

FORMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PASTA CERÁMICA PIGMENTADA PARA LA FABRICACIÓN ADITIVA POR *ROBOCASTING* EN ARQUITECTURA

S. Santos¹, P. Santos¹, N. Graça², R. Salgado³, H. Jorge¹

¹CTCV- Centro de Tecnologia da Cerâmica e do Vidro- Coimbra (Portugal), ² JOMAZÉ, Lda. – Alcobaça, Portugal

³Ttargetquimic, Lda – Murte de, Portugal

INTRODUCCIÓN

La cerámica ha desempeñado un papel fundamental en la arquitectura y la construcción a lo largo de la historia, destacándose por su atractivo estético, funcionalidad y durabilidad. El revestimiento cerámico de las fachadas es muy habitual, sobre todo en países con una sólida tradición cerámica, como Portugal. En ciudades como Lisboa y Oporto, los azulejos forman parte integral de la identidad urbana y patrimonial, realzando tanto el carácter visual de los edificios como su protección frente a la humedad, las fluctuaciones de temperatura y el deterioro ambiental (Kingery et al., 1976; Reed, 1995).

En las últimas décadas, los avances en las tecnologías de fabricación digital han impulsado nuevos enfoques en la producción cerámica, especialmente a través de la fabricación aditiva. La integración de materiales tradicionales y procesos digitales avanzados ha ampliado significativamente las posibilidades formales y funcionales de la cerámica, favoreciendo la producción de geometrías complejas y soluciones arquitectónicas personalizadas (Travitzky et al., 2014). Entre las diferentes técnicas aplicadas a la cerámica, destaca el *robocasting* (también denominado escritura directa con tinta o DIW por sus siglas en inglés) por su versatilidad y su capacidad para fabricar estructuras tridimensionales mediante la deposición controlada de pastas cerámicas capa a capa (Hinczewski, 1998; Lewis, 2006).

Sin embargo, el desempeño de este proceso depende en gran medida de las propiedades reológicas de la pasta cerámica utilizada. Parámetros como la viscosidad y la plasticidad influyen directamente en la estabilidad de la extrusión y en la integridad geométrica de las piezas producidas. Para las aplicaciones de impresión 3D, las formulaciones deben presentar un comportamiento pseudoplástico, lo que permite el flujo bajo tensión y la recuperación estructural tras la deposición, garantizando así la estabilidad dimensional durante el conformado (Barnes, 1989; M'Barki et al., 2017). Además, las propiedades mecánicas en crudo, como la dureza y la resistencia a la deformación, son esenciales para garantizar la estabilidad estructural de las piezas antes de la cocción (German, 1996).

En el ámbito de las aplicaciones decorativas y arquitectónicas, la incorporación de pigmentos cerámicos también reviste gran importancia, ya que permite obtener colores homogéneos y efectos visuales integrados directamente en la masa cerámica. Sin embargo, estos aditivos pueden alterar el equilibrio fisicoquímico del sistema, influyendo en la dispersión de las partículas, viscosidad de la suspensión y el comportamiento en la cocción (Eppler y Eppler, 2000). Además, la presencia de partículas finas asociadas a los pigmentos puede alterar la contracción, la porosidad y la resistencia mecánica final de las piezas (Lewis, 2006; Travitzky et al., 2014).

Por lo tanto, estudiar las relaciones entre la composición de la pasta, su comportamiento reológico, propiedades mecánicas y desempeño estético resulta esencial para el desarrollo de soluciones cerámicas innovadoras aplicadas a la arquitectura contemporánea. La combinación de la tradición cerámica y las tecnologías digitales emergentes abre nuevas posibilidades para la creación de revestimientos arquitectónicos personalizados, sostenibles y técnicamente avanzados, lo que contribuye a la evolución del lenguaje formal y constructivo de la arquitectura actual.

1. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son: analizar la influencia de las propiedades reológicas de la pasta cerámica —concretamente, la viscosidad, la plasticidad y el comportamiento pseudoplástico— en la calidad de la extrusión y la estabilidad dimensional; investigar el impacto de la incorporación de pigmentos cerámicos en el comportamiento de la pasta durante el proceso; y comparar la influencia de los pigmentos en las propiedades finales de las piezas cerámicas, incluyendo la contracción, la resistencia mecánica y el acabado estético.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales y formulaciones

Los materiales utilizados en el estudio fueron: una pasta de loza en polvo, agua del grifo (como fase continua y agente hidratante) y un pigmento cerámico inorgánico de tono marrón. El pigmento presenta una elevada estabilidad térmica y química, lo que lo hace adecuado para sistemas cerámicos (Monrós, G. 2016).

