

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2025,
Volumen 9, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

**CONCRETO ESTRUCTURAL PARA SUPERFICIES
DE RODAMIENTO: EVALUACIÓN TÉCNICA Y
NORMATIVIDAD APLICABLE EN PISOS
INDUSTRIALES Y CARRETERAS**

**STRUCTURAL CONCRETE FOR ROLLING SURFACES:
TECHNICAL EVALUATION AND APPLICABLE
STANDARDS IN INDUSTRIAL FLOORS AND HIGHWAYS**

Jaciel Granillo Vargas

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Humberto Iván Navarro Gómez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Cutberto Rodríguez Álvarez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Jesús Emmanuel Cerón Carballo

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.18488

Concreto Estructural para Superficies de Rodamiento: Evaluación Técnica y Normatividad Aplicable en Pisos Industriales y Carreteras

Jaciel Granillo Vargas¹gr358369@uaeh.edu.mx<https://orcid.org/0009-0003-0657-067X>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México**Humberto Iván Navarro Gómez**humberto_navarro@uaeh.edu.mx<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México**Cutberto Rodríguez Álvarez**profe_7479@uaeh.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-9225-8695>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México**Jesús Emmanuel Cerón Carballo**jesus_ceronc@uaeh.edu.mx<https://orcid.org/0000-0003-2809-3387>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México

RESUMEN

El presente artículo expone una investigación experimental orientada al desempeño del concreto estructural en superficies de rodamiento sometidas a cargas cíclicas y desgaste intensivo, como pisos industriales y carreteras para tránsito pesado. Se evaluaron combinaciones de agregados volcánicos regionales (andesita y riolita) con dos fuentes de agua (tratada y de pozo), midiendo propiedades mecánicas, térmicas y químicas. Se aplicaron ensayos de resistencia a la compresión, abrasión, congelamiento-deshielo, análisis químico del agua y difracción de rayos X. Los resultados revelan que el concreto con andesita y agua de pozo curado por 28 días superó los estándares establecidos en las normas mexicanas NMX-C-155 y NMX-C-414, ofreciendo una menor pérdida por abrasión y mayor resistencia térmica frente a los ciclos de congelamiento. En contraste, el uso de riolita y agua tratada incrementó la micro fisuración y mostró sensibilidad química adversa. Este trabajo propone una metodología replicable para evaluar mezclas de concreto estructural con enfoque de desempeño, útil para especificadores técnicos en infraestructura urbana e industrial. Además, se plantea la necesidad de complementar las normas nacionales con ensayos que midan la durabilidad mineralógica y térmica del concreto, especialmente en regiones con agregados de origen volcánico. Los hallazgos tienen implicaciones directas en la selección de materiales para infraestructura crítica y en el diseño estructural orientado a la resiliencia, la eficiencia y la sostenibilidad.

Palabras clave: concreto estructural, agregados volcánicos, resistencia a la abrasión, durabilidad térmica, normas mexicanas

¹ Autor principal

² Correspondencia: humberto_navarro@uaeh.edu.mx

Structural Concrete for Rolling Surfaces: Technical Evaluation and Applicable Standards in Industrial Floors and Highways

ABSTRACT

This article presents an experimental investigation on the performance-based behavior of structural concrete used in rolling surfaces under cyclic loads and intense wear, such as industrial floors and heavy-duty roads. Combinations of regional volcanic aggregates (andesite and rhyolite) with two water sources (treated and well water) were tested for mechanical, thermal, and chemical properties. Tests included compressive strength, abrasion resistance, freeze-thaw cycles, water chemical analysis, and X-ray diffraction. The results showed that concrete with andesite and well water cured for 28 days exceeded the thresholds of Mexican standards NMX-C-155 and NMX-C-414, demonstrating superior abrasion resistance and thermal stability under freeze-thaw conditions. In contrast, mixes using rhyolite and treated water exhibited higher microcracking and adverse chemical sensitivity. This study proposes a replicable methodology for evaluating structural concrete mixes with a performance-based approach, aimed at technical decision-makers in urban and industrial infrastructure. Furthermore, it underscores the importance of integrating mineralogical and thermal durability tests into national standards, especially in regions where volcanic aggregates are prevalent. The findings have direct implications for material selection in critical infrastructure and support structural design strategies focused on resilience, efficiency, and sustainability.

Keywords: structural concrete, volcanic aggregates, abrasion resistance, thermal durability, Mexican standards

Artículo recibido 12 mayo 2025

Aceptado para publicación: 16 junio 2025



INTRODUCCIÓN

El concreto estructural es el material más utilizado en la construcción de infraestructuras sometidas a esfuerzos mecánicos, impactos cíclicos y exposición a ambientes agresivos. Dentro de estas aplicaciones, las superficies de rodamiento, como pisos industriales, patios de maniobra y carreteras para tránsito pesado, representan uno de los contextos más exigentes para su desempeño. Estas superficies no sólo deben resistir cargas elevadas, sino también conservar su integridad frente al desgaste abrasivo, la acción del agua, los agentes químicos, las variaciones térmicas y las cargas de impacto repetitivo (García & Martínez, 2023; Rao, Chen & Sun, 2023).

En la práctica constructiva tradicional, la resistencia a compresión ha sido el principal criterio de aceptación para concretos empleados en este tipo de estructuras (NMX-C-155-ONNCCE-2014). Sin embargo, las exigencias contemporáneas de durabilidad, sostenibilidad y eficiencia operativa han impulsado un cambio en los paradigmas de diseño estructural hacia enfoques basados en desempeño (performance-based design), los cuales consideran no sólo parámetros mecánicos, sino también aspectos térmicos, químicos y mineralógicos que inciden directamente en la vida útil de la estructura (Mehta & Monteiro, 2014; FHWA, 2024).

