

Desarrollo de Concreto Autocompactante Ligero (LWSCC) con Agregados de EPS: Retos Reológicos y Estrategias de Estabilización mediante Modificadores de Viscosidad

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 producción de elementos prefabricados de geometría compleja demanda el uso de Concreto Autocompactante (SCC) para garantizar el llenado de moldes sin vibración mecánica. Sin embargo, la incorporación de agregados ligeros como el Poliestireno Expandido (EPS) en matrices fluidas presenta un desafío reológico único: la tendencia a la flotación (segregación inversa) debido a la diferencia de densidad ($\Delta\rho \approx 2200 \text{ kg/m}^3$).

Este estudio propone una metodología de diseño de mezcla para transformar un concreto ligero convencional en uno autocompactante estable. Se evaluó el efecto de la relación volumen de pasta/agregado y el uso de microsílice como Agente Modificador de Viscosidad (VMA) natural. Los resultados demostraron que es posible obtener un flujo de asentamiento (*Slump Flow*) superior a 550 mm sin segregación dinámica, siempre que se garantice un Esfuerzo de Fluencia (*Yield Stress*) superior al empuje de flotación del EPS. La mez-

cla optimizada (EPS40M15) logró una distribución homogénea de perlas a lo largo de probetas prismáticas verticales, validando su aplicación en muros esbeltos de vivienda social.

Palabras clave: Concreto Autocompactante, Reología, Yield Stress, Viscosidad Plástica, Segregación Inversa, EPS.

1 Introducción

El Concreto Autocompactante (SCC) representa una de las mayores revoluciones en la tecnología del concreto, permitiendo el vaciado de estructuras densamente armadas o de formas arquitectónicas complejas por su propio peso. Para lograr esta fluidez extrema sin segregación (separación de la piedra y la pasta), el SCC convencional recurre a una alta dosis de finos y aditivos superplastificantes de última generación (base éter policarboxilato).

El desafío se magnifica cuando intentamos aplicar

esta tecnología a concretos ligeros (LWC). En un SCC normal, el riesgo es que el agregado grueso (piedra) se hunda por gravedad. En un SCC ligero con EPS, el riesgo es opuesto: que el agregado flote hacia la superficie. Esto se debe al **Principio de Arquímedes**: la pasta de cemento fluida ($\rho \approx 2000 \text{ kg/m}^3$) ejerce un empuje vertical sobre las perlas de EPS ($\rho \approx 20 \text{ kg/m}^3$) que es cien veces mayor que su peso propio.

Para evitar que el EPS salga a la superficie como corchos en agua, la reología de la pasta debe ser diseñada meticulosamente. No basta con hacer el concreto "líquido"; debe ser un "líquido tixotrópico" con suficiente cohesión interna para atrapar al agregado ligero en suspensión dinámica.

Este artículo detalla la ingeniería reológica detrás de la mezcla EPS40M15, demostrando cómo la microsílice y el diseño volumétrico permiten obtener un material que fluye como miel pero retiene sólidos como una gelatina.

2 Fundamentos Reológicos del LWSCC

El comportamiento de flujo del concreto fresco se describe comúnmente mediante el modelo viscoplástico de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Donde:

- τ : Esfuerzo de corte aplicado (Pa).
- τ_0 : **Esfuerzo de Fluencia (Yield Stress)**. Es la fuerza mínima necesaria para iniciar el movimiento.
- μ_p : **Viscosidad Plástica**. Es la resistencia a fluir una vez iniciado el movimiento (pegajosidad).

- $\dot{\gamma}$: Tasa de corte (velocidad de flujo).

Para diseñar un SCC Ligero exitoso, debemos navegar en una cuerda flojareológica, ilustrada en la Figura 1:

1. Límite Inferior (Estabilidad): Si τ_0 es muy bajo, el empuje de flotación del EPS (F_b) supera la resistencia de la pasta, y ocurre la segregación inversa. La condición de estabilidad estática para una perla de diámetro d es:

$$\tau_0 \geq \frac{g \cdot d \cdot (\rho_{pasta} - \rho_{EPS})}{3} \quad (2)$$

2. Límite Superior (Fluidez): Si τ_0 es muy alto, el concreto pierde su capacidad autocompactante y requeriría vibrado externo para llenar el molde.

