

ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

Instituto Eduardo Torroja - **España**
Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**
Antonio Carmona Filho - **Brasil**
Dante Domene – **Argentina**

Manuel Fernández Cánovas – **España**
Alvaro Garcia Meseguer (**Q.E.D**) - **España**
José Calavera Ruiz – **España**
Paulo Helene, **Brasil**

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Carmen Andrade Perdrix, **España**

Presidente

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

César Juárez Alvarado, **México**

Vicepresidente Técnico

Pedro Garcés Terradillos, **España**

Vicepresidente Administrativo

Luis Álvarez Valencia, **Guatemala**

Tesorero

Jose Manuel Mendoza Rangel, **México**

Gestores

Enrique Cervera Aguilar, **México**
Paulo Helene, **Brasil**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

Dr. Pedro Castro Borges (Fundador)
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
(CINVESTAV IPN – Mérida)
Mérida, Yucatán, **México**

Co-Editor en Jefe (2024-2025):

Dr. Álvaro G. Sánchez Bellido
Santa Cruz de la Sierra, **Bolivia**.

Editor Ejecutivo:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel (Fundador)
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Facultad de Ingeniería Civil
Monterrey, Nuevo León, **México**

Editores Asociados:

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Monterrey, Querétaro
Querétaro, **México**

Dra. Edna Possan

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, **Brasil**

Dr. Fernando Branco (Fundador)

Universidad Técnica de Lisboa
Lisboa, **Portugal**

Dr. Filippo Ubertini

Universidad de Perugia,
Perugia, **Italia**

Dr. José Iván Escalante García (Fundador)

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional (Unidad Saltillo)
Saltillo, Coahuila, **México**.

Dr. Manuel Fernández Cánovas (Fundador)

Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, **España**

Dra. Oladis Troconis de Rincón (Fundador)

Centro de Estudios de Corrosión
Universidad de Zulia
Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene (Fundador)

Universidade de São Paulo.
São Paulo, **Brasil**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

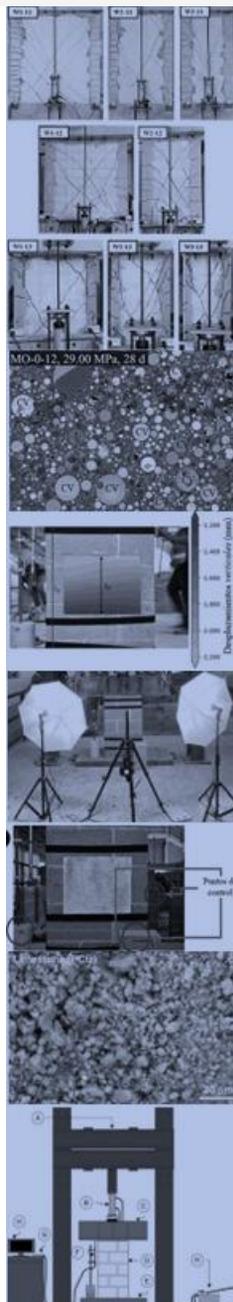
Universidad de Alicante
San Vicente, **España**

Ing. Raúl Husni (Fundador)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos
Aires. Buenos Aires, **Argentina**

Dr. Ravindra Gettu

Instituto Indio de Tecnología de Madrás,
Chennai, **India**



CONTENIDO

Página

REVISIÓN

- Mendoza-Rangel, J. M., Zapata-Padilla, J. R., Anguiano-Pérez, F. D., Velásquez-Hernández, M. I., Mares-Chávez, S., Espino-Robles, E. E., Alvarado-López, J. I., López-Serna, M.A., Mendoza-Jiménez, J. A., Díaz-Aguilera, J. H.:** Economía circular en la industria de la construcción por impresión 3D: una solución de diseño, durabilidad, materiales y procesos para lograr la vivienda digna, asequible y sostenible en Nuevo León y México. 115 – 140

INVESTIGACIÓN BÁSICA

- Varela-Rivera, J. L., Cacep-Rodríguez, J., Fernández-Baqueiro, L. E., Moreno-Herrera, J. A.:** Comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de concreto celular de autoclave con diferentes escalas. 141 – 156

- Betancourt-Castillo, I. E., Burciaga-Díaz, O.:** Cementos activados alcalinamente basados en piedra caliza-ceniza volante: Efecto de la activación con MgO-NaOH, resistencia a la compresión y productos de reacción. 157 – 173

