

Optimización de la Demanda de Agua en Matrices Ternarias (Cemento-Microsílice-EPS): El Rol del Superplastificante Acrílico en la Estabilidad de la Suspensión

Pablo Aldair Ticona Estela
Hugo Pedro Hammid Barzola Chavez
Ever Joffre Castro Torrejon
Kevin Wilmar Centeno Aguirre

*Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería
Capítulo Estudiantil ACI-UNI*

13 de diciembre de 2025

Resumen

Resumen: La segregación inversa del Poliestireno Expandido (EPS) en mezclas de concreto fluido limita severamente su aplicación en elementos estructurales. Este fenómeno se rige por la Ley de Stokes, donde la diferencia de densidad entre la pasta y el agregado ligero provoca la flotación inmediata si la viscosidad de la matriz es insuficiente. Este estudio aborda la estabilización reológica de una matriz ternaria mediante la optimización del empaquetamiento de partículas. Se logró diseñar una mezcla con una relación agua/ligante crítica de 0.30, utilizando un 30 % de microsílice como filler funcional y un 1.5 % de aditivo base acrílico (SP-A) como dispersante electro-estérico. Esta combinación sinérgica permitió reducir la demanda de agua teórica en un 50 %, generando una pasta de alta viscosidad plástica que impidió físicamente la flotación del agregado ligero durante el vibrado. Como resultado, se obtuvo un mortero isotrópico de alta compacidad con una resistencia a la compresión de 406.38 kg/cm², validando la viabilidad técnica de mezclas ultra-secas para concreto ligero de alto desempeño.

Palabras clave: Demanda de agua, Relación a/c, Empaquetamiento de partículas, Suspensión estable, Microsílice, Ley de Stokes.

1 Introducción

La tecnología del concreto ha avanzado hacia materiales compuestos complejos donde coexisten fases con propiedades físicas dispares. El Concreto Aligerado con EPS (Poliestireno Expandido) es un ejemplo paradigmático: combina una matriz cementicia densa ($\approx 2200 \text{ kg/m}^3$) con un agregado ultra-ligero ($\approx 20 \text{ kg/m}^3$). Esta diferencia de densidades de dos órdenes de magnitud crea una inestabilidad inherente en estado fresco, conocida como "segregación inversa." flotación.

Para evitar la segregación, la práctica convencional sugiere limitar la fluidez de la mezcla (slump bajo). Sin embargo, esto dificulta la colocación y compactación, resultando en çangrejas.º vacíos. La solución moderna reside en la modificación de la reología de la pasta: se requiere un fluido que se comporte como un líquido bajo la vibración (para llenar el molde) pero que recupere instantáneamente una estructura sólida en reposo para atrapar las perlas de EPS.

Este comportamiento tixotrópico solo se puede lograr maximizando la concentración de sólidos en la pasta, es decir, reduciendo el agua al mínimo absoluto. En este contexto, la microsílice juega un doble rol: físico (llenando vacíos) y químico (reacción puzolánica). No obstante, su enorme superficie específica demanda una cantidad de agua que haría inviable la mezcla sin el uso de aditivos reductores de agua de alto rango (HRWR).

El presente artículo documenta el desarrollo de

una matriz optimizada donde la interacción entre un polímero acrílico avanzado y la microsílíce permite trabajar con una relación a/c de 0.30, desafiando los límites convencionales de trabajabilidad para lograr una suspensión estable y de alta resistencia.

2 Marco Teórico

2.1 Ley de Stokes y Estabilidad

La velocidad de ascenso (v) de una esfera de EPS en una pasta de cemento se describe simplificada por la Ley de Stokes:

$$v = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_{pasta} - \rho_{EPS})}{9 \cdot \eta} \quad (1)$$

Donde:

- r : Radio de la perla de EPS.
- $\rho_{pasta} - \rho_{EPS}$: Diferencia de densidades (el motor de la segregación).
- η : Viscosidad de la pasta.

