

Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico

Analysis of the insulation capacity of closed porosity materials: thermal shield

Fernando Calderón Ayala ¹
Omar Gabriel Hernández González ²
José Gabriel Ayala Landeros ³

RESUMEN

El estudio “Escudo Térmico” explora la viabilidad de desarrollar ladrillos cerámicos con porosidad cerrada inducida por almidón, orientados a reducir la conductividad térmica sin comprometer la integridad estructural. Desde la ingeniería de materiales, la combinación controlada de caolín, diatomita y bentonita, con variaciones en el contenido de almidón (10–30 %), permitió generar matrices cerámicas ligeras con densidades decrecientes de 0.937 a 0.823 g/cm³. Este descenso en densidad se correlacionó directamente con una disminución significativa de la conductividad térmica, alcanzando reducciones de hasta 81.04 % respecto a la alúmina patrón (0.12 W/mK). El proceso de pirólisis y sinterización a 980 °C garantizó la formación de poros cerrados estables, atribuibles a la descomposición térmica del almidón. Este comportamiento evidencia un control efectivo del transporte térmico por conducción y una optimización de la microestructura sin recurrir a cementos Portland. En términos de sostenibilidad, los resultados posicionan a estos cerámicos como alternativas viables a los aislantes sintéticos convencionales, combinando bajo impacto ambiental, estabilidad térmica y durabilidad.

PALABRAS CLAVES: aislamiento térmico, porosidad cerrada, eficiencia energética, materiales sostenibles.

Fecha de recepción: 02 de noviembre, 2025.

Fecha de aceptación: 13 de marzo, 2026.

¹ Profesor-Asignatura del Tecnológico Nacional de México/ IT de San Juan del Río (ITSJR)/ Dpto. Ingeniería en Sistemas Computacionales, Av. Tecnológico S/N, San Juan del Río, Qro. fernando.ca@sjuanrio.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0001-2927-4895>

² Profesor-Asignatura del Tecnológico Nacional de México/ IT de San Juan del Río (ITSJR)/ Dpto. Ingeniería Industrial, Av. Tecnológico S/N, San Juan del Río, Qro. omar.hg@sjuanrio.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0006-4495-2398>

³ Profesor-Investigador del Tecnológico Nacional de México/ I.T. de San Juan del Río (ITSJR)/ Dpto. Ingeniería Industrial, Av. Tecnológico S/N, San Juan del Río, Qro. **Autor Corresponsal**, gabriel.al@sjuanrio.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6967-5175>



Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico

ABSTRACT

The study “Thermal Shield” explores the feasibility of developing ceramic bricks with closed porosity induced by starch, aimed at reducing thermal conductivity without compromising structural integrity. From a materials engineering perspective, the controlled combination of kaolin, diatomite, and bentonite—with starch contents ranging from 10% to 30%—enabled the formation of lightweight ceramic matrices exhibiting decreasing densities from 0.937 to 0.823 g/cm³. This reduction in density directly correlated with a significant decrease in thermal conductivity, achieving reductions of up to 81.04% compared to standard alumina (0.12 W/mK). The pyrolysis and sintering process at 980 °C ensured the formation of stable closed pores, attributable to the thermal decomposition of starch. This behavior demonstrates effective control of heat transfer by conduction and microstructural optimization without the use of Portland cement. In terms of sustainability, the results position these ceramics as viable alternatives to conventional synthetic insulators, combining low environmental impact, thermal stability, and durability.

KEYWORDS: thermal insulation; closed porosity; energy efficiency; sustainable materials.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción representa uno de los sectores de mayor impacto ambiental, al ser responsable del 36 % del consumo energético global y del 39 % de las emisiones de CO₂ asociadas a la energía, derivadas principalmente del uso intensivo de materiales convencionales como el concreto (UNEP, 2022). A ello se suma que cerca del 11 % de las emisiones globales de CO₂ provienen de la energía incorporada durante la fabricación y transporte de materiales de construcción (Akadiri et al., 2012). Frente a este panorama, resulta imprescindible el desarrollo de alternativas sostenibles que reduzcan la dependencia del cemento Portland y permitan disminuir tanto la huella de carbono como la carga energética de los edificios.

