

Artículo Técnico

CEREA 3D: La Nueva Frontera de la Cerámica Arquitectónica. Fabricación Aditiva, Economía Circular y Resiliencia Climática mediante sistemas de enfriamiento pasivo industrializados

Carmen Galán-Marín, José Pérez-Fenoy, Carlos Rivera-Gómez, Eduardo Diz-Mellado, Adriano Jiménez-Guerrero



El proyecto CERECA 3D plantea una aproximación integrada que combina fabricación aditiva, diseño paramétrico y materiales cerámicos de alta porosidad para desarrollar soluciones pasivas de acondicionamiento climático aplicables a la arquitectura contemporánea.

Producto: Ladrillo
Dirigido a: Proyectistas y constructores
Contenidos: Diseño y construcción

1. INTRODUCCIÓN: EL PARADIGMA DE LA EDIFICACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

El sector de la edificación se encuentra en una encrucijada crítica. Actualmente, es responsable de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y de aproximadamente el 40% de la demanda energética global. Ante este escenario, la arquitectura debe evolucionar desde una concepción de barrera estática hacia una “piel activa”, entendida como una envolvente capaz de interactuar dinámicamente con las condiciones ambientales mediante mecanismos de regulación térmica, lumínica e hídrica que contribuyan a reducir la demanda energética operacional de los edificios (Galán-Marín & Rivera-Gómez, 2021).

En el contexto específico del área mediterránea, el fenómeno antropogénico del sobrecalentamiento urbano y el efecto de isla de calor no solo compromete el confort térmico de los ciudadanos, sino que dispara la demanda de refrigeración mecánica, creando un círculo de consumo energético y emisiones (Zhang et al., 2020). Este desafío exige el desarrollo de tecnologías que viabilicen los edificios de consumo casi nulo (nZEB) impulsados por la Comisión Europea.

Es en este marco donde surge el proyecto CERECA 3D (Sistema de acondicionamiento térmico pasivo mediante celosía impresa en Cerámica Evapotranspirativa Arquitectónica). Esta investigación propone una revisión tecnológica de los procesos de producción de la cerámica tradicional mediante procesos de fabricación avanzada (Melero-Tur et al., 2025). El sistema busca hibridar el conocimiento existente del enfriamiento evaporativo con las herramientas de fabricación propias de la Industria 4.0, como es la fabricación aditiva de elementos cerámicos. De esta forma se logra una solución que actúa como un sumidero térmico pasivo en espacios de transición como patios y galerías (Diz-Mellado et al., 2024; Galán-Marín & Rivera-Gómez, 2021).

2. ESTADO DEL ARTE Y CONTEXTO TECNOLÓGICO: DE LA CERÁMICA TRADICIONAL A LA INDUSTRIA 4.0

Históricamente, la cerámica ha sido el material por excelencia en la arquitectura mediterránea debido a su durabilidad, inercia térmica y abundancia local. Sin embargo, su industrialización en el siglo XX se centró en la estandarización masiva, limitando la complejidad geométrica que los sistemas pasivos requieren para ser verdaderamente eficientes.

El sector de la construcción, y específicamente el de los materiales cerámicos, requiere de sinergias innovadoras para adaptarse a la nueva situación productiva y tecnológica global. La evolución del sector marca una tendencia hacia procesos cada vez más industrializados donde el nivel de prefabricación se incrementa para optimizar plazos y costes (Galán-Marín & Rivera-Gómez, 2021).

2.1. De la Cerámica Tradicional a la Fabricación Aditiva LDM

Tradicionalmente, la producción industrial de cerámica se ha basado en procesos de prensado o extrusión lineal (imagen 1). Estas técnicas convencionales han limitado la complejidad geométrica de las piezas a moldes estandarizados, restringiendo la libertad formal en el diseño arquitectónico (Galán-Marín & Rivera-Gómez, 2021; Jiménez-Guerrero et al., 2023).

Frente a este modelo, la Fabricación Aditiva por Deposición Líquida (LDM), comúnmente conocida como impresión 3D de arcilla, permite la creación de objetos mediante el apilamiento sucesivo de capas sin necesidad de moldes costosos (Fig. 1) (Galán-Marín & Rivera-Gómez, 2021; Melero-Tur et al., 2025). Mientras que la impresión 3D en construcción se ha centrado mayoritariamente en materiales cementicios, la arcilla ofrece ventajas orientadas a la función evapotranspirativa: una alta capacidad higroscópica, porosidad natural y una mayor circularidad material (Jiménez-Guerrero et al., 2023). El reto actual reside en la transición de la producción artesanal de piezas aisladas hacia la fabricación industrial de sistemas constructivos completos (Jiménez-Guerrero et al., 2023).

Más allá de una innovación estrictamente productiva, la fabricación aditiva aplicada a la cerámica supone un cambio de paradigma arquitectónico. La posibilidad de producir geometrías complejas, personalizadas y climáticamente adaptativas permite que la envolvente deje de concebirse como un elemento homogéneo y repetitivo para transformarse en un sistema capaz de responder activamente a las condiciones ambientales. De este modo, la impresión 3D no solo amplía la



Figura 1. Comparativa visual entre la fabricación tradicional de piezas de arcilla cocida (izquierda) y la Fabricación Aditiva (LDM) (derecha).

libertad formal del proyecto arquitectónico, sino que posibilita el desarrollo de componentes capaces de integrar simultáneamente funciones estructurales, climáticas y espaciales en una única pieza constructiva.