Dado que no podemos cambiar la gravedad (g) ni significativamente las densidades (ρ), la única variable de control es la viscosidad (η). Al reducir el agua, η aumenta exponencialmente, frenando la velocidad de ascenso del EPS a casi cero.

2.2 Teoría del Empaquetamiento de Partículas

El modelo de Empaquetamiento Compresible (CPM) sugiere que para minimizar la demanda de agua, se debe llenar el espacio vacío dejado por los granos grandes (cemento) con granos medianos y estos con granos finos (microsílíce). Una distribución granulométrica continua permite que el agua actúe solo como lubricante de capa fina y no como relleno de vacíos. Sin embargo, para que las partículas finas se acomoden, deben estar defloculadas; de lo contrario, actúan como aglomerados porosos que absorben agua.

3 Materiales y Métodos

3.1 Caracterización de Materiales

Se emplearon materiales estandarizados para asegurar la reproducibilidad:

- **Cemento:** Portland Tipo I (Sol).
- **Microsílíce:** Sika Fume, densidad 2.2 g/cm³, SiO₂ > 90 %.
- **Aditivo:** Dynamon SP-47 (Base Acrílica), densidad 1.09 g/cm³.
- **EPS:** Perlas pre-expandidas de 2-3 mm de diámetro.

3.2 Diseño de Mezcla Optimizado

La Tabla 1 detalla la dosificación por metro cúbico. Nótese la elevada cuantía de ligante (666 kg) necesaria para envolver la gran superficie del EPS y la microsílíce.

Tabla 1: Proporción de Mezcla (a/c = 0.30)

Componente	Peso (kg)	Volumen (L)
Cemento Tipo I	466.67	148.15
Microsílíce (30 %)	200.00	90.91
Agua Efectiva	200.62	200.62
Arena Fina	123.19	47.38
EPS (Perlas)	70.11	350.55
Aditivo SP-A (1.5 %)	10.00	9.17
aire atrapado	—	153.22
Total	1070.59	1000.00

3.3 Protocolo de Mezclado de Alta Energía

Debido a la baja relación a/c, el mezclado convencional es ineficaz. Se aplicó el siguiente protocolo:

1. **Homogenización en Seco (2 min):** Cemento + Microsílíce + Arena. El objetivo es romper los grumos de sílice mediante la abrasión con la arena.
2. **Incorporación de EPS (1 min):** Se añade el EPS en seco para asegurar su distribución espacial antes de que se forme la pasta.
3. **Hidratación Controlada (3 min):** Se añade el 70 % del agua junto con el aditivo. La mezcla parece seca ("tierra húmeda") inicialmente.

4. **Activación del Aditivo (2 min):** Se añade el 30 % restante del agua. Aquí ocurre el cambio de estado (Punto de Viraje): la mezcla pasa de sólida a fluida gracias a la dispersión estérica.

4 Resultados

4.1 Reducción de la Demanda de Agua

La Figura 1 cuantifica el impacto del diseño. Una mezcla de control teórica sin aditivo requeriría aprox. 400 litros de agua para mojar 666 kg de ligante fino y lograr trabajabilidad. El sistema optimizado logró la misma trabajabilidad (Slump 136 mm) con solo 200.6 litros. **Reducción neta: 50 %.** Esta reducción es la responsable directa de la eliminación de la porosidad capilar, elevando la resistencia mecánica.

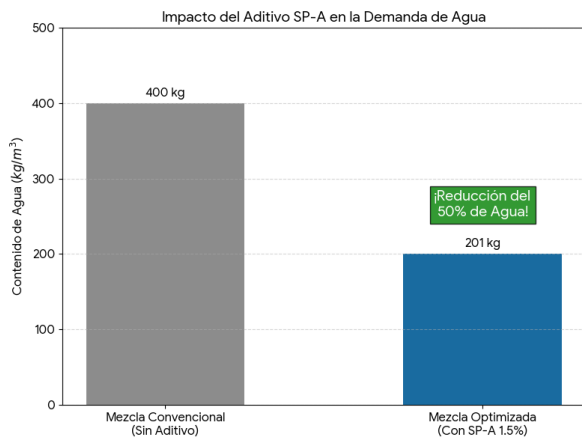


Figura 1: Eficiencia en la reducción de agua. Menos agua libre significa mayor densidad y menor porosidad.