- Chávez-Gómez, J. H., Mesa-Lavista, M., Álvarez Pérez, J., Yépez-Rincón, F., Valencia-Guzmán, E., González-Alcorta, R.:** Un acercamiento a la correlación de imágenes digitales para mediciones de especímenes de mampostería en laboratorio. 174 – 190

- Torres, C., Rosas, J., Pérez, O.:** Sucesión numérico-vectorial para el análisis estructural gráfico de edificios históricos de mampostería con arcos y sistemas simétricos. 112 – 210

CASO DE ESTUDIO

- Sousa, J. L. C., Maia, C. L., Vasconcelos, S. D., Oliveira, F. H. L.:** Impacto técnico y económico de las diferencias en la clasificación funcional de los pavimentos de las carreteras. 211 – 223

RA V14 N2, mayo – agosto, 2024

Mensaje del Editor en Jefe

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

<http://www.revistaalconpat.org>

Es motivo de satisfacción y alegría para el equipo de la Revista ALCONPAT ver publicado el segundo número de nuestro catorceavo año.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de producción citable (investigaciones básicas o aplicadas, y revisiones), investigación documental y casos de estudio, relacionados con los temas de nuestra asociación, o sea control de calidad, patología y recuperación de las construcciones.

Esta edición V14 N2, inicia con un trabajo procedente de **México**, donde José Manuel Mendoza Rangel y colegas hacen una revisión de la impresión 3D de materiales cementantes (I3DMC) evaluando su idoneidad para construir Vivienda Digna, Asequible y Sostenible (ViDAS) en México, considerando los requerimientos mecánicos, por durabilidad y sostenibilidad. La crisis climática y económica son retos actuales para una Industria de la Construcción Circular, pero la I3DMC reduce hasta 88%, 50%, 70% y 90% las emisiones de CO₂, materiales y desechos, mano de obra, tiempos y costos, respectivamente, alcanzando la resistencia y durabilidad de la construcción convencional. Asimismo, existen empresas de I3DMC en países desarrollados, pero importar esta tecnología a países en desarrollo es poco asequible, por tanto, la investigación de tecnologías de I3DMC está en curso en Nuevo León, México, permitiendo la construcción de ViDAS por \$1,700-\$4,500/m².

En el segundo trabajo, procedente de **México**, Irma Elizabeth Betancourt- Castillo y Oswaldo Burciaga-Díaz investigan los efectos de la activación alcalina con MgO-NaOH sobre la resistencia a la compresión y los productos de reacción de los cementos activados alcalinamente con polvo de piedra caliza (PCLz) y ceniza volante de Clase C (CV). Los resultados mostraron que las sustituciones de 25%<PCLz<75% permitieron 25-76 MPa a los 360 días de curado, obteniendo la mayor resistencia con 25%PCLz-75%CV y 50%PCLz-50%CV con 10 y 12% NaOH-MgO respectivamente. Los resultados sugieren que el PCLz participa en las reacciones de hidratación como agente de relleno y nucleante mientras que el CV es el principal contribuyente al avance de las reacciones químicas. La difracción de rayos X (XRD), el análisis térmico (TA) y microscopía electrónica de barrido (SEM) indicaron la formación de productos del tipo M-S-H y C, N-A-S-H, además de fases carbonatadas como hidrotalcita,

gaylussita y pirssonita. No se observaron trazas de MgO sin reaccionar, lo que indica su completa incorporación en los productos de reacción.

El tercer trabajo de este número es de **México**, donde Jorge Varela-Rivera y colegas presentan un estudio sobre el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de concreto celular de autoclave (CCA). Se ensayaron cinco muros confinados de CCA a escala reducida sujetos a cargas laterales. Las variables estudiadas fueron el factor de escala geométrica y la relación de aspecto de los muros. Se consideraron escalas 1:2 y 1:3. Con base en el comportamiento de los muros a escala reducida y natural se determinaron factores de escala experimentales. Los factores de escala geométrica existentes se compararon con los correspondientes experimentales. Se concluye que los factores de escala geométrica pueden utilizarse para predecir la resistencia a cortante y resistencia máxima a cortante de los muros con escalas 1:2 y 1:3. Los factores de escala geométrica sólo pueden utilizarse para predecir la rigidez y la distorsión asociados con la resistencia máxima a cortante.