2.2. Innovación en Materiales y Economía Circular: Hacia una Cerámica Funcional

La transición hacia una construcción sostenible exige el paso de materiales pasivos a sistemas activos de bajo impacto. El proyecto CERE 3D contempla la modificación de pastas cerámicas tradicionales mediante la incorporación de residuos una línea de investigación respaldada por estudios recientes que exploran la “arquitectura circular”.

La literatura científica integrada en el proyecto destaca que la adición de residuos no solo es una estrategia de gestión de desechos, sino una vía para mejorar las propiedades térmicas y físicas de la cerámica. Estudios previos han validado que la inclusión de subproductos como serrín o lodos minerales (Fig. 2) permite controlar la red de porosidad del material, optimizando su capacidad para retener y evaporar agua sin comprometer la estabilidad estructural:

- **Residuos Vegetales (Polvo de corte de madera):** Siguiendo investigaciones como las de Cultrone et al. (2020) y Muñoz et al. (2019), el uso de agentes porógenos orgánicos es clave. El serrín, al calcinarse durante la cocción, genera una red de macro y microporosidad que, en las mezclas de CERE 3D (específicamente la combinación de arcilla Amarilla + polvo de corte de madera), ha permitido alcanzar una porosidad abierta superior al 50%. Este fenómeno es esencial para la capacidad de almacenamiento hídrico necesaria para el enfriamiento evaporativo.



Figura 2. Proceso de mezclado de residuos. Arcilla amarilla y lodos de corte de mármol (columna izquierda) y arcilla roja y polvo de corte de madera (columna derecha).

- **Residuos Minerales (Lodos de corte de mármol):** Referencias como Khan et al. (2021) señalan que el polvo de mármol mejora las propiedades térmicas y mecánicas de los ladrillos ligeros. En este proyecto, los lodos de mármol actúan como estabilizadores dimensionales, compensando la pérdida de densidad que provoca el serrín y asegurando que la pieza no colapse durante la extrusión o el secado.

2.3. Evolución de los Sistemas Evapotranspirativos

El uso del enfriamiento evaporativo en la arquitectura tradicional ha sido recurrente, pero su industrialización ha sido limitada por los procesos de fabricación convencionales. La revisión de la literatura y de patentes realizada en el marco del proyecto CERE 3D revela una amplia gama de antecedentes:

- **Envolventes modulares:** Sistemas como el *Cool Brick* ya exploraban la impresión 3D para piezas cerámicas evaporativas, mientras que el sistema Ecooler se centraba en celosías cerámicas tradicionales.
- **Fachadas activas:** Soluciones como la “fachada-botijo” (Patente ES-2386470_A1) o paneles de fachada ventilada con mini-aljibes (*Cold Spot*) han sentado las bases para el uso de cerámica porosa en el enfriamiento pasivo.

A pesar de estos antecedentes, la mayoría de las soluciones existentes presentan limitaciones derivadas de la estandarización geométrica, la escasa integración entre comportamiento climático y diseño arquitectónico, o la dificultad para su escalabilidad industrial. En este contexto, el principal aporte de CERE 3D reside en combinar diseño paramétrico, fabricación robótica y materiales cerámicos de alta porosidad en un único sistema constructivo capaz de optimizar simultáneamente el rendimiento térmico, la personalización geométrica y la viabilidad industrial. El proyecto aborda así un vacío existente entre las investigaciones experimentales a pequeña escala y la posibilidad real de transferir sistemas evapotranspirativos cerámicos al ámbito de la construcción industrializada contemporánea.

2.4. Posibilidades de la Impresión 3D (LDM) en la Cerámica

La integración de la robótica industrial, como el uso de impresoras 3D o brazos robóticos controlados mediante entornos de programación avanzada, permite automatizar la producción de elementos cerámicos geométricamente complejos y adaptables, frente a las limitaciones propias de las técnicas tradicionales de fabricación (Fig. 3). Esta convergencia tecnológica facilita que la cerámica deje de ser un material meramente pasivo para convertirse en una “piel activa” funcional, capaz de absorber, retener y evapotranspirar agua de forma controlada (Galán-Marín & Rivera-Gómez, 2021; Melero-Tur et al., 2025). La tecnología de Liquid Deposition Modelling (LDM) abre un abanico de posibilidades que la industria tradicional no puede cubrir:

