

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL HORMIGÓN EN CILINDROS DOSIFICADOS CON LIXIVIADOS EN DISTINTAS CONCENTRACIONES

Evaluation of the Mechanical Strength of Concrete in Cylinders Dosed with Leachate at Different Concentrations

SIDNEY SALVATIERRA^{1a*}, JAVIER ISA^{1b}, ROGER RÍOS^{1c},
ADRIANA FERNÁNDEZ^{1d}

Recibido: 21/09/2025 • Aceptado: 20/10/2025

Cómo citar: Salvatierra, S., Isa, J., Ríos, R., Fernández, A. (2025). Evaluación de la resistencia mecánica del hormigón en cilindros dosificados con lixiviados en distintas concentraciones. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 8, 85-110. <https://doi.org/10.22206/cite.2025.v8.3592>

Resumen

El presente estudio evalúa el impacto de los lixiviados en la resistencia mecánica del hormigón mediante ensayos en cilindros dosificados con concentraciones al 100% de agua (0% lixiviado) en calidad de control, luego al 50% y 100% de lixiviado. Se fabricaron 126 probetas cilíndricas (15 cm x 30 cm) según la ASTM C31, distribuidas en tres grupos y evaluadas a los 7, 14, 28 días, y 3, 6, 9 y 12 meses. Los materiales incluyeron el uso de cemento Portland IP30, agregados silíceos y basálticos, y lixiviados del botadero controlado de Tiquipaya (Cochabamba, Bolivia), caracterizados por una alta carga orgánica (DQO: 7,520 mg/L), contenido de sólidos suspendidos

*Autor de correspondencia.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba – Bolivia

^a Ingeniero Civil M.Sc., Docente Tiempo Completo, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba - Bolivia. ORCID: 0000-0002-7773-178X. Correo electrónico: ssalvatierraq@univalle.edu

^b Estudiante de pre grado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba - Bolivia. ORCID: 0009-0008-5362-3179. Correo electrónico: iaj0033145@est.univalle.edu

^c Estudiante de pre grado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba - Bolivia. ORCID: 0009-0001-7281-4797. Correo electrónico: rgr0033592@est.univalle.edu

^d Estudiante de pre grado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba - Bolivia. ORCID: 0000-0002-7366-2721. Correo electrónico: fda0028279@est.univalle.edu



(28,140 mg/L) y un pH alcalino (9.9). La dosificación utilizada siguió el método ACI 211.1 (relación agua/cemento: 0.45). Los resultados muestran que el hormigón con agua potable mantiene una resistencia estable (221 kg/cm² a 12 meses), mientras que con 50% lixiviado presenta una reducción inicial del 15-20%, con recuperación a 247 kg/cm² a los 9 meses. El hormigón con 100% lixiviado alcanza alta resistencia inicial, pero sufre un deterioro del 35% a 12 meses (138 kg/cm²). Estos hallazgos resaltan la necesidad de diseñar hormigones resistentes a ambientes agresivos y mejorar la gestión de lixiviados en países en desarrollo, proponiendo cementos especializados y sistemas de tratamiento para mitigar impactos estructurales y ambientales.

Palabras clave: Hormigón; resistencia mecánica; dosificación; lixiviados.

Abstract

This study evaluates the impact of leachate on the mechanical strength of concrete by testing cylinders dosed with leachate concentrations at 100% water (0% leachate) in control quality, then at 50% and 100% leachate. One hundred and twenty-six cylindrical specimens (15 cm x 30 cm) were manufactured according to ASTM C31, distributed in three groups and evaluated at 7, 14, 28 days, and 3, 6, 9 and 12 months. The materials included the use of Portland cement IP30, siliceous and basaltic aggregates, and leachate from the Tiquipaya controlled dump (Cochabamba, Bolivia), characterized by a high organic load (COD: 7,520 mg/L), suspended solids content (28,140 mg/L) and an alkaline pH (9.9). The dosage used followed the ACI 211.1 method (water/cement ratio: 0.45). The results show that concrete with potable water maintained stable strength (221 kg/cm² at 12 months), while concrete with 50% leachate showed an initial reduction of 15-20%, recovering to 247 kg/cm² at 9 months. Concrete with 100% leachate achieved high initial strength, but suffered a 35% deterioration at 12 months (138 kg/cm²). These findings highlight the need to design concretes resistant to aggressive environments and improve leachate management in developing countries, proposing specialized cements and treatment systems to mitigate structural and environmental impacts.

Keywords: Concrete; mechanical resistance; dosage; leachates.

1. Introducción

El hormigón se encuentra compuesto por partículas embebidas (agregados) en una mezcla aglutinante compuesta por agua y cemento

hidráulico (Auquilla & Peláez, 2021), siendo uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo por su excelente resistencia mecánica a la compresión (Vaca, 2022), pero su durabilidad se ve comprometida cuando se expone a ambientes agresivos (Mehta & Monteiro, 2014). Durante su vida útil, las estructuras de hormigón armado enfrentan diversos factores de deterioro que pueden clasificarse en factores endógenos (internos) y exógenos (externos). Los primeros incluyen procesos como la reacción álcali-agregado, donde los álcalis del cemento reaccionan con componentes silíceos de los agregados, generando expansiones internas y fisuración (Montaña & Carmona, 2015).

