

INFLUENCIA DE LOS SUPERPLASTIFICANTES SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CEMENTO PORTLAND COMPUESTO

*INFLUENCE OF SUPERPLASTICIZERS ON THE
MECHANICAL PROPERTIES OF PORTLAND COMPOSITE
CEMENT*

MARTÍNEZ GUTIÉRREZ, Myriam Itzel ¹

GALLARDO HEREDIA, Marisol ¹

LÓPEZ BADILLO, Claudia Magdalena ¹

RESUMEN

El presente trabajo describe la influencia de los superplastificantes (SP) sobre las propiedades mecánicas y trabajabilidad del cemento Portland compuesto (CPC). Estos aditivos químicos son utilizados para reducir el contenido de agua sin afectar la hidratación del cemento y conjuntamente mejorar la fluidez, resistencia y durabilidad del material. Se describen los principales tipos de superplastificantes: lignosulfatos, formaldehídos de naftaleno sulfonado, formaldehídos de melamina sulfonada y éteres policarboxílicos. Estos últimos muestran un desempeño superior al mantener la trabajabilidad y aumentar la resistencia del material con porcentajes menores al 3 %. Además, se revisaron diversos estudios que demuestran la eficacia de los SP en mezclas de CPC con materiales alternativos, como cenizas volantes, escorias o puzolanas, ya que estos últimos modifican la reología y la cinética de hidratación, lo que hace más evidente el efecto del aditivo sobre la trabajabilidad y las propiedades mecánicas (Argin & Uzal, 2026). En general, una aplicación adecuada de SP reduce la demanda de agua y mejora la trabajabilidad de sistemas cementicios, este artículo aporta una visión integradora que explica, desde fundamentos químicos, por qué su presencia resulta esencial para controlar la dispersión de partículas, la hidratación temprana y el uso eficiente del agua en sistemas cementicios.

Palabras clave: cemento Portland compuesto; materiales cementantes; propiedades mecánicas; trabajabilidad; aditivos químicos.

CRUZ ARGÜELLO, Julio César ²

MÚZQUIZ RAMOS, Elia Martha ¹

1. Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Saltillo, Coahuila,
México.

2. Instituto Tecnológico de
Chetumal, Tecnológico
Nacional de México. Chetumal,
Quintana Roo, México.

Correspondencia
emuzquiz@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-8626-678X>

Fecha de recepción
28 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

ABSTRACT

This paper describes the influence of superplasticizers (SP) on the mechanical properties and workability of Portland Composite Cement (PCC). These chemical additives are used to reduce water content without affecting cement hydration while also improving the material's flowability, strength, and durability. The main types of superplasticizers are described: lignosulfates, sulfonated naphthalene formaldehyde, sulfonated melamine formaldehyde, and polycarboxylic ethers. The latter shows superior performance by maintaining workability and increasing the material's strength at percentages below 3 %. Furthermore, several studies demonstrating the effectiveness of SP in PCC mixtures with alternative materials, such as fly ash, slag, or pozzolans, were reviewed. These alternative materials modify the rheology and hydration kinetics, making the effect of the additive on workability and mechanical properties more evident (Argın & Uzal, 2026). In general, proper application of SP reduces water demand and improves the workability of cementitious systems. This article provides an integrative view that explains, from chemical fundamentals, why its presence is essential to control particle dispersion, early hydration, and efficient water use in cementitious systems.

Keywords: Portland composite cement; cementitious materials; mechanical properties; workability; chemical additives.

1. INTRODUCCIÓN

El cemento Portland compuesto (CPC) es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo debido a su capacidad para alcanzar gran resistencia y durabilidad una vez endurecido (Orozco et al., 2018). Estas propiedades dependen de factores como la relación agua/cemento, la calidad de las materias primas y la incorporación de aditivos químicos como retardantes, acelerantes del fraguado y superplastificantes. Estos últimos, mejoran la trabajabilidad del material sin aumentar la cantidad de agua, mejorando la resistencia mecánica ya que no alteran el proceso de hidratación (X. H. Wang et al., 2024). Los superplastificantes (SP) actúan sobre las partículas del cemento reduciendo las fuerzas de atracción mediante mecanismos fisicoquímicos, principalmente las fuerzas estéricas y/o electrostáticas. Eso permite reducir el contenido de agua necesario para