Se prepararon dos formulaciones con la pasta cerámica comercial en polvo, que se diferenciaban únicamente por la incorporación de un pigmento cerámico inorgánico. El pigmento seleccionado para su inclusión fue el pigmento marrón. La formulación sin pigmento se utilizó como control de los experimentos, lo que permitió realizar una evaluación comparativa del efecto de la adición del pigmento sobre las propiedades del material.

Las formulaciones se prepararon en porcentaje en peso (% p/p) tomando como referencia 3 kg de la formulación seca de la pasta plástica para ambas condiciones experimentales. La pasta plástica de base (formulación de control, sin pigmento) contenía un 24,7% (p/p) de agua destilada. La pasta plástica pigmentada contenía un 23,81% (p/p) de agua destilada y un 5,0% (p/p) de pigmento cerámico marrón. La diferencia del porcentaje de agua entre las formulaciones se ajustó para compensar la incorporación del pigmento, manteniendo una consistencia reológica comparable entre los sistemas.

2.2. Preparación de la pasta para el robocasting

La preparación de las muestras se llevó a cabo en condiciones de laboratorio controladas a temperatura ambiente, utilizando un mezclador planetario equipado con un gancho amasador. Inicialmente, la pasta de loza en polvo se mezcló con el agua destilada bajo agitación continua hasta lograr la completa hidratación y homogeneización de la matriz cerámica. Este proceso se realizó de forma gradual para evitar la formación de aglomerados y garantizar una dispersión uniforme. En la formulación pigmentada, el pigmento cerámico se dispersó previamente en una pequeña fracción del agua disponible para asegurar la correcta humectación de las partículas y minimizar su aglomeración. Posteriormente, esta predispersión se incorporó a la masa principal bajo agitación, asegurando una distribución homogénea del pigmento en la matriz. Tras la adición de todos los componentes, ambas formulaciones se sometieron a una etapa final de homogeneización durante 20 minutos. A continuación, las pastas se dejaron madurar durante 24 horas con el objetivo de lograr la estabilización estructural del sistema, favorecer un desaireado pasivo y alcanzar el equilibrio reológico óptimo.

2.3. Caracterización de la pasta cerámica

2.3.1. Comportamiento reológico

Se midió la curva de viscosidad de las pastas cerámicas sin pigmentar y pigmentadas a 25°C utilizando un viscosímetro rotacional NETZSCH Kinexus Lab (Figura 1). Se utilizó un perfil de rampa de velocidad de cizalla de 1 a 100 s⁻¹, con 5 puntos de medición por década. Los datos se ajustaron al modelo de la ley de potencias $\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$, donde η corresponde a la viscosidad aparente; K es el índice de consistencia, $\dot{\gamma}$ representa la velocidad de cizalla y n corresponde al índice de comportamiento reológico.

2.3.2. Difracción de rayos X (DRX)

Los análisis por difracción de rayos X (DRX) tanto de las pastas cerámicas pigmentadas como de las no pigmentadas se realizaron utilizando un difractómetro X'Pert PRO de Malvern Panalytical (Figura 2). Los análisis se llevaron a cabo con el fin de identificar las fases cristalinas presentes en las formulaciones cerámicas y de evaluar las variaciones mineralógicas asociadas a la incorporación del pigmento.



Figura 1. Viscosímetro rotacional NETZSCH **Figura 2.** Difractómetro X'Pert PRO

2.3.3. Procesos de impresión de las muestras

Las muestras se imprimieron utilizando la impresora VormVrij Lutum 5 con una boquilla de 5,5 mm de diámetro. Se depositaron cinco capas, lo que dio como resultado piezas con unas dimensiones finales de 116 × 30 × 10 mm para evaluar el comportamiento mecánico de las muestras cerámicas fabricadas mediante fabricación aditiva.

Tras la impresión, las piezas se secaron en una estufa durante 24 horas a 110 °C. Para conseguir un mejor acabado superficial, las piezas se lijaron antes de la cocción (Figura 3). Por último, la cocción se llevó a cabo a una temperatura máxima de 1100 °C, aplicando una velocidad de calentamiento controlada de 2,6 °C/min.