Entre los factores exógenos más dañinos se encuentran los ataques por sulfatos y cloruros (Pire, 2013), así como el proceso de carbonatación. Los sulfatos, presentes en suelos, aguas subterráneas y lixiviados, reaccionan con los componentes del cemento formando compuestos expansivos que generan tensiones internas (Irassar et al., 2010). Este fenómeno se manifiesta visiblemente mediante fisuras superficiales, manchas blanquecinas y pérdida progresiva de resistencia mecánica (Maldonado & Alan, 2024).

Por otra parte, la carbonatación, es un proceso particularmente preocupante. Cuando el dióxido de carbono atmosférico penetra en el hormigón, reacciona con los hidróxidos de calcio, reduciendo el pH y eliminando la protección natural contra la corrosión de las armaduras (Río Bueno, 2008). Este fenómeno es acelerado en ambientes urbanos e industriales con alta contaminación atmosférica (Bertolini et al., 2013).

Para mitigar estos efectos, es fundamental emplear hormigones con una dosificación adecuada y agregados que cumplan con las propiedades recomendadas a nivel normativo (Neville, 2011), que garanticen una buena calidad. Existen diversos métodos para determinar las proporciones óptimas de agua, cemento y agregados, siendo los más utilizados el método ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2002) y el método propuesto por Jiménez Montoya (Jiménez et al, 2015). El primero se basa en relaciones agua/cemento y volúmenes absolutos, mientras que el segundo considera principalmente la granulometría de los agregados (Velásquez, 2011).

Un caso especial de exposición agresiva ocurre cuando el hormigón entra en contacto con lixiviados de rellenos sanitarios (Valderrama et al., 2016). Los rellenos sanitarios son estructuras diseñadas para la disposición final de residuos sólidos con el fin de mitigar el impacto ambiental

y en un futuro recuperar el terreno para otros fines, en este sentido, durante el tiempo de funcionamiento se van generando lixiviados, los cuales aumentan en épocas de lluvias (Méndez et al., 2009). Estos líquidos contienen altas concentraciones de materia orgánica, metales pesados y sales solubles (Ding et al., 2001) que aceleran los procesos de deterioro (Giraldo, 2001). En Bolivia, donde aproximadamente el 90% de los residuos se disponen en botaderos a cielo abierto (Salguero, 2025), los lixiviados representan un problema ambiental y estructural de primera magnitud siendo que se genera aproximadamente 8.250 toneladas por día (Flores, 2024).

Estudios recientes han demostrado el severo impacto de los lixiviados en las propiedades del hormigón. Rodríguez et al. (2025) reportaron pérdidas de hasta 43% en resistencia a compresión después de seis meses de exposición a drenajes ácidos de minas. De manera similar, Correa (2024) observó un deterioro acelerado en estructuras de plantas hidroeléctricas expuestas a aguas residuales, con pérdida significativa de sección transversal.

Ante esta problemática, la presente investigación busca evaluar sistemáticamente el efecto de los lixiviados en las propiedades mecánicas del hormigón. Para ello, se prepararon cilindros de hormigón con diferentes concentraciones de lixiviado (0%, 50% y 100%), los cuales fueron sometidos a ensayos de resistencia a compresión. Los resultados obtenidos proporcionarán valiosa información para el diseño de estructuras más duraderas en entornos contaminados.

Finalmente, este estudio contribuye al desarrollo de soluciones técnicas para la gestión de residuos en países en desarrollo, donde frecuentemente faltan sistemas adecuados de tratamiento de lixiviados (Méndez et al., 2009). Los hallazgos podrían aplicarse no solo en rellenos sanitarios, sino también en infraestructura cercana a botaderos o zonas con contaminación de suelos y aguas subterráneas (Rivera et al., 2018).

2. Metodología

2.1 Diseño experimental

El presente estudio adoptó un enfoque experimental comparativo para evaluar sistemáticamente el efecto de los lixiviados en las propiedades

Figura 1

Dimensiones del cilindro



mecánicas del hormigón. El diseño contempló la fabricación de un total de 126 probetas cilíndricas estándar, con dimensiones de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura como se ve en la Figura 1, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma ASTM C31/C31M (2020) para la preparación y curado de especímenes de prueba de hormigón en laboratorio.

Las muestras se distribuyeron en tres grupos experimentales bien diferenciados:

1. Grupo de control 100% agua (0% lixiviado): 42 cilindros curados exclusivamente en agua potable
2. Grupo intermedio (50% lixiviado): 42 cilindros sometidos a una mezcla 1:1 de agua y lixiviado
3. Grupo experimental (100% lixiviado): 42 cilindros expuestos directamente a lixiviado puro

Para garantizar la confiabilidad estadística de los resultados, se programaron evaluaciones en siete intervalos de tiempo distintos (7, 14, 28 días, y 3, 6, 9, 12 meses), asignando 6 cilindros por grupo para cada periodo de evaluación. Este esquema permitió analizar tanto el comportamiento temprano como la evolución a largo plazo de las propiedades mecánicas.

2.2 Materiales y caracterización

Los componentes empleados en la fabricación de los especímenes fueron seleccionados y caracterizados meticulosamente como puede observarse en la Figura 2 (a) y (b) de la caracterización de los agregados mediante el ensayo de granulometría.