obtener una mezcla con fluidez lo que da aumento a la resistencia mecánica del material (Nkinamubanzi et al., 2016). El uso de SP ha avanzado desde los primeros lignosulfonatos hasta las actuales formulaciones a base de policarboxilatos. Estos avances han contribuido al desarrollo de concretos con mejores propiedades mecánicas comparadas al concreto convencional, como el concreto de ultra alto desempeño (UHPC) o el concreto autocompactante (Akhnoukh & Buckhalter, 2021). Además de mejorar la fluidez de la mezcla, el uso adecuado de SP influye en parámetros críticos como la distribución del tamaño de partículas, la resistencia inicial y final, la retracción y el módulo de elasticidad. Su eficiencia depende de variables como el tipo de cemento, la dosis empleada y la compatibilidad química entre ambos. Investigaciones recientes han demostrado que una dosificación óptima de SP puede reducir la variabilidad del concreto y favorecer una microestructura más densa y homogénea (Rao et al., 2024). El principal objetivo de este artículo es dar a conocer, de manera general, el papel de los SP en el cemento y cómo estos aditivos mejoran su trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

2. CEMENTO PORTLAND COMPUESTO

El CPC es un material aglutinante esencial en la industria de la construcción, el cual es utilizado para la elaboración de concretos y morteros. La importancia de este material se debe a su capacidad para reaccionar químicamente con el agua formando reacciones de hidratación, que le permiten endurecer y adquirir resistencia con el paso del tiempo (Bullard et al., 2011; John & Lothenbach, 2023; Xu et al., 2024).

El principal componente del CPC es el clinker, el cual está constituido por cuatro fases minerales: alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferrita tetracálcica (C_4AF). En la tabla 1, se describe el papel de cada fase en el proceso de hidratación (Elsen et al., 2011; Ochoa Luna & Flores B., 1994).

En la actualidad, en algunos casos también se le adicionan materiales como escorias de alto horno o cenizas volantes para mejorar su desempeño, a raíz de esto, se modificó el nombre de cemento Portland ordinario a cemento Portland compuesto (Cárdenas Pulido et al., 2016; Saha, 2018; F. Wang et al., 2024).

Tabla 5. Composición del CPC.

Fase/Compuesto	Fórmula química/ Composición	Proporciones (%)	Aportación
Alita (silicato tricálcico C_3S)	Ca_3SiO_5	~50-70	Fraguado rápido y desarrollo de la resistencia inicial.
Belita (silicato dicálcico C_2S)	Ca_2SiO_4	~15-30	Aumento de la resistencia a largo plazo.
Aluminato tricálcico (C_3A)	$Ca_3Al_2O_6$	~5-10	Reacciones iniciales de hidratación.
Ferrita tetra cálcica (C_4AF)	$Ca_2(Al, Fe)_2O_5$	~5-15	Estabilidad química del cemento.
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	~3-5	Tiempo de fraguado.
Cenizas volantes, escorias de alto horno, entre otros.	$(SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3)$, $(CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO)$	~0-10	Mejoran la trabajabilidad, aumentan la durabilidad y reducen el calor de hidratación.

Tomado de: Elsen et al. (2011); Ochoa Luna & Flores B. (1994).

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CEMENTOS

Estas son fundamentales para determinar el desempeño real de un cemento, ya que existe una conexión entre la resistencia mecánica y la durabilidad dado que un material estructuralmente apto suele ser más denso y resistente a agentes agresivos como ácidos, sulfatos y cloruros (Tahwia et al., 2023). Entre las propiedades más relevantes de los cementos destacan la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión y el módulo de elasticidad. La resistencia a la compresión es el parámetro más utilizado para indicar si el material cuenta con una buena calidad, determinando la capacidad de la estructura para soportar cargas. Esta propiedad depende de factores como la relación agua/cemento, la porosidad del material y la microestructura que se desarrolla durante el tiempo de curado (Gaonkar & Madhu, 2021). En la



actualidad, los aditivos químicos (superplastificantes, plastificantes) son utilizados ampliamente en el desarrollo de materiales cementantes ya que son capaces de modificar y mejorar estas propiedades. Estos, al ser incorporados en pequeñas cantidades, influyen directamente en las propiedades del cemento como la trabajabilidad, la consistencia, el tiempo de fraguado, la densidad y la hidratación (Cheung et al., 2011).