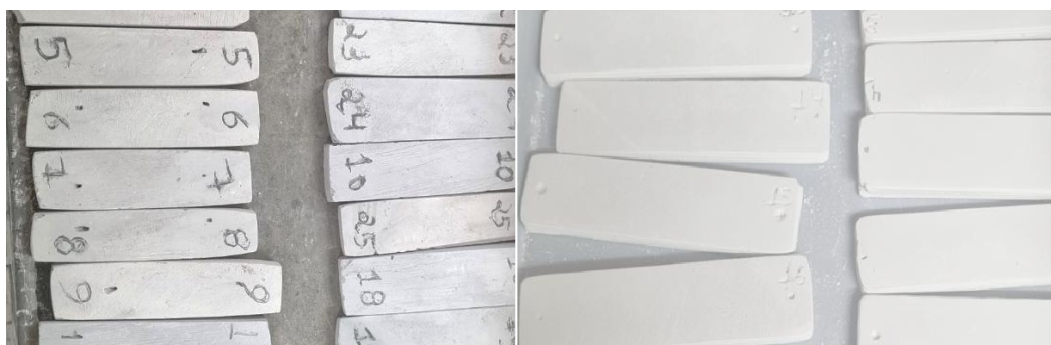


Figura 3. Muestras impresas y acabadas.

2.4. Caracterización de los materiales cocidos

2.4.1. Ensayo de flexión en tres puntos

El ensayo de flexión en tres puntos (Figura 4) es un método muy utilizado para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales sometidos a tensiones de flexión. Este ensayo permite determinar propiedades como la resistencia a la flexión y el comportamiento frente a la fractura, y resulta especialmente adecuado para materiales cerámicos, polímeros, compuestos y metales.

El ensayo de flexión en tres puntos se llevó a cabo en un equipo AMETEK LD30. La muestra se apoyó en dos puntos fijos mientras se aplicaba una carga en el centro de la misma, lo que generó tensiones de tracción en la superficie inferior y tensiones de compresión en la superficie superior. Con el aumento progresivo de la carga aplicada, el material se deformó hasta que se produjo la rotura.

El esquema básico del ensayo se describe por la ecuación (1) para la tensión máxima de flexión:

$$(1) \quad \sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2}$$

donde:

σ_f - corresponde a la tensión de flexión (MPa)

F - es la carga máxima aplicada (N)

L - representa la distancia entre los apoyos cilíndricos (mm)

b - es la anchura de la muestra (mm)

d - corresponde al espesor de la muestra (mm)

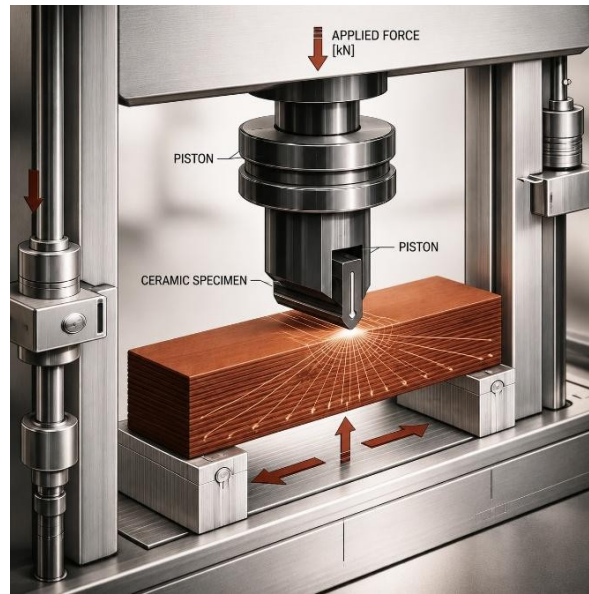


Figura 4. Diagrama del ensayo de flexión en tres puntos

2.4.2. Absorción de agua

El ensayo de absorción de agua se utiliza habitualmente para caracterizar los materiales cerámicos. Evalúa la cantidad de agua que un material puede absorber a través de sus poros abiertos. Este ensayo proporciona información importante sobre la porosidad, densificación y calidad de cocción de las piezas cerámicas. La absorción de agua está directamente relacionada con el comportamiento mecánico y la durabilidad del material.

En primer lugar, las muestras se secaron hasta alcanzar un peso constante y, a continuación, se determinó su peso en seco. Posteriormente, las muestras se sumergieron en agua hirviendo durante 3 horas. A continuación, se dejaron reposar durante 24 horas hasta que alcanzaron la temperatura ambiente. Esto permite que el agua penetre en los poros accesibles. Tras la saturación, se retiraron las muestras y se eliminó el exceso de agua de la superficie. Por último, se determinó el peso en estado saturado.

