



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

EFEECTO DEL AGUA RESIDUAL DE DECAPADO INDUSTRIAL SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETO SOMETIDO A CURADO ACELERADO

**EFFECT OF INDUSTRIAL PICKLING WASTEWATER ON THE
COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE SUBJECTED TO
ACCELERATED CURING**

Ana Magdalena Torres Ponce
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Luis Daimir López León
Universidad Autónoma de México

Efecto del agua residual de decapado industrial sobre la resistencia a la compresión de concreto sometido a curado acelerado

Ana Magdalena Torres Ponce¹

to389355@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0008-0588-2782>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

México

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Luis Daimir López León

luis_lopez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5871-7707>

Universidad Autónoma de México

México

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el efecto del uso de agua residual proveniente del proceso de decapado industrial como sustituto parcial del agua de mezclado en concretos sometidos a curado acelerado. Para ello, se desarrolló una investigación experimental con enfoque cuantitativo y carácter comparativo, que comprendió la caracterización fisicoquímica del efluente, la elaboración de mezclas con diferentes dosificaciones de agua residual, la aplicación del procedimiento de curado acelerado y la evaluación de la resistencia a la compresión y del tiempo de fraguado. Los resultados evidenciaron que la incorporación del agua residual favoreció el incremento de la resistencia a la compresión hasta la dosificación correspondiente a la mezcla AD-1.5, la cual presentó el mejor desempeño mecánico, además de reducir el tiempo de fraguado. Aunque en dosificaciones mayores la resistencia disminuyó, los valores obtenidos continuaron siendo superiores a los registrados en la mezcla convencional. En conclusión, el aprovechamiento del agua residual de decapado industrial representa una alternativa con potencial para reutilizar residuos industriales y disminuir el consumo de agua potable en la producción de concreto; no obstante, es necesario realizar investigaciones complementarias que permitan evaluar su comportamiento a largo plazo y su efecto sobre la durabilidad del material.

Palabras clave: agua residual de capado industria; concreto; curado acelerado; resistencia a la compresión; sostenibilidad.

¹ Autor principal.

Correspondencia: to389355@uaeh.edu.mx

Effect of industrial pickling wastewater on the compressive strength of concrete subjected to accelerated curing

ABSTRACT

This study aimed to analyze the effect of using industrial pickling wastewater as a partial replacement for mixing water in concrete subjected to accelerated curing. An experimental study with a quantitative and comparative approach was conducted, including the physicochemical characterization of the wastewater, the preparation of concrete mixtures with different wastewater dosages, the application of an accelerated curing procedure, and the evaluation of compressive strength and setting time. The results showed that the incorporation of wastewater improved compressive strength up to the AD-1.5 mixture, which exhibited the best mechanical performance while also reducing the setting time. Although higher dosages resulted in a decrease in compressive strength, the values remained higher than those obtained with the conventional mixture. These findings suggest that industrial pickling wastewater is a promising alternative for the reuse of industrial waste and for reducing potable water consumption in concrete production. However, further studies are required to evaluate its long-term performance and its influence on concrete durability.

Keywords: industrial pickling wastewater; concrete; accelerated curing; compressive strength; sustainability.

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial debido a su resistencia, versatilidad y disponibilidad de sus componentes. Sin embargo, uno de los principales desafíos en su aplicación consiste en reducir el tiempo necesario para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas, ya que el desarrollo de su resistencia depende del proceso de hidratación del cemento Portland. En este contexto, la búsqueda de alternativas que permitan acelerar el desarrollo de resistencias tempranas constituye una línea de investigación de interés para la industria de la construcción (American Concrete Institute [ACI], 2022).

El incremento de la resistencia inicial del concreto está estrechamente relacionado con las reacciones de hidratación del cemento, especialmente con la participación del silicato tricálcico (C_3S), cuya hidratación favorece la formación del gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), principal responsable de las propiedades mecánicas del material. Diversos estudios han señalado que estas reacciones pueden acelerarse mediante condiciones térmicas controladas o mediante la incorporación de sustancias acelerantes, favoreciendo un desarrollo más rápido de la resistencia (Wang et al., 2022; Costa et al., 2025). Entre los procedimientos más utilizados se encuentra el curado acelerado, el cual, de acuerdo con ASTM C684, emplea temperaturas controladas para acelerar la hidratación del cemento y evaluar el comportamiento temprano del concreto, siendo ampliamente utilizado en la fabricación de elementos prefabricados (ASTM International, 2023).

