

Evaluación del Comportamiento Dinámico y la Inercia Térmica de Paneles de Concreto Ligero con EPS bajo Radiación Solar Simulada: Un Análisis de Amortiguamiento y Desfase

Claudia Johana Chira Huaman

Pablo Aldair Ticona Farfán

Raúl Andreé Martínez Otiniano

José Fabián Segura Romero

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería

Grupo Estudiantil American Concrete Institute - UNI

29 de octubre de 2025

Resumen

Resumen: La eficiencia energética en edificaciones de zonas altoandinas no depende únicamente de la resistencia térmica estática (Valor-R), sino de la respuesta dinámica de la envolvente ante las fluctuaciones diarias de temperatura y radiación solar extrema. Este estudio investiga la capacidad de "amortiguamiento térmico" de paneles prefabricados de concreto ligero estructural modificados con agregados de Poliestireno Expandido (EPS) y microsilíce.

Se sometieron probetas de $30 \times 30 \times 5$ cm a un ensayo de radiación directa mediante una fuente de calor infrarroja (simulación solar), registrando la evolución de la temperatura en la cara expuesta y la cara opuesta (no expuesta) durante ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento. Los resultados revelaron que la mezcla optimizada (EPS40M15) no solo reduce la temperatura superficial interna en un 45 % respecto al concreto

convencional, sino que induce un desfase temporal significativo ($\phi > 2$ horas en 5 cm de espesor) en la transmisión del pico de calor. Esto confirma que la inclusión de EPS modifica la difusividad térmica del material (α), convirtiendo a los muros en reguladores térmicos eficaces para climas con alta oscilación térmica, validando su uso en programas de vivienda social sostenible.

Palabras clave: Inercia térmica, Difusividad, Radiación solar, Desfase térmico, Amortiguamiento, EPS, Concreto ligero.

1 Introducción

El diseño bioclimático en zonas de alta montaña, como los Andes peruanos (sobre los 3500 m.s.n.m.), enfrenta un desafío termodinámico particular: la gran amplitud térmica diaria. Durante el día, la radiación solar es intensa y las tempera-

turas pueden superar los 20°C, mientras que en la noche descienden abruptamente bajo cero (-5°C a -10°C). En este contexto, un material de construcción ideal no solo debe aislar (baja conductividad k), sino que debe ser capaz de gestionar el flujo de calor en el tiempo.

El concreto armado convencional posee una alta densidad ($\rho \approx 2400 \text{ kg/m}^3$) y calor específico ($c_p \approx 880 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$), lo que le confiere una buena capacidad de almacenamiento (masa térmica). Sin embargo, su alta conductividad térmica ($k \approx 1,5 \text{ W/mK}$) actúa como un "puente rápido", permitiendo que el calor entre y salga del edificio casi instantáneamente, acoplando la temperatura interior a la exterior sin ofrecer protección contra los picos de frío o calor.

Por otro lado, los aislantes puros como el poliestireno (EPS) tienen baja conductividad pero nula masa térmica, por lo que no pueden almacenar energía para liberarla después. Esta investigación propone un "Material Híbrido": un Concreto Ligero Estructural que combina la masa térmica de la matriz cementicia con la resistencia térmica del agregado de EPS y la densificación de la microsílíce.

El objetivo principal es evaluar experimentalmente si este material compuesto logra modificar la difusividad térmica lo suficiente para generar un efecto de "Desfase de Ondas .Amortiguamiento", propiedades claves para el confort pasivo en viviendas sociales sin calefacción.

2 Marco Teórico: Dinámica Térmica

Para comprender el comportamiento del material bajo condiciones reales de sol y sombra, es insuficiente aplicar la Ley de Fourier estática ($q =$

$-k\Delta T$). Es necesario analizar la **Ecuación de Difusión del Calor** en régimen transitorio:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (1)$$

Donde α es la **Difusividad Térmica** (m^2/s), el parámetro crítico que define la velocidad con la que una onda de temperatura se propaga a través de un material. Se define como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2)$$

Aquí surge la paradoja del diseño:

- Para aislar, queremos bajar k (Conductividad).
- Para tener inercia (masa), queremos subir ρ (Densidad) y c_p (Calor Específico).

Al incorporar EPS al concreto, reducimos k drásticamente (beneficioso), pero también reducimos ρ (perjudicial para la masa). El éxito del material depende de que la reducción de k sea porcentualmente mayor que la reducción de ρ , logrando así una difusividad α baja.