En este contexto, los materiales cerámicos con porosidad controlada se perfilan como una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia térmica en edificaciones, adaptándose a las condiciones climáticas de cada región. A diferencia de los concretos tradicionales, estos materiales no requieren cemento como aglomerante, presentan menor densidad y ofrecen un mayor control de la transferencia de calor, lo que los convierte en candidatos idóneos para aplicaciones constructivas no estructurales y de aislamiento.

Los materiales aislantes convencionales, como la espuma de poliuretano, la lana mineral o el poliestireno expandido, aunque efectivos en el corto plazo, presentan limitaciones importantes: toxicidad en caso de combustión, baja reciclabilidad y alta carga ambiental en su disposición final (Arenas & Tenorio, 2019; American Family Insurance, 2023; Santos et al., 2021). En contraste, los cerámicos porosos destacan por su estabilidad térmica, durabilidad y menor impacto ambiental (Hegazy et al., 2012). La incorporación de porosidad cerrada en ladrillos cerámicos permite disminuir significativamente la conductividad térmica sin incrementar la absorción de agua ni comprometer su integridad básica (Hassani et al., 2014). Estudios previos han mostrado que la adición de diatomita, almidón o bentonita facilita la generación de poros cerrados y contribuye al mejoramiento de las propiedades aislantes (Baccour et al., 2009; Singh & Mohapatra, 2014).

Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico

Este proyecto plantea el desarrollo del Escudo Térmico, un ladrillo cerámico con porosidad cerrada inducida por almidón, diseñado para reducir la conductividad térmica y la densidad del material, sin depender del cemento como aglomerante. En las Tablas 1, 2, 3 y 4 se presentan las composiciones químicas típicas del Caolín, Diatomita, Almidón y Bentonita respectivamente.

Tabla 1. Composición Química del Caolín

Óxido	Formula	Contenido (%)
Dióxido de silicio	SiO ₂	45-50%
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	35-39%
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	<0.5%
Óxido de titanio	TiO ₂	<1%
Óxido de calcio	CaO	<0.1%
Óxidos de magnesio	MgO	<0.5%
Óxido de sodio	NaO	<0.1%
Óxido de potasio	K ₂ O	<0.2%
Humedad	H ₂ O	12-14%

Fuente: Hongfei C., 2012

Nota: El caolín fue asumido como principalmente caolinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄)

Tabla 2. Composición Química de la Diatomita

Óxido	Formula	Contenido (%)
Dióxido de silicio	SiO ₂	80-94%
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	1-4%
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	0.5-2%
Óxido de calcio	CaO	0.2-1%
Óxidos de magnesio	MgO	0.2-1%
Óxido de sodio	NaO	0.1-0.5%
Óxido de potasio	K ₂ O	0.1-0.5%
Cenizas	H ₂ O	3-7%

Fuente: Hernández-Ávila, et al., 2017

Tabla 3. Composición Química del Almidón

Componente	Contenido (%)	Descripción
Almidón (amilosa y amilopectina)	85-90%	Polisacárido principal
Humedad	8-13%	Agua residual
Proteínas	0.3-0.5%	Proteínas residuales
Lípidos (grasas)	0.1-0.2%	Trazas de aceites
Cenizas (minerales)	0.1-0.3%	Restos minerales
Fibra dietética	0-0.2%	Residuos fibrosos

Fuente: ChemLibreTexts. (2019)

Nota: El almidón, como polisacárido, está formado por unidades repetidas de glucosa con fórmula general (C₆H₁₀O₅)_n

Tabla 4. Composición Química de la Bentonita

Óxido	Formula	Contenido (%)
Dióxido de silicio	SiO ₂	55-61%
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	14-20%
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	1-4%
Óxido de titanio	TiO ₂	<1%
Óxido de calcio	CaO	0.5-2%
Óxidos de magnesio	MgO	2-5%
Óxido de sodio	NaO	2-4%
Óxido de potasio	K ₂ O	0.3-1%
Cenizas	-	6-13%

Fuente: Según Iran Bentonite Co. (s. f.)

Nota: La bentonita es básicamente montmorillonita con fórmula (Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂·nH₂O y presenta SiO₂ y Al₂O₃.

