

Análisis de la estructura porosa de piezas cerámicas cocidas: influencia del agregado de aserrín en granulometrías diversas.

Analysis of the porous structure of fired ceramic pieces: influence of sawdust addition on various particle sizes.

Presentación: 06/08/2026

Doctorando:

Juan Pablo PASQUINI

<https://orcid.org/0009-0000-8922-0269>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Grupo de Estudios Ambientales, San Nicolás, Buenos Aires-Argentina.

jpasquini@frsn.utn.edu.ar

Directora:

Nancy Esther QUARANTA

Codirectora:

Gisela Guadalupe PELOZO

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la incorporación de aserrín de pino como agente generador de poros en composiciones arcillosas destinadas a la elaboración de materiales cerámicos estructurales, analizando su influencia sobre las propiedades físicas, mecánicas y microestructurales de los productos obtenidos. Las probetas fueron conformadas mediante prensado uniaxial a 25 MPa a partir de mezclas arcilla-aserrín con una adición del 2 % en peso de biomasa, empleando diferentes fracciones granulométricas ($< 0,044$ mm; 0,250–0,500 mm y 1–2 mm). Las formulaciones se acondicionaron con un contenido de humedad del 8 % y se moldearon en matrices de 70×40 mm, obteniéndose muestras de aproximadamente 15 mm de espesor. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico a 1000°C durante 3 h.

Los materiales cerámicos sinterizados exhibieron una coloración rojiza homogénea, adecuada cohesión estructural y ausencia de defectos superficiales relevantes, tales como fisuración, exfoliación o desprendimiento granular, evidenciando una correcta estabilidad dimensional durante la cocción.

Los resultados experimentales indicaron que todas las composiciones presentaron propiedades físicas y mecánicas comparables y compatibles con los requisitos normativos exigidos para su aplicación y comercialización. Asimismo, se observó que la morfología de los poros desarrollados tras la etapa de cocción conservó similitud con la geometría original de las partículas de biomasa empleadas, aunque con dimensiones reducidas. Adicionalmente, se determinó que el tamaño de poro generado corresponde aproximadamente al 60–70 % del tamaño inicial de las partículas de aserrín, lo que evidencia la posibilidad de modificar la microestructura porosa del material cerámico mediante la incorporación controlada de biomasa residual como agente formador de poros.

Palabras claves: Biomasa; Residuos; Aserrín; Cerámicos; Tamaño de partícula

Abstract

The aim of this study was to evaluate the effect of incorporating pine sawdust as a pore-forming agent into clay-based compositions intended for the production of structural ceramic materials, analyzing its influence on the physical, mechanical, and microstructural properties of the resulting products. The specimens were formed by uniaxial pressing at 25 MPa using clay-sawdust mixtures containing 2 wt.% biomass, with different particle-size fractions (< 0.044 mm, 0.250–0.500 mm, and 1–2 mm). The formulations were conditioned to a moisture content of 8% and molded in 70×40 mm dies, yielding samples approximately 15 mm thick. Subsequently, the specimens were subjected to thermal treatment at 1000 °C for 3 h.

The sintered ceramic materials exhibited a homogeneous reddish coloration, adequate structural cohesion, and no significant surface defects, such as cracking, exfoliation, or granular spalling, demonstrating good dimensional stability during firing.

The experimental results indicated that all compositions presented comparable physical and mechanical properties that were consistent with the regulatory requirements for their application and commercialization. Furthermore, it was observed that the morphology of the pores developed during firing retained similarities to the original geometry of the biomass particles used, although with reduced dimensions. Additionally, the pore size generated was found to correspond to approximately 60–70% of the initial size of the sawdust particles, demonstrating the possibility of tailoring the porous microstructure of ceramic materials through the controlled incorporation of residual biomass as a pore-forming agent.

Keywords: Biomass; Residues; Sawdust; Ceramics; Particle size

Introducción

La industria cerámica tradicional es uno de los sectores más antiguos y productivos del mundo, sustentada en la alta disponibilidad y el bajo costo de materias primas como la arcilla. No obstante, los métodos convencionales de fabricación enfrentan desafíos críticos de sostenibilidad debido al elevado consumo energético y la generación de desechos. Ante esta problemática, la investigación presentada propone una solución alineada con la economía circular: el desarrollo de materiales cerámicos con porosidad controlada mediante la incorporación de aserrín de pino, un subproducto lignocelulósico que representa hasta el 50 % del procesamiento de la madera y que a menudo carece de una gestión adecuada.