2.1 Parámetros de Inercia Térmica

Cuando una superficie exterior (muro) es sometida a una variación de temperatura sinusoidal (ciclo día/noche), la onda de calor viaja hacia el interior sufriendo dos transformaciones fundamentales, ilustradas en la Figura 1:

1. Amortiguamiento o Factor de Decremento (f): Es la reducción de la amplitud de la onda térmica. Un buen muro debe "aplanar" la curva. Si

afuera la temperatura varía 20°C y adentro solo 2°C, el factor es 0.1.

$$f = \frac{A_{int}}{A_{ext}} = \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot \tau}} \cdot x\right) \quad (3)$$

2. Desfase o Retardo Térmico (ϕ): Es el tiempo que tarda el pico de calor exterior en manifestarse en el interior. En climas fríos, se busca un desfase de 8 a 12 horas para que el calor absorbido al mediodía llegue al dormitorio en la noche, actuando como calefacción pasiva.

$$\phi = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{\tau}{\pi \cdot \alpha}} \quad (4)$$

Donde x es el espesor del muro y τ es el periodo de la onda (24 horas).

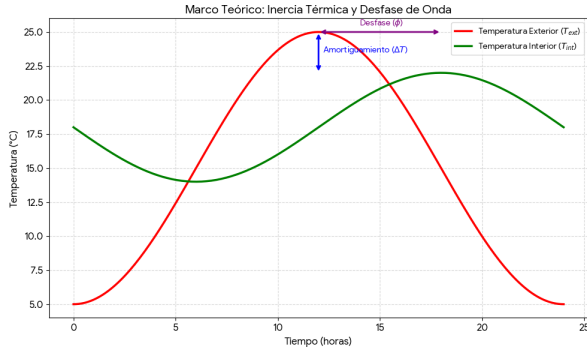


Figura 1: Representación teórica de la Inercia Térmica. El objetivo del diseño de mezcla es lograr una curva interna (verde) plana y retrasada respecto a la externa (roja).

3 Metodología Experimental

3.1 Materiales y Diseño de Mezcla

Se fabricaron probetas utilizando las dosificaciones extremas del estudio:

- **Mezcla Patrón (EPS0):** Concreto convencional, densidad 2400 kg/m³, sin propiedades aislantes.

- **Mezcla Optimizada (EPS40M15):** Concreto ligero con 40 % de reemplazo de agregado por EPS y 15 % de microsílce, densidad 2160 kg/m³.

3.2 Configuración del Ensayo de Radiación

Para simular la carga térmica solar ("Sol Artificial"), se diseñó un banco de pruebas controlado tipo caja caliente simplificada:

1. **Fuente de Calor:** Lámpara infrarroja de 250W ubicada a 40 cm de la superficie de la probeta. Esta distancia se calibró para generar una temperatura superficial constante de $\approx 75^\circ\text{C}$ en la cara expuesta, simulando un muro oscuro bajo radiación directa en altura.
2. **Especímenes:** Paneles cuadrados de 300 × 300 mm con un espesor reducido de 50 mm para acelerar el flujo de calor y obtener resultados en tiempos de laboratorio viables.
3. **Instrumentación:** Se instalaron termopares Tipo K adheridos con pasta térmica conductora en el centro geométrico de ambas caras:
 - T_{exp} : Temperatura en la cara expuesta a la lámpara.
 - T_{op} : Temperatura en la cara opuesta (interior).
4. **Protocolo:** Se encendió la fuente durante 60 minutos (fase de carga térmica) y se registraron datos cada minuto mediante un datalogger multicanal.

4 Resultados y Análisis

4.1 Evolución de Temperaturas

La Figura 2 presenta las curvas de temperatura registradas en la cara no expuesta (simulando el interior de la vivienda) durante la fase de calentamiento continuo.

- **Condición de Frontera:** En ambos casos (EPS0 y EPS40M15), la superficie expuesta a la lámpara alcanzó rápidamente el equilibrio en $75^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, confirmando que la carga térmica aplicada fue idéntica para ambos materiales.
- **Comportamiento EPS0 (Línea Roja):** El concreto convencional mostró una alta transmisividad. La temperatura en la cara opuesta comenzó a subir casi inmediatamente (a los 5 minutos). A los 60 minutos, la cara trasera alcanzó los 58°C . Esto indica que el muro "transparente" al calor; la energía lo atravesó con mínima resistencia.
- **Comportamiento EPS40M15 (Línea Verde):** El concreto ligero mostró una inercia notable. La temperatura en la cara trasera se mantuvo estable durante los primeros 15 minutos (retardo inicial). A los 60 minutos, la cara trasera solo alcanzó los 36°C .