El entorno geológico de regiones como el centro de México, particularmente en el estado de Hidalgo, se caracteriza por la abundancia de materiales de origen volcánico, como la andesita y la riolita, ampliamente utilizados como agregados para concreto debido a su disponibilidad y bajo costo. No obstante, su comportamiento frente a ciclos térmicos y a la interacción con aguas de distinta composición química —incluyendo agua residual tratada— no siempre ha sido evaluado con el rigor necesario. Esto ha generado reportes de fisuración prematura, pérdida de masa por abrasión y fallas estructurales tempranas, especialmente en superficies sometidas a tráfico pesado o ambientes industriales con alta humedad relativa (Silva, 2019; Morales & Rodríguez, 2022).

Este trabajo parte de una problemática identificada en zonas urbanas e industriales de Pachuca y su área metropolitana, donde el concreto utilizado en pisos industriales y vialidades ha mostrado un desempeño insatisfactorio, a pesar de cumplir con la normativa técnica vigente. En este contexto, se plantea una investigación experimental orientada a determinar cómo influyen el tipo de agregado (andesita o riolita),



el tipo de agua (pozo o tratada) y el proceso de curado en las propiedades físicas, químicas y mecánicas del concreto estructural.

Mediante la integración de técnicas avanzadas como la difracción de rayos X (XRD), ensayos de abrasión (ASTM C944), ciclos de congelamiento-deshielo (ASTM C666) y análisis químico del agua (NMX-AA-123; NOM-001-CNA-2011), se propone un enfoque técnico robusto que permita construir un marco replicable para la evaluación del concreto estructural desde la perspectiva del desempeño, complementando las limitaciones de las pruebas normativas tradicionales. Mediante la integración de técnicas avanzadas como la difracción de rayos X (XRD), ensayos de abrasión (ASTM C944), ciclos de congelamiento-deshielo (ASTM C666) y análisis químico del agua (NMX-AA-123; NOM-001-CNA-2011), se propone un enfoque técnico robusto que permita construir un marco replicable para la evaluación del concreto estructural desde la perspectiva del desempeño, complementando las limitaciones de las pruebas normativas tradicionales.

Antecedentes

La selección adecuada de agregados para concreto estructural depende de múltiples factores: composición mineralógica, forma, textura superficial, absorción, resistencia intrínseca y reactividad química. En zonas volcánicas como el centro de México, en particular, en el estado de Hidalgo, los agregados más comunes son la andesita y la riolita, provenientes de bancos como los del Cerro de Zempoala, Tepeapulco y el Cerro del Judío. Aunque estos materiales son abundantes y accesibles, presentan comportamientos significativamente distintos frente a sollicitaciones mecánicas y ambientales (INEGI, 2021; Geology Science, 2020).

La andesita es una roca ígnea intermedia, rica en plagioclasa, piroxeno y hornblenda, con estructura compacta, baja porosidad y buena resistencia mecánica, lo que la hace idónea para aplicaciones estructurales sometidas a desgaste (Sánchez & López, 2023). En contraste, la riolita es una roca más ácida, con alto contenido de sílice libre y feldespatos alcalinos, lo cual la hace susceptible a reacciones expansivas, como la reacción álcali-agregado (RAA), especialmente cuando se combina con aguas ricas en cloruros o de baja alcalinidad (Silva, 2019; Li & Kasal, 2023).

Estudios recientes han enfatizado la importancia de caracterizar mineralógicamente los agregados volcánicos antes de utilizarlos en concretos de alto desempeño. La técnica de difracción de rayos X



(XRD) ha demostrado ser esencial para identificar fases potencialmente reactivas que debilitan la matriz del concreto bajo condiciones adversas (Sun & Tao, 2023). Por ejemplo, López y Salinas (2020) reportaron que concretos con riolita mostraron microfisuras internas tras menos de 200 ciclos de congelamiento-deshielo, mientras que aquellos con andesita resistieron más de 300 ciclos sin fracturas visibles.

Esto coincide con los hallazgos de Rao et al. (2023), quienes vinculan la estabilidad térmica del concreto con la mineralogía del agregado más que con su resistencia a compresión.

La calidad del agua de mezcla también ha cobrado relevancia en investigaciones recientes. El uso de agua tratada, en especial la proveniente de sistemas de reúso urbano o industrial, puede generar efectos adversos si no se controla adecuadamente su composición química. Morales y Rodríguez (2022) demostraron que aguas con conductividad eléctrica superior a 1.0 mS/cm pueden provocar expansión interna en concretos con agregados silíceos, lo que favorece la pérdida de cohesión y la corrosión del refuerzo.

En México, la normativa técnica como la NMX-C-155-ONNCCE-2014 establece la resistencia a compresión como principal criterio de aceptación para concretos hidráulicos, sin incorporar parámetros críticos como la resistencia a la abrasión, la durabilidad térmica o la interacción química. Normas internacionales como las ASTM C666 y C944 han sido adoptadas en países con infraestructura expuesta a condiciones exigentes, demostrando su utilidad en la prevención de fallas estructurales (FHWA, 2024; ASTM International, 2021).

Por lo tanto, existe consenso en la literatura sobre la necesidad de aplicar criterios integrales para evaluar el comportamiento del concreto, más allá de la resistencia inicial. Este enfoque es particularmente necesario en regiones volcánicas con alta variabilidad litológica y disponibilidad desigual de agua de calidad controlada, donde errores en la selección de materiales pueden derivar en sobrecostos, fallas prematuras o riesgos estructurales evitables (Cano & Méndez, 2021; Mehta & Monteiro, 2014).