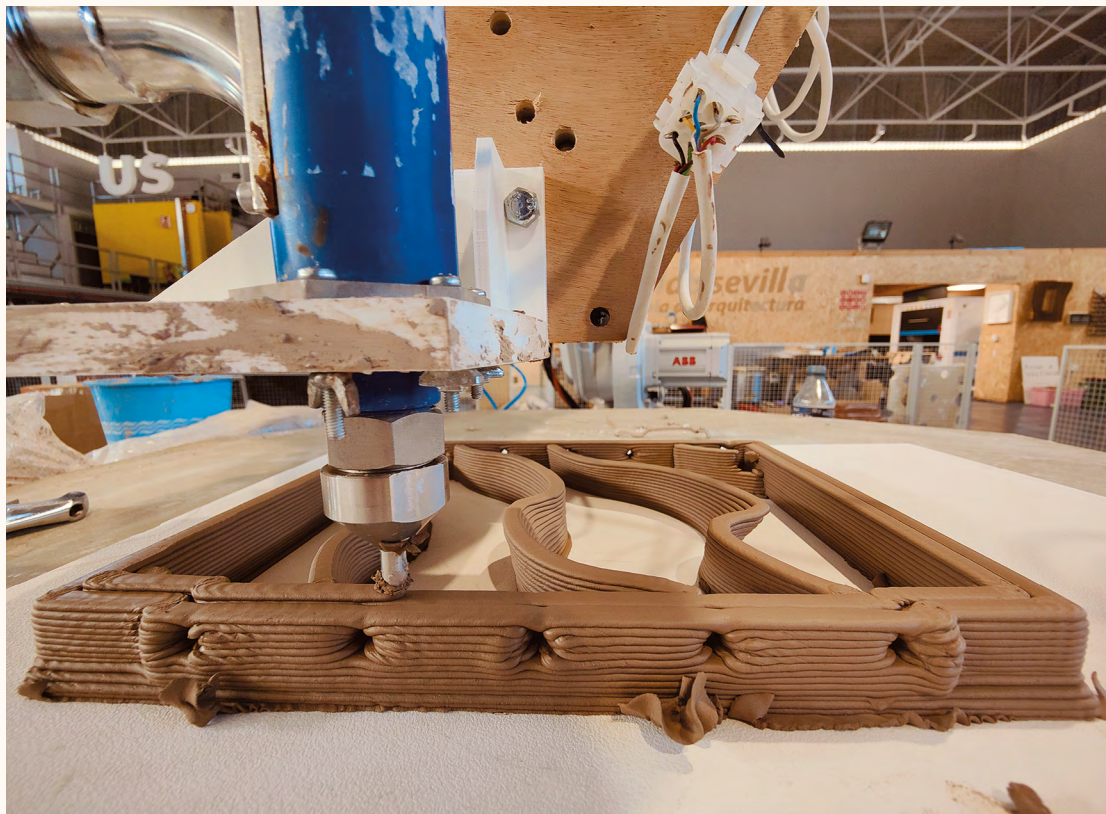


Figura 3. Proceso de conformado de una de las geometrías de celosías complejas desarrolladas para los prototipos del proyecto.

1. **Optimización del Trayecto (Toolpathing):** A diferencia de la extrusión por molde, la impresión 3D permite diseñar la trayectoria del robot para crear canales internos de ventilación. Estudios como el de Diz-Mellado et al. (2025) demuestran que ajustar parámetros como el ancho del trazo y la superposición de capas permite controlar con precisión la rugosidad superficial, lo que aumenta la superficie de intercambio térmico.
2. **Complejidad Geométrica y Personalización:** Se pueden fabricar celosías con variaciones de apertura según la radiación solar específica de cada punto de la fachada. Esto se logra mediante el diseño paramétrico (Rhino/Grasshopper), traduciendo datos climáticos en coordenadas de impresión (G-Code) de forma automática.
3. **Aplicaciones en Restauración y Patrimonio:** Como detalla el documento *Enhancing 3D-Printed Clay Models for Heritage*, la combinación de escaneo 3D e impresión de arcilla permite replicar piezas cerámicas históricas desaparecidas con una precisión milimétrica, integrando además las mejoras térmicas del sistema CERE 3D en edificios protegidos.
4. **Reducción de Desperdicios:** El proceso es inherentemente más limpio; el material sobrante en estado crudo (antes de la cocción) es 100% reciclable dentro del mismo proceso de impresión, eliminando el residuo de fabricación.

3. EL PROYECTO CERE 3D

En este contexto de transición hacia sistemas constructivos más adaptativos, circulares y energéticamente eficientes, el proyecto CERE 3D plantea una aproximación integrada que combina fabricación aditiva, diseño paramétrico y materiales cerámicos de alta porosidad para desarrollar soluciones pasivas de acondicionamiento climático aplicables a la arquitectura contemporánea.

El proyecto CERE 3D surge como respuesta tecnológica a la necesidad de incrementar la resiliencia climática de las ciudades y edificios mediterráneos. Financiado por la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía, el proyecto es el resultado de una colaboración interdisciplinar liderada por la Universidad de Sevilla, en conjunto con la Fundación INNOVARCILLA, la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad San Pablo CEU y el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) (Fig. 4).



Figura 4. Logotipo del proyecto CERE 3D y de las instituciones participantes. Financia Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía.

3.1. Concepto y Ámbito de Aplicación

El objetivo central es desarrollar un sistema de celosías industrializadas que aprovechen el fenómeno físico del enfriamiento evaporativo potenciado por una de las herramientas de la Industria 4.0: la impresión 3D robótica y el diseño paramétrico. El sistema conjuga dos principios biofísicos fundamentales:

- **Enfriamiento Latente:** Basado en la absorción de calor producida durante el cambio de estado del agua de líquido a vapor, aprovechando la elevada porosidad de las matrices cerámicas para almacenar humedad y favorecer su evaporación progresiva, reduciendo así la temperatura del aire circundante.
- **Enfriamiento Sensible:** Asociado a la disminución directa de la ganancia térmica mediante una geometría optimizada que maximiza el sombreado, el autosombreado y el control de la radiación solar incidente sobre la envolvente arquitectónica.