En el cuarto artículo Jorge Humberto Chávez-Gómez y colegas de **México**, emplean una técnica de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) para analizar los desplazamientos en muretes de mampostería sometidos a compresión axial, sin usar un programa comercial. Se desarrolló un algoritmo empleando el método numérico de Newton Raphson para este propósito. Los resultados obtenidos fueron comparados con las mediciones del transductor diferencial lineal variable (LVDT), validando la eficacia del algoritmo y comparándolos con estudios previos, con errores aceptables. Este trabajo forma parte de un proyecto en curso en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, estableciendo las bases para futuras investigaciones sobre la implementación de la técnica para la obtención de patologías y estados deformacionales en estructuras de mampostería. Como principal conclusión se llegó a la determinación que el DIC podrá ser empleado como un método de medición fiable de desplazamientos y deformaciones en ensayos de laboratorio

El quinto artículo, de Carlos Alberto Torres Montes de Oca, José Eduardo Rosas Valencia y Oswaldo Aldair Pérez Jarquín, proviene de **México**. Ellos investigan como es denotar la aplicación de la sucesión numérico-vectorial en el análisis estructural de edificios históricos de mampostería, con arcos y sistemas simétricos, incluyendo procesos matemáticos en el análisis gráfico antiguo, enfatizando la importancia de las cargas en la estabilidad estructural. Los análisis se basan en tres etapas fundamentales: reconocimiento del sistema constructivo del objeto patrimonial, discretización geométrica del sistema y análisis vectorial bajo diferentes consideraciones físicas. Así, las líneas de empuje se ven afectadas por las cargas, las condiciones de contorno y la historia del comportamiento estructural

del objeto patrimonial. Las herramientas numéricas y computacionales ofrecen procesos de análisis gráfico más rápidos y precisos. Los autores concluyen que estos métodos proporcionan resultados muy particulares y algunos de ellos son similares, por lo que se recomienda utilizar los métodos como complemento y no catalogar uno sobre el otro.

El artículo que cierra la edición es de José Levi Chaves de Sousa y Carlos Ochoa de **Brasil**, quienes analizan si existen diferencias en la clasificación del estado superficial de un pavimento de carretera flexible utilizando el Levantamiento Visual Continuo (LVC) y el Índice de Gravedad Global (IGG). Se seleccionó un segmento de carretera revestido con Concreto Asfáltico, con el objetivo de evaluar los costos asociados a cada clasificación. Debido a la limitación de un mayor tiempo para obtener el IGG, el análisis se limitó a ese segmento. Los resultados revelaron divergencias en las clasificaciones y costos de los métodos en los segmentos iniciales de la carretera. Se concluyó que el LVC ofreció mejores resultados que el IGG, atribuible a la subjetividad inherente de la evaluación humana. Además, se observó que los dos métodos se complementan en el análisis funcional de pavimentos de carreteras.

Tenemos la seguridad de que los artículos de este número constituirán una referencia importante para aquellos lectores involucrados con cuestiones de evaluaciones y caracterizaciones de materiales, elementos y estructuras. Agradecemos a los autores participantes en este número por su voluntad y esfuerzo para presentar artículos de calidad y cumplir con los tiempos establecidos.

Al cierre de este V14 N2 2024, 14 años después de haber iniciado operaciones, nuestro desempeño como Revista Alconpat se vio finalmente recompensado con nuestra inclusión en uno de los dos mejores índices para revistas como lo es Scopus de Elsevier. Ya contamos con un factor de impacto modesto (0.3), que estoy seguro irá aumentando gracias a ustedes nuestros lectores y a la calidad de nuestros artículos. Nuestra pertenencia a Scopus tiene su histórico inicio el 29 de diciembre de 2022, fecha en la que recibimos la aprobación de Elsevier. Esperamos durante 2024 aplicar a Journal Citation Reports, que es el índice de mayor cobertura y calidad internacional. Estos son motivos de celebración para nuestra comunidad que ha hecho una inversión científica en nuestra revista esperando momentos como éste. Enhorabuena a todos.

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe

Economía circular en la industria de la construcción por impresión 3D: una solución de diseño, durabilidad, materiales y procesos para lograr la vivienda digna, asequible y sostenible en Nuevo León y México

J. M. Mendoza-Rangel , J. R. Zapata-Padilla , F. D. Anguiano-Pérez ,
M. I. Velásquez-Hernández , S. Mares-Chávez , E. E. Espino-Robles , J. I. Alvarado-López
, M.A. López-Serna , J. A. Mendoza-Jiménez , J. H. Díaz-Aguilera* 

*Autor de Contacto: jhda_ic24@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.735>

Recibido: 22/04/24 | Correcciones recibidas: 10/05/2024 | Aceptado: 14/05/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

Esta revisión de la impresión 3D de materiales cementantes (I3DMC) evalúa su idoneidad para construir Vivienda Digna, Asequible y Sostenible (ViDAS) en México, considerando los requerimientos mecánicos, por durabilidad y sostenibilidad. La crisis climática y económica son retos actuales para una Industria de la Construcción Circular, pero la I3DMC reduce hasta 88%, 50%, 70% y 90% las emisiones de CO₂, materiales y desechos, mano de obra, tiempos y costos, respectivamente, alcanzando la resistencia y durabilidad de la construcción convencional. Asimismo, existen empresas de I3DMC en países desarrollados, pero importar esta tecnología a países en desarrollo es poco asequible, por tanto, la investigación de tecnologías de I3DMC está en curso en Nuevo León, México, permitiendo la construcción de ViDAS por \$1,700-\$4,500/m².