4. SUPERPLASTIFICANTES

Los superplastificantes (SP) son aditivos químicos que se utilizan para aumentar la fluidez y la trabajabilidad de mezclas cementicias, capaces de reducir el contenido de agua en $\sim 30\%$, mejorando su desempeño y representando un beneficio ambiental importante al disminuir el consumo de agua asociado a la producción de estas mezclas (Ramachandran & Malhotra, 1996). Estos consisten en polímeros de alto peso molecular solubles en agua. La solubilidad está determinada por la presencia de grupos hidroxilos ($-\text{OH}$), sulfonatos ($\text{R}-\text{SO}_3^-$) o carboxilos ($-\text{COOH}$), los cuales están unidos a la cadena principal del polímero (Darweesh, 2016).

Su mecanismo de acción se basa en sus estructuras moleculares y en las interacciones fisicoquímicas, dispersando las partículas del cemento sin aumentar el contenido de agua, actuando por repulsión electrostática y/o por efecto estérico, lo que rompe los flóculos y libera el agua atrapada en ellos. Esto permite reducir la relación

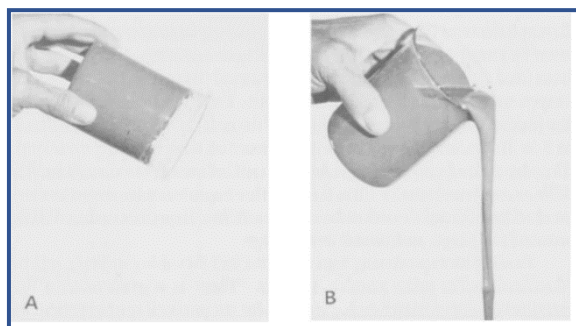


Figura 1. Efecto de superplastificantes en el cemento. A: Cemento + agua. B: Cemento + agua + superplastificante.

Tomado de Ramachandran y Alhotra (1996).

agua/cemento, aumentar la fluidez y mejorar las resistencias mecánicas y la durabilidad del material, además de influir en la hidratación y el tiempo de fraguado (Nkinamubanzi et al., 2016).

4.1 IPOS DE SUPERPLASTIFICANTES

Los SP se clasifican en cuatro tipos principales: lignosulfatos (LS), formaldehído de naftaleno sulfonado (SNF), formaldehído de melamina sulfonada (SMF) y éter policarboxílico (PCE). Los tipos de LS, SNF y SMF funcionan según el principio de repulsión electrostática, mientras que, en los PCE el mecanismo principal es el efecto de repulsión estérico (Sathyan y Anand, 2019).

- Lignosulfatos (ls) Fueron los primeros dispersantes agregados como aditivos reductores de agua en el concreto. Se han utilizado desde la década de 1930. Se obtienen como subproductos de la pasta de sulfito de la madera, que se utiliza para separar fibras de celulosa puras mediante la disolución de hemicelulosa y lignina (Gelardi et al., 2016). Contienen numerosos grupos funcionales como ácido carboxílico ($-\text{COOH}$), fenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$), ácido sulfónico ($\text{R-SO}_3\text{H}$), entre muchos otros; al igual que diversas combinaciones de estos (figura 2). Al retardar el fraguado del cemento, puede ser favorable en ciertas condiciones climáticas, sin embargo, el tiempo de fraguado podría extenderse hasta tiempos imprácticos (Flatt & Schober, 2012).

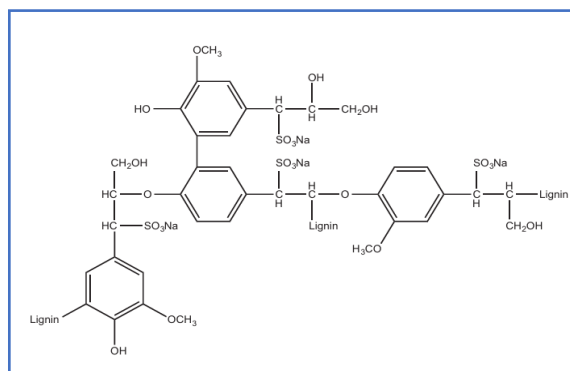


Figura 2. Estructura química de un LS.