La diferencia fundamental entre ambos procesos radica en cómo gestionan la energía térmica: mientras que el enfriamiento sensible reduce directamente la temperatura al bloquear la radiación, el enfriamiento latente la reduce mediante un intercambio de energía, donde el calor del aire se consume para evaporar el agua sin alterar la carga energética total del sistema.

El ámbito constructivo previsto para esta solución es versátil, abarcando desde el mobiliario urbano y los espacios de transición (patios, galerías y corredores) hasta soluciones de fachada de doble piel.

3.2. Objetivos de la Investigación

El objetivo general es el desarrollo de un nuevo sistema de celosía fría industrializada basado en piezas cerámicas prefabricadas en módulos de alta porosidad que mejoren el rendimiento energético y el confort térmico de los edificios frente a las soluciones constructivas convencionales.

Para operativizar este propósito, la investigación se divide en cuatro objetivos específicos:

1. **Optimización de Matrices Porosas:** Analizar procedimientos para incrementar la porosidad mediante la inclusión de residuos industriales (economía circular), garantizando la estabilidad y la capacidad de ser extruidas robóticamente.
2. **Desarrollo de Modelos y Sistemas:** Diseñar y definir constructivamente cada una de las partes de la celosía, adecuando las geometrías complejas a los criterios compositivos actuales para maximizar la superficie de intercambio aire-agua.
3. **Industrialización mediante Fabricación Digital:** Validar el uso de la Fabricación Aditiva (LDM) y el diseño paramétrico para la producción estandarizada y escalable de componentes que no serían viables mediante moldes o extrusión tradicional.
4. **Validación en Prototipo Real:** Realizar pruebas piloto y monitorización microclimática en un edificio real para comprobar la efectividad del sistema.

Este enfoque permite que la cerámica deje de ser un material pasivo para convertirse en una “piel activa” que actúa como un sumidero térmico, reduciendo la dependencia de sistemas de climatización mecánicos (Melero-Tur et al., 2025).

4. ARQUITECTURA CIRCULAR: MATRICES CERÁMICAS POROSAS EN EL PROYECTO CERE3D

La transición hacia una construcción verdaderamente sostenible, en continuidad con las estrategias de innovación material y economía circular descritas en el apartado 2.2, exige que el sector evolucione desde el uso de materiales meramente pasivos hacia sistemas activos de bajo impacto ambiental. En el marco del proyecto CERE3D, esta evolución se ha materializado a través de una línea de investigación en ciencia de materiales centrada en la modificación de pastas cerámicas tradicionales mediante la incorporación de residuos industriales (Fig. 5),

alineándose con los principios de la economía circular y reduciendo la huella de carbono del material. El objetivo no es solo la gestión de subproductos industriales, sino la creación de matrices cerámicas con propiedades higrótérmicas optimizadas para el enfriamiento evaporativo.

4.1. Estrategias para el incremento de la porosidad: Caracterización de matrices arcillosas, agentes porógenos y subproductos industriales

El rendimiento de una celosía evapotranspirativa depende directamente de su capacidad para absorber, retener y evaporar agua. Para maximizar este fenómeno de calor latente, la investigación se centró en analizar procedimientos para incrementar la porosidad abierta de las matrices cerámicas garantizando su estabilidad hídrica y mecánica.

Se exploraron diversas técnicas de procesamiento, incluyendo el espumado directo de suspensiones cerámicas consolidado mediante gelificación y el uso de réplicas de esponjas poliméricas. Sin embargo, la vía más prometedora por su alineación con el principio *Do No Significant Harm* (DNSH) fue la inclusión de residuos orgánicos e inorgánicos que actúan como agentes porógenos o estabilizadores estructurales.

Se evaluaron tres tipos de arcillas base para su uso en un proceso de impresión 3D LDM: Arcilla Roja, Blanca y Amarilla. Cada una presentó comportamiento reológico distinto:

- **Arcilla Blanca:** Destacó por su elevada plasticidad debido a un alto contenido en esmectitas. Esta propiedad permitió emplear las presiones de extrusión más bajas de todo el estudio realizado en el proyecto, facilitando la impresión de geometrías complejas; no obstante, mostró una mayor sensibilidad a las variaciones de humedad y una tendencia superior a la contracción durante el secado.
- **Arcilla Roja:** Presentó la menor plasticidad intrínseca, lo que derivó en un rango de humedad imprimible muy estrecho y una mayor demanda de presión. Para optimizar su comportamiento, requirió el uso de silicato sódico como defloculante, logrando mejorar su fluidez en niveles bajos de humedad y garantizando una excelente estabilidad dimensional con menor riesgo de retracción tras la cocción.
- **Arcilla Amarilla:** Se consolidó como el material más equilibrado y versátil, presentando el índice de plasticidad más alto de los ensayos acometidos. Su composición proporcionó el rango de humedad imprimible más amplio sin necesidad de uso de aditivos, lo que permitió una mayor flexibilidad en su formulación y un balance óptimo entre facilidad de extrusión y estabilidad estructural de las capas.