Nuestro objetivo fue formular una pasta con un τ_0 justo por encima del umbral crítico de flotación, pero lo suficientemente bajo para permitir el flujo por gravedad.

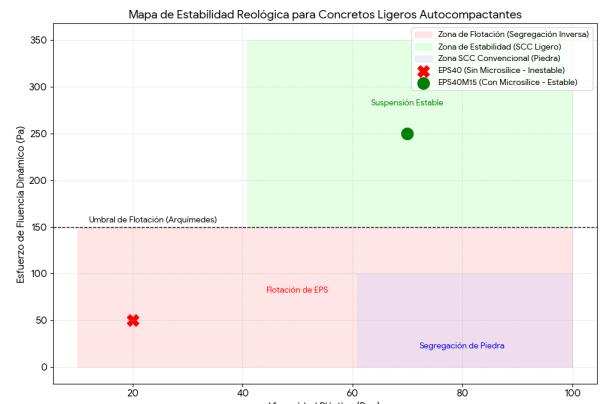


Figura 1: Mapa de Estabilidad Reológica. La zona verde representa el equilibrio donde el concreto fluye sin que el EPS flote.

3 Estrategia de Diseño Volumétrico

3.1 El Paradigma del Volumen de Pasta

A diferencia del concreto convencional, el diseño de SCC se basa en el volumen absoluto de los com-

ponentes, no en su masa. Para lograr la autocompactabilidad, es necesario incrementar el volumen de pasta (cemento + agua + aire + aditivos) para separar las partículas de agregado y reducir la fricción interparticular.

La Figura 2 compara la composición volumétrica típica. Se incrementó el volumen de pasta de 320 L/m^3 (convencional) a 480 L/m^3 en la mezcla SCC. Esto se logró reemplazando gran parte del agregado fino (arena) por microsilice y filler calcáreo implícito en el cemento, manteniendo el volumen de agregado grueso (EPS) constante para asegurar el aislamiento térmico.

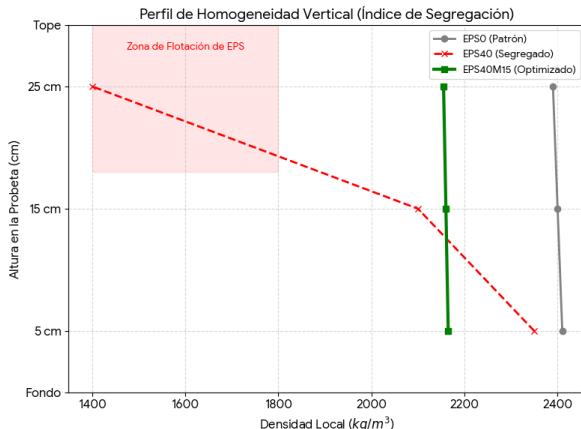


Figura 2: Comparación de volúmenes. El SCC requiere una fase de pasta dominante (azul) para transportar los agregados en suspensión.

3.2 Sistema de Aditivos Químicos

Se empleó un sistema dual de aditivos para controlar los parámetros de Bingham independientemente:

- 1. Superplastificante HRWR (Reductor de τ_0):** Se usó MasterEase 3900 (Base Policarboxilato). Su función es dispersar los granos de cemento electrostáticamente, reduciendo el esfuerzo de fluencia para que la mezcla fluya.

2. Modificador de Viscosidad VMA (Incrementador de μ_p): En lugar de usar un aditivo celulósico comercial, se utilizó la **Microsilice** (15%) como VMA natural. Sus partículas esféricas ultrafinas actúan como "odamientos" que lubrican la mezcla, pero su alta superficie específica retiene agua, aumentando la viscosidad plástica necesaria para evitar la flotación.