Dado que la bentonita no se debe agregar a más de 5%, debido a que a mayor proporción afecta las propiedades que se están buscando, lo más importante es que no se formarían poros y afectaría a la variable dependiente que es la conductividad térmica. La investigación se realizó en el Instituto Tecnológico de San Juan del Río, bajo un enfoque de la Planeación Avanzada de la Calidad y con



Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico

la finalidad de atender necesidades de aislamiento en distintas regiones climáticas de México. La pregunta central que guía este estudio es: ¿Cómo influye la porosidad cerrada, generada a partir de caolín, diatomita, almidón y bentonita, en el rendimiento térmico de ladrillos cerámicos?

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de materiales cerámicos con porosidad cerrada representa una línea de investigación estratégica para responder a los desafíos energéticos y ambientales del sector de la construcción. Actualmente, esta industria es responsable de un elevado consumo energético global y de un porcentaje significativo de las emisiones de CO₂, debido principalmente al uso extensivo de materiales convencionales como el cemento Portland y los aislantes sintéticos. Frente a esta situación, surge la necesidad de diseñar soluciones constructivas más sostenibles que reduzcan la huella de carbono, mejoren la eficiencia energética y aprovechen materias primas de bajo impacto ambiental.

El proyecto “Escudo Térmico” aborda esta problemática mediante la formulación de ladrillos cerámicos con porosidad cerrada inducida por almidón, los cuales logran disminuir la conductividad térmica sin afectar su integridad estructural. Este enfoque aprovecha mecanismos fisicoquímicos controlados —como la pirólisis del almidón y la sinterización a temperaturas moderadas— para generar matrices cerámicas ligeras con propiedades térmicas optimizadas. Dichas características los posicionan como alternativas competitivas frente a los materiales aislantes sintéticos tradicionales, los cuales suelen presentar desventajas ambientales, de reciclabilidad y de seguridad en caso de combustión.

Asimismo, la investigación aporta conocimiento valioso en el campo de la ingeniería de materiales al establecer la relación entre la microestructura, la densidad y el comportamiento térmico de cerámicos porosos, ofreciendo una base experimental para futuras aplicaciones en edificaciones sostenibles. Desde una perspectiva tecnológica y de innovación, los resultados obtenidos pueden contribuir al desarrollo de productos nacionales de alto valor agregado, con potencial de transferencia hacia la industria de la construcción y alineados con los objetivos globales de eficiencia energética y descarbonización.

METODOLOGÍA

Debido a limitaciones de recursos, el presente estudio se restringió a la evaluación de tres formulaciones cerámicas, todas con la misma proporción base de caolín, diatomita y bentonita, y variando únicamente el contenido de almidón como agente formador de poros.

Composiciones evaluadas

La Tabla 5 muestra las proporciones en peso de las materias primas empleadas en cada prueba.

Tabla 5. Formulaciones cerámicas evaluadas en este estudio

Probeta	Caolín (%)	Diatomita (%)	Bentonita (%)	Almidón (%)
P1	76	10	5	10
P2	76	10	5	20
P3	76	10	5	30

Fuente: Elaboración propia



Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico

Preparación de muestras

Los polvos de caolín, diatomita y bentonita se homogeneizaron en seco. Posteriormente se incorporó el almidón, en proporción según la Tabla 5, y se añadió agua destilada hasta obtener una masa plástica. La mezcla fue vertida en los moldes hasta completar su volumen interno y se dejó en reposo a temperatura ambiente por 24 horas para permitir la gelificación por acción del almidón. Las muestras se secaron a 105 °C durante 24 h para eliminar humedad libre. Las dimensiones de las probetas fueron de 38 mm de diámetro por espesor variable de acuerdo al llenado de los moldes.

Tratamiento térmico:

En la etapa de pirólisis las probetas se calentaron hasta 600 °C (200 °C/h) para eliminar el almidón. A continuación, se sinterizaron a una temperatura de 980 °C (200 °C/h) con 2 h de sostenimiento, en atmósfera oxidante.