Figura 5. Probetas conformadas mediante fabricación aditiva LDM de diferentes arcillas y residuos en diferentes porcentajes.

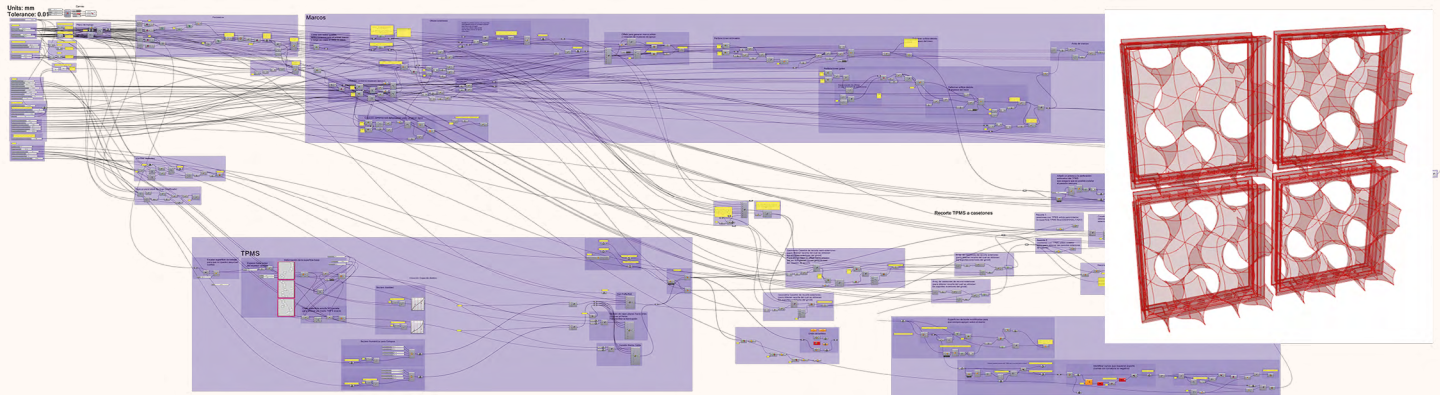


Figura 6. Definición del algoritmo paramétrico desarrollado en Grasshopper para la generación y control geométrico de las celosías.

Caracterizadas las arcillas, se planteó la incorporación de subproductos industriales de la zona, principalmente polvo de corte de madera (residuo lignocelulósico) y lodos de mármol (residuos minerales calizos), para maximizar el efecto “botijo” (enfriamiento evaporativo), era esencial aumentar la porosidad abierta del material tras la cocción.

- **Polvo de corte de madera (Residuo Vegetal):** El polvo de aserrado de madera se incorporó a la mezcla de arcilla actuando como un agente de sacrificio. Durante el ciclo de sinterización a 980°C, el serrín se calcina, dejando en su lugar una red de microporosidad abierta interconectada. Los ensayos realizados en el marco del proyecto han demostrado que es posible alcanzar niveles de porosidad superiores al 50% en mezclas con arcilla amarilla, una cifra significativamente superior a la de la cerámica convencional, lo que resulta esencial para la retención hídrica y la posterior evaporación adiabática. Utilizado como agente generador de poros.
- **Lodos de Mármol (Residuo Mineral):** Procedentes del corte de rocas calizas, estos lodos se integran por su fracción mineral finamente dispersa. Estos lodos fueron incorporados para evaluar su impacto en la estabilidad mecánica y dimensional. Se descubrió que estos residuos ayudan a compensar las contracciones de secado y mejoran la resistencia final, ofreciendo un equilibrio óptimo entre porosidad y viabilidad estructural.

5. PROCESO: DISEÑO PARAMÉTRICO, FABRICACIÓN ROBÓTICA LDM Y SISTEMA CONSTRUCTIVO

La verdadera innovación del proyecto CERE 3D radica en la sinergia entre el diseño computacional y la fabricación aditiva, una integración que permite trascender las limitaciones de la industria cerámica convencional (Jiménez-Guerrero et al., 2023). Este enfoque unifica la libertad formal del diseño paramétrico con el rigor industrial de la robótica, transformando datos climáticos y geométricos en componentes constructivos de alta eficiencia.

5.1. Flujo de trabajo y optimización multiobjetivo

El proceso comienza con la definición de un modelo paramétrico desarrollado en el entorno de Rhinoceros 3D y Grasshopper (Fig. 6) (Jiménez-Guerrero et al., 2023; Galán-Marín & Rivera-Gómez, 2021). A diferencia de los métodos tradicionales, este sistema permite generar variaciones geométricas instantáneas mediante la modificación de parámetros clave como la distancia entre lamas, el espesor de la celda o el ángulo de apertura (Diz-Mellado et al., 2024; Jiménez-Guerrero et al., 2023).