El aserrín actúa como un agente formador de porosidad estratégica. Durante la cocción a 1000 °C, la biomasa orgánica, formada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, combustiona gradualmente (San Miguel & Gutiérrez Martí, 2015), dejando huecos en la matriz arcillosa que funcionan como aislantes térmicos naturales. Este fenómeno es fundamental para la eficiencia energética en la edificación, un sector responsable del 40 % del consumo mundial de energía, ya que el aire atrapado en los poros reduce la conductividad térmica del material y, por ende, la necesidad de climatización artificial.

El objetivo de este trabajo es evaluar la incorporación de aserrín de pino residual con diferentes tamaños de partículas en ladrillos cerámicos arcillosos, y su efecto sobre las propiedades de los mismos, en especial su porosidad.

Desarrollo

Se utilizó aserrín de pino proveniente de un aserradero de Villa Constitución (Santa Fe) y una arcilla comercial suministrada por una industria cerámica de Rosario. La arcilla fue secada, molida y tamizada a una granulometría inferior a 1 mm, mientras que el aserrín se clasificó en 3 granulometrías diferentes: $< 0,044$ mm; 0,250–0,500 mm y 1–2 mm.

Las materias primas fueron caracterizadas mediante microscopía óptica (OM), microscopía electrónica de barrido con microanálisis EDS (SEM-EDS), difracción de rayos X (XRD), análisis granulométrico, pérdida por calcinación (PPC) y análisis térmico diferencial y termogravimétrico (DTA-TGA). Los productos cerámicos obtenidos se evaluaron mediante ensayos de porosidad, absorción de agua, variación volumétrica permanente (VVP), pérdida de peso por calcinación (PPC) y resistencia a la compresión, entre otros.

Las muestras se prepararon a partir de mezclas de arcilla y aserrín con contenidos de 2 % en peso de aserrín en los tres rangos granulométricos ya mencionados. Los conformados se obtuvieron por prensado uniaxial a 25 MPa en moldes de 70 x

40 mm, con 8 % de agua y espesores aproximados de 15 mm. Como referencia se elaboró una muestra sin adición de biomasa (A0). Los productos obtenidos se denominaron A1 ($<0,044$ mm), A2 (0,250-0,500 mm) y A3 (1-2 mm).

Los conformados fueron secados a temperatura ambiente y a 100 °C, y posteriormente cocidos a 1000 °C durante 3 h siguiendo condiciones similares a las empleadas industrialmente. La porosidad y la absorción de agua se determinaron según ASTM C20-00, mientras que la resistencia a la compresión se evaluó conforme a la norma IRAM 12586. Los diagramas de difracción de rayos X de los materiales en polvo que se estudian en este trabajo, fueron obtenidos con un equipo PANalytical X'Pert PRO, con radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\alpha = 1.5406\text{nm}$). Las condiciones de operación del equipo fueron 40kV y 40mA. El difractograma fue analizado con el programa HighScore de PANAnalytical.

El análisis de tamaño y forma de los poros se realizó utilizando microscopio electrónico de barrido FEI Inspect S50 y un microscopio óptico marca Zeiss-Axiotech con cámara marca Donpisha 3CCD, con digitalizador de imágenes.

Para la determinación de la superficie específica se usó la ecuación de Brunauer-Emmett-Teller (BET). El análisis de la microporosidad utilizó tanto los métodos de Dubinin-Radushkevich (DR), Dubinin Astakhov (DA), como aquellos que requieren isothermas de referencia, como t-plot (JH de Boer) y α plot (Isotherma Estandar-Silica). El volumen total de poros se estimó mediante la regla de Gurvich para $p/p_0 = 0,985$. Para la distribución de tamaño de microporos se empleó el método H-K (Horyáth-Kawazoe) para poros en forma de rendija, mientras que para mesoporos se aplicó el método BJH (Barrett-Joyner-Halenda).