Medición de conductividad térmica

Se utilizó el método comparativo en régimen estacionario, conforme a la norma ASTM E1225-99:

- Principio: La muestra se coloca en serie con una barra de referencia de conductividad conocida. Bajo un mismo flujo de calor axial, se miden gradientes de temperatura en ambos elementos, calculando la conductividad de la muestra a partir de la relación entre los gradientes (Fig. 1).
- Montaje:
 - Fuente de calor en el extremo caliente y sumidero en el extremo frío (Fig. 2).
 - Guardas térmicas para minimizar pérdidas laterales (Fig. 3).
 - Termopares tipo J fijados en posiciones conocidas sobre muestra y referencia.

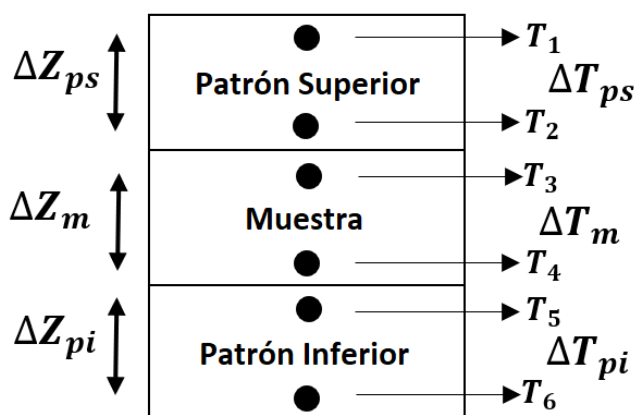


Figura 1. Principio del Método Comparativo

Fuente: Elaboración propia

Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico



Figura 2. Equipo para medición de Conductividad Térmica (ASTM E1225-99).
Fuente: Elaboración propia



Figura 3. Diseño de guardas y acomodo de probetas.
Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

1. Montaje serie referencia–muestra. El material de referencia fueron pastillas de alúmina (Al_2O_3) sinterizada con una conductividad térmica de 0.12 W/m K .
2. Aplicación de potencia controlada y espera hasta alcanzar régimen estacionario. El control de la potencia del sistema se realiza mediante la programación de la temperatura en la fuente, la cual es censada mediante un termopar tipo J. La programación del controlador digital fue de $300 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Registro de temperaturas en ambos cuerpos. El registro de la temperatura se realizó mediante un sistema de adquisición de datos, empleando una tarjeta NI 9211 y un programa para la adquisición desarrollado en el software NI LabView 2025 Q1. La velocidad de muestreo fue de 1 muestra/ segundo, en un total de 3600 segundos.
4. Cálculo de la conductividad Térmica. Para realizar el cálculo se tomó en cuenta la fórmula 1,

Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico

$$k_m = \frac{\Delta Z_m}{2\Delta T_m} \left(k_{ps} \frac{\Delta T_{ps}}{\Delta Z_{ps}} + k_{pi} \frac{\Delta T_{pi}}{\Delta Z_{pi}} \right) \quad 1$$

En donde:

k = Conductividad térmica

ΔZ = Distancia de separación entre termopares

ΔT = Gradiente de temperatura

ps = patrón superior; pi= patrón inferior; m = muestra

Considerando que la distancia de separación entre termopares y la conductividad térmica para las probetas patrón son iguales, la ecuación 1 se transforma en 2:

$$k_m = \frac{k_p}{2\Delta T_m} (\Delta T_{ps} + \Delta T_{pi}) \quad 2$$

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como primer resultado se muestran las probetas sinterizadas a 980 °C, las cuales presentaban buena consistencia para su manipulación. En la Figura 4, se puede apreciar el resultado de la fabricación de las probetas con diferente contenido de almidón.



Figura 4. Probetas para pruebas.

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se presenta la densidad (Tabla 6) de las probetas obtenidas después de la sinterización. Se presenta el cálculo del volumen y la densidad de acuerdo con las dimensiones de las probetas.

Tabla 6. Densidad de las probetas

Probeta	Almidón (%)	Peso (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
P1	10	17	18.146	0.937
P2	20	16	18.146	0.882
P3	30	14	17.012	0.823

Fuente: Elaboración propia



Análisis de la capacidad de aislamiento de materiales con porosidad cerrada: escudo térmico

Finalmente, se presenta la gráfica de las mediciones de la probeta 1 (Fig. 5), correspondiente al contenido de 10 % de almidón. La Tabla 7, muestra los resultados de la medición de la conductividad térmica del material propuesto.

