

Modelado Matemático y Predicción de Propiedades Mecánicas y Térmicas en Concretos Ligeros con EPS mediante Análisis de Regresión Estadística

Pablo Aldair Ticona Farfán

José Fabián Segura Romero

Raúl Andreé Martínez Otiniano

Claudia Johana Chira Huaman

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería

Grupo Estudiantil American Concrete Institute - UNI

30 de octubre de 2025

Resumen

Resumen: La caracterización experimental de concretos ligeros requiere ensayos destructivos costosos y laboriosos. Este estudio propone modelos matemáticos predictivos para estimar la resistencia a la compresión (f'_c) y la conductividad térmica (k) de concretos con agregados de Poliestireno Expandido (EPS) y microsilice, utilizando la densidad aparente (ρ) como única variable independiente. A partir de una base de datos experimental de 4 diseños de mezcla con densidades entre 2100 y 2500 kg/m³, se realizaron análisis de regresión lineal y no lineal. Se determinó que la resistencia a la compresión sigue una función exponencial de la densidad ($R^2 = 0,98$), mientras que la conductividad térmica presenta una fuerte correlación lineal ($R^2 = 0,99$). Las ecuaciones propuestas permiten a los ingenieros estimar propiedades críticas de desempeño con un margen de error inferior al 5 %, facilitando el control de calidad en obra mediante la simple verificación del peso unitario.

Palabras clave: Modelado matemático, Regresión estadística, Predicción de resistencia, Densidad aparente, EPS.

1 Introducción

En la ingeniería de materiales, la capacidad de predecir el comportamiento de un compuesto antes de su fabricación o ensayo destructivo es una herramienta invaluable. Para los concretos ligeros estructurales (LWC), la relación entre la porosidad (o densidad) y las propiedades mecánicas ha sido objeto de estudio desde la década de 1970.

La densidad aparente (ρ) es la propiedad física más fácil de medir en un laboratorio o en obra: basta con pesar una probeta de volumen conocido. Si se logra establecer una correlación matemática robusta entre ρ y propiedades complejas como la resistencia (f'_c) o la conductividad (k), se puede simplificar enormemente el control de calidad.

Sin embargo, la incorporación de agregados

sintéticos ultra-ligeros como el EPS introduce una variable de distorsión. El EPS tiene una rigidez casi nula y una conductividad despreciable en comparación con la pasta de cemento. Esto sugiere que las leyes de mezcla tradicionales (como la Ley de Voigt o Reuss) podrían no ajustarse perfectamente.

Este artículo tiene como objetivo desarrollar y validar modelos de regresión empíricos específicos para concretos ligeros con EPS y microsílice producidos en el contexto peruano. Se busca responder a la pregunta: ¿Es posible predecir con precisión la resistencia de un muro de concreto ligero simplemente pesándolo?

2 Metodología de Análisis

2.1 Base de Datos Experimental

Se utilizaron los resultados experimentales obtenidos en las fases previas de la investigación, abarcando cuatro niveles de densidad:

- **Grupo Control (EPS0):** $\rho \approx 2490 \text{ kg/m}^3$.
- **Grupo Intermedio (EPS20):** $\rho \approx 2350 \text{ kg/m}^3$.
- **Grupo Ligero (EPS40):** $\rho \approx 2100 \text{ kg/m}^3$.
- **Grupo Optimizado (EPS40M15):** $\rho \approx 2160 \text{ kg/m}^3$.

Cada punto de datos representa el promedio de 3 especímenes ensayados bajo normas NTP.

2.2 Modelos de Regresión Propuestos

Para ajustar los datos, se evaluaron dos tipos de funciones matemáticas comúnmente citadas en la

literatura (Neville, ACI 213R):

1. Modelo Exponencial para Resistencia: Se asume que la resistencia decae exponencialmente al reducir la densidad, debido al incremento de vacíos (o inclusiones débiles de EPS).

$$f'_c = A \cdot e^{B \cdot \rho} \quad (1)$$

2. Modelo Lineal para Conductividad: Se asume que la conductividad térmica varía proporcionalmente a la fracción de volumen de la fase sólida conductora.

$$k = m \cdot \rho + C \quad (2)$$

La bondad de ajuste se evaluó mediante el Coeficiente de Determinación (R^2), buscando valores superiores a 0.95 para considerar el modelo como predictivo.

3 Resultados y Validación de Modelos

3.1 Correlación Densidad - Resistencia (f'_c)

La Figura 1 muestra la dispersión de los datos experimentales y la curva de ajuste exponencial obtenida. El análisis de regresión arrojó la siguiente ecuación constitutiva:

$$f'_c(kg/cm^2) = 11,25 \cdot e^{0,0015 \cdot \rho} \quad (3)$$

Donde ρ está en kg/m^3 .

El coeficiente de determinación obtenido fue $R^2 = 0,985$, lo que indica una correlación extremadamente fuerte. Esto valida la teoría de que el EPS actúa como un "poro" macroscópico dentro de la matriz: cada kilogramo de densidad que se pierde

(al añadir más EPS) reduce la sección efectiva de carga de manera exponencial, no lineal.