Resultados

El análisis por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) evidenció que la biomasa está compuesta principalmente por carbono y oxígeno, junto con una elevada proporción de fósforo y cantidades menores de magnesio, aluminio, silicio y calcio. Por su parte, la arcilla presentó una composición característica de una arcilla comercial, dominada por silicio y aluminio, además de contener hierro, magnesio, calcio, potasio y sodio en menores proporciones. La composición química de la arcilla muestra que los óxidos predominantes son el de Si (61,2%) seguido por el de Al (20,7%) y Fe (8,4%).

Las observaciones realizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), reportadas en trabajos previos, mostraron que el aserrín está formado por partículas alargadas de estructura fibrosa y con predominio de tamaños medios dentro del intervalo granulométrico seleccionado para el estudio. A mayores aumentos se observaron estructuras abiertas y acanaladas, cuya morfología favorece potencialmente la interacción entre la biomasa y las partículas de arcilla durante la preparación de las mezclas (Pasquini et al, 2026).

La distribución granulométrica de las materias primas originales, determinada en estudios previos, reveló que la arcilla está constituida predominantemente por partículas comprendidas entre 0,125 y 0,500 mm, aunque también presenta una fracción significativa de partículas finas (0,044–0,088 mm). De manera similar, el aserrín de pino mostró una elevada proporción de partículas dentro del rango de 0,125–0,500 mm, mientras que las fracciones correspondientes a partículas finas ($\leq 0,088$ mm) y gruesas (≥ 1 mm) resultaron poco representativas.

El análisis térmico diferencial (DTA) realizado sobre aserrín de pino molido evidenció la presencia de dos picos exotérmicos centrados en 327 °C y 448 °C. El primero, de mayor intensidad y definición, fue atribuido a la combustión de la hemicelulosa, mientras que el segundo, más amplio, se asoció a la superposición de los procesos de degradación de la celulosa y la lignina. En concordancia, la curva termogravimétrica (TGA) registró pérdidas escalonadas de masa vinculadas a dichos fenómenos. La amplia ventana térmica de combustión observada permite inferir una eliminación progresiva de la biomasa durante la cocción, reduciendo el riesgo de generación de tensiones internas y fisuración en las piezas cerámicas.

Los ladrillos elaborados con arcilla comercial, tanto con o sin incorporación de biomasa, presentaron una coloración rojiza uniforme y una estructura macroscópica bien definida, sin evidencias de desgranamiento en aristas o vértices. La tonalidad observada se atribuye al contenido de hierro presente en la arcilla y como era de esperar, se mantuvo invariable independientemente del tamaño de partícula de aserrín incorporado.

Del análisis de los ensayos realizados a los ladrillos se desprende que los valores de pérdida de peso por calcinación aumentan con el aumento del tamaño de las partículas de aserrín mientras que en el caso de los valores de variación volumétrica permanente se observa una disminución al aumentar el tamaño de las partículas. De todas formas, en ambos casos los valores se encuentran muy cercanos: alrededor de 7% para PPC y 9% para VVP.

La porosidad aparente se incrementó al incorporar aserrín, lo que evidencia que la combustión de la biomasa genera una red de poros sin provocar alteraciones significativas en la integridad de la matriz cerámica. Este comportamiento podría justificar la estabilización observada en los valores de VVP, evitando contracciones excesivas y la aparición de defectos estructurales. En las muestras A1, A2 y A3, la porosidad promedio fue cercana al 21,5 %, mientras que un valor de 19,10 % fue determinado para la muestra sin residuo.

En cuanto a la resistencia a la compresión (RC), las normas IRAM empleadas para los ensayos no establecen requisitos mínimos específicos; por ello, los resultados suelen compararse con los criterios definidos por la norma ASTM C62-04 para ladrillos de construcción, que establece resistencias mínimas de 8,6 MPa para unidades individuales y 10,3 MPa como promedio de cinco especímenes ensayados. Asimismo, puede considerarse como referencia el Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería (CIRSOC 501, 2007), que fija un valor mínimo de 5,0 MPa. En todos los casos analizados, las resistencias obtenidas superaron ampliamente los valores exigidos por dichas normativas, como se muestra en la tabla 1.