Tomado de Gelardi et al. (2016).

- Formaldehídos de naftaleno sulfonado (snf). Se desarrollaron inicialmente en la década de 1930. A finales de 1960 fueron introducidos en el mercado japonés como aditivos para concreto (Gelardi et al., 2016). Su capacidad de dispersión es mayor que la de los LS, lo que permite una mayor reducción de agua, hasta de 30 % (Nkinamubanzi et al., 2016). Se producen mediante la reacción de naftaleno sulfónico con ácido sulfúrico para obtener β -naftaleno sulfónico, para posteriormente ser condensado con formaldehído en medio acuoso formando el SNF (figura 3). Sin embargo, no todos los

cementos son compatibles con todos los SNF (Flatt & Schober, 2012). Tienen buena eficacia inicial, pero su efecto puede disminuir con el tiempo. Presentan una interacción débil con los minerales arcillosos.

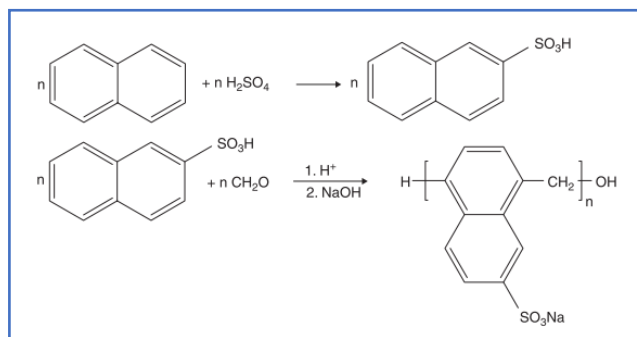


Figura 3. Síntesis para la preparación de SNF.

Tomado de Gelardi et al. (2016).

- Formaldehídos de melamina sulfonada (SMF). Se han utilizado desde mediados de 1970 como SP para concretos. Son producidos por una reacción de condensación de melamina con sulfato y formaldehído (figura 4) (Gelardi et al., 2016). En comparación con el SNF, la reducción de agua es prácticamente la misma, pero la vida útil del SNF es ligeramente mejor. Los SNF suelen ser de los SP de los más utilizados en la industria del concreto ya que no retardan el fraguado del cemento (Flatt & Schober, 2012).

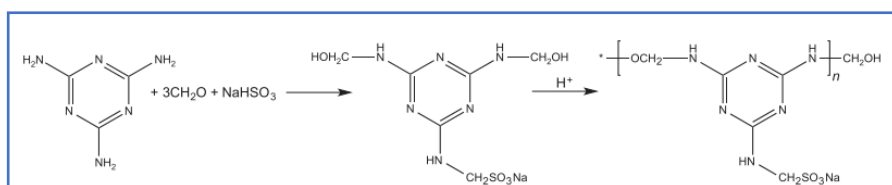


Figura 4. Secuencia de reacción para la síntesis de SMF.

Tomado de Gelardi et al. (2016).

ÉTERES POLICARBOXÍLICOS (PCE):

Se desarrollaron en Japón a mediados de 1980, en comparación con los SP a base de LS, SNF y SMF, presentan la capacidad de mantener la trabajabilidad del concreto y dispersar las partículas de cemento a bajas dosis sin aumentar los periodos de fraguado (Rao et al., 2024). Tienen estructuras químicas versátiles y pueden lograr una reducción de agua de hasta el 40 %, pero generalmente presentan una baja tolerancia a los minerales arcillosos (Nkinamubanzi et al., 2016). La estructura de los SP en forma de "peine" (figura 5) consiste en una cadena principal que contiene grupos carboxílicos,



los cuales ceden carga negativa a esta, a la que se unen cadenas laterales de poliéteres. La cadena principal con carga negativa es responsable de la adsorción del SP sobre las partículas de cemento con carga positiva (Gelardi et al., 2016).