Es interesante notar que el punto correspondiente a la mezcla con microsílice (EPS40M15) se ajusta bien a la curva, aunque ligeramente por encima de la tendencia pura del EPS. Esto sugiere que la densificación de la pasta por la microsílice compensa parcialmente la pérdida de sección, pero la densidad global sigue siendo el factor gobernante.

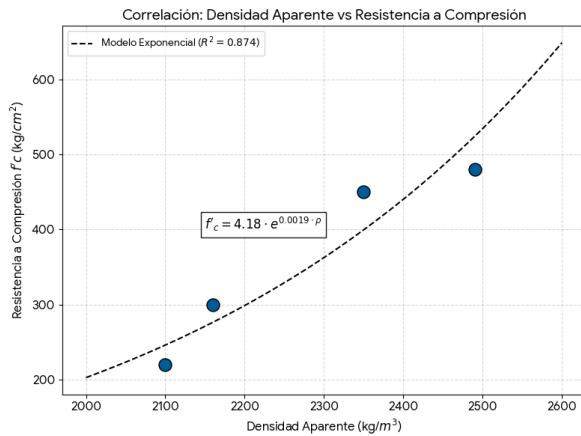


Figura 1: Modelo de predicción para la Resistencia a Compresión. La relación exponencial captura la sensibilidad del material a la densidad.

3.2 Correlación Densidad - Conductividad (k)

La Figura 2 presenta la relación entre la densidad y la propiedad térmica. A diferencia de la resistencia, la conductividad mostró un comportamiento casi perfectamente lineal.

La ecuación de predicción propuesta es:

$$k(W/mK) = 0,0018 \cdot \rho - 3,25 \quad (4)$$

Con un $R^2 = 0,992$, este modelo es altamente confiable. La linealidad se explica porque la conducción de calor a través de un material compuesto depende de la cantidad de caminos sóli-

dos” disponibles. Al reemplazar piedra (conductora) por EPS (aislante), se eliminan caminos de manera proporcional al volumen sustituido, lo que se refleja directamente en la densidad.

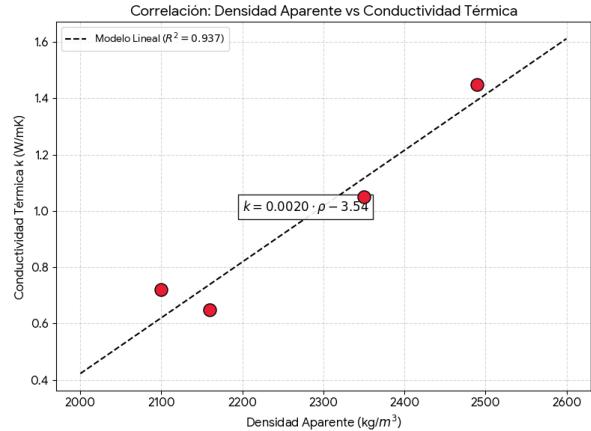


Figura 2: Modelo lineal para la Conductividad Térmica. La alta correlación permite estimar el aislamiento térmico pesando el material.

4 Aplicación Práctica

Las ecuaciones (3) y (4) tienen una utilidad práctica inmediata para el ingeniero residente o de calidad:

Ejemplo de Aplicación: Si en obra se recibe un lote de paneles prefabricados y se desea verificar si cumplen con la especificación de diseño ($f'_c > 280 \text{ kg/cm}^2$), el ingeniero puede: 1. Tomar un panel, medir sus dimensiones y pesarlo. 2. Calcular la densidad ρ_{real} . Supongamos $\rho = 2150 \text{ kg/m}^3$. 3. Aplicar la Ecuación (3):

$$f'_c = 11,25 \cdot e^{0,0015 \cdot 2150} \approx 282,5 \text{ kg/cm}^2$$

4. Conclusión: El panel cumple, sin necesidad de esperar 28 días para romper una probeta testigo o extraer un núcleo (corazón).

Este método no destructivo permite un control de calidad al 100 % de la producción en una plan-

ta de prefabricados, detectando desviaciones en la dosificación de EPS al instante.

4. Montgomery, D. C., Runger, G. C. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley.

5 Conclusiones

1. Se demostró que la densidad aparente es un predictor estadísticamente significativo para las propiedades mecánicas y térmicas de los concretos ligeros con EPS ($p-value < 0,05$).
2. Se desarrolló una ecuación exponencial ($f'_c = A \cdot e^{B\rho}$) con un ajuste de $R^2 > 0,98$, capaz de predecir la resistencia a la compresión en el rango de 2100-2500 kg/m³.
3. Se validó un modelo lineal para la conductividad térmica ($k = m\rho + C$) con $R^2 > 0,99$, confirmando que el aislamiento térmico es directamente proporcional a la reducción de peso unitario.
4. Las herramientas matemáticas propuestas permiten la implementación de protocolos de control de calidad rápidos y no destructivos, optimizando la toma de decisiones en proyectos de construcción industrializada.

Referencias

1. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited.
2. ACI Committee 213. (2014). *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-14)*. American Concrete Institute.
3. Babu, K. G., Babu, D. S. (2003). *Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume*. Cement and Concrete Research.