Además, tiene otras ventajas, que son su baja densidad, su capacidad de reflejar en el espectro visible la radiación electromagnética y su alta resistencia a la corrosión [1]. Las aleaciones de aluminio-silicio son de las más empleadas a nivel industrial en procesos de fabricación por fundición debido a su elevada capacidad de ser coladas.

Al añadir silicio a las aleaciones de aluminio, aumenta su dureza, su resistencia mecánica y su resistencia al desgaste. Sin embargo, se reduce su coeficiente de expansión térmica y su conductividad eléctrica. El principal problema es que el aluminio y el silicio están divorciados en la microestructura, de manera que el aluminio se puede anodizar para decorarse y protegerse frente a la corrosión, mientras que el silicio no se puede anodizar. Esto implica que la presencia del silicio, aunque mejora la fluidez, imposibilita el anodizado, que es lo que hace que se mejore su resistencia a la corrosión y le ofrece la posibilidad de ser decorado. Debido a este problema es preciso a nivel industrial buscar nuevas alternativas para encontrar aleaciones que, fluyendo bien, puedan ser anodizadas [2].

Como se observa en la Figura 1, la aleación de aluminio y silicio presenta dos fases inmiscibles, una formada por el aluminio y la otra por el silicio. El silicio ayuda al aluminio a fluir, ya que su punto eutéctico se encuentra a un 12,5% de silicio, disminuyendo su punto de fusión. Esto implica que la composición de las aleaciones debe estar en torno a ese punto.

En dicho diagrama se observan tres campos bifásicos. El primero de ellos, a baja temperatura, con la aleación en estado sólido, está formado por aluminio y silicio, que

son inmiscibles entre sí, como se ha comentado en el párrafo anterior. Los otros dos, a temperaturas superiores, están formados por fases líquidas y sólidas de aluminio y silicio, correspondientemente.

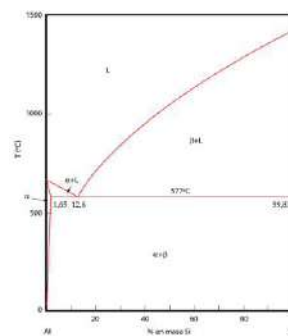


Figura 1. Diagrama de equilibrio Al-Si [3].

Para comprender las propiedades de estas aleaciones, es preciso conocer su microestructura. En la Figura 2 se muestra la microestructura de una aleación de Al-Si fabricada por colada y posteriormente refinada. En ella puede observarse que hay dendritas de aluminio (fases blancas) rodeadas de una fase eutéctica de aluminio y silicio (parte más oscura). Observando el diagrama de fases de estas aleaciones, que suelen tener menos silicio que el del punto eutéctico, puede entenderse el proceso que da lugar a esta microestructura: primero se pasa del estado líquido al campo bifásico L + Al. En este punto se forman las dendritas citadas de aluminio primario. Posteriormente, al enfriar más, se da la reacción eutéctica, en la que el líquido restante se transforma en sólidos de aluminio y silicio eutécticos, que rodean a dendritas primarias de aluminio previamente formadas.



Figura 2. Microestructura Al-Si [4].

Por lo tanto, es de especial importancia realizar nuevas aleaciones de aluminio que puedan ser tanto coladas como anodizadas.

2. OBJETIVOS.

Una vez analizada la situación industrial de las aleaciones de aluminio para colar y anodizar, se planteó el estudio de nuevas aleaciones que combinen estos dos propósitos. Para ello se partió de una aleación de forja AA6082 a la que se añadieron diferentes elementos aleantes para estudiar las nuevas composiciones.

Los objetivos principales fueron: el estudio de nuevas aleaciones que combinen capacidad para ser coladas y anodizadas; y el estudio de costes a nivel industrial de la aleación seleccionada proponiendo como caso a estudiar la fabricación de una lámpara.

3. METODOLOGÍA.

Lo primero que se aborda en este estudio es la fabricación por colada, donde se funden los materiales a 700 °C para poder introducirlos en el molde en estado líquido, donde se solidifican para adquirir las dimensiones deseadas. En la Tabla 1 se muestran las composiciones de las muestras de estudio obtenidas, donde la muestra referencia es la AA6082 sin modificar, y el resto de las muestras son modificaciones de la AA6082. Además, en todas las muestras se mantuvo constante la composición del Mn con un 0,70 y del Cr con un 0,20.

Tabla 1. Composición de las muestras de estudio.

6082	Si	Mg	Zn	Cu	Fe	Ti	Sr
Ref.	1,30	1,00	0,20	0,10	0,50	0,10	0,00
1	2,00	2,60	0,20	0,10	0,50	0,10	0,00
2	1,30	1,00	0,20	0,20	1,00	0,10	0,00
3	1,30	1,00	0,25	0,10	0,50	0,15	0,00
4	2,00	2,60	0,25	0,10	0,50	0,15	0,00
5	2,00	2,60	0,25	0,10	1,00	0,15	0,00
6	2,00	2,60	0,25	0,20	1,00	0,15	0,00
7	2,00	2,60	0,25	0,20	1,00	0,15	0,02

Una vez obtenidas las muestras se realizó un pulido superficial para su preparación metalográfica. Por último, se hizo un ataque químico para revelar la microestructura a través de una disolución Kellers.

Para el estudio de las muestras se usaron los siguientes equipos: el microscopio óptico Leica/DMR para observar la microestructura y determinar el tamaño de grano; un sistema de fluorescencia de rayos X (EDS) acoplado al microscopio electrónico de barrido (SEM) para estudiar la composición; el durómetro para medir la dureza; el potenciómetro para evaluar el comportamiento a corrosión, mediante el LPR, EIS y Polarización anódica-catódica.

Dado que el objetivo es que las nuevas aleaciones combinasen capacidad de ser coladas y anodizadas, también se anodizaron las muestras. Para finalizar se estableció la relación entre el coste por unidad de pieza y el tamaño de lote mediante el programa *Granta EduPack*.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Microscopía óptica.

Mediante este equipo se observó la microestructura a tres aumentos (50x, 100x, 200x). Dado que las distintas muestras presentan composiciones similares, en la Figura 3 se ilustran la muestra 1 y la muestra 7. Se observan granos de aluminio con forma dendrítica, encontrándose el silicio en los bordes, ya que se forman eutécticos divorciados. Cabe destacar que la muestra 7 presenta un grano más refinado por ser la única que contiene estroncio.

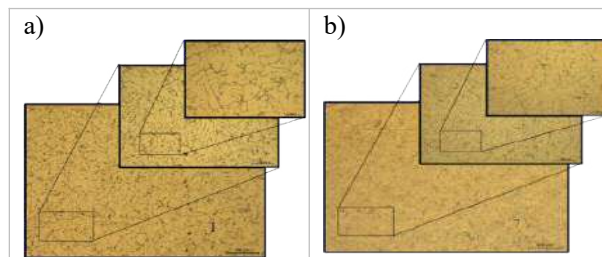


Figura 3. Micrografías de la microestructura: a) Muestra 1; b) Muestra 7.

A partir de estas imágenes se puede determinar el tamaño de grano que se relaciona con la dureza de cada muestra. Para determinar el tamaño de grano se usan las reglas de conteo, en especial el método de Heyn. Los resultados se muestran en la Tabla 2. De acuerdo con el efecto Hall-Petch, cuanto más pequeño sea el tamaño de grano, menor dureza presenta el material, debido al deslizamiento de un grano al próximo en los límites de grano [5].

Tabla 2. Índice de tamaño de grano.

Muestra	G	Muestra	G
Ref.	2,95	4	1,87
1	1,58	5	2,83
2	2,05	6	1,98
3	2,40	7	2,35

4.2. Análisis composicional (SEM-EDS).

En todas las muestras la composición es similar por lo que se ilustra en la Figura 4 la muestra 7, donde se observa cómo el aluminio y el silicio son inmiscibles. El aluminio tiene una estructura FCC, de manera que en los intersticios del aluminio están la mayoría de los aleantes. En las dendritas está el aluminio, en los espacios interdendríticos está el silicio y el magnesio, y el resto de aleantes están dispersados.