Muestra	A0	A1	A2	A3
RC [MPa]	90,18	30,35	21,66	22,82

Tabla 1. Resistencia a la compresión de las diferentes muestras

El análisis de la morfología de poros mediante microscopía óptica reveló que la forma de los poros generados reproduce, en gran medida, la geometría de las partículas de aserrín utilizadas como agente formador de poros.

La Figura 1 presenta micrografías ópticas correspondientes a las muestras A0, A1, A2 y A3. Se observa un incremento progresivo en el tamaño de poros a medida que aumentan las dimensiones de las partículas de aserrín incorporadas a la matriz arcillosa. También, se puede observar un incremento de la porosidad con respecto a la muestra de referencia. Por otro lado, las muestras cerámicas que tienen residuos de tamaño igual o mayor a los 0,250 mm, presentan algunos poros con dimensiones superiores a las del material agregado. Esto puede deberse a la unión entre partículas de aserrín que, tras su combustión, originan estas cavidades de mayor tamaño que el previsto para partículas individuales, y que se han detectado en las muestras A2 y A3. La presencia de estos poros interconectados podría explicar la disminución de las propiedades mecánicas, al favorecer la concentración de tensiones y la formación de grietas.

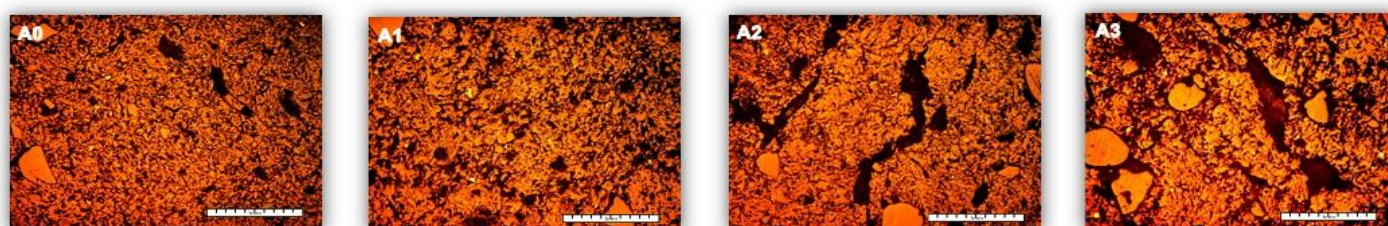


Figura 1. Imágenes de microscopía óptica de las muestras (barra:1mm)

Adicionalmente, por comparación entre las partículas de mayor tamaño agregadas en los rangos utilizados (muestras A1 y A2), y los poros de mayor tamaño en los ladrillos correspondientes, se determinó que el tamaño de poro generado corresponde aproximadamente al 60–70 % del tamaño inicial de la partícula de aserrín que le dio origen, lo que evidencia la posibilidad de modificar la microestructura porosa del material cerámico mediante la incorporación controlada de la biomasa residual. En el caso A3 resulta difícil hacer este cálculo debido a la importante presencia de poros interconectados.

La Figura 2 muestra las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para las muestras elaboradas con distintas granulometrías de aserrín, junto con la composición de referencia, similar análisis que el

desarrollado con OM. En todas las muestras se distinguen granos densos bien definidos de morfología predominantemente redondeada, marcados como 1 en la imagen A0, atribuibles a partículas ricas en sílice. Asimismo, algunas regiones de mayor brillo observadas, zona 2 en la imagen A0, se pueden asociar a fases con mayor contenido de hierro, según el análisis de EDS, en concordancia con la composición química característica de la arcilla empleada.