Agregados:

- Fino: Arena silíceá natural
 - o Módulo de finura: 2.90
 - o Densidad aparente: 2.65 g/cm³
 - o Absorción: 2.1%
- Grueso: Grava triturada de origen basáltico
 - o Tamaño máximo nominal: 25 mm
 - o Densidad aparente: 2.70 g/cm³
 - o Absorción: 1.8%

Figura 2

Granulometría agregado fino(a), Granulometría agregado grueso (b)



(a)

(b)

- Cemento:
 - o Tipo Portland IP 30 conforme a ASTM C150
 - o Resistencia característica a compresión de 28 MPa a 28 días
 - o Densidad absoluta de 3.15 g/cm^3
 - o Superficie específica Blaine: $380 \text{ m}^2/\text{kg}$
- Agua de mezclado:
 - o Agua potable municipal
 - o pH: 7.2
 - o Sólidos disueltos totales: 120 mg/L
 - o Cumplimiento integral con los requisitos de la norma boliviana NB 637 (2018)

La muestra de lixiviados como puede verse en la Figura 3 (a) y (b) se obtuvo de la bocatoma de la piscina de lixiviados del botadero controlado del municipio de Tiquipaya del departamento de Cochabamba (Bolivia).

Caracterización fisicoquímica completa:

- pH: 6.8 ± 0.5
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): $1,850 \pm 250 \text{ mg O}_2/\text{L}$
- Sulfatos (SO_4^{2-}): $1,200 \pm 150 \text{ mg/L}$
- Cloruros (Cl^-): $800 \pm 100 \text{ mg/L}$
- Metales pesados (Pb, Cd, Cr): $< 5 \text{ mg/L}$

Figura 3

Toma de muestra de lixiviados (a); Almacenamiento de muestra (b)



(a)

(b)

2.3 Procedimiento experimental

2.3.1 Dosificación y mezclado:

La dosificación se realizó mediante el método ACI 211.1, buscando una resistencia característica a compresión de 210 kg/cm^2 (21 MPa) a 28 días. La relación agua/cemento se fijó en 0.45, con la siguiente proporción en peso por metro cúbico:

- Cemento: 420 kg
- Agua: 189 kg
- Arena: 675 kg
- Grava: 1,201 kg

El proceso de mezclado se llevó a cabo en una mezcladora mecánica de 100 L de capacidad (Figura 4), siguiendo estrictamente el protocolo ASTM C192/C192M:

1. Homogeneización inicial de agregados secos (1 minuto)
2. Incorporación gradual del agua o solución de lixiviado (2 minutos)
3. Adición del cemento y mezclado final (3 minutos adicionales)

Figura 4

Maquinaria y materiales para la elaboración de la mezcla



2.3.2 Moldeo y compactación

Cada cilindro se moldeó en tres capas sucesivas, como se ve en la Figura 5 compactando cada una con 25 golpes de varilla metálica según lo especificado en ASTM C31. Se prestó especial atención a:

- Alineación vertical perfecta de los moldes
- Nivelación precisa de la superficie superior
- Identificación clara de cada espécimen

Figura 5

Elaboración de cilindros de hormigón



2.3.3 Control de consistencia

Mediante el cono de Abrams se realizó el control de consistencia (asentamiento) de la mezcla para los 3 tipos de dosificación elaborada, como se observa en la Figura 6, cada dosificación tuvo una consistencia diferente.

2.3.4 Curado y exposición

El proceso de curado se desarrolló en tres fases:

1. Curado inicial (24 horas): Los cilindros en los moldes fueron curados con agua cada 8 horas a temperatura ambiente.
2. Curado estándar (28 días): Los cilindros fueron inmersos en agua en la piscina de curado a temperatura ambiente como se observa en la Figura 7.

Figura 6

Control de asentamiento del hormigón (100% agua, 50% agua - lixiviado, 100% lixiviado)

**Figura 7**

Curado estándar de cilindros



Exposición prolongada: Se puede observar en la Figura 8 que los cilindros posteriores al curado estándar fueron sumergidos en recipientes de 200 L con renovación mensual del medio de exposición en intervalos de 3, 6, 9 y 12 meses.

2.3.5 Evaluación de propiedades mecánicas

Ensayo de resistencia a compresión

Como se observa en la Figura 9 (a), los ensayos se realizaron en una prensa hidráulica servo-controlada de 3,000 kN de capacidad (modelo

Figura 8

Cilindros en exposición prolongada en los turriles de 200 L



Figura 9

Prensa hidráulica TCP-300(a); Modo de falla de cilindro(b)



(a)

(b)

TCP-300), calibrada según los requisitos de ASTM C39/C39M. El protocolo de ensayo incluyó:

1. Acondicionamiento: Secado superficial de los cilindros a temperatura ambiente durante 24 horas
2. Preparación: Medición precisa de dimensiones con calibre digital (± 0.1 mm)
3. Ensayo: Aplicación de carga axial a velocidad constante de 0.25 MPa/s
4. Registro: Captura digital de la carga máxima (kN) y modo de falla (Figura 9 (b))

3. Resultados y discusión

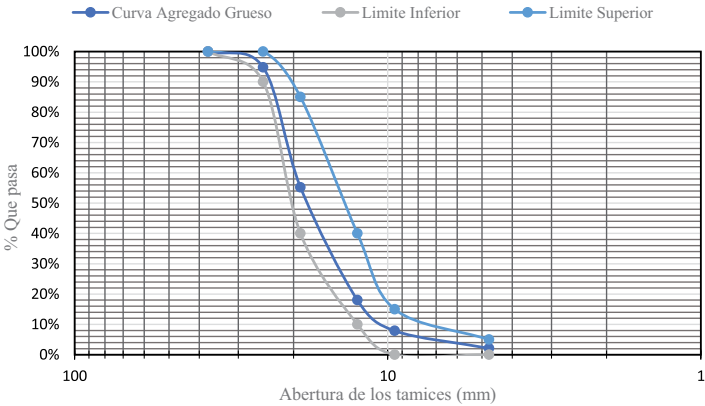
3.1 Análisis granulométrico agregado grueso

En cuanto al análisis granulométrico del agregado grueso, como se observa en la Tabla 1 basados en una muestra de 10000 gr y en aplicación a la ASTM C 136 los pesos retenidos cumplen los límites superior e inferior, asimismo cumpliendo la curva granulométrica los límites permitidos como se evidencia en la Figura 10.