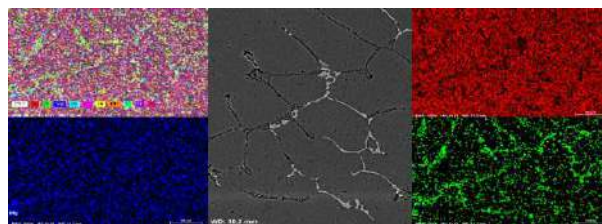


Figura 4. Muestra 7 en el microscopio SEM.

4.3. Microdureza Vickers.

Se estudia la dureza mediante el durómetro. En la Tabla 3 se muestran los resultados de microdureza, en los que

se concluye que siguen el mismo patrón de dureza que el observado a través del microscopio.

La muestra referencia es la más dura, ya que a pesar de que los aleantes que la forman son blandos, es la muestra que menor contenido de ellos presenta, mientras que la más blanda es la muestra 1, al tener gran cantidad de magnesio y poco titanio [6].

Tabla 3. Resultados de la microdureza.

Muestra	HV ₁	Muestra	HV ₁
Ref.	91,81	4	76,87
1	74,27	5	86,78
2	81,26	6	79,69
3	83,74	7	82,84

4.4. Estudio OCP y Rp.

Para iniciar el análisis de la corrosión, se realiza el estudio del potencial en circuito abierto (OCP) para evaluar la nobleza de las muestras. En la Figura 5a se muestra la evolución del OCP con el tiempo. A medida que pasa el tiempo el potencial se hace más positivo, lo cual indica que la muestra se está pasivando, haciéndose menos reactiva. Esto se debe a que la capa pasiva crece haciendo que se proteja el material. La presencia de picaduras, por otro lado, hace que el OCP sea más negativo, perjudicando al material. A pesar de eso, se estabiliza con el tiempo. La diferencia de potencial entre las muestras analizadas no es muy elevada, siendo una diferencia no significativa.

Una vez evaluada la estabilidad del sistema electroquímico, se estudia la resistencia a la corrosión. En la Figura 5b se observa que hay picos máximos por la formación de productos de corrosión, que hace que suba la resistencia a la polarización (Rp), debido a que los óxidos cerámicos son estables a corrosión. Luego esos productos de corrosión se agrietan haciendo que la Rp baje al entrar en contacto el líquido con el metal. Al final del ensayo no hay mucha diferencia entre las muestras, salvo la muestra 4 y la muestra 6, que son las que mejor se comportan a tiempos mayores. Y la muestra 7 es la que peor resiste con el paso del tiempo, asociando su comportamiento a la presencia de granos finos que se corroen antes, porque tiene más límite de grano, es decir, desorden atómico y, además, presenta una capa de óxido pasiva más estable [7].

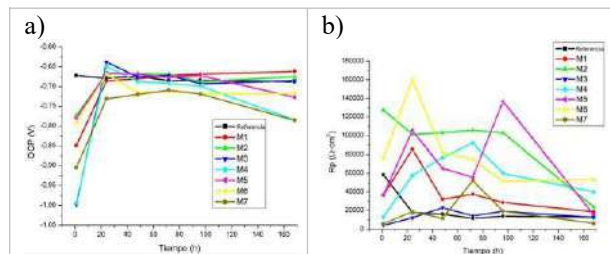


Figura 5. Evolución con el tiempo: a) OCP; b) Rp.

4.5. Polarización Anódica-Catódica.

En este estudio se determina el potencial y la densidad de corriente a dos tiempos de inmersión, 1 hora y 168 horas. Las conclusiones obtenidas en este estudio son: cuanto mayor es el tiempo de inmersión, más noble se hace la

muestra 3, relacionando este comportamiento con su bajo contenido de magnesio. Sin embargo, la muestra 7 es la menos noble en términos generales al estar presente el estroncio, que es muy reactivo.

En ambos casos concuerda con el estudio de OCP en términos de nobleza del material. Sin embargo, en el caso de polarización A-C se obtienen también los valores de densidad de corriente al aplicar a las muestras un rango de potencial amplio, obteniendo una visión del comportamiento a corrosión, ya que mayores densidades de corriente implican mayor degradación por corrosión.

4.6. Estudio EIS.

Este estudio determina los circuitos equivalentes de las muestras para cada tiempo de inmersión. Hay dos circuitos, un R(RC) que representa ataques generalizados y un R(RC)(RQ) que además de ataques generalizados, representa ataques localizados, que son las picaduras [5]. Por lo tanto, en la Figura 6 se representan ambos circuitos, destacando que en el caso de la Figura 6a es una capa pasiva homogénea y en el caso de la Figura 6b es una capa pasiva heterogénea.

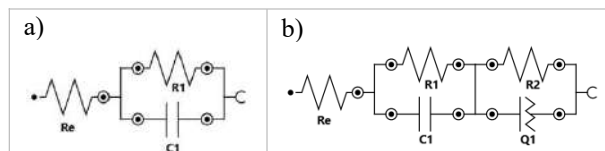


Figura 6. Circuitos eléctricos: a) Circuito R(RC); b) Circuito R(RC)(RQ).

Se concluye que la muestra referencia y la muestra 3 solo presentan ataques generalizados, mientras que la muestra 2 y la muestra 5, además de ataques generalizados, presentan picaduras. Destacando que el resto de las muestras no se asocian a un único circuito equivalente, ya que sus circuitos cambian con el tiempo.

4.7. Efectos de realizar anodizado.

Tras la fabricación de muestras y su estudio preliminar, las muestras se anodizan. Para ello se selecciona la muestra 7, ya que, a pesar de tener peores propiedades, al tener un mayor número de aleantes, la muestra fluye mejor y tiene mayor margen de mejora. Teniendo un buen acabado tras el anodizado, demostrando que son anodizables.

En la Tabla 4 se aprecia que al realizar el anodizado, la muestra se hace más resistente a la corrosión, al formarse capas de óxido gruesas, haciendo la muestra más noble al conseguir un potencial más positivo. Además, disminuye la densidad de corriente, permitiendo que la muestra se degrade menos [8].

Tabla 4. Estudios de la muestra con y sin anodizado.

Estudio	OCP	Rp	Polarización A-C	
Medida	OCP (V)	Rp (Ω·cm²)	V (V)	i (A/cm²)
Sin anodizar	-1,05	5057	-0,89	2,56E-08
Anodizada	-0,37	5235346	-0,64	1,06E-10

Para finalizar, en la Figura 7 se muestra cómo han quedado las piezas. Al aplicarle el anodizado no se aprecia cambio de tono, mientras que, si no se anodiza, se ve un cambio de tonalidad, ya que se forman productos de corrosión al no presentar una capa protectora [8].

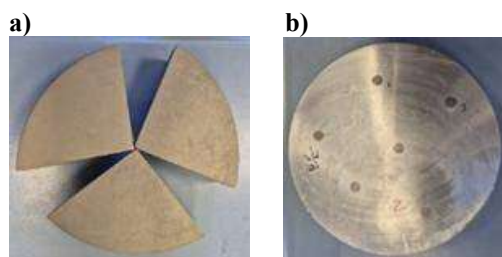


Figura 7. Muestra 7: a) Anodizada; b) Sin anodizar.

4.8. Diseño de la lámpara.

Una vez que se ha realizado el estudio técnico, se propone el diseño de una lámpara para analizar su implantación industrial. Para ello, se usa el programa de diseño 3D *Tinkercad*. En la Figura 8 se muestra el diseño, la parte azul oscura es la estructura y la parte gris es la luz.

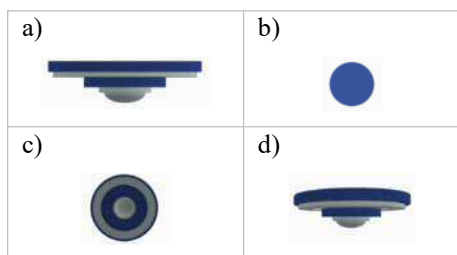


Figura 8. Diseño de la lámpara con vista: a) Lateral; b) Superior; c) Inferior; d) Ortogonal.