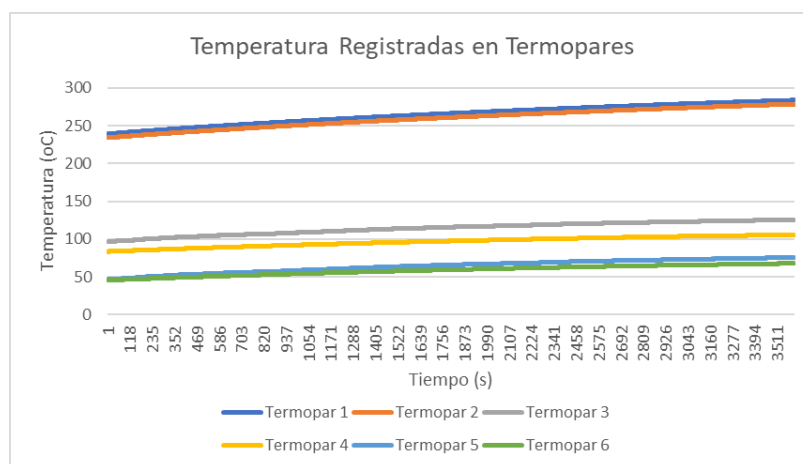


Figura 5. Temperaturas registradas en termopares.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Resultados de la medición de la conductividad térmica de las probetas con diferente contenido de almidón

Probeta	ΔT_{ps} (°C)	ΔT_m (°C)	Δt_{pi} (°C)	k_p (W/mK)	k_m (W/mK)
P1	5.235	20.035	4.25	0.12	0.02841
P2	5.126	22.342	4.04	0.12	0.02462
P3	5.168	24.126	3.982	0.12	0.02276

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este proyecto demostraron que las proporciones adecuadas de caolín, diatomita y almidón y bentonita permiten fabricar productos cerámicos con porosidad cerrada capaces de ofrecer un mejor aislamiento térmico. De acuerdo con la tabla 6 y 7, a medida que disminuye la densidad y aumenta la porosidad la conductividad térmica disminuye proporcionando un mejor aislamiento térmico.

Tomando como base la conductividad térmica de la alúmina de 0.12 W/mK, la probeta P1 disminuye la conductividad térmica en un 76.32%, mientras que la probeta P2 disminuye un 79,49% y finalmente la probeta P3 lo hace en un 81.04%.

Estos resultados demuestran que variando el porcentaje de porosidad en materiales cerámicos se puede controlar la conductividad térmica de material, ajustando esta propiedad de acuerdo con la aplicación específica que se requiera.

Es importante comentar que no se disponía de algún equipo que permitiera medir la porosidad cerrada, por lo que en el futuro será necesario complementar esta información con este tipo de cálculos.

REFERENCIAS

- Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., & Olomolaiye, P. O. (2012). Design of a sustainable building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector. *Buildings*, 2(2), 126–152. <https://doi.org/10.3390/buildings2020126>
- American Family Insurance. (2023). Fire safety: The dangers of polyurethane foam. American Family Insurance Group. Recuperado de <https://www.amfam.com>
- Arenas, J. P., & Tenorio, R. (2019). Materials for noise control in buildings: A review. *Applied Acoustics*, 146, 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.018>
- Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F., & Mhiri, T. (2009). Influence of clay composition on the mechanical and thermal properties of fired clay bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(14), 2379–2385. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.02.006>
- Hassani, A., Khodadadi, A., & Nouri, A. (2014). Thermal conductivity of porous ceramics: The effect of porosity and pore size distribution. *Ceramics International*, 40(9), 14267–14272. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.05.075>
- Hegazy, B. E., Fouad, H. A., & Hassanain, A. M. (2012). Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(6), 1661–1667. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05102.x>
- Santos, S., Silva, A., & de Brito, J. (2021). Thermal insulation materials in buildings: A review on environmental impacts and recycling. *Journal of Building Engineering*, 44, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102612>
- Singh, V. P., & Mohapatra, B. K. (2014). Thermal insulating lightweight fired clay bricks incorporating fly ash. *Construction and Building Materials*, 68, 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.024>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). 2022 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi: UNEP.