Tabla 1
Pesos retenidos de agregado grueso

ANALISIS GRANULOMETRICO “ASTM C136”					
PESO INICIAL DE LA MUESTRA = 10000 gr					
TAMIZ		Peso Retenido (gr)	Peso Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante Acumulado (%)
Pulg.	mm				
1 1/2”	37,5	0	0,00	0,00	100,00
1”	25,00	520	5,21	5,21	94,79
3/4”	19,00	3950	39,55	44,75	55,25
1/2”	12,70	3720	37,24	82,00	18,00
3/8”	9,51	1010	10,11	92,11	7,89
# 4	4,75	578	5,79	97,90	2,10
FONDO		210,00	2,10	100,00	0,00
TOTAL		9988,00	100,00	-	-

Figura 10
Curva granulométrica de agregado grueso frente a límites



3.2 Análisis granulométrico agregado fino

En cuanto al agregado fino, se observa en la Tabla 2, con una muestra de 500 gr y basados en la ASTM C 136, los límites superior e inferior

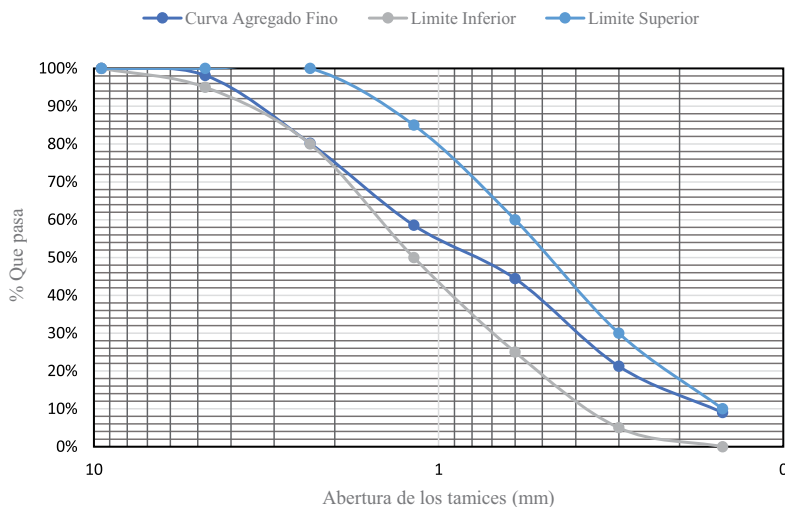
Tabla 2
Pesos retenidos de agregado fino

ANALISIS GRANULOMETRICO “ASTM C136”					
PESO INICIAL DE LA MUESTRA = 500 gr					
TAMIZ		Peso Retenido	Peso Retenido	Retenido Acumulado	Pasante Acumulado
Pulg.	mm	(gr)	(%)	(%)	(%)
3/8”	9,500	8,80	0,00	0,00	100,00
Nº 04	4,750	9,30	1,86	1,86	98,14
Nº 08	2,360	89,75	17,95	19,82	80,18
Nº 16	1,180	108,30	21,67	41,48	58,52
Nº 30	0,600	70,50	14,10	55,58	44,42
Nº 50	0,300	115,80	23,17	78,75	21,25
Nº 100	0,150	61,10	12,22	90,97	9,03
Nº 200	0,075	29,30	5,86	96,84	3,16
FONDO		7,02	1,40	98,24	1,76
TOTAL		499,87	98,24	-	-

cumplen en cuanto a los pesos retenidos, asimismo cumpliendo la curva granulométrica los límites permitidos como se evidencia en la Figura 11.

Figura 11

Curva granulométrica de agregado fino frente a límites



3.3 Análisis de calidad de agua de lixiviado

Se contrató los servicios del laboratorio AquaLab para realizar el análisis de calidad de agua de los lixiviados, obteniendo los resultados reflejados en la Tabla 3, se consideró realizar el análisis fisicoquímico y biológico de las muestras.

Los resultados de laboratorio demuestran que los lixiviados tienen características altamente contaminantes y muy agresivas, el pH es de 9.90 lo que indica una condición alcalina, aspecto que puede alterar la hidratación del cemento y por ende la estabilidad química de la pasta cementicia.

En cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), se obtuvo valores de 7520.00 mg/L y 260.00 mg/L respectivamente, evidenciando una elevada carga orgánica. Por lo que, existe una presencia considerable de materia orgánica biodegradable y no biodegradable que podría interferir en los procesos de fraguado y endurecimiento del concreto.