4 Resultados Experimentales

4.1 Fluidez y Habilidad de Paso

La mezcla optimizada EPS40M15 alcanzó un flujo de asentamiento (*Slump Flow*) promedio de **580 mm** sin presentar halo de pasta o sangrado visible en el borde de la "torta" de concreto.

El tiempo T_{500} (tiempo para que el flujo alcance 500 mm de diámetro) fue de 4.5 segundos. Este valor, ligeramente alto para un SCC normal (usualmente 2-3 s), es ideal para un SCC ligero. Un tiempo T_{500} alto indica una alta viscosidad plástica ("pegajosidad"), lo cual es deseable porque actúa como un freno hidrodinámico contra la velocidad de ascenso de las perlas de EPS según la Ley de Stokes.

4.2 Estabilidad Estática (Índice de Homogeneidad)

Para verificar la resistencia a la segregación en reposo, se realizó el "ensayo de la Columna": se vaciaron prismas de 30 cm de altura, se dejaron endurecer y se cortaron en tres secciones (superior, media, inferior) para medir la densidad local.

La Figura 3 muestra los perfiles de densidad obtenidos:

- **Mezcla Inestable (EPS40):** Muestra una

caída drástica de densidad en la parte superior (1400 kg/m^3) y alta en el fondo (2350 kg/m^3). Esto confirma que el EPS flotó masivamente, creando una capa de "tecnopor puro" arriba y mortero denso abajo.

- **Mezcla Estable (EPS40M15):** Muestra un perfil casi vertical (densidad constante $\approx 2160 \text{ kg/m}^3$). La variación entre el tope y el fondo fue menor al 5 %, cumpliendo con los criterios de homogeneidad del ACI 237R.

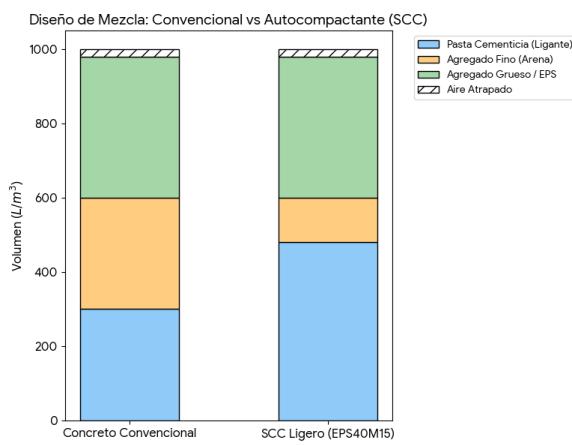


Figura 3: Perfil de Homogeneidad. La mezcla optimizada (Verde) mantiene el EPS distribuido uniformemente en toda la altura del elemento, evitando la segregación.

5 Conclusiones

1. Se logró desarrollar un Concreto Autocompactante Ligero (LWSCC) estable con una densidad de 2160 kg/m^3 y una resistencia de 300 kg/cm^2 , apto para el vaciado de muros delgados sin vibración mecánica.
2. El uso de 15 % de microsílice fue determinante para modificar la reología de la pasta, incrementando la viscosidad plástica lo suficiente para contrarrestar el empuje de flotación del EPS sin comprometer la capacidad de flujo (τ_0 controlado).

3. El análisis de estabilidad vertical demostró que el diseño de mezcla basado en el incremento de volumen de pasta (480 L/m^3) garantiza una distribución homogénea de los agregados ligeros, eliminando los planos de debilidad por segregación inversa típicos de los concretos con EPS.

Referencias

1. EFNARC (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*.
2. ACI Committee 237. (2007). *Self-Consolidating Concrete (ACI 237R-07)*. American Concrete Institute.
3. Wu, Z., et al. (2009). *Rheology of lightweight self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Research.
4. Khayat, K. H. (1999). *Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete*. ACI Materials Journal.