La absorción de agua se calcula a partir de la relación entre la diferencia entre la masa saturada y la masa seca, según la ecuación (2):

$$(2) \quad W_A = \frac{(W_s - W_d) \times 100}{W_d}$$

Donde:

W_A = absorción de agua (%)

W_s = peso saturado (g)

W_d = peso seco (g)

Los valores más altos de absorción de agua indican una mayor porosidad abierta, mientras que los valores más bajos se asocian a materiales más densos y con menos defectos internos. En los materiales cerámicos producidos mediante impresión 3D, el ensayo de absorción de agua es

especialmente importante para evaluar la influencia de los parámetros de proceso, la orientación de la impresión y las condiciones de sinterización en la microestructura final de las piezas. Además, este ensayo ayuda a establecer una correlación entre la porosidad y las propiedades mecánicas, lo que contribuye a la optimización del comportamiento de los materiales desarrollados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Reología

Se evaluó el comportamiento reológico de las formulaciones para caracterizar la capacidad de flujo y la estabilidad estructural de las pastas cerámicas, parámetros fundamentales para su aplicación en la fabricación aditiva mediante extrusión (*robocasting*) (Figura 5). El control reológico es crucial para asegurar no solo un buen procesado del material durante la extrusión, sino también el mantenimiento de la integridad geométrica de las piezas tras su deposición.

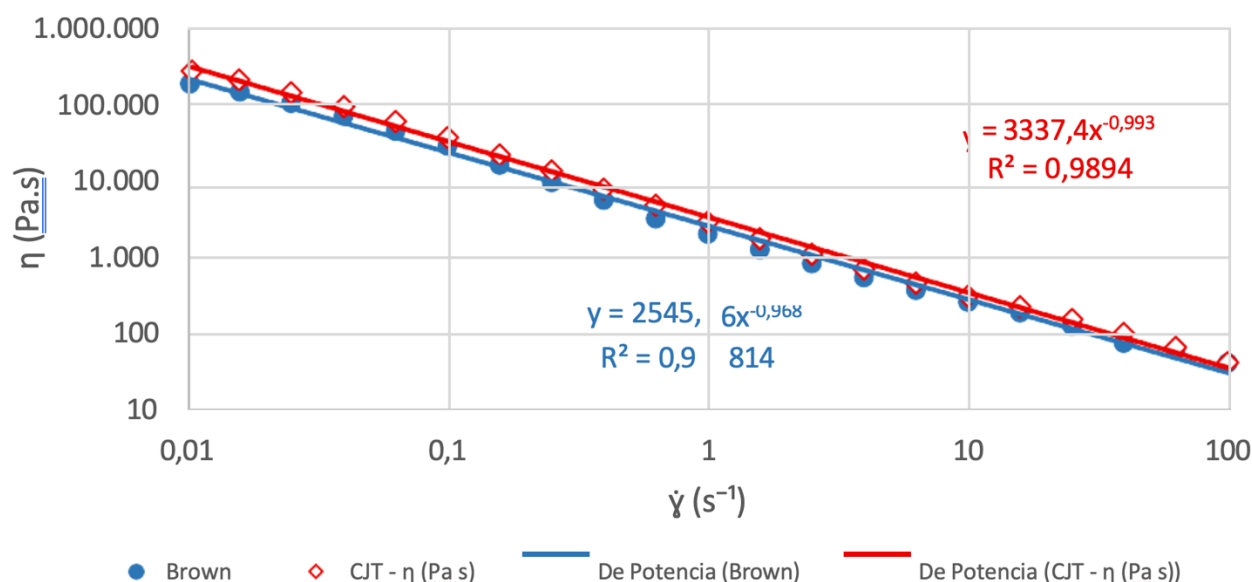


Figura 5. Curvas de flujo de la pasta cerámica pigmentada y no pigmentada.

En comparación con la pasta base, la formulación pigmentada mostró una tendencia a presentar una menor viscosidad, especialmente a bajas velocidades de cizalla. Este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de partículas de pigmento cerámico, las cuales pueden reducir la interacción entre las partículas y favorecer una menor resistencia al flujo.