Tabla 3
Análisis de contenido de lixiviado

Parámetros	Método Estándar (SM)	Límite de Detección	Unidad de Medida	Resultados
pH	SM 4500-H ⁺ B Electrométrico	0.10	-	9.90
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	SM 5220 D Espectrofotometría	1.00	mg O ₂ /L	7520.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	SM 5210 B Incubación	1.00	mg O ₂ /L	260.00
Sólidos Totales (ST)	SM 2540 B Gravimétrico 105°C	1.00	mg/L	30930.00
Sólidos Suspendidos (SS)	SM 2540 D Gravimétrico 105°C	1.00	mg/L	28140.00
Sólidos Disueltos (SD)	SM 2540 C Gravimétrico 180°C		mg/L	2790.00
Bicarbonatos	SM 2320 Cálculo	0.01	mgCaCO ₃ /L	800.00
Carbonatos	SM 2320 Cálculo	0.01	mgCaCO ₃ /L	1360.00
Cloruros	SM 4500-CI B Titulación	0.12	mgCl ⁻ /L	5865.03
Color	SM 2120 C Nefelometría	0.05	UCV	27415.00
Turbiedad	SM 2130 B Nefelometría	0.04	NTU	250.00
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ Nefelometría	1.78	mgSO ₄ ²⁻ /L	471.44
Metales Pesados				
Hierro Total	SM 3111 B Absorción Atómica	0.01	mgFe/L	18.26
Manganeso	SM 3111 B Absorción Atómica	0.01	mgMn/L	0.10

(continuada)

Tabla 3
Análisis de contenido de lixiviado (Continuada)

Parámetros	Método Estándar (SM)	Límite de Detección	Unidad de Medida	Resultados
Sodio	SM 3500 N B Fotometría de llama	0.01	mgNa/L	4117.00
Potasio	SM 3500 K B Fotometría de llama	0.01	mgK/L	7335.00
Cadmio	SM 3111 B Absorción Atómica	0.002	mgCd/L	<0.002
Cobre		0.05	mgCu/L	<0.05
Cromo Total		0.01	mgCr T/L	<0.01
Níquel		0.01	mgNi/L	<0.01
Plata		0.005	mgAg/L	<0.005
Plomo		0.01	mgPb/L	<0.01
Zinc		0.05	mgAg/L	1.17
Mercurio	SM 3111 B Absorción Atómica-GH	0.001	mgHg/L	<0.001

Fuente: Elaboración propia en función al reporte de laboratorio de AguaLab, 2025.

Los sólidos totales (ST) alcanzaron 30,930.00 mg/L, siendo su mayoría sólidos suspendidos (SS) con 28,140.00 mg/L, y una menor fracción como sólidos disueltos (SD) con 2,790.00 mg/L. Esta distribución indica que el lixiviado contiene una gran cantidad de partículas en suspensión, lo cual afectaría negativamente la trabajabilidad del hormigón, obteniendo una mezcla heterogénea y dificultando la compactación.

Respecto a los metales pesados, el hierro total (18.26 mgFe/L) y el zinc (1.17 mgZn/L) fueron los más significativos. Elementos como sodio (4,117.00 mg/L) y potasio (7,335.00 mg/L) también estuvieron presentes en altas concentraciones, lo cual puede interferir en la retención de agua y en la estabilidad de la pasta cementicia. Otros metales como cadmio, plomo, mercurio, plata, níquel, y cromo estuvieron debajo de los límites de detección.

Los resultados reflejan que el lixiviado analizado tiene un perfil químico altamente contaminante y agresivo, con una mezcla de materia or-

gánica, alta carga salina y algunos metales que podrían afectar negativamente las propiedades físicas, químicas y mecánicas del hormigón. Estos datos justifican la reducción de la trabajabilidad observada en el ensayo de consistencia, así como la necesidad de monitorear su influencia en la resistencia y durabilidad del material en estudios posteriores.

3.4 Dosificación de la mezcla de hormigón

La dosificación se realizó en base al cálculo de los datos, determinando el volumen ocupado por cada componente del concreto, utilizando sus respectivos pesos específicos: 3.10 kg/dm³ para el cemento, 2.60 kg/dm³ para la arena, 2.70 kg/dm³ para la grava y 1.00 kg/dm³ para el agua. A partir de estos valores, se obtuvieron los volúmenes relativos (unitarios) de cada material, normalizados respecto al volumen del cemento. En la Tabla 4 se puede ver la dosificación determinada y utilizada en la elaboración de los cilindros.

Tabla 4

Dosificación de la mezcla de hormigón

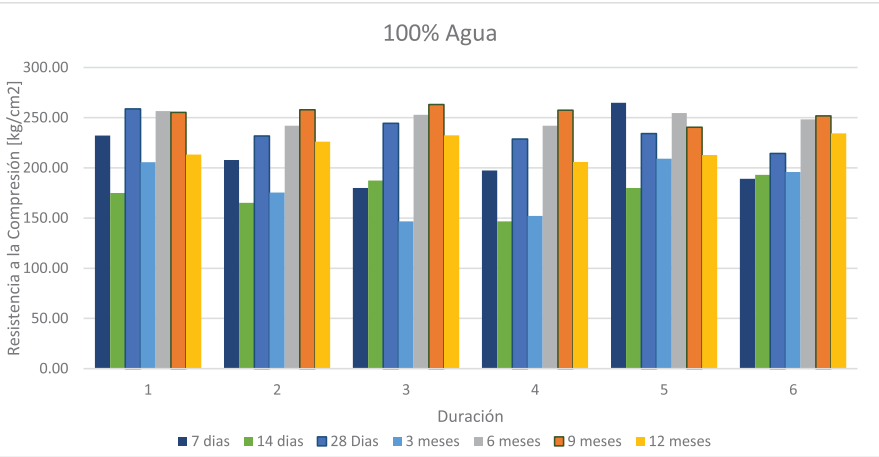
Material	Peso (kg)	Porción en Peso Unitario	Volumen (m ³)	Por Volumen Unitario
Cemento	394.44	1	0.1272	1
Arena	675.67	1.71	0.2591	2.04
Grava	1201.19	3.05	0.4456	3.5
Agua	177.5	0.45	0.1775	-

La variación para la concentración de lixiviado se consideró en la relación de cantidad de agua determinada para la dosificación, usando el agua al 100%, 50% agua – 50% lixiviado y al 100% de lixiviado.