Paralelamente, el aprovechamiento de residuos industriales ha adquirido relevancia como estrategia para disminuir el consumo de recursos naturales y promover prácticas asociadas con la economía circular. En este sentido, diversas investigaciones han analizado la incorporación de subproductos industriales en materiales cementantes con el propósito de mejorar sus propiedades y reducir el impacto ambiental derivado de su disposición final (Maddikeari et al., 2024).

Entre estos residuos se encuentran las aguas residuales generadas durante el proceso de decapado industrial, las cuales contienen cloruros, sulfatos y diferentes cationes metálicos capaces de interactuar con la matriz cementante. Se ha reportado que la presencia de ciertos iones, particularmente los cloruros, puede acelerar la hidratación del cemento y favorecer la formación temprana de productos como el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y la portlandita, contribuyendo al desarrollo inicial de la

resistencia mecánica del concreto (Wang et al., 2022; Zhang et al., 2022). Asimismo, Zeng et al. (2023) describen la composición química característica de este tipo de efluentes y su potencial para ser aprovechados en diferentes aplicaciones industriales.

No obstante, a pesar de los avances reportados sobre el uso de aguas residuales en materiales cementantes, aún existe información limitada acerca del comportamiento del agua residual proveniente del proceso de decapado industrial cuando se utiliza como parte del agua de mezclado en concretos sometidos a curado acelerado (Maddikeari et al., 2024). Este vacío de conocimiento justifica la necesidad de evaluar su influencia sobre el desempeño mecánico del concreto y su posible contribución al aprovechamiento sostenible de residuos industriales.

Con base en lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la incorporación de agua residual de decapado industrial como parte del agua de mezclado sobre la resistencia a la compresión del concreto sometido a curado acelerado, con la finalidad de analizar su comportamiento mecánico y valorar su potencial como alternativa para el aprovechamiento de residuos industriales y la reducción del consumo de agua potable en la producción de concreto.

METODOLOGÍA

Tipo de Investigación: La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo experimental y de alcance comparativo, orientada a evaluar el efecto del agua residual de decapado industrial como parte del agua de amasado sobre la resistencia a la compresión del concreto sometido a curado acelerado. El diseño fue experimental, al manipular la dosificación del agua residual y comparar el comportamiento mecánico de las mezclas elaboradas con diferentes contenidos del efluente respecto a una mezcla de referencia. La metodología comprendió la caracterización fisicoquímica del agua residual, el diseño de mezclas de concreto, la elaboración de especímenes, la aplicación del curado acelerado conforme a la norma ASTM C684/C684M-23 y la evaluación de la resistencia a la compresión.

Población de estudio: La población de estudio estuvo constituida por 18 especímenes cilíndricos de concreto, distribuidos en seis dosificaciones experimentales (AD-0, AD-0.5, AD-1.0, AD-1.5, AD-2.0 y AD-2.5), elaborándose tres especímenes por cada condición experimental. La mezcla de referencia se preparó con agua potable, mientras que en las mezclas experimentales se substituyó parcialmente el agua de amasado por agua residual de decapado industrial en diferentes dosificaciones, manteniendo

constante la relación agua-cemento.

Como criterio de inclusión se consideraron únicamente los especímenes elaborados conforme al diseño de mezcla establecido y sometidos al procedimiento de curado acelerado bajo las mismas condiciones experimentales. Se excluyeron aquellos especímenes que presentaran defectos de fabricación o anomalías que pudieran afectar la confiabilidad de los ensayos.

