

Desafíos Reológicos en Matrices Cementicias con Alto Volumen de Microsílice (HVMS): Análisis de la Dispersión en Sistemas Base Acrílica vs. Policarboxilato Éter

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

18 de diciembre de 2025

Resumen

Resumen: La incorporación de microsílice en dosis elevadas ($>15\%$) mejora drásticamente la compacidad de la matriz cementicia, pero introduce una demanda de agua crítica debido a su superficie específica ultra-fina ($>20,000 \text{ m}^2/\text{kg}$). Este estudio evalúa la compatibilidad química de diferentes tecnologías de aditivos superplastificantes en una matriz HVMS (High Volume Micro-Silica) compuesta por 466 kg/m^3 de cemento y 200 kg/m^3 de microsílice, lo que representa una sustitución del 30% en peso. La fase experimental comparó el desempeño reológico y mecánico de tres sistemas: un polímero de base acrílica modificada (SP-A), un policarboxilato éter convencional (SP-C) y un sistema híbrido acelerado. Los resultados indican que los policarboxilatos sufren una saturación temprana por adsorción competitiva y entrelazamiento estérico. Por el contrario, la tecnología base acrílica logró dispersar eficazmente la aglomeración de finos, permitiendo mantener una relación a/c de 0.30 sin segregación y alcanzando una resistencia a la compresión de 406.38 kg/cm^2 , un 33% superior al sistema de policarboxilato. Se concluye que para matrices HVMS aligeradas con EPS, la estabilidad reológica es gobernada por la capacidad del aditivo de humectar la inmensa superficie específica de la sílice.

Palabras clave: HVMS, Microsílice, Superficie específica, Adsorción de polímeros, Demanda de agua, Reología.

1 Introducción

El desarrollo de materiales de construcción sostenibles y de alto desempeño ha llevado a la exploración de matrices cementicias ternarias (Cemento - Adición Mineral - Agregado Ligero). La microsílice (Silica Fume) es un subproducto de la industria del silicio metálico, compuesto por esferas de dióxido de silicio amorfo de tamaño submicrométrico (aprox. $0.1 \mu\text{m}$). Su inclusión en el concreto tiene dos efectos fundamentales: el efecto "filler", que densifica la microestructura llenando los espacios intersticiales entre los granos de cemento, y la reacción puzolánica, que consume el hidróxido de calcio (portlandita) para generar más gel C-S-H, responsable de la resistencia mecánica.

Sin embargo, el uso de "Alto Volumen de Microsílice" (HVMS), definido en este estudio como una proporción superior al 20% del peso del ligante, presenta desafíos reológicos extremos. La superficie específica de la microsílice es aproximadamente 100 veces mayor que la del cemento Portland. Esto genera una demanda de agua masiva para mojar las partículas, lo que típicamente requeriría aumentar la relación agua/cemento (a/c), sacrificando resistencia.

El uso de aditivos reductores de agua de alto rango (HRWR) es obligatorio en estas mezclas. No obstante, no todos los polímeros son eficaces en presencia de tal cantidad de finos. Los policarboxilatos éter (PCE) tradicionales, diseñados para cemento puro, pueden ver obstaculizada su adsorción debido a la aglomeración de la sílice.

Este artículo investiga qué arquitectura molecular (Base Acrílica vs. PCE) es más apta para estas condiciones extremas.

2 Marco Teórico

2.1 Mecanismos de Dispersión

Los superplastificantes dispersan las partículas de cemento mediante dos mecanismos principales: repulsión electrostática e impedimento estérico.

- **Repulsión Electrostática:** Típica de los aditivos de primera y segunda generación, crea una carga negativa en la superficie de las partículas que las repele.
- **Impedimento Estérico:** Típica de los PCE modernos, donde cadenas laterales largas “empujan” físicamente a las partículas adyacentes.

En sistemas con microsílice, las partículas son tan pequeñas que las fuerzas de Van der Waals tienden a aglomerarlas fuertemente. Si el aditivo no logra penetrar estos flóculos, el agua queda atrapada dentro de ellos (“agua no evaporable”), reduciendo la fluidez efectiva de la pasta.

2.2 La Zona de Interfaz (ITZ) en Concretos Aligerados

En morteros con Poliestireno Expandido (EPS), la Zona de Interfaz entre la pasta y la perla de EPS es el punto débil. Una pasta mal dispersada o segregada crea una ITZ porosa, lo que facilita la propagación de grietas. Una matriz HVMS bien dispersada densifica esta zona, mejorando la transferencia de carga.