A medida que aumenta la velocidad de cizalla, ambas formulaciones muestran una disminución progresiva de la viscosidad, lo que representa un comportamiento pseudoplástico, típico de las suspensiones cerámicas concentradas destinadas a procesos de extrusión. También se confirmó el comportamiento pseudoplástico, ya que el ajuste de ambos conjuntos de datos al modelo de la ley de potencias muestra un coeficiente de correlación cercano a 1 (pasta sin pigmentar $R = 0,995$; pasta pigmentada $R = 0,991$). Esto sugiere que se han roto parcialmente las estructuras internas formadas por las partículas sólidas en reposo. Este comportamiento favorece la capacidad de extrusión del material y reduce la presión necesaria para la impresión. Estos comportamientos

reológicos permiten que el material fluya bajo tensión durante la extrusión y recupere rápidamente su consistencia tras la deposición, lo que garantiza la estabilidad dimensional y minimiza las deformaciones estructurales entre las capas depositadas.

En general, los resultados indican que la incorporación del pigmento cerámico solo provocó cambios menores en el equilibrio reológico del sistema, aunque afectó moderadamente a la viscosidad aparente y al comportamiento de flujo de las pastas cerámicas. A pesar de estas variaciones, ambas formulaciones mostraron propiedades reológicas adecuadas para aplicaciones de impresión 3D por extrusión. Dichas características son fundamentales para garantizar la estabilidad dimensional, la retención de la forma y la integridad estructural del ensamblaje capa por capa a lo largo de todo el proceso de *robocasting*.

3.2. Análisis microestructural

Se llevó a cabo un análisis por difracción de rayos X (DRX) sobre ambas formulaciones cerámicas con el fin de identificar las fases mineralógicas presentes, así como para comparar las diferencias composicionales entre la pasta sin pigmentar y la pasta pigmentada (Figura 6).