Técnica de recolección de datos: La recolección de datos se realizó mediante observación experimental estructurada y ensayos de laboratorio, registrando el comportamiento del concreto durante las diferentes etapas del estudio. Se efectuó la caracterización fisicoquímica del agua residual de decapado industrial mediante análisis de laboratorio y posteriormente se evaluó el desempeño mecánico de las mezclas de concreto mediante ensayos de resistencia a la compresión después de la aplicación del curado acelerado conforme a las normas ASTM correspondientes.

Instrumentos para la recolección de datos: Para la obtención de la información se utilizaron equipos e instrumentos de laboratorio calibrados. La caracterización del agua residual comprendió la determinación de pH mediante potenciómetro digital, conductividad eléctrica mediante conductímetro, sólidos disueltos totales mediante métodos gravimétricos, cloruros por titulación argentométrica, sulfatos por espectrofotometría UV-Visible y cationes metálicos mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

Durante la elaboración y evaluación del concreto se emplearon moldes cilíndricos de 100×200 mm, cono de Abrams para la determinación del revenimiento, tanque de curado acelerado con control térmico marca Controls y máquina universal para el ensayo de resistencia a la compresión, conforme a las normas ASTM aplicables. Asimismo, se utilizaron fichas de registro para documentar los resultados experimentales.

Procedimiento: El procedimiento experimental inició con la obtención del agua residual de decapado industrial directamente de un proceso de tratamiento superficial de metales. Las muestras fueron recolectadas en recipientes de polietileno de alta densidad previamente acondicionados y almacenadas bajo condiciones controladas de temperatura para preservar sus características fisicoquímicas hasta el momento de su análisis.

Posteriormente, se realizó la caracterización fisicoquímica del efluente con el propósito de identificar

los parámetros que pudieran influir en el proceso de hidratación del cemento Portland. Se determinaron el pH, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, la densidad, el contenido de cloruros, sulfatos y la concentración de cationes metálicos presentes en la solución. Todos los análisis fueron efectuados por triplicado, aplicando procedimientos de control de calidad para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

Concluida la caracterización, se diseñó la mezcla de concreto mediante el método ACI 211.1 para una resistencia especificada de 25 MPa, manteniendo constante la relación agua-cemento de 0.61 en todas las mezclas. Se preparó una mezcla de referencia con agua potable y cinco mezclas experimentales en las que el agua residual de decapado sustituyó parcialmente el agua de amasado en dosificaciones de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 L por cada 50 kg de cemento, además de la mezcla control sin incorporación del efluente.

La fabricación de los especímenes se realizó conforme a las normas ASTM C192/C192M-24 y NMX-C-159-ONNCCE. Previamente, los materiales fueron acondicionados a temperatura ambiente y se verificó que los agregados se encontraran en condición saturada superficialmente seca. Posteriormente, se efectuó el mezclado manual de los materiales, incorporando el agua de amasado correspondiente a cada dosificación hasta obtener una mezcla homogénea. Antes del moldeo, se verificó la trabajabilidad del concreto mediante el ensayo de revenimiento conforme a la norma ASTM C143/C143M-20.

Para cada dosificación se elaboraron tres especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, los cuales fueron compactados mediante varillado, nivelados e identificados de acuerdo con la condición experimental correspondiente. Los especímenes permanecieron en sus moldes durante 24 horas en condiciones controladas de laboratorio y, posteriormente, fueron desmoldados para la aplicación del régimen de curado acelerado.

El curado acelerado se efectuó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C684/C684M-23. Los especímenes fueron sumergidos completamente en un tanque metálico de calentamiento con control térmico marca Controls, manteniéndose en agua a temperatura cercana al punto de ebullición durante un periodo de 3.5 horas $\pm$ 5 minutos. Finalizado el proceso, se permitió el enfriamiento gradual de los especímenes hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Finalmente, los especímenes fueron sometidos al ensayo de resistencia a la compresión conforme a la

norma ASTM C39/C39M-24, obteniéndose los valores de resistencia para cada dosificación experimental, los cuales sirvieron de base para el análisis comparativo del efecto del agua residual de decapado industrial sobre el comportamiento mecánico del concreto sometido a curado acelerado.