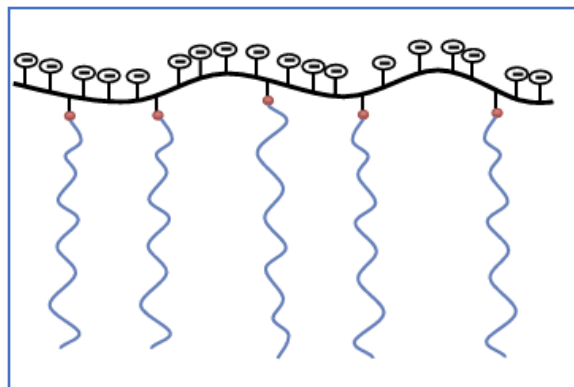


Figura 5. Estructura en forma de peine de un PCE.
Tomado de Gelardi et al. (2016).

APLICACIONES DE LOS SUPERPLASTIFICANTES

El uso de SP en mezclas cementicias ha sido ampliamente estudiado desde concretos de alta resistencia hasta mezclas con agregados alternativos. En los últimos años, diversas investigaciones han explorado nuevas formulaciones de estos aditivos, demostrando su capacidad para mejorar la durabilidad y desempeño del concreto.

Se ha observado que los SP no solo aumentan la trabajabilidad de la mezcla, sino que también promueven una hidratación más eficiente y una reducción significativa de la porosidad, lo que mejora la resistencia y la durabilidad a largo plazo. Esto coincide con el trabajo de Chen et al. (2022), quienes emplearon mezclas cementantes formadas por CPC y ceniza volante, incorporando SP tipo PCE. En su estudio evaluaron el comportamiento de estas mezclas en términos de hidratación, microestructura, resistencia mecánica e impermeabilidad.

Por su parte, Li et al. (2022) estudiaron cómo el contenido y la finura del metacaolín afectan la reactividad, trabajabilidad y resistencia de cementos con arcillas calcinadas y SP de HPEG (Éter metalil poli(etilenglicol)) PCE. También encontraron que un mayor contenido de metacaolín aumenta la reactividad y la resistencia inicial del material, pero también incrementa la cantidad de agua y la dosis requerida de PCE. La finura influye principalmente en la



cantidad de agua, mientras que el contenido de metacaolín determina la cantidad de PCE requerida.

Diversas investigaciones se han centrado en comparar el comportamiento de distintos tipos de SP y su interacción con otros aditivos empleados en la formulación del cemento. En este contexto, Kapeluszna y Chrabąszcz (2023) investigaron cómo interactúan los SP de PCE y SNF con ayudantes de molienda como TEA (trietanolamina) y glicol en cementos con diferentes contenidos de C_3A . También en esta investigación analizaron sus propiedades de hidratación, reología, resistencia mecánica, tensión superficial y contenido de aire. Los resultados mostraron que la TEA acelera la hidratación y disminuye la eficacia de los SP, en especial de SNF. En cementos con bajo C_3A el PCE fue más eficiente, mientras que en los de alto C_3A ambos aditivos tuvieron efectos similares. También observaron que las combinaciones de TEA y SNF aumentan el aire atrapado y modifican la estructura del poro, afectando la trabajabilidad y resistencia del material.

Cao et al. (2023) desarrollaron un SP diseñado para ser eficaz en concretos que incorporan ceniza volante y arena manufacturada, materiales que dificultan la trabajabilidad de la mezcla. Sus ensayos demostraron que este nuevo aditivo permitió mantener la fluidez de la mezcla, reducir la exudación y mejorar la resistencia mecánica, lo que lo convierte en una solución prometedora para la producción de concretos con materiales alternativos sin comprometer la calidad del producto final.

Zhang y Sun (2023) abordaron la aplicación de SP en sistemas activados alcalinamente con base en ceniza volante. Evaluaron propiedades reológicas como la viscosidad y el esfuerzo de cedencia, así como el mecanismo de adsorción de los SP en presencia de diferentes activadores alcalinos. Los resultados indicaron que, aunque estos aditivos pueden ser eficaces en este tipo de sistemas, su rendimiento depende significativamente del tipo de activador utilizado y de la interacción química con los productos de reacción formados.