A continuación, se presentan las dimensiones de la lámpara creada. La estructura cuenta con dos cilindros, uno superior y otro inferior, ambos de 2 cm de altura, cuyos diámetros son de 30 cm y 16 cm, respectivamente.

Además, es importante saber cuánto se tarda en fabricar cada pieza, para ello se estima mediante la regla de Chorinov que se representa mediante la ecuación (1):

—

donde B es la constante del molde que es 0,2 min/cm² para el molde usado; V es el volumen en cm³; A es el área en contacto con el molde en cm² y n es una constante que es 2.

A la hora de calcular el volumen se debe tener en cuenta el volumen de ambos cilindros, obteniendo un valor de 1815,84 cm³. Y en cuanto al área se deben considerar solo las caras que están en contacto con el molde, dando un valor de 1702,74 cm². Por lo tanto, se tarda 13,65 segundos en fabricar una lámpara mediante inyección a alta presión. Esto quiere decir que en una hora efectiva de trabajo se podrían fabricar 220 lámparas.

4.9. Costes de fabricación.

Una vez presentado el diseño de la lámpara, es clave estudiar los costes de fabricación para ver si el proceso es viable económicamente. Mediante el programa *Granta*

EduPack se estudia la relación entre el coste por unidad de pieza y el tamaño de lote, llegando a la conclusión de que a medida que aumenta el tamaño de lote, disminuye ese coste, lo cual se debe a que siempre hay unos costes fijos que son constantes y unos costes variables que al fabricar por lotes disminuyen. De manera que interesa más fabricar más lotes, ya que con pocas piezas no se compensa el capital inicial. Por lo tanto, se deben fabricar lotes de al menos 10000 lámparas para que el coste total por lámpara sea de 19 €. Dicho valor está cercano al coste de los materiales, ya que el coste del equipo de inyección a alta presión se amortigua al fabricar un número elevado de lámparas.

5. CONCLUSIONES.

Tras el estudio de las muestras para buscar aleaciones de aluminio y silicio que combinen colabilidad y capacidad para ser anodizadas se concluye que el aluminio está en forma de dendritas en cuyos bordes se encuentra el silicio, ya que son eutécticos divorciados. La muestra 7 es la seleccionada, ya que, a pesar de tener peores propiedades, al tener un mayor número de aleantes, la muestra fluye mejor.

Además, mediante la realización del anodizado, se mejoran esas propiedades al crear una capa pasiva sobre el material, cuya función es proteger la muestra. Empleando el diseño seleccionado se pueden fabricar 220 lámparas en una hora si se trabajase de manera efectiva. Donde el coste total para lotes superiores a 10000 lámparas es de 19 € por lámpara.

6. REFERENCIAS.

- [1] Héctor Rodríguez, "Propiedades del aluminio (Al)," *National Geographic España*, Jan. 15, 2024.
- [2] G. Barona López and E. Velasteguí López, "Materiales de aleación aluminio-silicio aplicados en la fabricación de partes de motores de combustión interna alternativos Parte II," *ConcienciaDigital*, vol. 3, no. 2, pp. 6–16, Apr. 2020, doi: 10.33262/concienciadigital.v3i2.1203.
- [3] "Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico," *Universidad Complutense*.
- [4] Xiuping Jiang, "Información metalográfica sobre el aluminio," *Struers Ensuring Certainty*.
- [5] J. Bedmar, S. García-Rodríguez, M. Roldán, B. Torres, and J. Rams, "Effects of the heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of 316 L stainless steel manufactured by Laser Powder Bed Fusion," *Corros Sci*, vol. 209, p. 110777, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.corsci.2022.110777.
- [6] W. Callister and D. Rethwisch, "Materials Science and Engineering An Introduction by William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch (z-lib.org)," 2018.
- [7] E. Otero Huerta, *Corrosión y degradación de materiales*, 2nd ed., vol. 4. 2001.
- [8] A. Mauricio Beltrán Martínez, "Estudio sobre el proceso de anodizado de aluminio y de una aleación Al-Mg-Si," Universidad Nacional Autónoma de México, México Ciudad Universitaria, 2014.

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE RELLENO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PIEZAS DE PLA 3D850 FABRICADAS POR IMPRESIÓN 3D MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Laura María Cabrera Martín, Fernando Rivera López

Departamento de Ingeniería Industrial, Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, Apdo. 456, Santa Cruz de Tenerife, E-38200, España
lauramcabreramartin@gmail.com; frivera@ull.es

Resumen: El enfoque de este trabajo es indagar sobre el comportamiento de un polímero de Ácido Poliláctico o PLA (siglas referidas al inglés *Polylactic Acid*), en concreto, el PLA 3D850 en la Fabricación Aditiva. El material de este filamento es de especial interés por su capacidad de imprimir piezas de alta resolución y con formas complejas a una velocidad mayor que otros similares. Además, es biodegradable y no sufre contracción térmica. En concreto, se quiere averiguar si utilizando el filamento de PLA 3D850, y distintas densidades de relleno, existen diferencias en las propiedades mecánicas de piezas de la misma geometría. Para ello, se fabricarán piezas normalizadas según las normas UNE-EN ISO 178, UNE-EN ISO 527 y UNE-EN ISO 604, con variaciones en la densidad de relleno, y se someterán a pruebas mecánicas para determinar cómo afecta esta variable a las características mecánicas.

Palabras clave: impresión, 3D, fabricación, aditiva, PLA, ácido, poliláctico, filamento.

1. INTRODUCCIÓN.

La Fabricación Aditiva o AM [1] (siglas referidas al inglés *Additive Manufacturing*), también denominada impresión 3D, es una tecnología en desarrollo que ha revolucionado la forma en que se diseñan y fabrican productos. Este tipo de técnica permite la creación de objetos tridimensionales mediante la adición sucesiva de capas de material, utilizando menos materia prima y generando menos residuos que otras formas tradicionales de fabricación.

Entre las tecnologías de AM disponibles, cabe destacar el Modelado por Deposición Fundida o FDM (siglas referidas al inglés *Fused Deposition Modeling*). En FDM se parte de un objeto o idea, y se diseña un modelo virtual mediante un software de Diseño Asistido por Ordenador o CAD, (siglas referidas al inglés *Computer Assisted Design*); el cual se segmenta digitalmente en múltiples capas en el plano horizontal. A partir de este escaneo, los segmentos y datos de las coordenadas del modelo virtual en 3D son utilizados para controlar los motores responsables de posicionar con precisión la boquilla del sistema de extrusión, que deposita el material capa a capa hasta conseguir el producto deseado.

2. OBJETIVO.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar el cambio en las propiedades mecánicas de piezas impresas mediante FDM al variar la densidad de relleno.

3. SMARTFIL®PLA 3D850.

El material empleado para la fabricación de las probetas es el SMARTFIL®PLA 3D850 desarrollado por la empresa NatureWorks. En su ficha técnica se presenta como un PLA mejorado, biodegradable y sin contracción

térmica, con propiedades mecánicas y térmicas más altas que un PLA estándar.

Tabla 1. Parámetros del PLA 3D850 del fabricante.

Densidad (g/cm ³)	1,24
Temperatura de impresión (°C)	205 - 220
Temperatura de la cama (°C)	40 - 60
Altura de la capa (mm)	≥ 0,1
Recomendaciones de boquilla (mm)	≥ 0,2

4. DISEÑO DE LAS PROBETAS.

Con el fin de determinar las propiedades mecánicas del filamento PLA 3D850, se ha de llevar a cabo el mismo ensayo repetidas veces y en las mismas condiciones. Se opta, por lo tanto, por fabricar probetas normalizadas según las normas UNE-EN ISO 178 [2], UNE-EN ISO 527 [3] y UNE-EN ISO 604 [4], que corresponden a los ensayos de flexión, tracción y compresión, respectivamente. Esto, junto con la repetitividad de las condiciones de los experimentos, asegura que las discrepancias obtenidas entre los distintos ensayos sean debido a la única variable que cambia en todo el proceso: la densidad de relleno.