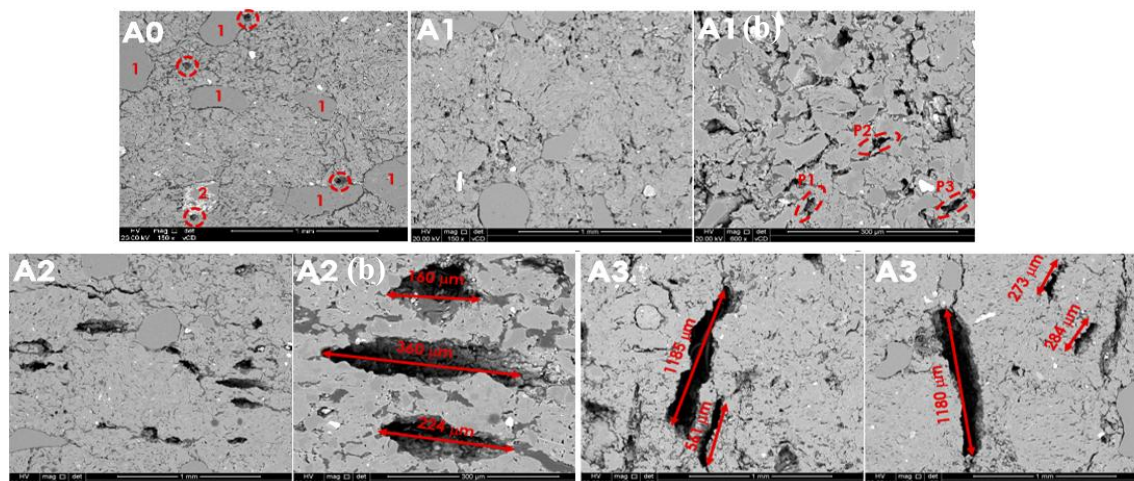


Figura 2. Imágenes SEM de las muestras: A0, A1, A2 y A3 a 150X, A1(b) y A2(b) a 600X.

Si bien en las muestras A0 y A1 la morfología y distribución de los poros no resultan tan evidentes como en las muestras A2 y A3, todas las muestras en principio fueron observadas con el mismo aumento (150X) a fin de permitir una comparación directa de sus características microestructurales. En la figura se han agregado además dos micrografías identificadas como A1(b) y A2(b), que se tomaron a mayores aumentos (600X) con el fin de observar en detalle los poros formados. Un análisis detallado permite identificar en la muestra A1(b) una mayor presencia de poros alargados y de pequeñas dimensiones en comparación con la muestra de referencia (A0); como ejemplo se han marcado en la imagen tres de ellos como P1, P2 y P3. En las muestras A2 y A3, elaboradas con partículas de aserrín de mayor tamaño, se observan poros cuyas dimensiones y morfología reproducen claramente las características geométricas de la biomasa utilizada, similar comportamiento al observado en la muestra A1 al analizar la microestructura a mayores aumentos (A1(b)). Esto confirma la influencia directa de la granulometría del agente formador de poros sobre la morfología final de la red porosa desarrollada en los productos cerámicos.

Los resultados obtenidos mediante el análisis BET para las muestras A1 y A3 muestran isoterma de adsorción clasificadas como Tipo III según la nomenclatura de la IUPAC. Este tipo de isoterma es característico de sistemas en los que la interacción entre el adsorbato y la superficie del adsorbente es relativamente débil, comportamiento típicamente asociado a materiales no porosos o con predominio de macroporos, como en el caso de las arcillas cerámicas, y se clasifican de acuerdo con el tamaño de éstos. La clasificación de la IUPAC para los sólidos porosos, teniendo en cuenta el tamaño de los mismos y considerando formas esféricas, es la siguiente: microporosas, con poros de diámetro menor a 10 nm; mesoporosas, con poros de diámetro entre 10 y 100 nm; y macroporosas, con poros de diámetro mayores a 100 nm.

En la región de bajas presiones relativas (p/p_0), ambas muestras presentan valores reducidos de adsorción, evidenciando un incremento inicial poco significativo de la cantidad adsorbida. Posteriormente, el sistema transita rápidamente hacia la región de adsorción multicapa, donde la cantidad de gas retenida permanece prácticamente constante, generando una meseta o región de estabilidad característica. Este comportamiento se encuentra estrechamente relacionado con las características superficiales de los materiales analizados y con la limitada afinidad entre la superficie sólida y las moléculas adsorbidas. Por otro lado, a valores elevados de presión relativa (p/p_0), las isoterma de ambas muestras exhiben un ligero aumento en la cantidad adsorbida. Este fenómeno puede atribuirse a procesos de condensación capilar que tienen lugar en poros de mayor tamaño, indicando la presencia de una estructura porosa dominada por macroporos o cavidades interconectadas. Dicho comportamiento se aprecia en la Figura 3, donde se observa la similitud de las isoterma obtenidas para ambas muestras.