Huang et al. (2024) analizaron el uso de SP para optimizar el cemento reciclado activado térmicamente (RC). Este tipo de material posee una superficie específica mayor y, por lo tanto, una demanda de agua elevada, requiriendo aditivos químicos con capacidades de dispersión superiores. Examinaron diversos mecanismos de acción, como el impedimento estérico y la repulsión electroestática para identificar qué estructuras moleculares de los



SP son más compatibles con la composición química del RC. Finalmente, proponen que el uso de estos aditivos es fundamental para mejorar la durabilidad y la resistencia mecánica de concretos.

Valdivieso-Galarza et al. (2025) evaluaron el efecto que causa los SP en la resistencia a la compresión y el porcentaje de porosidad del concreto. Trabajaron con diferentes relaciones agua/cemento (a/c) donde mantuvieron constante la cantidad de SP y el contenido de cemento. Obtuvieron resultados los que la incorporación del aditivo en mezclas de relación a/c baja logró optimizar significativamente las propiedades del concreto y a la vez redujo su porosidad por lo que la utilización de superplastificantes en dosis correctas, potencia significativamente las propiedades del concreto.

En conjunto, estos estudios demuestran que los superplastificantes desempeñan un papel fundamental en la optimización del comportamiento del cemento. Su correcta aplicación permite no solo mejorar la trabajabilidad de la mezcla, sino también influir positivamente en la resistencia mecánica, la densidad de la microestructura y la durabilidad del concreto, tanto en sistemas convencionales como en formulaciones con materiales suplementarios o alternativos.

CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió comprender, de manera general, el papel fundamental de los superplastificantes en el CPC y su influencia en las propiedades mecánicas, donde su correcta dosificación y tipo específico influyen en el rendimiento del material, permitiendo el desarrollo de materiales más resistentes, duraderos y de mejor calidad. Actualmente, los superplastificantes a base de policarboxilato (PCE) se han convertido en los más utilizados dentro de la industria de concreto, gracias a su alto desempeño en comparación con otros tipos. Su estructura molecular permite una dispersión más eficiente de las partículas del cemento, favoreciendo una mayor trabajabilidad y el incremento en las resistencias mecánicas del material. Su incorporación ha permitido el desarrollo de materiales cementicios más resistentes, duraderos y de mayor calidad, empleados en la industria de la construcción.



AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila y al programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de los Materiales por el apoyo brindado para la realización de este escrito, así como a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría N° 4063772.

REFERENCIAS

- Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00559. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>
- Argin, G., & Uzal, B. (2026). Compatibility of superplasticizers with natural pozzolan blended cement: Multi-criteria compatibility index through rheology and hydration kinetics. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 30(1), 1–30. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2545452>
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- Cárdenas Pulido, J., Lizarazo-Marriaga, J., & Aperador Chaparro, W. (2016). Comportamiento mecánico de sistemas cementantes binarios (cemento Portland–ceniza volante–escoria de alto horno). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(1), 78–98. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10032113>
- Cao, P., Huang, X., Bao, S., & Yang, J. (2023). Influence of high-robustness polycarboxylate superplasticizer on the performances of concrete incorporating fly ash and manufactured sand. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 19(8), 2041–2051. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.027399>
- Chen, J., Zhu, Y., Du, W., Li, M., Wang, Y., Zhang, C., Shi, M., & Xue, B. (2022). Influence of polycarboxylate superplasticizer on the properties of cement-fly ash cementitious materials and concrete. *Sustainability*, 14(20), 13440. <https://doi.org/10.3390/su142013440>
- Cheung, J., Jeknavorian, A., Roberts, L., & Silva, D. (2011). Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1289–1309. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.005>