3.4.1 Dosificación 100% agua

La Figura 12 muestra la evolución de la resistencia a la compresión del hormigón elaborado con 100% agua. A lo largo de las seis series se puede observar una tendencia consistente de aumento de la resistencia

Figura 12
Evolución de la resistencia mecánica del hormigón con dosificación de agua al 100%



desde los primeros días hasta los seis o nueve meses de edad. En la mayoría de los casos, los valores de resistencia superan el valor de referencia de 210 kg/cm² a los 28 días, cumpliendo adecuadamente con la normativa estructural con algunas particulares excepciones.

La consistencia en el desarrollo de la resistencia sugiere que el hormigón elaborado con agua potable mantiene buenas propiedades mecánicas a pesar de la continua exposición a lixiviados.

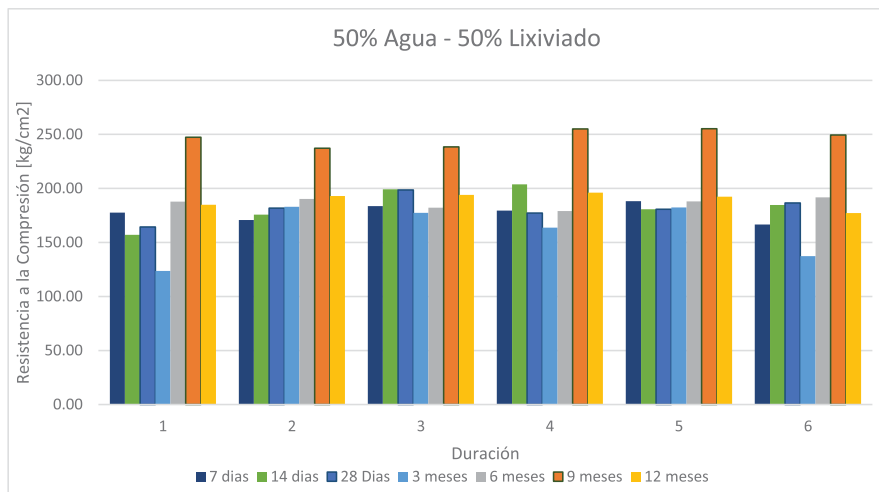
3.4.2 Dosificación 50% agua – lixiviado

La Figura 13 representa los resultados de resistencia a la compresión del hormigón elaborado con una mezcla equitativa de agua potable (50%) y lixiviado (50%). A diferencia del hormigón con agua potable, se observa un comportamiento más variable en el desarrollo de la resistencia. A pesar de que algunos valores alcanzan niveles adecuados, el rendimiento general se muestra más irregular, lo cual es atribuible a la influencia del lixiviado en la hidratación y la microestructura del cemento.

El uso de 50% de lixiviado no impidió el desarrollo de resistencia, pero sí afectó la velocidad y regularidad de ganancia. A largo plazo, la mezcla logró comportarse de forma aceptable, especialmente a los 9 meses.

Figura 13

Evolución de la resistencia mecánica del hormigón con dosificación de lixiviado y agua al 50%



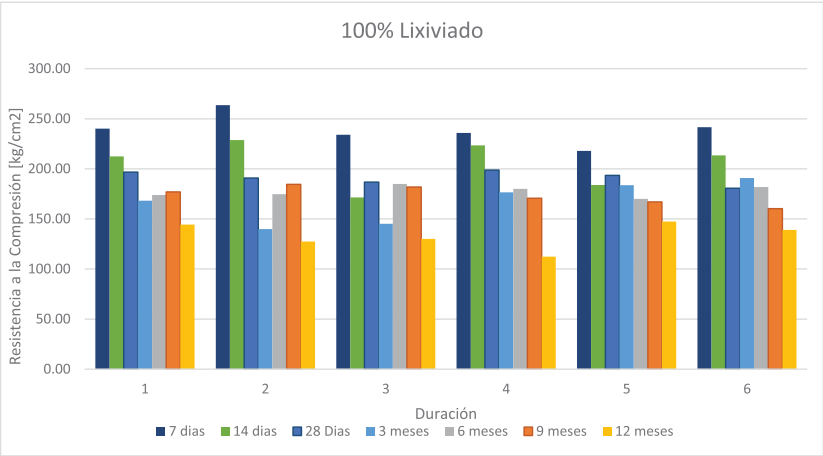
Esta mejora posterior puede deberse a una reacción retardada del cemento con componentes presentes en el lixivado, lo cual modifica el perfil de hidratación.

3.4.3 Dosificación 100% lixivado

La Figura 14 muestra la evolución de la resistencia a la compresión del hormigón elaborado con 100% de lixivado. A diferencia de las gráficas anteriores (agua y mezcla), se observa que el hormigón con 100% de lixivado alcanza altas resistencias en edades tempranas (7 a 14 días), e incluso en algunos casos superiores a las del hormigón convencional. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo, se evidencia una disminución progresiva y constante en la resistencia, lo cual es un indicativo de deterioro estructural o pérdida de cohesión interna a largo plazo.