Para garantizar el máximo rendimiento higratérmico y lumínico, el diseño se somete a un proceso de optimización multiobjetivo utilizando algoritmos genéticos como Octopus. Este tipo de algoritmos someten el diseño a numerosas simulaciones de radiación y luz natural (motores *EnergyPlus* y *Radiance* vía *Ladybug Tools*). En cada una de las iteraciones se modifican los parámetros de diseño con el fin de optimizar los indicadores clave de rendimiento (KPIs), con el objetivo además de resolver una contradicción clásica en arquitectura: maximizar el sombreado para reducir el calor y, a la vez, garantizar la entrada de luz natural. Los KPIs analizados (Jiménez-Guerrero et al., 2023) son los siguientes:

- **Irradiancia Promedio:** Para minimizar la ganancia térmica solar.
- **Autonomía de Luz Natural:** Para asegurar niveles de confort lumínico interior.
- **Volumen Material:** Como indicador directo del coste y la sostenibilidad.

Este bucle de retroalimentación permite identificar las geometrías de “Pareto”, que equilibran un rendimiento óptimo con un consumo mínimo de material.

5.2. Metodología de Fabricación: Robótica e Industria 4.0

Una vez definida la geometría óptima, el modelo digital se traduce directamente en trayectorias de impresión (Toolpathing) sin necesidad de moldes (Diz-Mellado et al., 2025). La producción de las piezas se ha estandarizado en las instalaciones de la Fundación Innovarcilla y el FabLab de la Universidad de Sevilla, utilizando un brazo robótico industrial ABB IRB 4600. El sistema de impresión, basado en la tecnología Liquid Deposition Modeling (LDM), consta de los siguientes elementos:

- **Extrusor WASP XL 3.0:** Equipado con un motor de alto torque para procesar pastas densas y boquillas intercambiables de 2 a 8 mm.
- **Tanque de 5L:** Un depósito de aluminio certificado para trabajar a presiones constantes, permitiendo una alimentación continua del material.
- **Ecosistema de Control:** Integración del software COMPAS para el control del brazo robótico ABB IRB 4600 y una placa Arduino UNO para la sincronización del flujo de extrusión.

5.3. Parámetros Críticos del proceso LDM

La transición del modelo digital a la pieza física depende del control estricto de la reología de las pastas. La investigación realizada ha determinado que el éxito de la impresión reside en la optimización de tres parámetros fundamentales (Diz-Mellado et al., 2025):

1. **Humedad de la Mezcla:** Debe mantenerse en un rango crítico (típicamente entre el 20% y 25%, dependiendo de la arcilla) para evitar tanto el colapso dimensional (*slumping*) como la aparición de grietas por falta de plasticidad.
2. **Presión de Extrusión:** Ajustada generalmente entre 2 y 4 bar, asegurando un flujo constante que evite discontinuidades internas o burbujas de aire.
3. **Velocidad de Impresión:** Optimizada entre 15 y 40 mm/s, garantizando una adherencia perfecta entre las capas superpuestas, lo cual es vital para el comportamiento mecánico del material.

Este método de fabricación no solo facilita la creación de geometrías de alta complejidad - imposibles de fabricar mediante extrusión o prensado - sino que permite diseñar canales internos de ventilación y rugosidades controladas que maximizan la superficie de intercambio aire-agua, potenciando así el enfriamiento evaporativo del sistema final.

5.4. Definición del Sistema Constructivo y Estandarización

Otro de los objetivos inherentes del proyecto CERE 3D es la transición desde la pieza aislada hacia un sistema constructivo completo y escalable (Fig. 7). Para ellos el sistema se concibe bajo principios de industrialización y prefabricación, buscando optimizar la puesta en obra y reducir los plazos de ejecución. Esto incluye:



Figura 7. Prototipo del sistema constructivo experimental desarrollado en el proyecto.

- **Piezas Cerámicas Singulares:** Desarrollo de piezas base y piezas especiales para la resolución de puntos singulares, como esquinas o remates, garantizando la continuidad estética y funcional.
- **Soportes y Anclajes:** Integración de sistemas de sustentación que permiten un montaje en seco, rápido y preciso, evitando la improvisación en obra.
- **Sistema de Humectación:** Integración estética de la instalación de agua necesaria para activar el fenómeno de evapotranspiración de forma controlada.

De esta forma, con este enfoque de arquitectura circular y digital se pretende que este tipo de revestimientos evolucionen hacia una “piel activa” industrializada, donde cada componente está optimizado para su orientación geográfica y necesidades específicas de confort.

6. CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES CERÁMICOS CERE3D

La validación del sistema CERE3D ha requerido una evaluación integral que abarca desde la integridad estructural de las piezas hasta su capacidad de modificación microclimática (Fig. 8). A diferencia de los componentes cerámicos tradicionales, los elementos fabricados mediante Fabricación Aditiva por Deposición Líquida (LDM) presentan una complejidad interna derivada de su proceso de producción capa a capa, lo que define tanto su respuesta mecánica como su eficiencia termodinámica.

6.1. Comportamiento mecánico

Uno de los hallazgos más críticos del proyecto es que el material cerámico impreso no se comporta como un bloque isótropo. La superposición de cordones de arcilla genera una estructura similar a la de un material compuesto, con un comportamiento elástico ortotrópico condicionado por la trayectoria del cabezal de impresión.

Los ensayos de flexión y compresión realizados bajo normativa europea (EN 843-1 y EN 1926:2006) confirman que la resistencia es máxima en la dirección del trazo de impresión (Eje X) y disminuye significativamente en las juntas. Se han identificado las siguientes pérdidas de resistencia respecto al eje continuo:

- **Dirección Y (Juntas verticales, entre trazos contiguos):** Presenta una reducción de entre el 24% y el 51% en resistencia a compresión y una pérdida de hasta el 76% en flexión.