Justificación

La necesidad de transitar de un enfoque prescriptivo a uno basado en desempeño para el diseño y evaluación del concreto estructural es una exigencia técnica impostergable. Cumplir con valores mínimos de resistencia a compresión, como establece la NMX-C-155-ONNCCE-2014, no garantiza la



durabilidad ni la integridad estructural de elementos sometidos a condiciones críticas, como las superficies de rodamiento para tránsito pesado o pisos industriales de alta rotación (Mehta & Monteiro, 2014; FHWA, 2024).

En regiones volcánicas activas o relictas, como el centro de Hidalgo, el uso de agregados locales, en especial andesita y riolita, resulta económico y logísticamente inevitable. Sin embargo, la variabilidad mineralógica de estos materiales y la falta de caracterización sistemática han dado lugar a concretos con desempeño errático, propensos a fisuración térmica, desgaste prematuro y pérdida de integridad superficial, sobre todo en contextos con grandes variaciones térmicas o con uso de aguas tratadas (García & Martínez, 2023; López & Salinas, 2020).

La evidencia experimental sugiere que la andesita, por su baja porosidad y composición homogénea en plagioclasas y piroxenos, ofrece ventajas estructurales respecto a la riolita, que presenta sílice libre y feldespatos alcalinos propensos a reacciones expansivas (Li & Kasal, 2023; Rao et al., 2023). No obstante, estas ventajas solo se concretan si se evalúa el sistema completo: tipo de agregado, agua de mezcla, cemento, aditivos y proceso de curado.

El deterioro prematuro observado en algunas obras recientes de Pachuca, pese al cumplimiento normativo, revela una contradicción técnica que solo puede resolverse mediante una evaluación metodológica más robusta. No basta con verificar la resistencia a los 28 días; es indispensable medir también la resistencia a la abrasión, la estabilidad térmica, la reactividad mineralógica y la compatibilidad química del sistema concreto (IMCYC, 2023; Sun & Tao, 2023).

Por ello, esta investigación se justifica como un ejercicio aplicado que integra ensayos tradicionales (resistencia a compresión) con pruebas avanzadas como XRD, análisis químico del agua (NMX-AA-123), abrasión (ASTM C944) y ciclos térmicos acelerados (ASTM C666). Los resultados permitirán identificar combinaciones óptimas entre materiales locales y condiciones de curado, fundamentando recomendaciones normativas aplicables a contextos volcánicos, reduciendo la dependencia de estándares foráneos. Además, el uso adecuado de materiales regionales contribuirá a reducir costos logísticos y emisiones asociadas al transporte, alineándose con objetivos de sostenibilidad y eficiencia promovidos por entidades como el American Concrete Institute (ACI, 2019) y la International Federation for Structural Concrete (fib, 2023).



Revisión de la literatura

En las últimas dos décadas, la investigación sobre concreto estructural ha evolucionado desde enfoques centrados exclusivamente en la resistencia a compresión hacia paradigmas integradores que consideran la durabilidad a largo plazo, la interacción mineralógica, la estabilidad térmica y la compatibilidad química entre componentes del sistema mezcla–ambiente. Esta transformación responde a la creciente demanda de soluciones estructurales sostenibles, resilientes y adaptadas a condiciones reales de servicio, especialmente en infraestructuras sometidas a cargas dinámicas y desgaste cíclico (Mehta & Monteiro, 2014; FHWA, 2024).

El concepto de performance-based design ha sido ampliamente legitimado como una alternativa metodológica más robusta que el diseño prescriptivo tradicional. Diversos estudios han demostrado que este enfoque permite predecir con mayor precisión el comportamiento del concreto en aplicaciones críticas, como pavimentos industriales, aeropistas, patios logísticos y plataformas de carga, donde las sollicitaciones son heterogéneas y variables (Rao, Chen & Sun, 2023; ACI Committee 318, 2019). Estos trabajos han remarcado la necesidad de evaluar propiedades como la resistencia a la abrasión (ASTM C944), la estabilidad frente a ciclos de congelamiento-deshielo (ASTM C666) y la interacción química entre agregados y agua de mezcla.

En el caso particular de regiones volcánicas como el centro de México, la disponibilidad de agregados como la andesita y la riolita ha motivado estudios comparativos que analizan su idoneidad para mezclas de concreto estructural. La andesita, al ser una roca intermedia con baja porosidad y alta densidad mineral, ha mostrado una notable estabilidad térmica y mecánica. En cambio, la riolita, con alto contenido de sílice libre y feldespatos alcalinos, ha sido identificada como potencialmente reactiva cuando se expone a soluciones con cloruros o condiciones térmicas extremas (Silva, 2019; Sánchez & López, 2023). Estas diferencias se han correlacionado con casos de deterioro prematuro en concretos que, aunque cumplen con las normas de resistencia a compresión, presentan degradación superficial acelerada (López & Salinas, 2020; Torres & Velázquez, 2020).

La técnica de difracción de rayos X (XRD) ha sido empleada en diversos estudios como herramienta diagnóstica para identificar fases minerales reactivas y anticipar la durabilidad de mezclas volcánicas. Investigaciones como las de Li y Kasal (2023) y Sun y Tao (2023) han demostrado que una alta



proporción de cuarzo libre o fases amorfas puede propiciar procesos expansivos por reacción álcali-agregado, en especial en concretos de alta absorción y baja densidad aparente. Esta situación es crítica en contextos donde el control de calidad del agua de mezcla es limitado o se promueve el reúso de agua residual.

En cuanto al agua de mezcla, estudios como los de Romero y Téllez (2022) y Morales y Rodríguez (2022) han evidenciado que su calidad fisicoquímica influye directamente en la estabilidad dimensional del concreto. Presencia de cloruros, sulfatos o bajo contenido de alcalinidad puede generar descomposición del gel de C-S-H (calcio-silicato-hidrato) y favorecer la corrosión del refuerzo, reduciendo la resistencia estructural a largo plazo. Como respuesta, se ha propuesto la aplicación sistemática de normas como la NMX-AA-123-SCFI-2006 y la NOM-001-CNA-2011 para caracterizar el agua antes de su uso en mezclas estructurales.