La densidad de relleno es el porcentaje de material del interior de una pieza impresa en 3D con respecto al volumen interior total. Los cambios en la densidad de relleno afectan a la resistencia, peso, rigidez y tiempo de impresión de la pieza. Una menor densidad de relleno supone un menor consumo de materia prima, pero puede afectar de forma negativa a las características mecánicas de las piezas, por lo que debe combinarse adecuadamente con el patrón de relleno para optimizar la relación entre ambos parámetros.

El proceso de diseño comienza creando un modelo 3D de cada tipo de probeta mediante el programa Autodesk Fusion. Esta representación tridimensional se transfiere al laminador de la impresora, en este caso el Bambu Studio, donde se reproduce hasta tener seis probetas. El programa cuenta con una vista previa de la placa de impresión, de tal manera que las probetas pueden distribuirse a lo largo de la superficie de impresión de la forma que se desee (Figura 1).

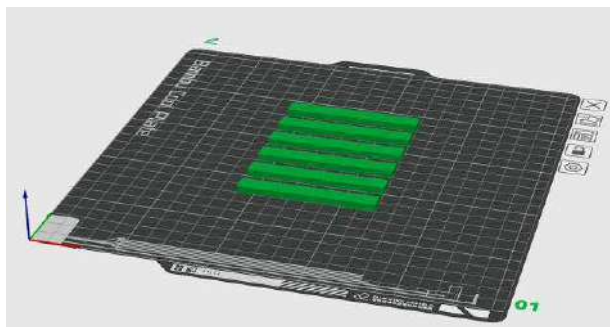


Figura 1. Probetas de flexión en el laminador Bambu Studio.

A fines comparativos, todas las probetas han sido fabricadas con los mismos parámetros de impresión.

- Altura de la capa:
 - Altura de capa (mm): 0,2
- Capas superiores/inferiores:
 - Patrón de la superficie superior: rectilíneo alineado.
 - Capas superiores de la cubierta: 1
 - Espesor de la cubierta (mm): 0
 - Patrón de la superficie inferior: rectilíneo alineado.
 - Capas inferiores de cubierta: 1
 - Patrón interno de relleno sólido: rectilíneo alineado.
- Relleno:
 - Dirección del relleno: 45°
- Velocidad de la capa inicial:
 - Capa inicial (mm/s): 50
 - Relleno de la capa inicial (mm/s): 105
- Velocidad de otras capas:
 - Pared exterior (mm/s): 200
 - Pared interior (mm/s): 300
- Velocidad de desplazamiento:
 - Recorrido (mm/s): 500
- Boquilla de la extrusora:
 - Diámetro (mm): 0,4

Puesto que el objetivo es determinar la influencia de la densidad de relleno sobre las propiedades mecánicas de las piezas, se han impreso cinco series de seis probetas cada una. Estas cinco series, numeradas del 1 al 5, corresponden a densidades de relleno del 99, 80, 60, 40 y 20% respectivamente. Nótese que el patrón de relleno utilizado no permite una densidad del 100%, por eso se ha utilizado el 99% en su lugar. En total se han fabricado 90 probetas.

La elección de la cantidad de probetas en cada serie se ha hecho en base a las normas anteriormente mencionadas, las cuales especifican que se deben testar al menos cinco probetas en cada ensayo. En este caso se han impreso y ensayado seis, por si la integridad de alguna de las piezas se viera afectada. Las normas también sugieren que las probetas se ensayen siempre orientadas en la misma dirección, con el fin de evitar los efectos de cualquier asimetría generada en el proceso de fabricación.

5. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS.

La impresora utilizada para fabricar las probetas es la Bambu Lab X1-Carbon, diseñada para permitir impresiones de alta velocidad sin sacrificar la calidad de impresión. El proceso de fabricación de las probetas es independiente de la geometría de estas, es decir, el procedimiento es igual independientemente si las probetas son de flexión, tracción o compresión. Tanto la temperatura de extrusión como la de la cama de impresión se han escogido en función de la Ficha Técnica del PLA 3D850. Se ha decidido que las temperaturas sean 200 °C para la extrusora y 55 °C para la cama de impresión.

Para garantizar la adherencia de las piezas a la cama de impresión, la primera capa se realiza a una velocidad menor y se lleva a cabo un control y análisis automático de dicha capa. Comprobado que no se hayan detectado errores en el análisis, se procede a la impresión del resto de capas (Figura 2).

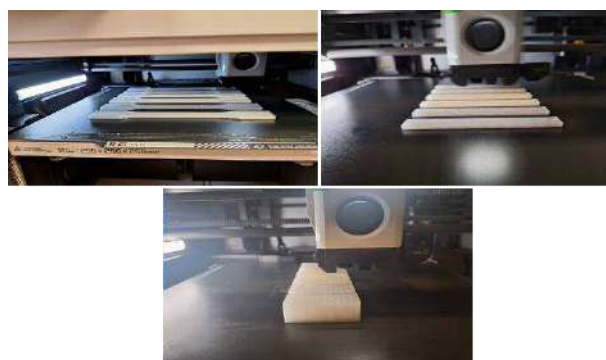


Figura 2. Impresión de las probetas para los ensayos.

6. ENSAYOS MECÁNICOS.

La máquina Universal de Ensayos utilizada para la obtención de las propiedades mecánicas es la Shimadzu Autograph. Posee un sistema que permite cambiar la célula de carga según las necesidades de los ensayos a llevar a cabo, con una capacidad de hasta 50 kN. La máquina es controlada por ordenador mediante el programa del propio distribuidor, Trapezium.

Para los tres tipos de ensayos se ha empleado una velocidad de ensayo de 1 mm/min y se han cambiado las células de cargas y los dispositivos adecuados para cada tipo de prueba. Para los ensayos de flexión se ha empleado una célula de carga de 5 kN, mientras que para los ensayos de tracción y compresión se ha utilizado una célula de 50 kN. En la Figura 3 se muestran imágenes que corresponden a los ensayos realizados.



Figura 3. Ensayos mecánicos de flexión, tracción y compresión respectivamente.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN.

En la Figura 4 se presentan las curvas de fuerza (F)-desplazamiento (s) obtenidas, mostrando en una misma gráfica un ensayo de cada Serie, pudiendo así obtener una vista global del efecto del porcentaje de relleno sobre las propiedades de flexión de las probetas.

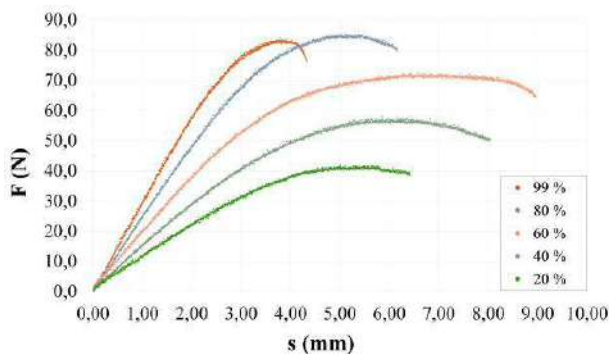


Figura 4. Curvas F-s de cada una de las Series.

A partir de estas curvas es posible determinar el Módulo de Ruptura y el Módulo de Flexión, los cuales se explican a continuación.

El Módulo de Ruptura o MOR, (siglas referidas al inglés *Modulus of Rupture*), es un parámetro que caracteriza la resistencia máxima de un material cuando se somete a una carga de flexión. Se expresa mediante la ecuación:

$$\text{MOR} = \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (1)$$

El Módulo de Flexión o Módulo de Elasticidad en flexión (E_f), mide la rigidez de un material cuando se dobla.

$$E_f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot b \cdot d^3} \quad (2)$$

En la Figura 5, se muestran los resultados de ambos parámetros para las 5 series ensayadas. En dicha figura, se aprecia una tendencia lineal de ambos parámetros: a mayor densidad de relleno, mayor MOR y E_f . Sin embargo, en el caso del MOR, la Serie 1 (correspondiente al 99% de relleno) no sigue esta tendencia, lo cual podría deberse a un fallo en la fabricación o en el ensayo de las probetas. Por otra parte, para la Serie 1, el E_f se encuentra dentro del rango esperado para piezas fabricadas con PLA (entre 2392-4930 MPa). Por el contrario, el E_f es

muy inferior a lo especificado en la Ficha Técnica del producto (aproximadamente 2540 MPa frente a unos 3300 MPa, respectivamente).