Análisis de datos: Los datos obtenidos durante la caracterización fisicoquímica del agua residual y los ensayos de resistencia a la compresión fueron organizados en tablas para facilitar su interpretación y comparación entre las diferentes dosificaciones evaluadas. Los resultados experimentales permitieron analizar el efecto de la incorporación del agua residual de decapado industrial sobre el comportamiento mecánico del concreto sometido a curado acelerado, estableciendo comparaciones con la mezcla de referencia y determinando la dosificación que presentó el mejor desempeño.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se presentan en función del objetivo general de la investigación, el cual consistió en evaluar el efecto del agua residual de decapado industrial sobre la resistencia a la compresión del concreto sometido a curado acelerado. Los principales resultados se describen a continuación.

Caracterización fisicoquímica del agua residual de decapado industrial

La caracterización fisicoquímica del agua residual de decapado industrial permitió identificar los principales parámetros que podrían influir en el comportamiento del concreto elaborado con este efluente. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1, donde se observa que el agua residual presenta una elevada concentración de especies iónicas, característica propia de los efluentes generados durante los procesos de decapado metálico.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del agua residual de decapado industrial

Parámetro	Unidad	Valor obtenido
pH	–	2.3 ± 0.1
Conductividad	mS/cm	41.8
TDS	mg/L	38 700
Cloruros (Cl^-)	g/L	112.4 ± 2.5
Sulfatos (SO_4^{2-})	g/L	6.8 ± 0.4
Calcio (Ca^{2+})	mg/L	$1\,150 \pm 30$

Hierro total ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)	mg/L	520 ± 25
Zinc (Zn^{2+})	mg/L	24.1
Níquel (Ni^{2+})	mg/L	11.6
Densidad	g/mL	1.11
Color / olor	–	Amarillento-pardo / ácido

Los resultados muestran que el agua residual presentó un pH de 2.3 ± 0.1 , indicando un carácter fuertemente ácido, así como una conductividad eléctrica de 41.8 mS/cm y un contenido de 38 700 mg/L de sólidos disueltos totales, valores que evidencian una elevada mineralización del efluente. Asimismo, la densidad registrada fue de 1.11 g/mL, superior a la del agua potable, comportamiento consistente con la elevada concentración de sales disueltas.

El parámetro de mayor relevancia correspondió a la concentración de iones cloruro (112.4 ± 2.5 g/L), constituyendo la especie química predominante del agua residual. De acuerdo con Wang et al. (2022) y Lee et al. (2025), los cloruros pueden actuar como acelerantes de la hidratación del cemento Portland al reducir el periodo de inducción y favorecer la formación temprana del gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), principal responsable del desarrollo de la resistencia mecánica del concreto. En consecuencia, la elevada concentración de cloruros observada en el efluente sugiere un potencial efecto sobre el desarrollo temprano de la resistencia del concreto sometido a curado acelerado.

Además de los cloruros, se identificó la presencia de calcio (1 150 mg/L), hierro total (520 mg/L), zinc (24.1 mg/L) y níquel (11.6 mg/L), elementos característicos de las aguas residuales provenientes del tratamiento superficial de metales. Estos compuestos pueden participar en procesos secundarios de hidratación y modificar la composición de la solución de poro del cemento, influyendo en la formación de los productos hidratados.

Por otra parte, el contenido de sulfatos (6.8 ± 0.4 g/L) fue considerablemente menor respecto a la concentración de cloruros, por lo que su influencia sobre las reacciones iniciales de hidratación se considera secundaria dentro del periodo de evaluación contemplado en este estudio.

En conjunto, los resultados de la caracterización fisicoquímica evidencian que el agua residual de decapado industrial posee una composición química con capacidad para modificar la cinética de

hidratación del cemento Portland. Particularmente, la elevada concentración de cloruros constituye el principal factor que podría favorecer el desarrollo temprano de resistencia del concreto sometido a curado acelerado, aspecto que se analiza en los apartados siguientes mediante los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión.