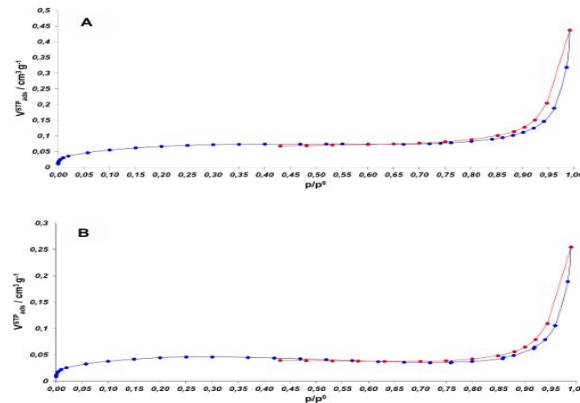


Figura 3. Isothermas de adsorción-desorción de las muestras A3 (figura A) y A1 (figura B)

Un estudio complementario fue realizado con el fin de determinar si el agregado de aserrín y los procesos de cocción utilizados modifican la estructura cristalográfica de la arcilla. Para esto se utilizó la muestra A0 (arcilla), y una muestra que será denominada A10, que contiene 10% en volumen de aserrín. En este caso la granulometría del aserrín usada es la de la muestra base ($< 1\text{ mm}$). Este análisis se llevó a cabo con XRD.

Los resultados obtenidos para las materias primas, aserrín y arcilla, y para las muestras en polvo de los ladrillos A0 y A10 permiten apreciar que las muestras en polvo A0 y A10 son semejantes, lo que indica que la presencia de aserrín durante la cocción no modifica la forma en que el proceso de sinterización se desarrolla. En relación al XRD de las materias primas, el aserrín presenta el difractograma típico de los materiales lignocelulósicos con presencia de los picos característicos de la celulosa semicristalina. Por su parte, en la arcilla, se identifican los picos característicos de cuarzo, feldespato (labradorita) y óxido de hierro (Pasquini et al, 2026). Si se comparan los diagramas de difracción de las materias primas con la de los ladrillos molidos, se observa que los picos de la celulosa no se encuentran en las muestras cocidas, como es de esperar debido a la combustión de la misma durante la cocción, y con respecto a la arcilla el cambio que se presenta es la disminución en los picos de la labradorita. Esta fase a la temperatura de cocción experimenta cambios físicos y estructurales internos significativos a nivel mineralógico, comportándose como una fase amorfa (Kingery et al, 1976).

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que el aserrín de pino constituye un agente formador de poros efectivo para la fabricación de materiales cerámicos de matriz arcillosa. Los análisis microestructurales por OM y SEM evidenciaron que la morfología y dimensión de los poros reproducen las características geométricas del aserrín empleado. Las formulaciones elaboradas con partículas de mayor granulometría presentaron poros de gran tamaño y sectores con porosidad interconectada, asociados a la presencia de agregados de biomasa en la mezcla inicial. Los estudios de adsorción de nitrógeno (BET) mostraron isothermas de Tipo III, consistentes con materiales dominados por macroporos y de baja superficie específica, en concordancia con las observaciones microestructurales. Desde el punto de vista tecnológico, todos los productos obtenidos alcanzaron valores de RC superiores a los requeridos por el mercado.

Referencias

- CIRSOC 501. Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas (2007).
- Pasquini J. P., Pelozo G. G., Quaranta N. E. (2026). Porous red ceramic bricks made from mixtures of clay and pine sawdust. *Revista Tecnología y Ciencia*. N° 55. Pp 33-48.
- San Miguel, G. & Gutiérrez Martí, F. (2015). *Tecnologías para uso y transformación de biomasa energética*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlman, D. R. (1976). *Introduction to ceramics*, Second Edition. Wiley-Interscience Publication. New York.