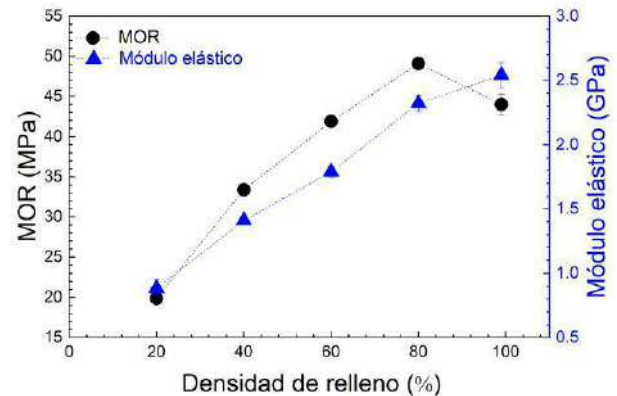


Figura 5. Comparación del MOR y E_f obtenidos para las 5 series.

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.

La Figura 6 muestra una representación de las curvas de tensión (σ_t)-deformación (ϵ_t) para cada Serie de los ensayos de tracción.

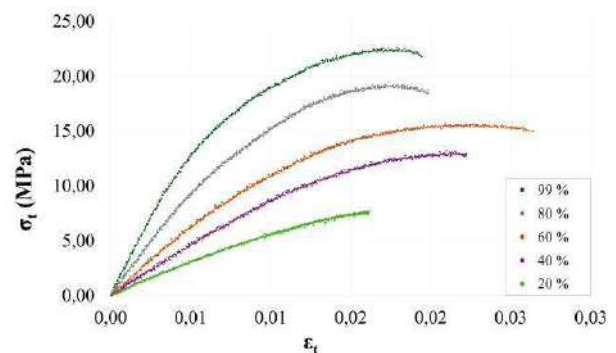


Figura 6. Curvas σ - ϵ de cada una de las Series.

A partir de las gráficas es posible determinar el Esfuerzo del Límite Elástico, la Resistencia a la Tracción y el Módulo de Young, explicados a continuación.

El Esfuerzo del Límite Elástico (σ_y), por definición, es el esfuerzo máximo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones permanentes. Es decir, si se aplicase un esfuerzo mayor a este límite, el material alcanzaría un comportamiento plástico con deformaciones irreversibles. Dado que identificar con precisión este punto puede ser complicado, se utiliza un criterio convencional que especifica que el Límite Elástico es la tensión correspondiente a una deformación específica previamente establecida, normalmente, del 0,2 %.

La Resistencia a la Tracción (σ_m) es el esfuerzo máximo recogido durante el ensayo de tracción.

El Módulo de Young o Módulo de Elasticidad en tracción (E_t), es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en

el intervalo de deformación comprendido entre 0,05 y 0,25%.

Los resultados obtenidos (Figura 7) muestran que tanto el σ_y y como la σ_m presentan una tendencia lineal creciente: a mayor densidad de relleno, mayor es el valor de estos parámetros. En el caso del σ_y puede deberse a que un mayor porcentaje de relleno supone una mayor sección a través de la cual distribuir la tensión de manera uniforme, retrasando el punto en el que la deformación se vuelve plástica. Por otro lado, en el caso de la σ_m puede deberse a que una mayor cantidad de huecos conlleva más puntos críticos donde se pueden iniciar fracturas, haciendo que la zona de deformación reversible se vea reducida. Los resultados obtenidos para el E_t se ajustan a una curva exponencial directamente proporcional a la densidad de relleno. Cabe destacar que para la Serie 1, el E_t concuerda con lo especificado con la Ficha Técnica de la materia prima (2760 MPa frente a unos 2636 MPa, respectivamente).

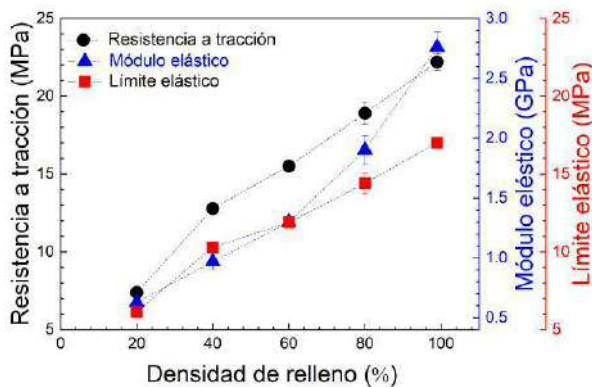


Figura 7. Comparación del σ_y , σ_m , y E_t obtenidos para las 5 series.

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN.

La Figura 8 muestra una representación de las curvas de tensión (σ_c)-deformación (ϵ_c) de las 5 Series ensayadas a compresión.

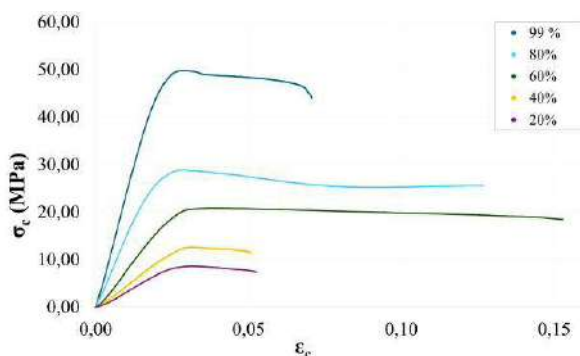


Figura 8. Curvas σ - ϵ de cada una de las Series.

A partir de los datos de tensión-deformación obtenidos durante los ensayos, es posible determinar el Esfuerzo de Elasticidad en compresión y la Resistencia a la Compresión, detallados a continuación.

El Módulo de Elasticidad en compresión (E_c) se calcula de forma análoga al E_t en tracción. Su valor se determina normalmente como el valor de la pendiente en el intervalo de deformación comprendido entre el 0,05 y 0,25%, pero debido a que no hay datos suficientes en ese intervalo, se toma el intervalo entre el 0,15 y el 0,25%.

La Resistencia a la Compresión (σ_m) es el esfuerzo máximo soportado durante el ensayo de compresión.

Atendiendo a la Figura 9, se puede comprobar cómo a medida que aumenta la densidad de relleno ambos parámetros aumentan siguiendo una tendencia exponencial.

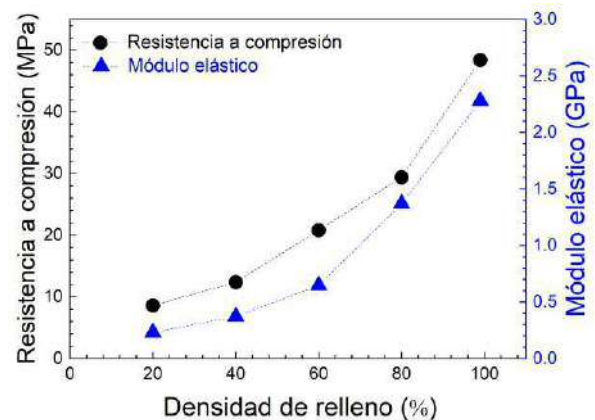


Figura 9. Comparación del E_c y σ_m obtenidos para las 5 series.

9. CONCLUSIONES.

Las propiedades mecánicas de las probetas impresas con PLA 3D850 están íntimamente relacionadas con la densidad de relleno, especialmente en el caso de los módulos elásticos. Por lo general, a mayor módulo elástico, mejor características mecánicas. También, se observa que, respecto a las tensiones de tracción, cuanto menos densidad de relleno menor es el límite elástico y la resistencia a la tracción. Por último, cabe destacar que, en compresión, al aumentar la densidad de relleno se consigue una mayor resistencia a la compresión y un aumento del módulo de elasticidad.

10. AGRADECIMIENTOS.

Parte de este trabajo ha sido financiado por el Proyecto ProID2024010034 de la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACIISI) y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional en el marco del programa FEDER Canarias 2021-2027.