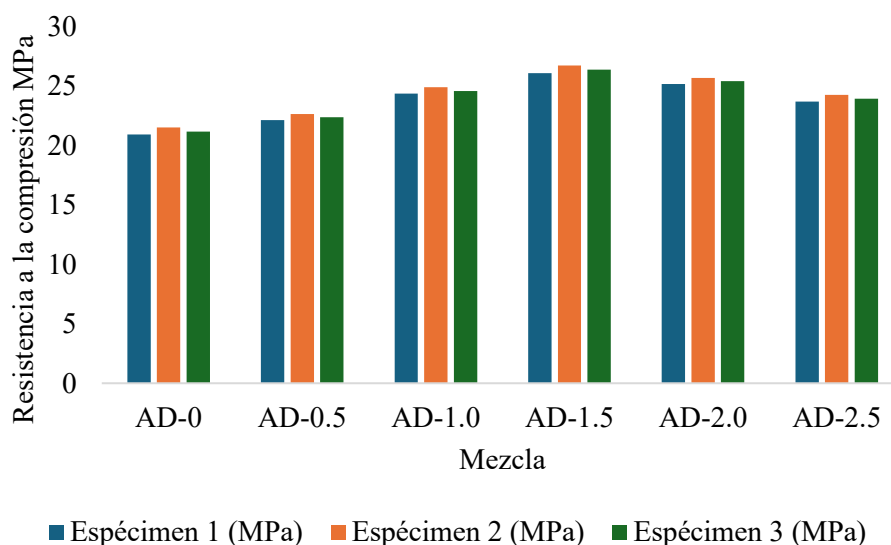
Desempeño mecánico del concreto con agua residual de decapado industrial

La resistencia a la compresión constituye uno de los principales indicadores para evaluar el desempeño mecánico del concreto, ya que refleja el grado de desarrollo de los productos de hidratación del cemento y la calidad de la microestructura formada durante el proceso de curado. En este estudio se evaluó el efecto de diferentes dosificaciones de agua residual de decapado industrial sobre la resistencia a la compresión del concreto sometido a curado acelerado. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2 y su comportamiento se ilustra en la Figura 1.

Tabla 2. Resultados de resistencia a la compresión del concreto sometido a curado acelerado

Mezcla	Espécimen 1 (MPa)	Espécimen 2 (MPa)	Espécimen 3 (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar
AD-0	20.94	21.52	21.18	21.21	0.29
AD-0.5	22.15	22.64	22.38	22.39	0.25
AD-1.0	24.36	24.91	24.58	24.62	0.28
AD-1.5	26.08	26.74	26.39	26.40	0.33
AD-2.0	25.18	25.69	25.42	25.43	0.26
AD-2.5	23.71	24.26	23.95	23.97	0.28

Figura 1. Resistencia a la compresión de las mezclas AD-0, AD-0.5, AD-1.0, AD-1.5, AD-2.0 y AD-2.5



Los resultados muestran que la incorporación de agua residual de decapado industrial favoreció el desarrollo de la resistencia a la compresión en comparación con la mezcla de referencia elaborada únicamente con agua potable. Todas las mezclas que incorporaron el efluente presentaron resistencias superiores a la obtenida por la mezcla AD-0, lo que evidencia que los compuestos presentes en el agua residual influyeron positivamente en las reacciones de hidratación del cemento bajo las condiciones de curado acelerado empleadas en esta investigación.

La mezcla de referencia (AD-0) alcanzó una resistencia promedio de 21.21 MPa, mientras que la incorporación de 0.5 L de agua residual por cada 50 kg de cemento (AD-0.5) incrementó la resistencia hasta 22.39 MPa, equivalente a un aumento aproximado del 5.6 %. Al aumentar la dosificación a 1.0 L/50 kg de cemento (AD-1.0), la resistencia promedio alcanzó 24.62 MPa, representando un incremento cercano al 16.1 % respecto al concreto convencional. Este comportamiento coincide con lo reportado por Wang et al. (2022), quienes señalan que concentraciones moderadas de cloruros reducen el periodo de inducción del cemento y favorecen la formación temprana del gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), acelerando el desarrollo de la resistencia mecánica.