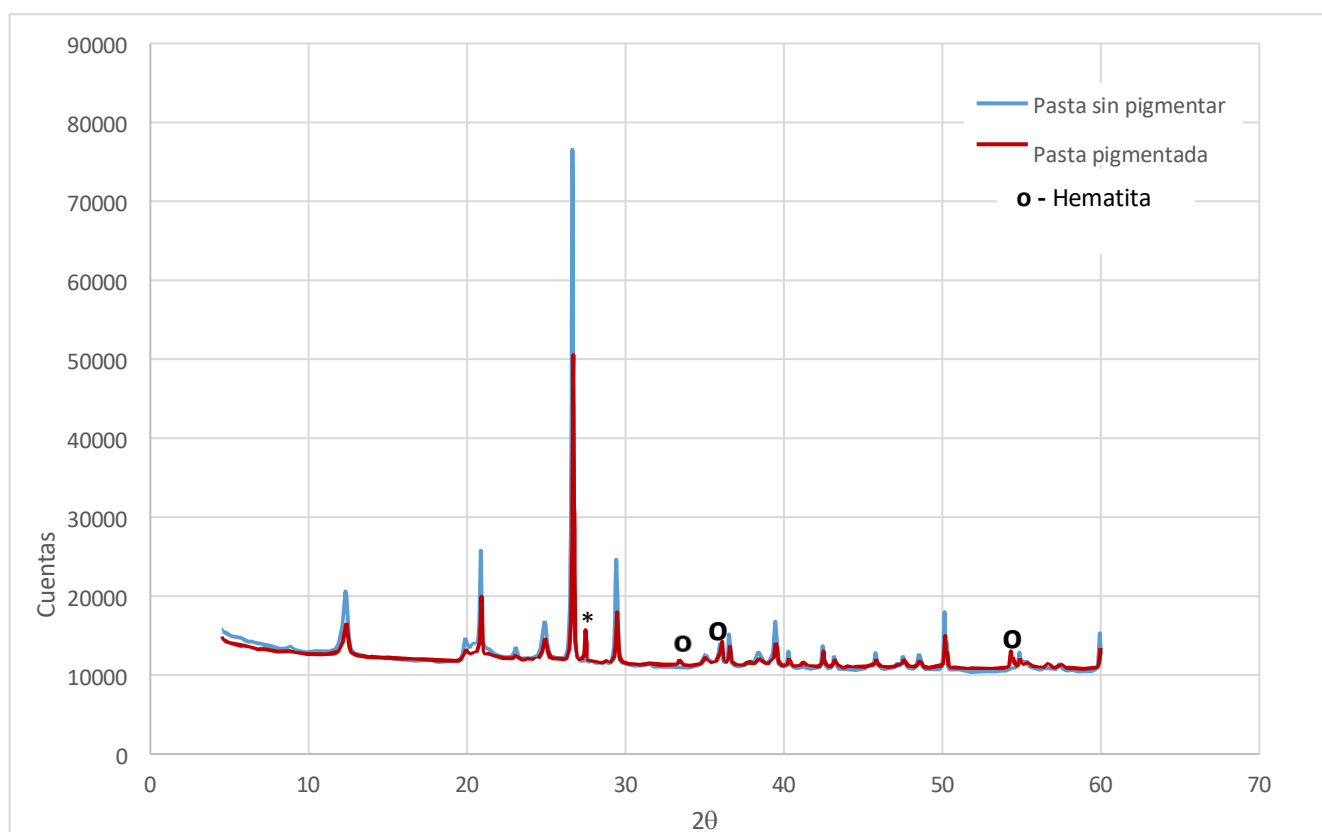


Figura 6. Difractometría de la pasta sin pigmentar y de la pasta pigmentada

El análisis por difracción de rayos X (DRX) reveló que tanto la pasta de color marrón como la pasta incolora contienen silicatos como fases cristalinas mayoritarias. No obstante, se identificaron diferencias en la composición mineralógica, las proporciones relativas y los roles funcionales de las fases constituyentes, lo que refleja los distintos roles que desempeñan las materias primas dentro del sistema cerámico.

El análisis por difracción de rayos X (DRX) de ambas pastas antes de la cocción muestra una composición idónea para el procesamiento cerámico, al contener cuarzo, caolinita, moscovita, talco y calcita. El cuarzo actúa como material desgrasante y esqueleto estructural del sistema. La caolinita destaca por su elevada plasticidad y capacidad de retención de agua, propiedades fundamentales para el conformado cerámico y la impresión 3D. Por su parte, la moscovita actúa como un silicato estructural, aportando a la estabilidad mineralógica, resistencia térmica e integridad estructural de la matriz cerámica. El talco actúa como agente fundente y lubricante, facilitando el procesamiento de la masa cerámica. La calcita desempeña el papel de componente mineral inorgánico capaz de influir en el comportamiento de masa cerámica durante la cocción. Sin embargo, la pasta pigmentada también contiene rutilo y hematita. La hematita está relacionada con el contenido en hierro, lo que contribuye directamente a la pigmentación marrón del material.

El análisis por DRX de la pasta pigmentada pone de relieve fases minerales que están asociadas principalmente a la estabilidad química y mineralógica intrínseca del sistema cerámico, lo que contribuye tanto a la integridad estructural como al desarrollo del color. La matriz, es decir, la pasta sin pigmentar, por su parte, contiene fases más directamente relacionadas con el comportamiento reológico, la plasticidad y el comportamiento en el procesado del soporte cerámico. A pesar de estas diferencias composicionales, ambas formulaciones presentan un alto contenido en silicatos, lo que confirma su compatibilidad con aplicaciones cerámicas y demuestra roles tecnológicos distintos y complementarios dentro de cada formulación.

3.3. Características del material cocido

Se comparó la resistencia a la flexión de la formulación pigmentada cocida (3D-Brown) y de la formulación sin pigmentar (3D-unpigmented), tal y como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Ensayo de flexión en tres puntos

Tal y como se muestra en la Figura 8, las muestras 3D-Brown presentaron una resistencia media a la flexión de $22,43 \pm 2,40$ MPa, mientras que las muestras 3D sin pigmentar mostraron un valor medio inferior, de $20,60 \pm 2,74$ MPa. Por el contrario, los resultados de absorción de agua revelaron una tendencia opuesta: las muestras 3D sin pigmentar presentaron el valor más alto de absorción de agua, un $20,03\% \pm 2,34\%$, mientras que las muestras 3D-Brown mostraron un valor de absorción más bajo, del $17,86\% \pm 2,47\%$.

Estos resultados combinados demuestran que la incorporación del pigmento marrón influyó positivamente tanto en el comportamiento mecánico como en el físico de la matriz cerámica. La mejora en el comportamiento a la flexión y la reducción de la absorción de agua observadas en la formulación 3D-Brown pueden estar relacionadas con modificaciones en el desarrollo microestructural del material durante la fase de cocción. La incorporación del pigmento, junto con la composición mineralógica de la matriz cerámica, puede haber favorecido una mayor densificación, reduciendo los defectos internos y la porosidad abierta dentro de la estructura.