11. REFERENCIAS

- [1] Grimm, T. Users Guide to Rapid Processing; SME, 2004.
- [2] UNE-EN ISO 178. 2020. Plásticos. Determinación de Las Propiedades de Flexión.
- [3] UNE-EN ISO 527-1. 2020. Plásticos. Determinación de Las Propiedades de Tracción.
- [4] UNE-EN ISO 604 Plásticos. Determinación de Las Propiedades En Compresión.

DESARROLLO DE UNA BASE DE DATOS DE ALEACIONES DE ALTA ENTROPÍA PARA SU APLICACIÓN EN SISTEMAS TES

Inés Utrero¹, Camila Barreneche¹, Lorena Betancor¹, Sergi Dosta¹

¹ Departamento de Ciencia de Materiales y Química Física, Universitat de Barcelona, inesutrero@gmail.com; c.barreneche@ub.edu; lorenabetancor@ub.edu; sdosta@ub.edu

Resumen

El presente trabajo desarrolla una base de datos de aleaciones de alta entropía (HEAs) aplicadas a sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) en plantas termosolares. El objetivo principal es mejorar la durabilidad de los tanques de sales fundidas frente a procesos de corrosión y desgaste. Para ello, se recopiló más de 700 aleaciones a través de la base de datos Scopus y se emplearon herramientas como el software Ansys Granta Constructor y Selector. En el caso de estudio, se identificaron dos aleaciones, TiC-CoCrFeNi y CoCrFeNiNb, que ofrecen un equilibrio óptimo entre resistencia a la corrosión y al desgaste. Los resultados obtenidos respaldan el avance tecnológico en sistemas TES y contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: aleaciones de alta entropía, almacenamiento de energía térmica, corrosión, desgaste, termosolares, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN.

El cambio climático y la dependencia de combustibles fósiles impulsan al uso de energías renovables.

Una de las energías más eficientes y limpias, es la energía solar térmica, capaz de generar electricidad aprovechando un recurso inagotable como es el sol. Este tipo de plantas suele incorporar sistemas de almacenamiento térmico (TES) para asegurar un suministro energético continuo, incluso cuando no hay radiación solar directa. De esta forma, es primordial garantizar la durabilidad, eficiencia y rendimiento de dichos sistemas.

Sin embargo, los tanques de sales fundidas presentan problemas de corrosión y desgaste. Son fabricados normalmente de acero inoxidable, se enfrentan a condiciones extremas en contacto con sales fundidas, lo que reduce su vida útil por corrosión y desgaste [1]. Ante esta situación, este trabajo se basa en el desarrollo de una base de datos de aleaciones de alta entropía (HEAs) que garantice la durabilidad de los tanques de almacenamiento térmico (TES) en plantas termosolares seleccionando el material más adecuado que minimice los procesos de corrosión [2] y desgaste de sus componentes debido al entorno donde se encuentren [3].

Las aleaciones de alta entropía (HEAs) son combinaciones de elementos con proporciones casi o equiatómicas[4], las cuales mejoran las propiedades mecánicas, térmicas y químicas en comparación a las aleaciones tradicionales. Este tipo de materiales tienen

buena resistencia frente a las altas temperaturas y a la corrosión, siendo una opción óptima para mejorar la vida útil de los sistemas TES y así mejorar la eficiencia energética de las plantas termosolares.

1.1 Energía solar térmica.

Las plantas solares de concentración (CSP) o plantas termosolares se basan en el principio de concentrar la radiación solar directa en un único punto.

Para maximizar su efectividad y aumentar la eficiencia de este tipo de plantas se introdujeron los sistemas de almacenamiento térmico (TES) o también conocidos como tanques de sales fundidas. Permite almacenar energía para garantizar el consumo durante las horas en las que el sol no irradia energía.

1.2 Aleaciones de alta entropía HEAs.

Las aleaciones de alta entropía (HEAs) se caracterizan por estar formadas por cuatro o más elementos principales, que, a diferencia de las aleaciones tradicionales, presentan una composición equiatómica o casi equiatómica; lo cual quiere decir que no tienen un elemento predominante y por ello sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas son mejoradas.

Existen cuatro efectos que caracterizan las propiedades de estos elementos:

- El efecto de alta entropía.
- El efecto de difusión lenta
- El efecto de distorsión de la red
- El efecto cóctel de propiedades.

Debido a estas propiedades, los HEAs son buenos candidatos como recubrimientos para tanques TES que operan a alta temperatura en medios corrosivos.

2. OBJETIVOS.

El objetivo principal del trabajo es desarrollar una base de datos de aleaciones de alta entropía (HEA), e identificar y seleccionar el material más adecuado para implementarlo como recubrimiento en los tanques de sales de una termosolar. Además, se busca aplicar un caso de estudio de selección de materiales para identificar las aleaciones más adecuadas frente a corrosión y desgaste.

2.1 Objetivos de desarrollo sostenible.

Las energías renovables son conocidas por los aspectos positivos que generan en el entorno ambiental; sin embargo, estas energías presentan impactos ambientales negativos ya que generan residuos que pueden causar daños en el medio ambiente y en el hábitat de diferentes especies; impactos que afectan al entorno. En el caso de las termosolares, provocan deslumbramientos en las aves que les ocasionan desorientación y a su vez fallecimiento e impactos.

Este proyecto tiene como objetivo mejorar la eficiencia y durabilidad de los tanques de almacenamiento de energía de las termosolares (TES) que concuerda con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [5], contribuyendo con el desarrollo de tecnologías que favorecen la eficiencia energética y la sostenibilidad ya que este tipo de elemento genera impactos ambientales, tanto en su fabricación, como en su uso y al final de su vida útil.

Se puede destacar:

- ODS 7: *Energía asequible y no contaminante.*
- ODS 9: *Industria, Innovación e Infraestructuras.*
- ODS 12: *Producción y Consumo Responsable.*
- ODS 13: *Acción por el clima*

3. CASO DE ESTUDIO.

3.1 Planteamiento del problema.

Uno de los principales problemas es la alta corrosividad del entorno, debido al uso de sales fundidas a altas temperaturas. A medida que hay un aumento de temperatura estas sales pueden reducirse a óxidos que incrementan la corrosión del medio y hay riesgo de tener una corrosión acelerada.



Figura 1. ODS correspondientes a la selección de aleaciones de alta entropía (HEAs) como recubrimiento para mejorar la durabilidad de los sistemas de almacenamiento (TES).

3.2 Metodología.

La metodología se basó en tres fases principales:

3.2.1. Selección de la información.

La metodología se basó en recopilar información sobre HEAs mediante Scopus, obteniendo datos de más de 757 aleaciones de alta entropía con datos experimentales recientes que permiten evaluar su comportamiento frente a condiciones de alta temperatura y ambientes corrosivos [6].

3.2.2. Desarrollo de la base de datos.

Primeramente, se trabajó con Microsoft Excel, registrando todas las propiedades recopiladas, y posteriormente fueron migradas al software Ansys Granta Constructor [7]. Para facilitar su análisis, se clasificaron en seis grandes categorías: propiedades físicas, mecánicas, magnéticas, térmicas, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión. Este esquema permitió identificar patrones y comparar aleaciones.

Tabla 1. Clasificación de las diferentes propiedades de los HEAs

Propiedades físicas	Densidad (kg/m ³) Estructura cristalina
Propiedades mecánicas	Módulo de Young (GPa)
	Límite elástico (MPa)
	Resistencia a la tracción (MPa)
	Resistencia a la compresión (MPa)
	Elongación (%)
Propiedades magnéticas	Dureza Vickers (HV)
Propiedades térmicas	Magnetización de Saturación (emu/g)
Resistencia al desgaste	Conductividad térmica (W/m°C)
	Ratio desgaste volumétrico (mm ³ /Nm)
	Ratio de erosión (m ³ /mm ³)
	Ratio de desgaste (mm ³ /m)
Resistencia a la corrosión	Coefficiente de fricción (COF)
	Densidad de corriente de corrosión (μA/cm ²)
	Potencial de corrosión (V)
	Ratio de corrosión (mm/año)

3.3 Selección de material.

El seleccionar un recubrimiento que mejore el contacto entre el sólido y el fluido al transporta el calor y optimice la transferencia de energía térmica, es el objetivo principal de este estudio. Cuando se combinan diferentes propiedades y parámetros del material para mejorar un objetivo concreto, el rendimiento del material se determina mediante el índice de material.