El mayor desempeño mecánico se registró en la mezcla AD-1.5, la cual alcanzó una resistencia promedio de 26.40 MPa, aproximadamente 24.5 % superior a la obtenida por la mezcla de referencia. Este resultado indica que dicha dosificación proporcionó las condiciones más favorables para acelerar las reacciones iniciales de hidratación durante el régimen de curado acelerado. La elevada concentración de

iones cloruro presentes en el agua residual favorece la disolución del silicato tricálcico (C_3S) y promueve la formación temprana de productos hidratados, comportamiento reportado por Wang et al. (2022) y Lee et al. (2025).

Sin embargo, al incrementar la dosificación del agua residual a 2.0 L y 2.5 L por cada 50 kg de cemento, la resistencia promedio disminuyó a 25.43 MPa y 23.97 MPa, respectivamente. Aunque estos valores continuaron siendo superiores a los del concreto de referencia, la tendencia observada indica que concentraciones elevadas del efluente no generan beneficios adicionales sobre el desempeño mecánico del concreto. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhang et al. (2022), quienes señalan que dosis excesivas de acelerantes a base de cloruros pueden favorecer la formación de productos de hidratación menos eficientes desde el punto de vista mecánico.

Por otra parte, las desviaciones estándar registradas fueron inferiores a 0.35 MPa en todas las mezclas, lo que evidencia una adecuada repetibilidad del procedimiento experimental y una baja variabilidad entre los especímenes ensayados. Estos resultados respaldan la confiabilidad de la metodología aplicada durante la elaboración de las mezclas, el proceso de curado acelerado y la evaluación de la resistencia a la compresión.

En conjunto, los resultados permiten identificar una dosificación óptima de 1.5 L de agua residual de decapado industrial por cada 50 kg de cemento, condición en la que se obtuvo el mayor incremento de resistencia a la compresión bajo el régimen de curado acelerado. Lo anterior evidencia el potencial del agua residual de decapado industrial como una alternativa para favorecer el desarrollo temprano de la resistencia del concreto y contribuir al aprovechamiento de residuos industriales bajo un enfoque de economía circular.

Tiempo de fraguado de las mezclas de concreto

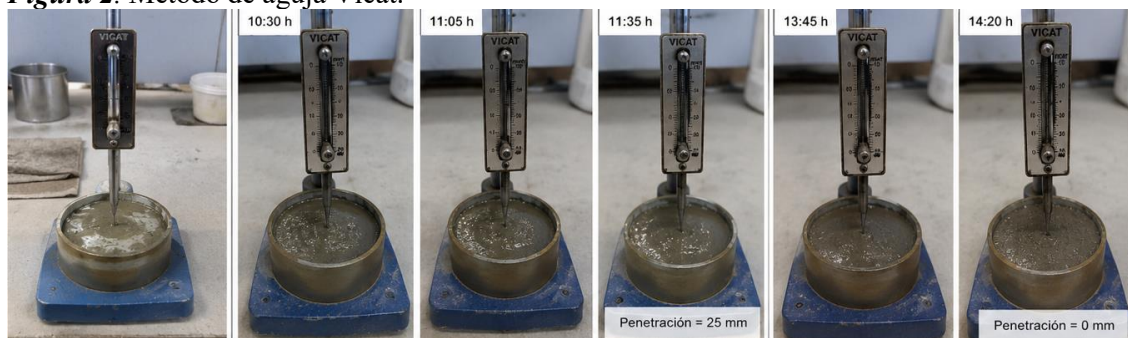
El tiempo de fraguado constituye un parámetro fundamental para evaluar el comportamiento del concreto en estado fresco, ya que permite determinar la velocidad con la que se desarrollan las reacciones iniciales de hidratación del cemento Portland. En la presente investigación se evaluó el efecto de diferentes dosificaciones de agua residual de decapado industrial sobre el tiempo de fraguado inicial y final de las mezclas de concreto. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Tiempo de fraguado de los concretos elaborados con diferentes dosificaciones de agua residual de decapado industrial.