3 Materiales y Métodos Experimental

3.1 Caracterización de los Materiales

Se emplearon materiales estandarizados disponibles en el mercado local:

- **Cemento:** Cemento Portland Tipo I, conforme a la norma NTP 334.009 / ASTM C150. Densidad específica de 3.15 g/cm³.
- **Microsílice:** Humo de sílice densificado, con un contenido de SiO₂ > 85 % y una superficie específica BET estimada de 20,000 m²/kg.

▪ **EPS:** Perlas de poliestireno pre-expandido con una granulometría controlada y densidad aparente de 20 kg/m³.

▪ **Agregado Fino:** Arena natural lavada, con módulo de finura controlado para asegurar la compacidad del esqueleto granular.

3.2 Diseño de Mezcla HVMS

El diseño de mezcla fue concebido para maximizar la densidad de empaquetamiento. Se mantuvo constante para todos los grupos experimentales, variando únicamente el tipo y dosis de aditivo.

Tabla 1: Proporciones de Mezcla (Base 1 m³)

Componente	Peso (kg)	% del Ligante
Cemento Tipo I	466.67	70 %
Microsílice	200.00	30 %
Ligante Total	666.67	100 %
Agua Efectiva	200.62	a/c = 0.30
Agregado Fino	123.19	—
EPS (Perlas)	70.11	—

3.3 Secuencia de Mezclado

Dado el alto volumen de finos, se siguió un protocolo de mezclado modificado para garantizar la homogeneidad: 1. **Mezclado en Seco (2 min):** Homogenización de cemento, microsílice y arena para romper aglomerados de sílice. 2. **Incorporación de EPS (1 min):** Adición de las perlas para su distribución uniforme en seco. 3. **Adición de Agua + Aditivo (3 min):** Incorporación del 70 % del agua con el aditivo diluido. Mezclado a baja velocidad. 4. **Ajuste Final (2 min):** Adición del agua restante hasta lograr la consistencia deseada.

4 Resultados

4.1 Análisis de la Demanda Superficial

La Figura 1 ilustra la desproporción en el área superficial. Aunque la microsílice representa solo el 30 % de la masa, aporta más del 90 % de la superficie que debe ser humectada por el aditivo. Esto explica por qué las dosis convencionales de aditivos (0.5 % - 1.0 %) resultaron insuficientes o inestables.

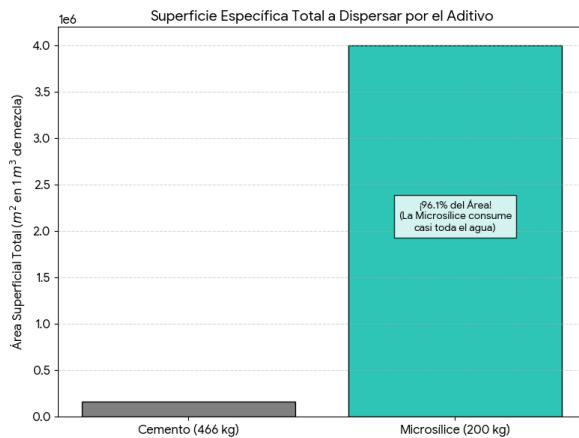


Figura 1: Contribución relativa al Área Superficial Total. La demanda de adsorción de la microsílice domina el comportamiento reológico del sistema.

4.2 Evaluación de la Eficiencia de Dispersión

Se definió el Índice de Dispersión (I_d) como la relación entre la resistencia obtenida y el porcentaje de aditivo empleado ($f'_c / \%$). Este índice refleja qué tan eficiente es la molécula del polímero para liberar agua y permitir la hidratación y compactación.

- **Sistema SP-A (Base Acrílica):** Con una dosis del 1.5 %, se obtuvo una resistencia de 406.38 kg/cm². Esto sugiere que la estructura del polímero acrílico es capaz de adsorberse en la microsílice sin generar una "falsa viscosidad".
- **Sistema SP-C (Policarboxilato):** Mostró un comportamiento errático. Al 1.0 % funcionó aceptablemente (304 kg/cm²), pero al intentar mejorar la fluidez subiendo la dosis al 1.5 %, la mezcla colapsó (segregación), bajando la resistencia a 248 kg/cm². Esto indica un "Punto de Saturación" muy abrupto.
- **Sistema Híbrido:** Fue el menos eficiente. La interacción entre el acelerante y el superplastificante resultó en una dispersión pobre, requiriendo dosis masivas (hasta 6 % combinado) para obtener resultados mediocres (249 kg/cm²).