Palabras clave: economía circular; impresión 3d de materiales cementantes; vivienda digna, asequible y sostenible; diseño eficiente; propiedades mecánicas y de durabilidad.

Citar como: Mendoza-Rangel, J. M., Zapata-Padilla, J. R., Anguiano-Pérez, F. D., Velásquez-Hernández, M. I., Mares-Chávez, S., Espino-Robles, E. E., Alvarado-López, J. I., López-Serna, M.A., Mendoza-Jiménez, J. A., Díaz-Aguilera, J. H. (2024), “Economía circular y la industria de la construcción por impresión 3D: una solución de diseño, durabilidad, materiales y procesos para lograr la vivienda digna, asequible y sostenible en México”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 115 – 140, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.735>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Nuevo León, México.

Contribución de cada autor

J.M. Mendoza-Rangel: conceptualización, recursos, supervisión y administración del proyecto. J.H. Díaz-Aguilera: idea original, recolección de datos (60%), escritura del trabajo y discusión del trabajo (60%). J.R. Zapata-Padilla, S. Mares-Chávez, F.D. Anguiano-Pérez, M.I. Velásquez-Hernández, E.E. Espino-Robles, J.I. Alvarado-López y J.A. Mendoza-Jiménez contribuyeron con la revisión, edición, recolección de datos y discusión del trabajo en porcentajes iguales.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

Circular economy in the 3D printing construction industry: a design, durability, materials, and processes solution to achieve decent, affordable, and sustainable housing in Nuevo León and Mexico

ABSTRACT

This review of 3D-printing of cementitious materials (3DPCM) evaluates its suitability to build Decent, Affordable and Sustainable Housing (DASH) in Mexico, considering mechanical requirements, durability, and sustainability. The climate and economic crises are current challenges for a Circular Construction Industry, but the 3DPCM reduces CO₂ emissions, materials and waste, labor, times and costs by up to 88%, 50%, 70% and 90%, respectively, achieving the strength and durability of conventional construction. Likewise, there are 3DPCM companies in developed countries, but importing this technology to developing countries is not affordable, therefore, research into 3DPCM technologies is ongoing in Nuevo León, Mexico, allowing the construction of DASH for \$1,700-\$4,500/m².

Keywords: circular economy; 3d-printing of cementitious materials; decent, affordable and sustainable housing; efficient design; mechanical and durability properties.

Economía circular na indústria de construção por impressão 3D: uma solução de design, durabilidade, materiais e processos para alcançar habitação digno, acessível e sustentável em Nuevo León e no México

RESUMO

Esta revisão da impressão 3D de materiais cimentícios (I3DMC) avalia sua adequação para construir Habitações Decentes, Acessíveis e Sustentáveis (ViDAS) no México, considerando requisitos mecânicos, durabilidade e sustentabilidade. A crise climática e econômica são desafios atuais para uma Indústria de Construção Circular, mas o I3DMC reduz as emissões de CO₂, materiais e resíduos, mão-de-obra, tempos e custos em até 88%, 50%, 70% e 90%, respectivamente, alcançando a resistência e durabilidade da construção convencional. Da mesma forma, existem empresas I3DMC em países desenvolvidos, mas importar esta tecnologia para países em desenvolvimento não é acessível, portanto, a investigação sobre tecnologias I3DMC está em curso em Nuevo León, México, permitindo a construção de ViDAS por 1.700-4.500 dólares/m².

Palavras-chave: economia circular; impressão 3d de materiais cimentícios; habitação digna, acessível e sustentável; projeto eficiente; propriedades mecânicas e de durabilidade.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La Economía Circular (EC) es un paradigma a nivel mundial que promueve la participación de todos los sectores de la sociedad (público, privado, académico y sociedad civil) para alcanzar una mejor calidad de vida con base en la sostenibilidad de los países. Las industrias están adoptando un modelo de producción y consumo basado en compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar los recursos existentes, con el fin de generar un valor añadido a los productos y materiales, incidiendo tanto en la manufactura y comercialización, como en su reintegración dentro de nuevos ciclos de producción y consumo (Parlamento Europeo, 2023). De esta forma, el ciclo de vida de los materiales se extiende al incorporarse una y otra vez en la manufactura de nuevos productos como materias primas circulares, lo cual reduce los residuos de las industrias al mínimo.