Los valores más bajos de absorción de agua obtenidos en las muestras pigmentadas sugieren la formación de una microestructura menos permeable y más compacta, lo que también podría explicar la mejora en el comportamiento a la flexión. Una menor porosidad suele contribuir a una mejor distribución de las tensiones durante la carga mecánica, lo que minimiza la aparición y la propagación de fracturas en todo el soporte cerámico. Además, la presencia de fases minerales específicas podría haber contribuido a una transferencia de tensiones más homogénea en condiciones de flexión, mejorando así la respuesta mecánica global del material.

Los valores de la desviación estándar indican una dispersión experimental relativamente baja entre las muestras analizadas, lo que sugiere una buena repetibilidad de las mediciones y una homogeneidad satisfactoria de las muestras fabricadas. Aunque ambas formulaciones presentaron un comportamiento comparable, las muestras sin pigmentar mostraron una variabilidad ligeramente mayor tanto en los resultados de resistencia a la flexión como en los de absorción de agua.

En general, las muestras 3D-Brown combinaban una resistencia mecánica superior con una menor absorción de agua, lo que indica una mayor integridad estructural y una mejor resistencia a la humedad en comparación con la formulación sin pigmentar. Estos resultados demuestran que la incorporación del pigmento marrón no afectó negativamente a la matriz cerámica; por el contrario, contribuyó a ligeras mejoras tanto en las propiedades mecánicas como en las físicas. Por lo tanto, la formulación pigmentada parece ser una alternativa prometedora para aplicaciones con componentes cerámicos impresos en 3D que requieran una resistencia mecánica adecuada, una menor permeabilidad y características estéticas deseables.

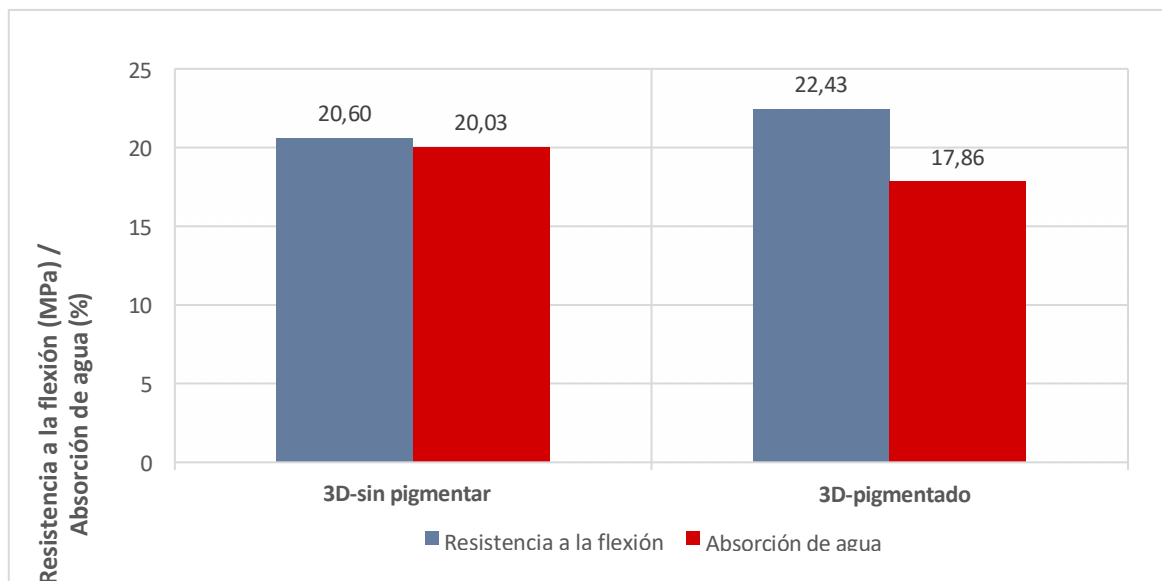


Figura 8. Comparación entre la resistencia a la flexión y la absorción de agua de pastas impresas en 3D, cocidas, con y sin pigmentos.

La respuesta de fractura observada durante los ensayos de flexión es característica de la loza tradicional, que suele presentar un comportamiento mecánico frágil (Figura 9). Las muestras presentaron una fractura repentina sin deformación plástica significativa, lo que indica una rápida propagación de la grieta bajo las tensiones de tracción generadas durante la flexión. Esta respuesta está relacionada con las características microestructurales intrínsecas de los materiales cerámicos, como la presencia de poros y otras heterogeneidades estructurales que actúan como puntos de concentración de tensiones y favorecen la rotura brusca.