Comparado con las otras dos condiciones, esta dosificación muestra un comportamiento inverso: alta resistencia inicial, pero una fuerte degradación a largo plazo. Esto puede deberse a la presencia de metales pesados, sales y materia orgánica en el lixivado, los cuales podrían haber generado una aceleración inicial de la hidratación, pero luego causando

Figura 14
Evolución de la resistencia mecánica del hormigón con dosificación de lixiviado al 100%



efectos corrosivos, expansivos o una inestabilidad química dentro de la matriz cementicia.

En la Tabla 5 se realiza una comparación de los 3 grupos de cilindros dosificados con distintas concentraciones de lixivios, mostrando la evolución de la resistencia mecánica a través del tiempo.

Respecto a los resultados de la resistencia del hormigón, se muestra bastante variabilidad en función de la concentración de lixivios y el tiempo de exposición de los cilindros.

En cuanto a los hormigones al 100% que sirven en calidad de control al ser convencionales, presentan los valores más altos de resistencia en casi todos los tiempos de evaluación, asimismo muestran un incremento esperado en resistencia hasta los 28 días, luego puede observarse fluctuaciones atribuibles a la heterogeneidad de los cilindros. A los 12 meses se mantiene una resistencia aceptable (promedio de 221 kg/cm²) estando dentro del rango de diseño de 210 kg/cm²

Los hormigones elaborados con 50% de lixivio presentan una reducción promedio de 15 a 20% de resistencia respecto al control en los primeros 28 días, a los 3 meses puede observarse una caída repentina (promedio de 161 kg/cm²) pudiendo deberse a un deterioro acelerado,

Tabla 5

Comparación de los resultados de resistencia mecánica en el tiempo de los distintos cilindros

Tiempo	Nº Cilindro	100% Agua	50% Agua - Lixiviado	100% Lixiviado
		Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)
7 días	1	232.21	177.61	240.21
	2	207.78	170.72	263.52
	3	180.06	183.67	233.98
	4	197.30	179.40	235.92
	5	264.93	188.17	218.00
	6	189.18	166.59	241.59
14 días	1	174.93	157.07	212.39
	2	165.14	175.72	228.73
	3	187.49	199.31	171.47
	4	146.81	203.80	223.51
	5	180.03	180.77	183.88
	6	193.06	184.76	213.37
28 días	1	258.78	164.28	196.68
	2	231.74	181.72	190.81
	3	244.30	198.56	186.65
	4	228.84	177.14	198.68
	5	234.12	180.80	193.55
	6	214.31	186.50	180.53
3 meses	1	205.74	123.58	168.13
	2	175.43	183.08	139.87
	3	146.71	177.40	145.15
	4	152.25	163.62	176.51
	5	209.26	182.40	183.75
	6	195.95	137.34	190.91
6 meses	1	256.56	187.85	173.92
	2	242.00	190.34	174.80
	3	252.84	182.17	184.85

(continuada)

Tabla 5
Comparación de los resultados de resistencia mecánica en el tiempo de los distintos cilindros (Continuada)

Tiempo	Nº Cilindro	100% Agua	50% Agua - Lixiviado	100% Lixiviado
		Resistencia (kg/cm²)	Resistencia (kg/cm²)	Resistencia (kg/cm²)
9 meses	4	242.09	179.06	180.05
	5	254.63	188.11	169.92
	6	248.27	191.66	181.76
	1	255.38	247.45	176.99
	2	257.99	237.21	184.53
	3	263.06	238.47	181.78
	4	257.48	255.11	170.70
	5	240.49	255.18	167.02
	6	251.84	249.42	160.27
12 meses	1	234.38	184.83	144.32
	2	213.31	193.06	127.37
	3	226.06	193.98	130.14
	4	232.49	196.03	112.26
	5	205.86	192.47	147.44
	6	212.86	177.32	138.97

no obstante, a los 9 meses recuperan su resistencia (promedio de 247 kg/cm²) pudiendo deberse a una saturación de sales en los poros.

Finalmente, los hormigones al 100% de lixiviados denotan una adquisición de resistencia muy acelerada a los 7 días y posterior a los 28 días presentan un deterioro progresivo, alcanzando a 138 kg/cm² (35% menos que el control) a los 12 meses.

4. Conclusiones

El presente estudio evaluó de manera sistemática los efectos de los lixiviados en las propiedades mecánicas del hormigón, utilizando cilin-

dros dosificados con concentraciones de agua al 100% (0% lixiviado) que sirvió como control, luego con concentraciones al 50% y 100% de lixiviado. Los resultados muestran que el hormigón preparado con agua potable (0% lixiviado) presenta un desarrollo normal y progresivo de la resistencia a compresión, alcanzando un promedio de 221 kg/cm^2 a los 12 meses, cumpliendo con el valor esperado de diseño de 210 kg/cm^2 y demostrando una adecuada durabilidad a largo plazo. Por su parte, el hormigón con 50% de lixiviado denota una respuesta más variable, con una disminución inicial de la resistencia entre un 15% y 20% en los primeros 28 días, estando entre las probables causas la interferencia en los procesos de hidratación del cemento. Sin embargo, a los 9 meses se observa una recuperación significativa, con un promedio de 247 kg/cm^2 , posiblemente relacionada con la acumulación de sales en los poros de la matriz cementicia. Por último, el hormigón dosificado con 100% de lixiviado muestra una ganancia acelerada de resistencia en etapas tempranas (7-14 días), superando incluso al control en algunos casos, pero conforme transcurre el tiempo sufre un deterioro progresivo a largo plazo, alcanzando solo 138 kg/cm^2 a los 12 meses, lo que representa una pérdida del 35% respecto al control, siendo catalogado como un hormigón pobre desde el punto de vista de la resistencia. Este comportamiento se atribuye a la acción corrosiva y expansiva de la alta carga orgánica, sales y metales pesados presentes en los lixiviados.