- Darweesh, H. H. M. (2016). Black liquor waste as a cement admixture or cement and concrete admixtures. In F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov, N. Karak, & H. Jonkers (Eds.), *Biopolymers and biotech admixtures for eco-efficient construction materials* (pp. 99–130). Woodhead Publishing.
- Elsen, J., Mertens, G., & Snellings, R. (2011). Portland cement and other calcareous hydraulic binders: History, production and mineralogy. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, 9, 441–479. <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.9.11>
- Flatt, R., & Schober, I. (2012). Superplasticizers and the rheology of concrete. In N. Roussel (Ed.), *Understanding the rheology of concrete* (pp. 144–208). Woodhead Publishing.
- Gaonkar, S., & Madhu. (2021). Impact of different water-cement ratios on concrete strength: A review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 9(1), 319–328. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.9.1.0037>
- Gelardi, G., Mantellato, S., Marchon, D., Palacios, M., Eberhardt, A. B., & Flatt, R. J. (2016). Chemistry of chemical admixtures. In P.-C. Aïtcin & R. J. Flatt (Eds.), *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 149–218). Woodhead Publishing.
- Huang, R., Xu, L., Xu, Z., Zhang, Q., & Wang, J. (2024). A review on concrete superplasticizers and their potential applications for enhancing the performance of thermally activated recycled cement. *Materials*, 17(17), 4170. <https://doi.org/10.3390/ma17174170>
- John, E., & Lothenbach, B. (2023). Cement hydration mechanisms through time – a review. *Journal of Materials Science*, 58(24), 9805–9833. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08651-9>
- Kapeluszna, E., & Chrabąszcz, K. (2023). Mutual compatibility of superplasticizers (PC, SNF), grinding aids (TEA, glycol) and C3A in Portland cement systems – Hydration, rheology, physical properties and air void characteristics. *Construction and Building Materials*, 373, 130877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130877>
- Li, R., Lei, L., & Plank, J. (2022). Impact of metakaolin content and fineness on the behavior of calcined clay blended cements admixed with HPEG PCE superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104654. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104654>
- Nkinamubanzi, P. C., Mantellato, S., & Flatt, R. J. (2016). Superplasticizers in practice. In P.-C. Aïtcin & R. J. Flatt (Eds.), *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 353–377). Woodhead Publishing.
- Ochoa Luna, R., & Flores B., E. (1994). Química del cemento: Parte I. *Revista de Química*, 8(2), 207–214. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5537>
- Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Factores influyentes en la calidad del concreto: Una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón. *Revista*

Ingeniería de Construcción, 33(2), 161–172. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000200161>

- Ramachandran, V. S., & Malhotra, V. M. (1996). Superplasticizers. In V. S. Ramachandran (Ed.), *Concrete admixtures handbook* (2nd ed., pp. 410–517). William Andrew Publishing.
- Rao, U. V. N., Kumar, N. V. S., Kavitha, C., Madhavi, Y., & Chowdary, P. S. (2024). Polycarboxylate superplasticizers used in concrete: A review. *International Journal of Experimental Research and Review*, 38, 69–88. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2024.v38.007>
- Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28(1), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Sathyan, D., & Anand, K. B. (2019). Influence of superplasticizer family on the durability characteristics of fly ash incorporated cement concrete. *Construction and Building Materials*, 204, 864–874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.171>
- Tahwia, A. M., Fouda, R. M., Abd Elrahman, M., & Youssef, O. (2023). Long-term performance of concrete made with different types of cement under severe sulfate exposure. *Materials*, 16(1), 240. <https://doi.org/10.3390/ma16010240>
- Valdivieso-Galarza, J. A., Ureta-Centeno, A. A., & Guerra-Mera, J. C. (2025). Influencia del aditivo superplastificante en la resistencia y porosidad del hormigón con varias relaciones agua-cemento. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 8(16), 16–36. <https://doi.org/10.46296/ig.v8i16.0281>
- Wang, F., Du, H., Zheng, Z., Xu, D., Wang, Y., Li, N., Ni, W., & Ren, C. (2024). The impact of fly ash on the properties of cementitious materials based on slag-steel slag-gypsum solid waste. *Materials*, 17(19), 4696. <https://doi.org/10.3390/ma17194696>
- Wang, X.-H., Fang, Z.-C., & Zheng, L. (2024). Effect of dose and types of the water reducing admixtures and superplasticizers on concrete strength and durability behaviour: A review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 30(1), 33–48. <https://doi.org/10.3846/jcem.2024.20145>
- Xu, X., Qi, C., Aretxabaleta, X. M., Ma, C., Spagnoli, D., & Manzano, H. (2024). The initial stages of cement hydration at the molecular level. *Nature Communications*, 15(1), 2731. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46962-w>
- Zhang, D., & Sun, X. (2023). Efficiencies of Super-Plasticizer on Rheology Properties of Fly Ash-Based Alkali-Activated Materials with Different Ms Waterglass Activators. *Polymers*, 15(9): 2054. <https://doi.org/10.3390/polym15092054>