Mezcla	Fraguado inicial (min)	Fraguado final (min)
AD-0	182	286
AD-0.5	168	264
AD-1.0	148	239
AD-1.5	132	218
AD-2.0	121	206
AD-2.5	113	197

Los resultados evidencian que la incorporación del agua residual de decapado industrial produjo una disminución progresiva del tiempo de fraguado conforme aumentó la dosificación del efluente. La mezcla de referencia (AD-0), elaborada únicamente con agua potable, presentó un tiempo de fraguado inicial de 182 minutos y un tiempo de fraguado final de 286 minutos, valores característicos para un concreto elaborado con cemento Portland compuesto bajo condiciones normales de laboratorio (Figura 2).

Figura 2. Método de aguja Vicat.



La incorporación de 0.5 L de agua residual por cada 50 kg de cemento (AD-0.5) redujo el tiempo de fraguado inicial a 168 minutos y el tiempo de fraguado final a 264 minutos, lo que representa una disminución aproximada del 7.7 % respecto a la mezcla de referencia. Estos resultados indican que incluso bajas concentraciones del efluente modifican las primeras etapas de hidratación del cemento, favoreciendo el endurecimiento del concreto.

Al incrementar la dosificación a 1.0 y 1.5 L por cada 50 kg de cemento, los tiempos de fraguado continuaron disminuyendo, alcanzando 148 y 132 minutos para el fraguado inicial, así como 239 y 218

minutos para el fraguado final, respectivamente. Este comportamiento coincide con el incremento observado en la resistencia a la compresión, donde la mezcla AD-1.5 presentó el mejor desempeño mecánico. De acuerdo con Wang et al. (2022), este efecto puede atribuirse a la elevada concentración de iones cloruro presentes en el agua residual, los cuales favorecen la disolución temprana del silicato tricálcico (C_3S), reducen el periodo de inducción y aceleran la formación del gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), principal responsable del desarrollo inicial de la resistencia.

Cuando la dosificación del agua residual aumentó a 2.0 y 2.5 L por cada 50 kg de cemento, el tiempo de fraguado continuó disminuyendo hasta 121 y 113 minutos, respectivamente. Sin embargo, esta aceleración del proceso de endurecimiento no produjo un incremento adicional en la resistencia a la compresión, ya que ambas mezclas presentaron valores inferiores a los obtenidos para la mezcla AD-1.5. Este comportamiento sugiere que una aceleración excesiva de las reacciones iniciales de hidratación puede favorecer la formación temprana de productos hidratados, limitando el desarrollo posterior de una microestructura más compacta y homogénea.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que el agua residual de decapado industrial ejerce un efecto acelerante sobre el proceso de fraguado del concreto, reduciendo tanto el tiempo de fraguado inicial como el final conforme aumenta su dosificación. No obstante, la mejor relación entre la reducción del tiempo de fraguado y el desempeño mecánico se obtuvo con la mezcla AD-1.5, la cual presentó el mejor equilibrio entre la aceleración del endurecimiento y el incremento de la resistencia a la compresión bajo las condiciones de curado acelerado evaluadas.

Análisis comparativo

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de agua residual de decapado industrial favoreció el desarrollo temprano de la resistencia a la compresión y redujo el tiempo de fraguado del concreto sometido a curado acelerado. La mejora observada hasta la dosificación AD-1.5 indica que una concentración moderada del efluente proporciona las condiciones más favorables para acelerar las reacciones iniciales de hidratación del cemento.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Wang et al. (2022) y Lee et al. (2025), quienes señalan que concentraciones moderadas de cloruros favorecen la formación temprana del gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), acelerando el desarrollo de la resistencia mecánica. Sin embargo, al

incrementar la dosificación hasta las mezclas AD-2.0 y AD-2.5, la resistencia disminuyó a pesar de que el tiempo de fraguado continuó reduciéndose, comportamiento que concuerda con Zhang et al. (2022), quienes indican que dosis elevadas de acelerantes a base de cloruros pueden limitar el desarrollo de una microestructura más homogénea.