Desde un punto de vista técnico, estos hallazgos destacan la necesidad de diseñar y elaborar hormigones más resistentes para entornos agresivos, utilizando cementos especializados, relaciones agua/cemento reducidas o aditivos que mitiguen los efectos de los lixiviados. Desde el punto de vista ambiental, los resultados evidencian los riesgos asociados a la exposición de estructuras a lixiviados, especialmente en contextos como Bolivia, donde la mayoría de los residuos se disponen en botaderos a cielo abierto o controlados, contribuyendo a la contaminación de suelos y aguas subterráneas. Esto resalta la importancia de implementar sistemas efectivos de tratamiento de lixiviados para proteger tanto la infraestructura como el medio ambiente.

Se recomienda evitar el uso de lixiviados en la dosificación de hormigón para elementos estructurales críticos y limitar su empleo a concentraciones menores al 50%, acompañado de un monitoreo constante

de las propiedades mecánicas, además de realizar un buen análisis de calidad del agua para el hormigonado. Para futuras investigaciones, se propone extender los ensayos a periodos superiores a 12 meses, evaluar la permeabilidad a cloruros, la corrosión de armaduras y el impacto de otros contaminantes líquidos, como drenajes ácidos o aguas residuales industriales, con el objetivo de desarrollar soluciones constructivas más duraderas y sostenibles en entornos contaminados, además de trabajar con variantes de cemento con alto contenido de puzolana y evaluar el efecto de la carbonatación.

Referencias

- American Concrete Institute (2002). *ACI 211.1: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Committee 211.*
- Auquilla Rodríguez, C. F., & Peláez Oñate, D. E. (2021). *Diseños alternativos sostenibles para el hormigón hidráulico con la utilización de vidrio molido como parte de agregado fino.* Universidad de Cuenca de Ecuador.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair* (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Correa Hoyos, I. (2024). *Estudio de la degradación de propiedades mecánicas en el concreto de estructuras de generación hidroeléctrica por exposición a aguas residuales del río Bogotá.* Universidad Nacional de Colombia.
- Ding, A., Zhang, Z., Fu, J., & Cheng, L. (2001). Biological control of leachate from municipal landfills. *Chemosphere*, 44, 1-8.
- Flores, R. (2024, 9 de diciembre). *De 112 municipios del país, solo el 12% tiene rellenos sanitarios.* La Razón. <https://hemeroteca.larazon.bo/ciudades/2024/12/09/de-112-municipios-del-pais-solo-el-12-tiene-rellenos-sanitarios/>
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de ingeniería*, (14), 44-55.
- Irassar, E. F., Di Maio, A. A., & Batic, O. R. (2010, June). Deterioro del hormigón por cristalización de sales. In *Spanish. In Proc., VI*

- Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras (CINPAR)*. Buenos Aires, Argentina: edUTecNe.
- Jiménez Montoya, P., García Meseguer, Á., & Morán Cabré, F. (2015). *Hormigón armado* (15ª ed.). Gustavo Gili.
- Maldonado Huayaney, R. F., & Alan Nolasco, M. A. (2024). *Evaluación del concreto con cemento HS y puzolana frente al ataque de sulfatos en presencia de humedad-distrito de Chilca*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giácoman Vallejos, G., & Jiménez Cisneros, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos físico-químicos de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 133-145.
- Montaña-Muñoz, C. C., & Carmona-Herrera, R. A. (2015). *Impacto de las adiciones para concreto en la reducción de la permeabilidad al ion cloruro vs la relación agua cemento*. Universidad Católica de Colombia.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson.
- Pire, W. G. (2013). Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado. *Core. Kmi. Open. Ac. Uk*, 137.
- Río Bueno, A. D. (2008). *Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación*.
- Rivera, Ú., Saturnino, J., & Yader, D. D. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7), 889-894. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.347444>
- Rodríguez Gómez, C., Dávila Martín, J. M., Miguel Sarmiento, A., de la Torre, M. L., & Hernández Gómez, A. (2025). Protecciones en el hormigón frente al drenaje ácido de mina. *Anales De Ingeniería Mecánica*, 1(24).

- Salguero, E. (2025). *Tratamiento de basura en Bolivia, un problema no resuelto*. Inmediaciones.org. <https://inmediaciones.org/tratamiento-de-basura-en-bolivia-un-problema-no-resuelto/>
- Vaca Pillajo, J. S. (2022). *Análisis de la resistencia a compresión del concreto con reemplazo parcial del cemento por osamentas de animales calcinadas y pulverizadas*. Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador.
- Valderrama, M., Montero del Águila, E., & Cruz Pio, L. E. (2016). Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(4), 454-466.
- Velásquez Garzón, R. F. (2011). Método de dosificación de hormigones de peso normal según “Jiménez Montoya, Alvaro García Mesequer y Francisco Morán Cabre”. *Revista Tecnología, Investigación y Docencia*, 57.