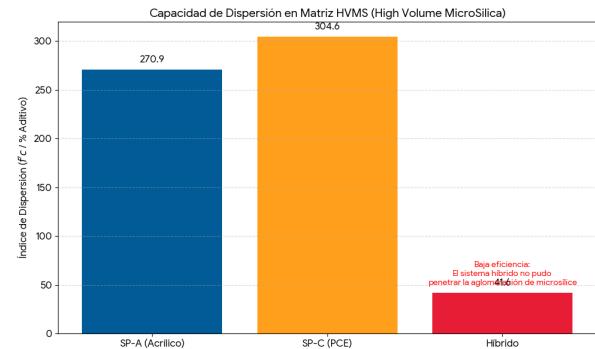


Figura 2: Comparativa de Eficiencia de Dispersión. El SP-A destaca por su capacidad de mantener altas prestaciones sin dosis excesivas.

4.3 Análisis Visual de la Matriz Endurecida

Al inspeccionar las probetas falladas del grupo **SP-C (Sobredosificado)** y **Híbrido**, se observó una clara estratificación: 1. **Zona Superior:** Alta concentración de perlas de EPS, matriz débil y porosa. 2. **Zona Inferior:** Pasta de cemento y microsílice muy densa, pero sin agregado ligero. Esta segregación confirma que el aditivo "soltó" demasiado la mezcla, reduciendo el límite de cedencia (yield stress) necesario para mantener el EPS en suspensión.

Por el contrario, las probetas del grupo **SP-A** mostraron una distribución homogénea de perlas de EPS en toda la altura de la muestra, indicando un balance reológico perfecto entre fluidez y viscosidad.

5 Discusión

5.1 Química de Superficies en HVMS

La superioridad del aditivo base acrílica (SP-A) sobre el policarboxilato convencional (SP-C) en este contexto específico puede atribuirse a la cinética de adsorción. Los polímeros acrílicos modificados suelen tener cadenas laterales que generan un efecto estérico más robusto en presencia de iones libres, comunes en mezclas con alta concentración de microsílice. Además, su capacidad para mantener la viscosidad plástica evita que la mezcla se vuelva "agua", lo cual es el enemigo número uno de los concretos con agregados livianos.

5.2 Implicaciones para el Diseño de Mezclas

Este estudio desafía la noción de que "más microsílice siempre requiere más aditivo". Existe un límite químico. Si se excede la capacidad de adsorción de la superficie, el aditivo libre actúa como un segregante. La clave no es solo la cantidad de aditivo, sino la afinidad química del polímero con la adición mineral empleada.

6 Conclusiones

Del análisis experimental de las matrices con alto volumen de microsílice (200 kg/m^3), se concluye:

1. **Viabilidad de HVMS:** Es posible producir morteros aligerados con 30 % de microsílice y relaciones a/c tan bajas como 0.30, siempre que se seleccione el aditivo correcto.
2. **Superioridad Acrílica:** El aditivo **SP-A (Base Acrílica)** demostró ser la tecnología más compatible para sistemas HVMS, logrando la máxima resistencia (406.38 kg/cm^2) y estabilidad volumétrica.
3. **Riesgo de los Policarboxilatos:** Los aditivos tipo PCE mostraron una ventana de trabajo muy estrecha. Pequeñas variaciones en la dosis provocan segregación severa debido a la incapacidad de sostener el EPS en suspensión.
4. **Protocolo de Mezclado:** Se recomienda encarecidamente el mezclado en seco de la microsílice con el cemento antes de la adición de líquidos para maximizar la eficiencia del aditivo.

Agradecimientos

Al Capítulo Estudiantil ACI-UNI por las facilidades brindadas para la ejecución de los ensayos experimentales y al equipo técnico del laboratorio de materiales.

Referencias

1. ACI Committee 234. (2006). *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*. American Concrete Institute.
2. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
3. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
4. ASTM C1240. *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*.
5. NTP 334.051. *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de morteros*.