- **Dirección Z (Juntas horizontales, entre capas superpuestas):** Muestra en la resistencia a compresión entre una leve mejora del -5% hasta una pérdida del 20%, mientras que en flexión se sitúa en reducciones de resistencia de entre el 46% y el 63%.

Para garantizar la durabilidad, se ha implementado el control de calidad mediante ultrasonidos y tomografía de rayos X, permitiendo detectar discontinuidades internas y burbujas de aire que podrían comprometer la estabilidad del sistema. Aunque se confirmó el comportamiento ortotrópico en la propagación de ondas, los resultados indicaron que la velocidad ultrasónica no se correlaciona linealmente con la resistencia mecánica, lo que obliga a un control de calidad basado en la densidad y la homogeneidad de la adhesión entre capas.

6.2. Caracterización Bioclimática y Rendimiento Térmico

Más allá de su viabilidad estructural, la caracterización bioclimática confirma el potencial del sistema desarrollado en el proyecto CERE3D como una “piel activa” para la resiliencia climática. El sistema combina dos fenómenos físicos para mejorar el confort térmico en climas cálidos: el enfriamiento latente y el enfriamiento sensible.

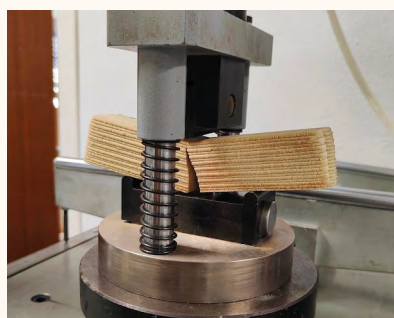


Figura 8. Ensayo de resistencia a flexión sobre probetas de material conformadas mediante fabricación aditiva LDM (imagen superior) y ensayo en túnel de viento para comprobar el rendimiento de enfriamiento de diferentes geometrías (imagen inferior).



- **Enfriamiento Latente (Evapotranspiración):** Gracias a la optimización de la porosidad abierta, que alcanza el 52,92% en las mezclas con residuo de serrín, la celosía funciona como un sumidero térmico pasivo. En condiciones de baja humedad relativa, la evaporación del agua retenida en la matriz cerámica puede reducir la temperatura ambiente local entre 5°C y 8°C.
- **Enfriamiento Sensible (Sombreado):** La libertad formal de la impresión 3D permite geometrías con “rugosidad controlada” y canales de ventilación internos que maximizan la superficie de contacto aire-agua. Mediante optimización paramétrica, se ha logrado que las piezas generen un autosombreado dinámico que minimiza la irradiación solar en la fachada sin sacrificar la autonomía de luz natural.

Los resultados de monitorización y simulación indicaron que el acondicionamiento térmico de espacios de transición (como patios y galerías) mediante este sistema puede suponer una **reducción de hasta un 11% en el consumo energético** de refrigeración de las estancias interiores colindantes. Esto posiciona a los componentes de CERE3D como soluciones industriales de alto valor añadido para edificios de consumo casi nulo (nZEB).

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE TRANSFERENCIA AL SECTOR

La investigación desarrollada en el marco del proyecto CERE 3D concluye que la convergencia entre la **cerámica circular** y la **fabricación robótica** constituye una vía preferente para la industrialización del sector de la edificación. El sistema trasciende el uso de la cerámica como material meramente pasivo, transformándolo en una **piel activa** capaz de mitigar los efectos del cambio climático en entornos urbanos mediterráneos.

7.1. Conclusiones Principales de la Investigación

Tras tres anualidades de desarrollo, los resultados obtenidos validan la eficacia del sistema en tres ejes fundamentales:

- **Viabilidad Material y Circularidad:** Se ha demostrado la capacidad de las arcillas tradicionales (Roja, Blanca y Amarilla) para integrar hasta un 25% en peso de residuos industriales (serrín y lodos de mármol) sin comprometer la integridad estructural para aplicaciones de envolvente. La mezcla de arcilla amarilla con serrín ha permitido alcanzar una porosidad abierta del 52,92%, propiedad crítica para maximizar el enfriamiento por evapotranspiración.
- **Optimización Digital y LDM:** El uso del diseño paramétrico y la Fabricación Aditiva (LDM) ha permitido superar las limitaciones de los moldes convencionales, facilitando geometrías complejas que optimizan simultáneamente la entrada de luz natural y la superficie de intercambio aire-agua.
- **Impacto en la Eficiencia Energética:** Las simulaciones y pruebas en prototipos reales confirman que el acondicionamiento térmico de espacios de transición mediante estas celosías puede suponer una reducción de hasta un 11% en el consumo energético de refrigeración de los edificios.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto CERE 3D PROYEXCEL_00532 financiado por la Junta de Andalucía, Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades. Convocatoria 2021 de ayudas a proyectos de investigación de excelencia, en régimen de concurrencia competitiva, destinadas a entidades calificadas como agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento, en el ámbito del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI 2020).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelkader, M., Petrik, S., Nestler, D., & Fijalkowski, M. (2024). Ceramics 3D printing: A comprehensive overview and applications, with brief insights into industry and market. *Ceramics*, 7(1), 68–85.,
- Barbero-Barrera, M. M., Jiménez-Guerrero, A., Melero-Tur, S., Pérez-Fenoy, J., Galán-Marín, M. C., & Rivera-Gómez, C. A. (2025). *Ceramic 3D printing of constructive systems of façades. PROS and CONS*. FEMS Euromat.
- Cultrone, G., Aurrekoetxea, I., Casado, C., & Arizzi, A. (2020). Sawdust recycling in the production of lightweight bricks: How the amount of additive and the firing temperature influence the physical properties of the bricks. *Construction and Building Materials*, 235, 117436.
- Diz-Mellado, E., Jiménez-Guerrero, A., Pérez-Fenoy, J., Rivera-Gómez, C., & Galán-Marín, C. (2025). Parameter-based optimization of the 3D clay-printability. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05377.,
- Diz-Mellado, E., López-Cabeza, V. P., Rivera-Gómez, C., Naboni, E., & Galán-Marín, C. (2024). Optimizing a courtyard microclimate with adaptable shading and evaporative cooling in a hot mediterranean climate. *Journal of Building Engineering*, 88, 109167.,
- Diz-Mellado, E., Perez-Fenoy, J., Mudarra-Mata, M., Rivera-Gómez, C., & Galan-Marín, C. (2024). Enhancing 3D-Printed Clay Models for Heritage Restoration Through 3D Scanning. *Applied Sciences*, 14(23), 10898.,
- Galán-Marín, C., & Rivera-Gómez, C. (2021). *Memoria Científico-Técnica Proyecto CERE 3D: Sistema de acondicionamiento térmico pasivo mediante celosía impresa en Cerámica Evapotranspirativa Arquitectónica*. Junta de Andalucía.
- Galán-Marín, C., Jiménez-Guerrero, A., Barbero-Barrera, M. M., Melero-Tur, S., Pérez-Fenoy, J., & Rivera-Gómez, C. A. (2025). Cerámica Circular: Fabricación Aditiva con Residuos Vegetales y Minerales. En *Libro de actas Congreso Internacional sobre Arquitectura y Economía Circular* (pp. 21-22). Universidad de Valladolid.,
- Jiménez-Guerrero, A., Hortigón, B., Vázquez, E., Rivera, C., & Galán, C. (2024). *Orthotropic mechanical behavior of 3D printed ceramics: Experimental analysis and testing*. European Conference on Fracture 2024 (ECF24).,
- Jiménez-Guerrero, A., Pérez-Fenoy, J., Rivera-Gómez, C., & Galán-Marín, C. (2023). *Exploring the synergy of additive manufacturing and parametric design for sustainable ceramic building elements*. 2nd International Conference on Green Construction (ICGC2023).,
- Melero-Tur, S., Jiménez-Guerrero, A., Pérez-Fenoy, J., & Barbero-Barrera, M. M. (2025). Re-imagining the production of 3D printed ceramics through the incorporation of waste materials. En *Construction, Energy, Environment and Sustainability*. Springer Nature.,
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718.
- Yin, Xunzhi, Chong Guo, Bo Sun, Honggang Chen, Hui Wang, and An Li. (2023). The state of the art in digital construction of clay buildings: Reviews of existing practices and recommendations for future development. *Buildings*, 13(9), 2381.
- Zhang, R., et al. (2020). Increased European heat waves in recent decades in response to shrinking Arctic sea ice and Eurasian snow cover. *Climate and Atmospheric Science*, 3, 1–9.

7.2. Transferencia Tecnológica y Modernización Industrial

Uno de los pilares del proyecto es la transmisión de resultados al sector empresarial y productivo. En este sentido, la colaboración estratégica con el Centro Tecnológico de la Cerámica de Andalucía (Innovarcilla) ha sido fundamental para asegurar que los desarrollos de laboratorio sean escalables a una producción industrial real.

La estrategia de transferencia se articula mediante las siguientes acciones:

1. **Protección de la Propiedad Intelectual:** Los sistemas y piezas singulares desarrollados se encuentran en proceso de registro mediante modelo de utilidad bajo la titularidad de la Universidad de Sevilla.
2. **Dinamización del Sector Cerámico Andaluz:** El proyecto busca dotar de mayor valor añadido a los productos del clúster cerámico de Bailén, permitiéndoles diversificar su actividad hacia soluciones de climatización pasiva.

7.3. Perspectivas Futuras

El proyecto CERE 3D sienta las bases para futuras líneas de investigación centradas en la automatización completa del montaje en obra y en el estudio de la durabilidad a largo plazo de estas cerámicas altamente porosas ante ciclos de hielo-deshielo y contaminación urbana. Asimismo, se abre una línea de trabajo orientada a la optimización conjunta de geometrías y formulaciones de pasta en función de condiciones climáticas específicas, integrando datos ambientales en los procesos de diseño paramétrico y fabricación para adaptar el comportamiento higrotérmico del sistema a distintos contextos de aplicación. En última instancia, el sistema se postula como una solución industrializada y resiliente alineada con los objetivos de los edificios de consumo casi nulo (nZEB) de la Comisión Europea, ofreciendo un modelo de construcción más regenerativo y comprometido con el medio ambiente.

CERE_3D