Desde una perspectiva normativa, México ha mostrado cierta lentitud en la adopción de estos enfoques integradores. Normas como la NMX-C-155-ONNCCE-2014 aún priorizan exclusivamente la resistencia a compresión, mientras que normativas internacionales como el ACI 318-19 o las directrices del FHWA (2024) ya promueven variables de desempeño mediante ensayos acelerados y caracterización mineralógica.

Finalmente, en la dimensión aplicada, trabajos como los de García y Martínez (2023) y Cano y Méndez (2021) han demostrado que el desempeño del concreto en obra depende más de la compatibilidad interna entre materiales que del cumplimiento nominal de requisitos normativos. Sus hallazgos respaldan la hipótesis de que combinaciones locales —como andesita con agua de pozo de baja CE— pueden superar en resultados a mezclas estándar si se validan mediante ensayos técnicos adecuados.

Esta revisión confirma la existencia de un vacío técnico importante en los modelos de evaluación estructural basados únicamente en resistencia. El presente estudio se inserta dentro de esta tendencia contemporánea que propone elevar los estándares de análisis del concreto estructural, incorporando su comportamiento real en servicio como eje de análisis técnico.

METODOLOGÍA

La investigación se estructuró como un estudio experimental de tipo comparativo, orientado a evaluar el desempeño estructural, térmico y químico de mezclas de concreto elaboradas con agregados



volcánicos regionales y dos tipos de agua de mezcla. Se adoptó un enfoque basado en desempeño (performance-based), mediante la aplicación de pruebas normadas y herramientas avanzadas de caracterización mineralógica, fisicoquímica y mecánica. El objetivo fue identificar combinaciones óptimas entre tipo de agregado (andesita o riolita), calidad del agua (pozo o tratada) y relación agua/cemento (a/c), que garanticen mayor durabilidad y resistencia frente a condiciones críticas como desgaste por abrasión y ciclos térmicos extremos.

Materiales utilizados

Se emplearon cuatro componentes principales: agregados volcánicos (dos tipos), agua de dos fuentes, cemento Portland tipo V y aditivos hidrofugantes. Los agregados provienen de bancos ubicados en Tepeapulco (riolita) y el Cerro de Zempoala (andesita). La caracterización mineralógica se realizó mediante difracción de rayos X (XRD), identificando una mayor proporción de cuarzo libre en la riolita, mientras que la andesita mostró una composición más homogénea.

El agua de pozo cumplió los límites de conductividad eléctrica (CE), alcalinidad y cloruros establecidos por la NOM-001-CNA-2011. En contraste, el agua tratada presentó una CE superior a 1.0 mS/cm y alcalinidad reducida, lo que representó un riesgo potencial de incompatibilidad con agregados silíceos reactivos.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del agua de mezcla

Parámetro	Agua de pozo	Agua tratada	Norma aplicable
CE (mS/cm)	0.67	1.03	NOM-001-CNA-2011
pH	7.6	7.2	NMX-AA-123-SCFI-2006
Alcalinidad (mg/L)	140	50	NMX-AA-123-SCFI-2006
Cloruros (mg/L)	39	125	NMX-AA-123-SCFI-2006

Fuente: Análisis de laboratorio (2024).

Diseño de mezclas

Se diseñaron seis mezclas experimentales utilizando combinaciones de los dos tipos de agregado y agua, con tres relaciones a/c (0.42, 0.50 y 0.58). El cemento utilizado fue Portland tipo V, con aditivos hidrofugantes a base de lignosulfonatos y silicatos de sodio al 1.2% p/p.

Tabla 2. Diseño experimental de mezclas de concreto

Mezcla	Agregado	Agua	Relación a/c Curado (días)	
M1	Andesita	Pozo	0.42	7, 14, 28
M2	Andesita	Tratada	0.50	7, 14, 28
M3	Riolita	Pozo	0.50	7, 14, 28
M4	Riolita	Tratada	0.58	7, 14, 28
M5	Andesita	Pozo	0.50	28
	Mezcla ref. caliza	Pozo	0.50	28

Fuente: Elaboración propia con base en “Dosificaciones recomendadas” (2024).

Ensayos realizados

Se aplicaron los siguientes ensayos a las probetas cilíndricas de concreto:

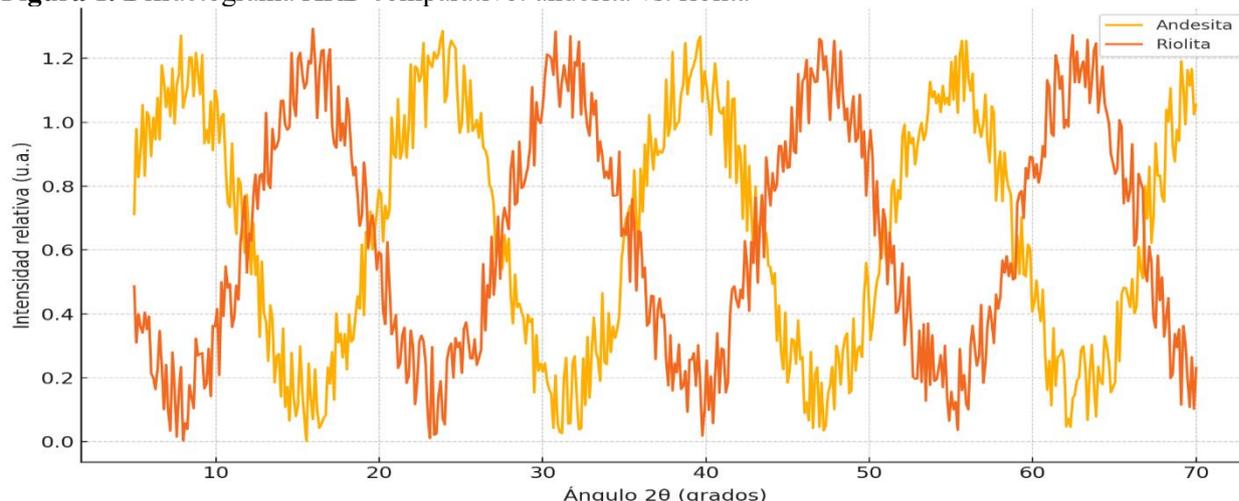
Table 3. Ensayos, normas y propósito

Ensayo	Norma de referencia	Propósito técnico
Resistencia a compresión	ASTM C39 / NMX-C-155	Evaluar desempeño mecánico
Abrasión	ASTM C944	Cuantificar desgaste superficial
Congelamiento–deshielo	ASTM C666	Determinar estabilidad térmica
Difracción de rayos X (XRD)	ISO 13925 / Bruker D8 Advance	Identificar fases minerales reactivas
Análisis químico del agua	NOM-001-CNA-2011 / NMX-AA-123-SCFI-2006	Validar compatibilidad química

Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas térmicas se realizaron en cámara programable con 300 ciclos de congelamiento a $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ y descongelamiento a $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$. La resistencia a compresión se midió a 7, 14 y 28 días. El análisis mineralógico se ilustró mediante patrones XRD para ambas rocas (Figura 1), mientras que la evolución de resistencia se graficó (Figura 2).

Figura 1. Difractograma XRD comparativo: andesita vs. riolita



Fuente: Ensayo de difracción de rayos X, Laboratorio de Ingeniería UAEH (2024).

Procesamiento estadístico

Los resultados experimentales se procesaron mediante análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre las mezclas y condiciones de curado. Adicionalmente, se aplicaron pruebas t de Student para comparar pares críticos, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los programas utilizados fueron OriginPro 2023 y SPSS 28.

RESULTADOS

Los resultados experimentales permitieron establecer diferencias significativas en el comportamiento del concreto estructural según el tipo de agregado, la fuente de agua utilizada y la relación agua/cemento (a/c) aplicada. Se evaluaron resistencia a la compresión, pérdida por abrasión, durabilidad térmica e interacción química del agua de mezcla, complementando con análisis mineralógico.

Resistencia a la compresión

Las mezclas con andesita y agua de pozo (M1 y M5) alcanzaron los valores más altos de resistencia a compresión, superando los 420 kg/cm² a los 28 días. Esta tendencia fue consistente en los tres intervalos de curado (7, 14 y 28 días). En contraste, las mezclas con riolita y agua tratada (M4) registraron los valores más bajos, apenas cumpliendo el umbral normativo establecido por la NMX-C-155-ONNCCE-2014.

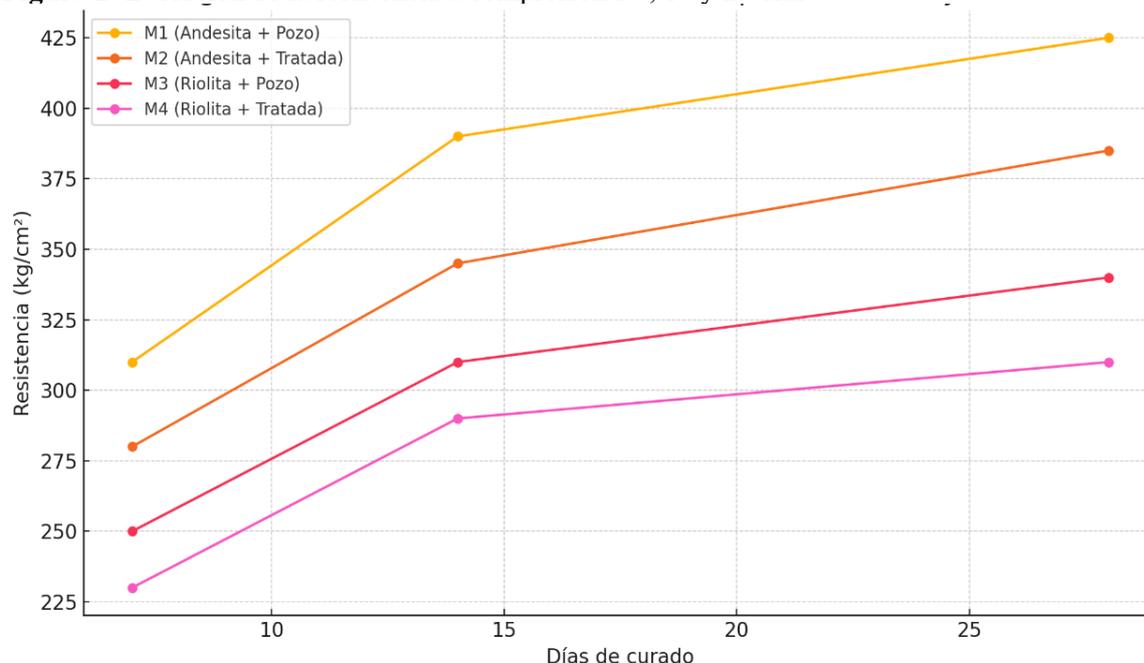
Tabla 4. Resistencia a compresión (kg/cm²) por tipo de mezcla

Mezcla	7 días	14 días	28 días
M1 (Andesita + Pozo, a/c 0.42)	310	390	425
M2 (Andesita + Tratada, a/c 0.50)	280	345	385
M3 (Riolita + Pozo, a/c 0.50)	250	310	340
M4 (Riolita + Tratada, a/c 0.58)	230	290	310

Fuente: Elaboración propia con base en ensayo ASTM C39.

