

# Sostenibilidad y Eficiencia del Ligante en Morteros Aligerados: Un Enfoque de Intensidad de Cemento ( $B_i$ ) para Optimizar el Uso de Recursos

Pablo Aldair Ticona Farfán  
Ever Joffre Castro Torrejon  
Kevin Wilmar Centeno Aguirre

*Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería*

*Capítulo Estudiantil ACI-UNI*

15 de diciembre de 2025

## Resumen

**Resumen:** La industria del cemento es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de  $\text{CO}_2$ . En el diseño de morteros de alto desempeño, el uso excesivo de material cementante para compensar bajas resistencias es una práctica insostenible. Este estudio evalúa la "Intensidad de Ligante" ( $B_i$ ), definida como la cantidad de cemento necesaria para producir 1 MPa de resistencia, en cuatro mezclas aligeradas con EPS. Los resultados revelan que la segregación causada por una mala elección del aditivo duplica el impacto ambiental de la mezcla. El sistema optimizado con base acrílica (SP-A) logró un índice de eficiencia de 16.7  $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$ , mientras que los sistemas inestables requirieron hasta 27.3  $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$ , demostrando que la estabilidad reológica es clave para la sostenibilidad.

**Palabras clave:** Sostenibilidad, Intensidad de ligante, Huella de carbono, Eficiencia de cemento, EPS.

## 1 Introducción

El concepto de "High Performance Concrete" (HPC) a menudo se confunde con alta resistencia, sin considerar el costo ecológico. Una métrica moderna para evaluar el desempeño ambiental es la Intensidad de Ligante ( $B_i$ ):

$$B_i = \frac{C + S}{f'_c} \quad (1)$$

Donde  $C$  es el contenido de cemento,  $S$  es la adición mineral (microsílice), y  $f'_c$  es la resistencia a 28 días en MPa.

Un valor bajo de  $B_i$  indica que la matriz cementicia está siendo utilizada eficientemente. En morteros con agregado ligero (EPS), la flotación de las perlas crea zonas de pasta pura sin esqueleto granular, desperdiciando el potencial del cemento. Este artículo cuantifica ese desperdicio.

## 2 Metodología

### 2.1. Material Cementante Total

Todas las mezclas mantuvieron una carga de ligante constante y elevada para garantizar el desempeño:

- Cemento Portland: 466.67  $\text{kg/m}^3$
- Microsílice: 200.00  $\text{kg/m}^3$
- **Total Ligante:** 666.67  $\text{kg/m}^3$

Esta alta cantidad de pasta hace que la eficiencia sea crítica; cualquier pérdida de resistencia penaliza severamente el índice ambiental.

## 3 Resultados

### 3.1. Índice de Intensidad de Ligante ( $B_i$ )

La Figura 1 compara cuántos kilogramos de ligante se "gastaron" para generar cada unidad de presión (MPa).

- **SP-A (Eficiente):** Con una resistencia de 406.38  $\text{kg/cm}^2$  (39.8 MPa), su índice es de **16.7  $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$** .
- **Híbrido (Ineficiente):** Debido a la segregación, su resistencia cayó a 24.4 MPa, elevando su índice a **27.3  $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$** .

Esto implica que el sistema inestable requiere un 63% más de cemento para ofrecer la misma prestación estructural que el sistema optimizado.

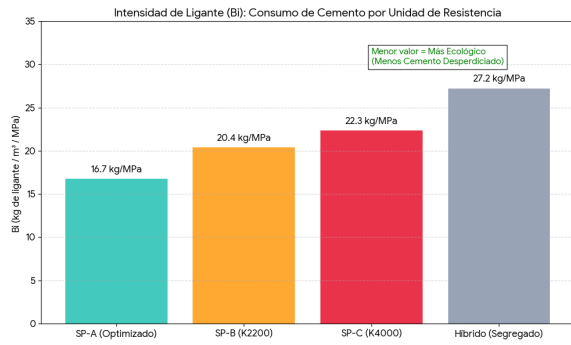


Figura 1: Intensidad de Ligante. Barras más bajas indican mayor sostenibilidad (menor consumo de cemento por MPa).

### 3.2. Costo Ambiental de la Segregación

La Figura 2 muestra la correlación entre la calidad física (densidad) y la huella ecológica ( $B_i$ ). Las mezclas que sufrieron segregación (puntos rojos a la izquierda) se desplazan hacia la zona de "Alto Desperdicio". La segregación no es solo un problema estructural, es un problema ambiental: la pasta de cemento que queda en el fondo de una probeta segregada no contribuye a la resistencia del elemento en su conjunto, convirtiéndose en material desperdiciado.

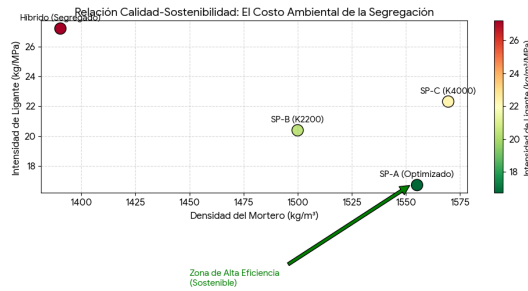


Figura 2: Mapa de Eficiencia. La zona verde representa el equilibrio ideal entre densidad y uso de cemento.

## 4 Discusión

La incorporación de 200 kg de microsílce busca densificar la matriz. Sin embargo, si el aditivo superplastificante no es compatible (como se vio con la sobredosis de SP-C o el sistema híbrido), la microsílce actúa simplemente como un relleno costoso en una matriz débil.

El uso de **SP-A al 1.5 %** permitió que la pasta encapsulara correctamente al EPS, logrando que cada grano de cemento y microsílce trabajara mecánicamente, reduciendo el  $B_i$  a niveles competitivos para morteros de alta resistencia.

## 5 Conclusiones

- La sostenibilidad en morteros aligerados depende intrínsecamente de la estabilidad reológica. La se-

gregación aumenta el índice de intensidad de ligante ( $B_i$ ) en más de un 60 %.

- El sistema optimizado con **SP-A** es la opción más ecológica, con un consumo de 16.7 kg de ligante por cada MPa de resistencia.
- Se recomienda utilizar el índice  $B_i$  como criterio de selección de aditivos, priorizando aquellos que maximicen la eficiencia del cemento sobre aquellos que solo ofrezcan fluidez o fraguado rápido.