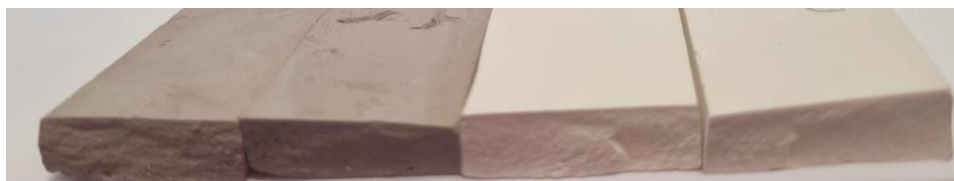


Figura 9. Superficie de fractura de las muestras impresas en 3D del soporte con pigmentación marrón (izquierda) y del soporte sin pigmentar (derecha).

4. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos demostraron que la incorporación del pigmento marrón provocó cambios en las propiedades reológicas, mineralógicas y tecnológicas de la pasta cerámica. En cuanto al comportamiento reológico, la pasta pigmentada presentó una viscosidad menor en comparación con la pasta no pigmentada, lo que indica una mayor capacidad de flujo y mayor facilidad de procesamiento durante las fases de conformado.

Como era de esperar, las dos composiciones cerámicas en crudo estudiadas mostraron picos característicos comparables en la difracción de rayos X, lo que indica la presencia de fases

minerales comunes entre las pastas. Sin embargo, la pasta pigmentada también presentaba la fase de hematita, ausente en la pasta no pigmentada. Esto sugiere que la adición del pigmento introdujo hematita —un mineral conocido por conferir una coloración marrón— modificando así la composición mineralógica del material. El comportamiento térmico y estructural de la cerámica durante la cocción pudo verse influido por la presencia de hematita, origen de la coloración marrón observada.

Los ensayos realizados con el material cocido mostraron una mejora en las propiedades mecánicas de la pasta pigmentada. En el ensayo de resistencia a la flexión, la muestra pigmentada presentó un valor de 22,34 MPa, superior al obtenido para la pasta no pigmentada, que fue de 20,60 MPa. Los resultados de absorción de agua mostraron un comportamiento superior de la pasta pigmentada, que presentó una absorción del 17,86%, mientras que la pasta no pigmentada registró un 20,03%. Este resultado sugiere una mayor densificación y una mejor cohesión estructural del material que contiene pigmento.

A partir de estos estudios, se ha confirmado que la adición del pigmento marrón no solo modificó el color de la pasta cerámica, sino que también contribuyó positivamente a sus propiedades físicas y mecánicas. Esto propició una menor viscosidad, una mayor resistencia a la flexión y una menor absorción de agua. A ello se suman los cambios mineralógicos generados por la presencia de hematita.

5. REFERENCIAS

- [1] BARNE, H. A. Shear-thickening ("dilatancy") in suspensions of nonaggregating solid particles dispersed in
- [2] Newtonian liquids. 1989.
- [3] EPPLER, R. A.; EPPLER, D. G. *Glazes and Glass Coatings*. Ohio: The American Ceramic Society, 2000. GERMAN, R. M. *Sintering Theory and Practice*. New York: Wiley, 1996.
- [4] HINCZEWSKI, C., CORBEL, S., & CHARTIER, T. Ceramic suspensions suitable for stereolithography. *Journal of the European Ceramic Society*, 18(6), 583–590. 1998.
- [5] KINGERY, W. D. et al. *Introduction to Ceramics*. 2nd ed. New York: Wiley, 1976. LEWIS, J. A. Direct ink writing of 3D functional materials. 2006.
- [6] M'BARKI, AMIN & BOCQUET, LYDERIC & STEVENSON, Adam. (2017). Linking Rheology and Printability for Dense and Strong Ceramics by Direct Ink Writing. *Scientific Reports*. 2017.
- [7] MONRÓS, G. Pigment, Ceramic. En: *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4419-8071-7_181.
- [8] REED, J. S. *Principles of Ceramics Processing*. 2nd ed. New York: Wiley, 1995. TRAVITZKY, N. et al. Additive manufacturing of ceramic-based materials. 2014.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto LiquidCerAM —Soluciones tecnológicas y materiales sostenibles para la fabricación aditiva mediante pastas cerámicas líquidas—, financiado por Portugal 2030 —CENTRO2030— UE, a través del Sistema de Incentivos a la Investigación y el Desarrollo Tecnológico, en el marco del proyecto de copromoción n.º 21637, operación n.º CENTRO2030-FEDER-01476100.