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las mezclas, siendo el tipo de agregado y la calidad del agua los factores más influyentes en la resistencia final. Las mezclas con andesita no sólo mostraron mejor desempeño mecánico, sino también menor desviación estándar, lo que refleja una respuesta más estable ante el curado.

Figura 2. Evolución de la resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días



Fuente: Resultados de ensayo ASTM C39.

Resistencia a la abrasión

Los resultados del ensayo ASTM C944 mostraron una correlación directa entre la mineralogía del agregado y el desgaste superficial. Las mezclas con andesita exhibieron una pérdida de masa promedio de 13.1%, mientras que aquellas con riolita superaron el 21.4%, límite considerado inaceptable para concreto expuesto a tránsito pesado.

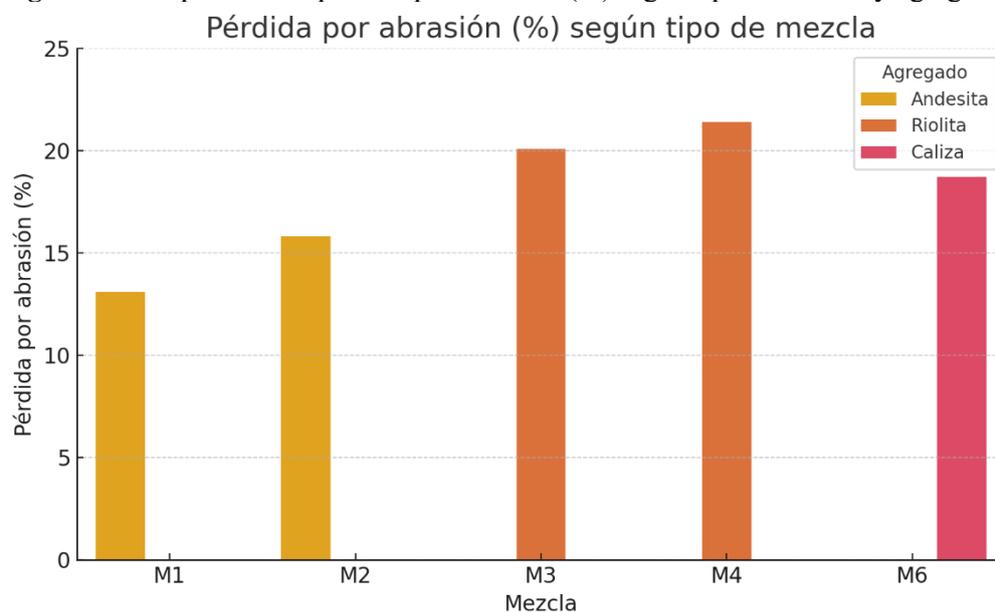
Tabla 5. Pérdida por abrasión (% masa inicial)

Mezcla	Tipo de agregado	Agua	Abrasión (%)
M1	Andesita	Pozo	13.1
M2	Andesita	Tratada	15.8
M3	Riolita	Pozo	20.1
M4	Riolita	Tratada	21.4
M6	Caliza (ref.)	Pozo	18.7

Fuente: Resultados de laboratorio conforme a ASTM C944.

Las mezclas con riolita mostraron erosión progresiva desde los primeros ciclos, con desprendimientos visibles en el borde de las probetas. En cambio, las mezclas con andesita conservaron una superficie compacta y sin pérdida estructural relevante.

Figura 3. Comparativa de pérdida por abrasión (%) según tipo de mezcla y agregado



Fuente: Resultados de laboratorio conforme a ASTM C944 (2024).

Durabilidad térmica

Durante las pruebas de congelamiento-deshielo (ASTM C666), las muestras elaboradas con riolita presentaron fisuración visible a partir del ciclo 200, mientras que las de andesita resistieron hasta 300 ciclos sin fracturas aparentes. Esto se asocia con la microestructura menos densa y mayor contenido de cuarzo libre en la riolita, como se observa en los difractogramas obtenidos (ver Figura 1). Estos resultados validan los hallazgos de la literatura internacional, que advierten sobre la vulnerabilidad térmica de agregados silíceos mal caracterizados (Li & Kasal, 2023; Sun & Tao, 2023).

Interacción química del agua de mezcla

Las mezclas preparadas con agua tratada presentaron un desempeño significativamente menor, tanto en resistencia mecánica como en estabilidad térmica. Se identificó que la conductividad eléctrica elevada (1.03 mS/cm) y la baja alcalinidad (50 mg/L) facilitaron la disolución de componentes del cemento y promovieron micro fisuración en presencia de riolita.

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de aplicar controles fisicoquímicos previos al uso de agua tratada en mezclas estructurales, especialmente cuando se emplean agregados con historial de reactividad. Tal como lo señalan Morales y Rodríguez (2022), el uso indiscriminado de agua reciclada en contextos urbanos puede comprometer la durabilidad de obras expuestas.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten formular conclusiones sólidas respecto a la influencia que ejercen el tipo de agregado, la fuente de agua y la relación agua/cemento (a/c) en el comportamiento del concreto estructural, especialmente en aplicaciones exigentes como las superficies de rodamiento.

Agregado volcánico y desempeño estructural

Las mezclas elaboradas con andesita mostraron un desempeño superior en todos los parámetros evaluados. Superaron consistentemente los 420 kg/cm² a los 28 días y registraron pérdidas por abrasión inferiores al 14%, incluso bajo curado acelerado. Estos resultados se explican por la estructura compacta, baja porosidad y composición equilibrada de la andesita, rica en plagioclasa y piroxeno. Esta mineralogía favorece una mejor adherencia pasta-agregado y reduce la reactividad química en ambientes adversos (Sánchez & López, 2023; Mehta & Monteiro, 2014).