Se establecieron umbrales limitantes para la densidad de corriente de corrosión ($I_{corr} \leq 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), el potencial de corrosión ($E_{corr} \geq -0.4 \text{ V}$) y la tasa de desgaste volumétrico ($\leq 1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) [7].

Con estos datos se elaboró un índice de material que combina las dos propiedades más críticas —resistencia a la corrosión y resistencia al desgaste—, de modo que se pudiera identificar el equilibrio más favorable.

$$M = \frac{1}{a \cdot R_{\text{corrosión}} + b \cdot R_{\text{desgaste}}}$$

Fig 2. Índice de material

Además, se tuvo en cuenta las distintas técnicas de aplicación de recubrimientos como High Velocity Oxy-Fuel (HVOF), Atmospheric Plasma Spray (APS) o Spark Plasma Sintering (SPS)[8].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El resultado principal de este trabajo es la creación de una base de datos que permitió filtrar las aleaciones de alta entropía más prometedoras. A partir de ella se aplicó un índice de material (Fig 2.).

Cuando se crea un conflicto en la elección del objetivo; la mejor opción es buscar el material que se acerque a optimizar mejor ambas propiedades. La elección más viable es la que cumpla con todas las restricciones, aunque no optimice ninguno de los objetivos.

Por ese motivo, se representó por un lado la densidad de corrosión de las diferentes aleaciones de alta entropía, tal como se muestra en la Figura 1.

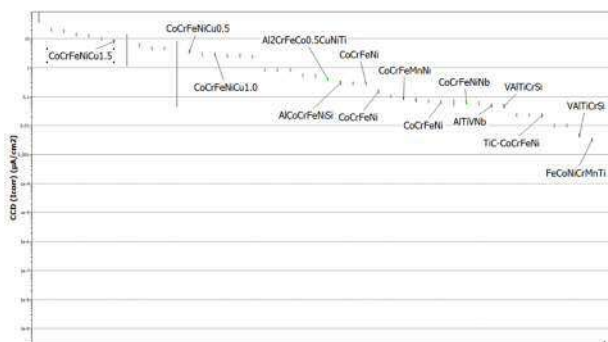


Figura 1. Densidad de corrosión I_{corr} de aleaciones de alta entropía HEAS

Y en el segundo caso se mostró la distribución de las aleaciones de alta entropía según su tasa de desgaste (Figura 2).

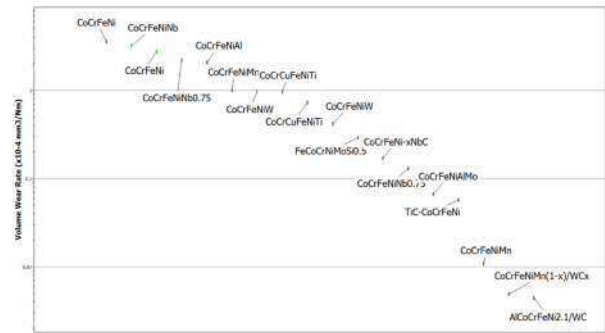


Figura 2. Tasa de desgaste volumétrico para aleaciones de alta entropía HEAS

Finalmente se representó el valor del índice de material seleccionado que garantiza buena resistencia a la corrosión y al desgaste. Los materiales con mayor valor de índice de material (M) muestra un mayor equilibrio frente a los mecanismos de degradación, a su vez penaliza los materiales que son deficientes según los datos recopilado en una de las propiedades seleccionadas; aunque sean excelentes en la otra.

Por ello, con los datos recopilados se mostró que teóricamente el TiC-CoCrFeNi y CoCrFeNiNb son las opciones más equilibradas [9] para entornos de altas temperaturas y ambientes corrosivos.

En ambos casos, el índice de material alcanzó valores elevados, confirmando un buen equilibrio entre resistencia a la corrosión y al desgaste. La primera, al incluir titanio y carbono, consigue formar capas protectoras densas y estables, mientras que la segunda, gracias a la incorporación de niobio, presenta una notable mejora en la estabilidad de la película pasiva, aunque con la necesidad de controlar la cantidad de este elemento [8].

Estos resultados son relevantes porque demuestran que la aplicación de HEAs en TES no solo tiene una base científica sólida, sino que también supone una mejora directa frente a los aceros inoxidable, que hoy en día son la opción más utilizada. Además, extender la vida útil de los tanques no solo reduce los costes de sustitución, sino que disminuye el impacto ambiental asociado al consumo de materiales y la generación de residuos.

No obstante, el trabajo también muestra la necesidad de continuar ampliando la base de datos con nuevos estudios experimentales, en particular aquellos que evalúen las HEAs en condiciones de operación reales de plantas termosolares [9].

5. CONCLUSIONES.

Este proyecto se basa en la creación de una base de datos estructurada de más de 700 aleaciones de alta entropía con propiedades mecánicas, térmicas y químicas relevantes.

Mediante el uso de software de selección Ansys Granta Constructor y Selector se ha podido construir una base de datos técnica y aplicar filtros restrictivos que ha facilitado la selección del HEAs más adecuado para aplicarlos como recubrimientos en los sistemas de almacenamiento de energía (TES).

Se ha aplicado un caso de estudio de selección de materiales para sistemas TES, identificando como más viables las aleaciones TiC-CoCrFeNi y CoCrFeNiNb, las cuales garantizan una mayor durabilidad de los sistemas de almacenamiento de energía (TES).

Demostrar que el uso de HEAs como recubrimiento mejora la durabilidad y eficiencia de los sistemas TES, contribuyendo a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible.[10]

Estos resultados pueden ser la base para futuras investigaciones centradas en la aplicación real de HEAs en entornos termosolares, donde la durabilidad del material sea un factor crítico.

6. REFERENCIAS.

- [1] S. Dosta, L. Betancor, and C. Barreneche, "Overview of surface engineering technology to improve the energy efficiency in concentrated solar power (CSP) plants," Oct. 15, 2024, *Elsevier B.V.* doi:10.1016/j.solmat.2024.113090.
- [2] Liu J. et al., Influence of alloying elements on corrosion resistance of HEAs, *J Alloys Compd.*, 2024.
- [3] Fujieda T. et al., Mechanical and corrosion properties of CoCrFeNiTi HEAs, *Addit. Manuf.*, 2019.
- [4] Ujah C.O. et al., Corrosion characteristics of HEAs by spark plasma sintering, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2024.
- [5] Muñoz Velasco P., Tema 4: Energía Solar Térmica, UNIR, 2025.
- [6] Zhang Y. et al., Microstructures and properties of high-entropy alloys, *Prog Mater Sci*, 2014.
- [7] Barreneche C. et al., Database on phase change materials for TES, *Energy Procedia*, 2014.
- [8] Zhang F. et al., Developments in CoCrFeNi-based HEAs coatings, *J Alloys Compd.*, 2025.
- [9] Hua W. et al., Progress in seasonal TES based on supercooled phase change materials, *Energy Storage*, 2023.

[10] Naciones Unidas, La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, 2030.

NORMAS DE PRESENTACION DE LA REVISTA “MATERIAL-ES” [12 ptos]

[Línea en blanco 10 ptos]

A. Pérez¹, M. Martínez¹, J. López² [11 ptos]

[Línea en blanco 10 ptos]

¹Centro y dirección 1, antper@unizere.es [11 ptos]

²Centro y dirección 2 [11 ptos]

[4 Líneas en blanco 10 ptos]

Resumen: En el siguiente texto se presentan las normas para la presentación de los trabajos completos. (*El formato en el que se presenta el presente texto, sirve de orientación a la estructura del trabajo*). El no cumplimiento de estas directrices puede implicar la exclusión del trabajo en la revista.

[Línea en blanco 10 ptos]

Palabras clave: palabras clave que caractericen el contenido del artículo separadas por comas.

[2 Líneas en blanco 10 ptos]

1. EXTENSIÓN.

Se admitirán trabajos completos de hasta 4 páginas (excepto en artículos invitados, que pueden ser de mayor longitud) incluyendo todas las secciones, ajustándose al formato que se indica a continuación. Para su correcto procesamiento, el fichero resultante deberá tener un tamaño menor a 5 MB.