Asimismo, el procedimiento de curado acelerado conforme a la ASTM C684/C684M-23 permitió evaluar eficientemente el desarrollo temprano de la resistencia, facilitando la identificación de la dosificación con mejor desempeño mecánico. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, los resultados respaldan el aprovechamiento del agua residual de decapado industrial como una alternativa para reducir el consumo de agua potable y promover la valorización de residuos industriales, en concordancia con lo señalado por Maddikeari et al. (2024).

No obstante, debido al elevado contenido de cloruros del agua residual, es recomendable realizar estudios complementarios sobre corrosión del acero de refuerzo, durabilidad y comportamiento a largo plazo antes de considerar su aplicación en concretos reforzados. En conjunto, los resultados demuestran que la dosificación AD-1.5 constituye la condición más favorable dentro del programa experimental desarrollado.

CONCLUSIONES

En función del objetivo de la presente investigación, que consistió en evaluar el efecto del agua residual de decapado industrial sobre la resistencia a la compresión del concreto sometido a curado acelerado, se concluye que la incorporación controlada de este efluente constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el desempeño del concreto en edades tempranas. Los resultados obtenidos evidenciaron que la composición fisicoquímica del agua residual, caracterizada principalmente por su elevado contenido de cloruros y otras especies iónicas, favoreció la aceleración de las reacciones iniciales de hidratación del cemento, reduciendo el tiempo de fraguado e incrementando la resistencia a la compresión bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Asimismo, se determinó que la dosificación correspondiente a la mezcla AD-1.5 presentó el mejor equilibrio entre la aceleración del proceso de endurecimiento y el desarrollo de la resistencia mecánica, mientras que dosificaciones superiores continuaron reduciendo el tiempo de fraguado sin generar mejoras adicionales en la resistencia. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de establecer

una dosificación adecuada del agua residual para aprovechar sus efectos acelerantes sin afectar el desempeño del concreto.

Finalmente, los hallazgos obtenidos respaldan el aprovechamiento del agua residual de decapado industrial como una alternativa para la valorización de residuos dentro de un enfoque de economía circular, contribuyendo potencialmente a disminuir el consumo de agua potable en la producción de concreto. No obstante, se considera pertinente desarrollar investigaciones complementarias sobre la durabilidad del material, la corrosión del acero de refuerzo y el comportamiento a largo plazo en diferentes condiciones de exposición, con el propósito de ampliar el conocimiento sobre la aplicación de este tipo de efluentes en sistemas cementantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 211. (2022). ACI 211.1-22: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute (ACI). (2022). ACI 308R-22: Guide to External Curing of Concrete. American Concrete Institute.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2020). ASTM C143/C143M-20. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2024). ASTM C39/C39M-24. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2024). ASTM C192/C192M-24. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International.
- ASTM International. (2023). ASTM C684/C684M-23. Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens. ASTM International.
- Costa, R. P., et al. (2025). Influence of alternative accelerators on the hydration and mechanical behavior of cementitious systems. *Ambiente Construído*, 25(1), 1–18.
- Lee, S. F., Portillo-Llamas, M., Ramón, J. E., Rubiano, F., Castillo, Á., & Martínez, I. (2025). Possible usage of five percent chloride ion by cement weight in mixing water blended with pozzolanic materials. *Emergent Materials*.

- Maddikeari, M., et al. (2024). A comprehensive review on the use of wastewater in the manufacturing of concrete: Fostering sustainability through recycling. *Recycling*, 9(3), 45.
- xiaNeville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). (2016). NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la construcción—Concreto hidráulico—Elaboración y curado de especímenes en laboratorio. ONNCCE.
- Wang, Y., Lei, L., Liu, J., Ma, Y., Liu, Y., Xiao, Z., & Shi, C. (2022). Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 331, 127339.
- Xia, J., et al. (2025). Mixed cement pastes: Effects of water, slag, and surfactant on hydration and early-age properties. *Buildings*, 15(12), 2116.
- Zeng, X., et al. (2023). Industrial pickling wastewater treatment and resource utilization: Recent advances and challenges. *Journal of Environmental Management*, 337, 117652.
- Zhang, H., et al. (2022). Effect of calcium chloride solution on performance and hydration behavior of cementitious materials. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 50(11), 1–12