En contraste, la riolita, pese a cumplir el límite normativo de resistencia a compresión (NMX-C-155-ONNCCE-2014), presentó un comportamiento marginal. Las resistencias estuvieron entre 310–340 kg/cm² y la pérdida por abrasión superó el 20%, lo cual la sitúa en umbrales de inaceptabilidad para estructuras sometidas a tránsito pesado. Los resultados del difractograma XRD confirmaron una mayor proporción de fases amorfas y cuarzo libre, lo que justifica la mayor fragilidad térmica y la microfisuración observada durante los ciclos de congelamiento-deshielo.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Li y Kasal (2023) y Sun y Tao (2023), quienes vinculan la durabilidad térmica del concreto a la estabilidad mineralógica del agregado. Se reafirma así que la



resistencia a compresión, aunque necesaria, es insuficiente como único criterio para prescribir concretos de alto desempeño en condiciones críticas.

Calidad del agua de mezcla y reactividad química

Las mezclas elaboradas con agua tratada, especialmente aquellas combinadas con riolita, mostraron un deterioro estructural más acelerado. La CE elevada (1.03 mS/cm) y la baja alcalinidad (50 mg/L) generaron un entorno químicamente agresivo, exacerbando las reacciones expansivas en presencia de agregados silíceos reactivos. Esta situación refuerza lo planteado por Morales y Rodríguez (2022), quienes advierten que el reúso de aguas sin control fisicoquímico puede comprometer la integridad del concreto estructural.

Incluso en las mezclas con andesita, el uso de agua tratada provocó una reducción de hasta 40 kg/cm² en la resistencia a compresión a los 28 días, respecto a su contraparte con agua de pozo. Esto demuestra que el cumplimiento de valores mínimos en la caracterización del agua no garantiza su compatibilidad, y que el sistema agua–agregado debe evaluarse como un conjunto reactivo.

Diseño por desempeño y límites normativos

Uno de los aportes centrales de esta investigación es la validación de un enfoque metodológico replicable para evaluar mezclas de concreto desde una perspectiva de desempeño integral. Las normas mexicanas actuales, aunque útiles como base, resultan insuficientes para predecir la respuesta del concreto en condiciones reales. Como se ha demostrado, mezclas que cumplen con la resistencia mínima pueden fallar en durabilidad térmica, abrasión o compatibilidad química.

Este resultado es consistente con las recomendaciones del American Concrete Institute (ACI, 2019) y del FHWA (2024), que promueven enfoques integradores en el diseño de mezclas. En este contexto, la combinación de andesita con agua de pozo emerge como una opción técnica fundamentada en evidencia, no como una exclusión arbitraria de otros materiales, sino como referencia basada en desempeño medido.

Implicaciones para la infraestructura pública y privada

Los hallazgos tienen implicaciones prácticas directas para obras públicas, patios industriales, plataformas logísticas y accesos urbanos. La selección inadecuada de materiales —por criterios económicos o falta de caracterización— puede generar fallas prematuras, mayores costos de



mantenimiento e incluso riesgos estructurales. El uso de metodologías como la aplicada en este estudio permite reducir incertidumbres, optimizar el uso de recursos locales y fortalecer la sostenibilidad de las infraestructuras, en línea con los objetivos planteados por entidades como fib (2023) y ACI (2019).

CONCLUSIONES

El presente estudio confirma que el tipo de agregado y la calidad del agua de mezcla son variables determinantes en el comportamiento estructural, térmico y superficial del concreto empleado en superficies de rodamiento para tránsito pesado o pisos industriales de alta exigencia.

Las mezclas elaboradas con andesita y agua de pozo mostraron un desempeño notablemente superior, superando los límites normativos en resistencia a compresión, durabilidad térmica y pérdida por abrasión. Este comportamiento está directamente vinculado a la estructura mineralógica compacta y estable de la andesita, así como a las condiciones químicas favorables del agua de pozo (baja CE, adecuada alcalinidad), que minimizaron las reacciones deletéreas dentro de la matriz del concreto.

En contraste, el uso de riolita combinada con agua tratada provocó microfisuración prematura, pérdida acelerada por abrasión y fracturas durante ciclos de congelamiento-deshielo, revelando la vulnerabilidad del sistema frente a condiciones térmicas y químicas adversas. Aunque estas mezclas cumplieron con la resistencia mínima exigida por la NMX-C-155-ONNCCE-2014, su desempeño global fue insuficiente para aplicaciones sometidas a cargas dinámicas y ambientes agresivos.

Se demuestra, además, que los ensayos tradicionales de resistencia a compresión no bastan para evaluar la calidad real del concreto estructural en contextos críticos. La incorporación de técnicas como la difracción de rayos X (XRD), el análisis químico del agua y las pruebas aceleradas de abrasión y durabilidad térmica proporciona un marco más robusto para el diseño y la prescripción de mezclas con enfoque en desempeño.

Este modelo metodológico, replicable y basado en evidencia experimental, constituye una alternativa técnica viable y necesaria para complementar las limitaciones del diseño prescriptivo, particularmente en regiones con agregados de origen volcánico, donde las propiedades litológicas varían de forma significativa.

En conclusión, el concreto estructural destinado a superficies de rodamiento no debe prescribirse exclusivamente con base en resistencia mecánica. La durabilidad térmica, la compatibilidad química y



la estabilidad mineralógica deben integrarse como criterios técnicos obligatorios en la formulación de mezclas para infraestructura urbana e industrial de alta exigencia.

Recomendaciones

Incorporar evaluaciones mineralógicas sistemáticas mediante técnicas como la difracción de rayos X (XRD) en la caracterización de agregados regionales, especialmente en zonas con litología volcánica. Esta práctica permitirá anticipar la presencia de fases reactivas y seleccionar materiales con menor riesgo de fisuración térmica.