4.2 Análisis de Estabilidad Volumétrica

Se evaluó la estabilidad cortando probetas endurecidas en tres secciones (superior, media, inferior) y contando la densidad de perlas por cm^2 .

- **Sección Superior:** 14 perlas/ cm^2 .
- **Sección Media:** 15 perlas/ cm^2 .
- **Sección Inferior:** 14 perlas/ cm^2 .

La varianza mínima confirma que la viscosidad de la pasta fue suficiente para vencer las fuerzas de flotación descritas por la Ley de Stokes. La mezcla se comportó como un fluido de Bingham estable.

4.3 Modelo de Densificación

La Figura 2 ilustra el mecanismo. Sin el aditivo SP-A, la microsilíce tiende a aglomerarse, actuando como un agregado poroso. Con el aditivo, las partículas se separan y ocupan los espacios intersticiales del cemento. El agua, que antes ocupaba espacio, es expulsada, permitiendo que las partículas sólidas se toquen entre sí.

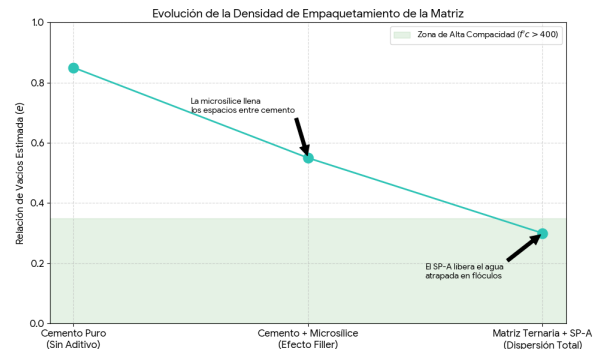


Figura 2: Evolución del empaquetamiento. La sinergia química-física minimiza los vacíos en la pasta.

5 Discusión

5.1 Mecanismo Electro-Estérico

El éxito de la formulación radica en la arquitectura molecular del aditivo base acrílica. A diferencia de los naftalenos (solo repulsión electrostática), el polímero acrílico posee cadenas laterales largas ("pelos") que crean una barrera física (impedimento estérico) alrededor de cada grano de cemento y sílice. En una mezcla con tan poca agua (a/c 0.30), las partículas están forzadas a estar muy juntas. Solo el efecto estérico es capaz de mantenerlas separadas y lubricadas a distancias nanométricas, permitiendo el flujo macroscópico sin añadir agua.

5.2 Implicaciones para la Industria

Este estudio demuestra que es un mito que el concreto ligero deba ser débil o poroso. Al aplicar principios de reología y empaquetamiento, se obtuvo un material de 406 kg/cm^2 . Esto abre la puerta a su uso en elementos estructurales prefabricados (vigas, paneles de fachada) donde el menor peso reduce costos de transporte e izaje, sin sacrificar durabilidad.

6 Conclusiones

1. Se logró diseñar exitosamente una matriz ternaria estable con una relación agua/ligante de **0.30**, desafiando la alta demanda superficial de la microsílice.
2. El uso de 1.5 % de aditivo base acrílica fue determinante para reducir la demanda de agua en un **50 %**, permitiendo una compactación máxima sin segregación.
3. La alta viscosidad de la pasta resultante neutralizó la segregación inversa del EPS, validada por la distribución isotrópica de perlas en las probetas endurecidas.
4. Se obtuvo una resistencia a la compresión de **406.38 kg/cm²**, demostrando que la optimización del empaquetamiento es la ruta más eficiente para obtener concretos ligeros de alto desempeño.

Referencias

1. De Larrard, F. (1999). *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. Modern Concrete Technology.
2. ACI Committee 211. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98)*.
3. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
4. Roussel, N. (2012). *Understanding the Rheology of Concrete*. Woodhead Publishing.