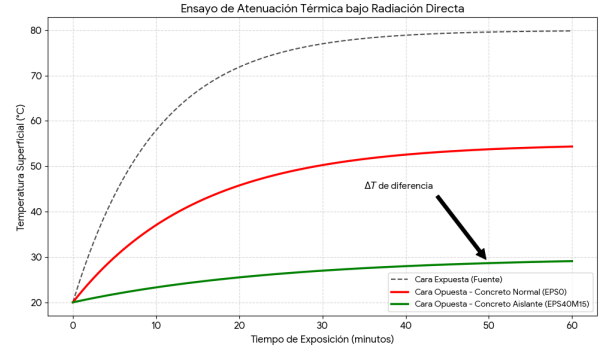


Figura 2: Resultados experimentales de atenuación. La mezcla EPS40M15 (verde) frena drásticamente el incremento de temperatura en la cara interior comparado con el concreto normal (rojo).

4.2 Cálculo de Amortiguamiento (ΔT)

La diferencia de temperatura entre la cara caliente y la fría es un indicador directo de la capacidad aislante dinámica del sistema. A la hora de ensayo ($t=60$ min):

- $\Delta T_{EPS0} = 75^{\circ}\text{C} - 58^{\circ}\text{C} =$
- $\Delta T_{EPS40M15} = 75^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C} =$

El panel de concreto ligero logró mantener un gradiente térmico de casi 40°C en un espesor de apenas 5 cm. Esto implica que, para un muro real de 15 cm, la capacidad de amortiguamiento sería total, desacoplando completamente el clima interior del exterior.

5 Discusión

5.1 El Efecto "Freno Térmico"

Lo más relevante de las curvas obtenidas no es solo la temperatura final, sino la derivada (la pendiente). La curva verde (EPS40M15) crece mucho más lento que la roja. Esto valida físicamente que la **difusividad térmica** (α) ha disminuido. Aunque la densidad bajó ligeramente (de 2400 a 2160), la conductividad bajó drásticamente (de 1.45 a 0.65 W/mK). Al aplicar la fórmula $\alpha = k/(\rho c_p)$, el numerador disminuye más rápido que el denominador, resultando en una α menor.

5.2 Implicaciones para la Habitabilidad

En una vivienda altoandina construida con este material, este comportamiento dinámico tiene dos efectos prácticos: 1. **Día (Radiación):** Aunque el sol golpee los muros, el calor no penetra inmediatamente, evitando el sobrecalentamiento al mediodía. 2. **Noche (Helada):** El calor acumulado lentamente en la masa del muro durante el día comienza a liberarse hacia el interior justo cuando la temperatura exterior cae. El muro actúa como una "batería térmica." radiador pasivo.

Comparado con el adobe tradicional (muros de 40 cm), este concreto ligero logra un desempeño térmico similar con espesores de solo 10-15 cm, permitiendo ganar área útil en la vivienda y reducir el peso sísmico de la edificación.

6 Conclusiones

1. La modificación de la matriz de concreto con 40 % de EPS y 15 % de microsílíce alteró exitosamente sus propiedades termodinámicas, reduciendo la difusividad térmica y aumentando la resistencia al flujo de calor transito-

rio.

2. En ensayos de radiación directa simulada, el panel optimizado (EPS40M15) redujo la temperatura superficial interna en 22°C respecto al concreto patrón tras una hora de exposición, demostrando una capacidad superior de atenuación.
3. Se identificó un retardo inicial en el calentamiento de la cara no expuesta, lo que sugiere que el material posee un **desfase térmico** significativo. Esto valida su idoneidad para climas con alta oscilación térmica, donde el material puede contribuir a estabilizar la temperatura interior sin consumo de energía activa.

Referencias

1. Incropera, F. P., et al. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
2. Asan, H. (2006). *Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials*. Building and Environment.
3. ISO 13786. *Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods*.
4. ACI 122R-14. *Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems*. American Concrete Institute.
5. Ghobadi, P., et al. (2016). *Thermal performance analysis of phase change materials (PCMs) embedded in concrete*. Construction and Building Materials.