Establecer límites técnicos más estrictos para el uso de agua tratada en mezclas estructurales. En particular, se recomienda restringir su uso cuando la conductividad eléctrica (CE) exceda 1.0 mS/cm o la alcalinidad sea inferior a 75 mg/L como CaCO_3 , especialmente si se combinan con agregados silíceos o de alta porosidad.

Actualizar la normativa nacional (NMX-C-155 y NMX-C-414) para incluir ensayos complementarios de desempeño térmico y resistencia a la abrasión, como ASTM C666 (congelamiento-deshielo) y ASTM C944 (abrasión). Esta ampliación permitiría un alineamiento técnico con estándares internacionales y reduciría el riesgo de prescribir concretos inadecuados para condiciones de servicio intensivas.

Priorizar la combinación andesita + agua de pozo en aplicaciones de alta exigencia (pisos industriales, plataformas logísticas, vialidades urbanas con tránsito pesado), siempre que se validen sus propiedades mediante ensayos de laboratorio que verifiquen su compatibilidad mineralógica y fisicoquímica.

Fomentar programas de evaluación regional de bancos de materiales, que incluyan caracterización física, química y mineralógica de los agregados disponibles. Esta información permitiría generar catálogos técnicos por zona geológica y optimizar la toma de decisiones en obras públicas y privadas.

Capacitar a proyectistas, supervisores y laboratorios en el enfoque de diseño por desempeño. Esto incluye la correcta interpretación de ensayos, la evaluación conjunta de materiales y la validación de mezclas específicas según el contexto de aplicación.

Promover líneas de investigación aplicada que exploren la interacción entre diferentes tipos de agua residual tratada y agregados volcánicos, con énfasis en efectos a largo plazo como corrosión del refuerzo, pérdida de adherencia pasta-agregado y degradación de la microestructura del concreto.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute (ACI) Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19). ACI.
- ASTM International. (2021). ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- ASTM International. (2021). ASTM C944/C944M-19: Standard test method for abrasion resistance of concrete.
- ASTM International. (2022). ASTM C666/C666M-22: Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing.
- Cano, J., & Méndez, R. (2021). Influencia de la porosidad en el desgaste del concreto para tránsito pesado. *Revista Ingeniería y Territorio*, 12(1), 33–42.
- FHWA (Federal Highway Administration). (2024). Performance-based specifications for concrete pavements. U.S. Department of Transportation.
- García, C., & Martínez, P. (2023). Evaluación de mezclas de concreto en patios industriales bajo estándares de desempeño. *Ingeniería Civil México*, 87(3), 89–104.
- Geology Science. (2020). Andesite rock: Properties and uses. <https://www.geologyscience.com>
- IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto). (2023). Manual para pisos industriales de concreto.
- INEGI. (2021). Estudio geológico de los bancos de agregados en la región centro de Hidalgo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Li, W., & Kasal, B. (2023). X-ray diffraction application in assessing durability of volcanic aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 340, 127733.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127733>
- López, E., & Salinas, A. (2020). Durabilidad térmica del concreto con agregados silíceos. *Revista de Materiales de Construcción*, 22(4), 275–284.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.



- Morales, J., & Rodríguez, V. (2022). Corrosión por cloruros en concretos con agua residual tratada. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 16(2), 65–78.
- NMX-AA-123-SCFI-2006. (2006). Análisis de aguas residuales – Determinación de cloruros y alcalinidad. Secretaría de Economía.
- NMX-C-111-ONNCCE-2014. (2014). Industria de la construcción – Agregados – Métodos de prueba. ONNCCE.
- NMX-C-155-ONNCCE-2014. (2014). Concreto hidráulico – Determinación de resistencia a compresión. ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE-2016. (2016). Cementantes hidráulicos – Requisitos y especificaciones. ONNCCE.
- NOM-001-CNA-2011. (2011). Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores. CONAGUA.
- Rao, M., Chen, W., & Sun, T. (2023). Assessment of long-term durability for road concretes in urban environments. *Journal of Sustainable Construction*, 12(1), 45–61.
- Rodríguez, A., & Morales, H. (2021). Estudio comparativo de agregados andesíticos y riolíticos en la zona centro de México. *Materiales y Construcción Latinoamérica*, 29(3), 56–72.
- Romero, J., & Téllez, M. (2022). Influencia del tipo de agua en la resistencia del concreto estructural. *Revista Mexicana de Ingeniería Civil*, 18(2), 112–128.
- Sánchez, T., & López, B. (2023). Agregados volcánicos: comportamiento mecánico y normatividad. *Boletín Técnico de Construcción*, 15(1), 77–91.
- Science Notes. (2021). Properties and uses of rhyolite. <https://sciencenotes.org/properties-and-uses-of-rhyolite/>
- Silva, R. (2019). Concreto con agregados reactivos: prevención y control. *Revista de Ingeniería de Materiales*, 14(2), 45–58.
- Sun, G., & Tao, L. (2023). The effect of sulfate contamination on performance of concrete mixtures. *Journal of Environmental Engineering*, 149(5), 04023020.
- <https://doi.org/10.1061/JEE.0000384>



- Torres, F., & Velázquez, J. (2020). Evaluación de la micro fisuración en concretos con agua residual. *Revista Técnica CIMAV*, 31(4), 123–137.
- UNE-EN 206:2014. (2014). Hormigón. Especificaciones, desempeño, producción y conformidad. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- Valdés, R., & Quiroz, L. (2022). Diagnóstico normativo para superficies de rodamiento en zonas sísmicas. *Revista de Ingeniería Estructural*, 40(1), 51–68.
- Zhu, J., & Al-Qadi, I. L. (2024). Freeze-thaw cycles and chloride impact on concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2678(3), 237–249.