2. FORMATO GENERAL.

Los márgenes serán de 2 cm en todos los casos (superior, inferior, derecha e izquierda). El texto debe ajustarse a 2 columnas (Excepto el Título, Autores y Resumen), con espaciado entre columnas de 1cm. Se utilizará espaciado simple entre líneas de texto dejando una línea en blanco entre párrafos (sin sangrado), así como entre el texto y el encabezado siguiente. La primera línea después de un encabezado tendrá un espaciado anterior de 6 ptos para separarlo del encabezado.

Tipo de letra para el texto principal: Times New Roman 10.

3. TÍTULO.

Centrado la parte superior de la primera hoja sin dejar espacio. Letra: Times New Roman 12, mayúsculas y **negrita**.

4. AUTORES.

El nombre de los autores constará centrado debajo del título, dejando una línea en blanco de 10 ptos. Tipo de letra: Times New Roman 11 **negrita cursiva** y en minúsculas. Deberá subrayarse el nombre del autor que presenta el trabajo y la pertenencia a distintos centros se indicará con un superíndice detrás del nombre.

Tras una línea en blanco, se indicará la filiación de los autores. Debe hacerse constar la dirección de correo electrónico del autor de correspondencia. La dirección de cada centro, en su caso, se incluirá en una línea diferente. Times New Roman 11.

5. RESUMEN.

No debe exceder de 150 palabras. Se colocará debajo de los autores tras 4 líneas en blanco (tamaño 10 puntos). Tras el resumen se colocarán las palabras clave con un espacio en blanco de 10 puntos. El texto principal a doble columna comenzará tras dos líneas en blanco de las palabras clave.

6. ENCABEZADOS.

Los encabezamientos de los distintos apartados se mecanografiarán en mayúsculas y en negrita y serán numerados correlativamente. Los subencabezados, en su caso, deberán ir en minúsculas y subrayados. En todos los casos se acabará con un punto.

Se dejará un espacio en blanco antes del encabezado, pero la primera línea de texto tras el encabezado tendrá un espaciado de párrafo de 6 puntos, siempre con interlineado sencillo. Los subapartados, se numerarán por orden de aparición con el nº de apartado seguido del subapartado seguido cada uno de punto, con espaciado de párrafo anterior de 6 puntos. No se debe poner espaciado anterior y posterior a la vez, para mantener la distancia en 6 puntos.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1. Materias primas.

Texto correspondiente. Párrafo con espaciado posterior 6 ptos.

7. ECUACIONES Y FÓRMULAS.

Se recomienda mecanografiar las fórmulas dejando una línea en blanco antes y después de las mismas y consignando su número de referencia entre paréntesis en el margen derecho. Las ecuaciones deben citarse en el texto antes de aparecer.

8. FIGURAS Y TABLAS.

Las figuras aparecerán insertadas en el lugar del texto que les corresponda.

Como norma general, las tablas y figuras deberán ocupar el ancho de columna, aunque en caso necesario pueden prepararse para abarcar el ancho de hoja. Las figuras, a las que se hará referencia en el texto sin destacar ni en negrilla ni en cursiva, aparecerán numeradas correlativamente y con un pie de figura que tendrá la estructura que se muestra en el siguiente ejemplo:

Figura 1. Sección longitudinal del pliegue 2 A. Pliegue en la parte interna del codo. 2,4x.

Las tablas tendrán el mismo tipo de letra que el texto, anteponiendo a cada tabla el número y título correspondiente en la forma que se indica:

Tabla 1. Composición química de los aceros.

La leyenda de las tablas se pondrá justo encima de la tabla, mientras que los pies de figura se pondrán justo debajo de la figura.

9. REFERENCIAS.

Se citarán en el texto con el número correspondiente entre corchetes: [1]. Aparecerán agrupadas en la última sección. Las referencias se numerarán correlativamente en el orden que aparecen en el texto, con la forma siguiente:

[1] Kamdar, M. H., “Embrittlement by Liquid and Solid Metals”, Ed. The Metallurgical Society, 1984.

SCIENTIFIC JOURNAL "MATERIAL-ES" GUIDELINES FOR PRESENTATION

[Blank line 10 points]

A. Pérez¹, M. Martínez¹, J. López² [11 ptos]

[Blank line 10 points]

1 Group and address 1, antper@unizere.es [11 ptos]

2 Group and address 2 [11 ptos]

[Blank line 10 points]

[Blank line 10 points]

[Blank line 10 points]

[Blank line 10 points]

Summary: In the following text are described the guidelines for presenting complete works. (*The format in which this text is presented, serves as an orientation of the work structure*). Failure to comply these guidelines may involve the exclusion of the work from the magazine.

[Blank line 10 points]

Keywords: keywords that characterize the article content separated by commas.

[Blank line 10 points]

[Blank line 10 points]

1. EXTENSION.

Full papers of up to 4 pages (excepting invited articles that could be longer) including all sections following the format rules given herein are welcome. For a correct processing, the resulting file size must be less than 5 MB.

2. GENERAL FORMAT.

The margins will be 2 cm in all cases (upper, lower, right and left). The text must be adjusted to 2 columns (except the Title, Authors and Summary), with 1 cm. spacing between columns. Simple spacing will be used between lines of text leaving a blank line between paragraphs (without bleed), as well as between the main text and the next section heading. The first line after the heading will have a paragraph space of 6 points.

Main text formatted in Times New Roman font size 10.

3. TITLE.

At the top of the first sheet, centered without leaving space. Times New Roman font size 12, caps and **bold**.

4. AUTHORS.

The name of the authors will be centered below the title, leaving a blank line of 10 points. Type of letter: Times New Roman font size 11 **bold, italics and lowercase**. The name of the author presenting the work should be underlined, and membership to different groups will be indicated by a superscript after the name.

After a blank line, the authors affiliation will be indicated. The rapporteur's e-mail address must be included. In the case of postgraduate and master students it is recommended to provide the email of one of their supervisors, due to their intrinsic temporality. Each center's address, if so, will be included in a different line, Times New Roman font size 11.

5. SUMMARY.

It will not exceed 150 words in the English version. It will be placed below the authors after 4 blank lines (10 points size). After the summary, the keywords will be given, with a space of 10 points in between. The main text in double column will begin after the keywords separated by two blank lines.

6. HEADINGS.

Different sections headings will be typed in **CAPITAL LETTERS, BOLD** and will be numbered correlatively. Subheadings, if applicable, should be lowercase and underlined.

The text will be separated from the next heading by a blank line, but after the heading, the first line of text will not have blank line, although it must have a paragraph spacing of 6 points. The subsections will be numbered in the order of appearance with the section number followed by the subsection, each followed by a point, with a previous paragraph spacing of 6 points. Previous and subsequent spacing should not be applied at the same time to maintain a distance of 6 points.

Example:

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE.

2.1. Raw materials.

Texto correspondiente. Párrafo con espaciado posterior 6 ptos.

7. EQUATIONS AND FORMULAS.

It is recommended to type the formulas leaving a blank line before and after them and entering their reference number in parentheses in the right margin. Equations should be cited before appearing in the text.

8. FIGURES AND TABLES.

The figures will appear inserted in the corresponding place of the text.

As a general rule, tables and figures should occupy the column width, although if necessary they can be prepared to cover all the sheet width. The figures, to

which reference will be made in the text, will appear numbered correlatively and with a figure foot that will have the structure shown in the following example:

Figure 1. Longitudinal section of the fold 2 A. Fold in the inner elbow side. 2,4x.

The tables will have the same format as the text, placing the corresponding number and title before each table as shown:

Table 1. Chemical composition of steels.

The legend of the tables are put above the table, while the explanation of the figures appear as foot below them.

9.REFERENCES.

They will be cited in the text with the corresponding number in brackets: [1]. They will be presented grouped in the last section. The references will be numbered correlatively in the order they appear in the text, with the following form:

[1] Kamdar, M. H., “Embrittlement by Liquid and Solid Metals”, Ed. The Metallurgical Society, 1984.