Si un producto llega al final de su vida útil, sus materiales se mantienen dentro de las cadenas de valor y suministro siempre que sea posible su reciclaje, reparación, renovación, etc., incluso compartiendo las materias primas circulares entre industrias de diferentes tipos, lo cual puede requerir del acondicionamiento de los materiales, su transformación, control de calidad, etc. Por lo tanto, la circularidad forma parte del diseño eficiente de los materiales para lograr la optimización de los procesos, del control de calidad y de la durabilidad de los elementos de construcción (Mendoza-Rangel y Díaz-Aguilera, 2023; Yang y col., 2022). Este modelo circular contrasta con el modelo económico lineal convencional, basado principalmente en “usar y desechar” o de obsolescencia programada, el cual requiere de grandes cantidades de materiales y energía, baratos y de fácil acceso, que asocian el consumo no-sostenible de los recursos naturales (Parlamento Europeo, 2023). Así, diversos autores a nivel mundial (Adesina (2020), Van Breugel (2017) y Villagrán-Zaccardi y col. (2022)), han aplicado los principios de la EC en la Industria de la Construcción (IC) para desarrollar materiales, tecnologías y procesos más sostenibles con respecto de la construcción convencional. Los esfuerzos de la IC en EC pueden clasificarse en siete áreas principales (Mendoza-Rangel y Díaz-Aguilera, 2023): (i) Digitalización, (ii) Innovaciones tecnológicas, (iii) Diseño eficiente, (iv) Materiales reciclados, (v) Extensión de vida útil, (vi) Recursos locales, y (vii) Procesos eficientes. Los alcances y beneficios de las siete áreas tienden a superponerse en función del modelo de EC a desarrollar para la IC, pudiendo incluir la fabricación de materiales de construcción, aditivos químicos, agregados reciclados, procesos de construcción, diseño de mezclas, optimización de propiedades (p.ej., mecánicas, durabilidad, térmicas, etc.), proyectos de edificación e infraestructura, o cualquier otro tipo de aplicación.

Con respecto a la digitalización de la IC, esta se logra introduciendo elementos tecnológicos para alcanzar la optimización de los materiales y sus propiedades, procesos de fabricación y construcción, etc. (NoParast y col., 2021), favoreciendo la sostenibilidad de la industria y la reducción de la huella de carbono. Algunos ejemplos son: (i) la reducción en la generación de desperdicios mediante el control preciso de la dosificación y mezclado de los materiales, utilizando sensores de monitoreo en tiempo real, lo cual también reduce la variabilidad de las propiedades resultantes (Adesina, 2021; NoParast y col., 2021); (ii) el control de la composición química durante la producción de materiales por medio del modelamiento estadístico avanzado, utilizando softwares (Perez-Cortes y Escalante-García, 2020); (iii) el control de calidad del diseño, materiales y procesos por medio de Inteligencia Artificial o modelado BIM (Adesina, 2021; Hossain y col., 2020; Marsh y col., 2022); (iv) la disminución de los tiempos de construcción o la fabricación de elementos prefabricados mediante el uso de robots y maquinaria automatizada, que incluso pueden operar 24 horas al día y siete días a la semana con el mismo rendimiento, como la impresión 3D (Fořt, y Černý, 2020; Robayo-Salazar y col, 2023); (v) el desarrollo de materiales y elementos de construcción circulares considerando un diseño eficiente que permita maximizar tanto la durabilidad durante la primera vida de servicio, como la circularidad para reparar el material,

reincorporarlo en nuevos ciclos de vida como materia prima en el mismo tipo de proceso, en otra nueva aplicación en la IC o incluso en otra industria; etc. (Velvizhi y col., 2020).

Entre las opciones relacionadas con la digitalización de la IC, la impresión 3D de mezclas cementantes (I3DMC) es una de las tecnologías con más ventajas en términos de desempeño mecánico, durabilidad y sostenibilidad, ya que permite crear elementos de construcción tridimensionales, arquitectónicos y estructurales, capa por capa a partir de un diseño digital, de manera precisa, eficiente, eficaz y por un costo significativamente menor en comparación con la construcción convencional (ArchDaily, 2018; Colorado y col., 2020; Şahin y col., 2022; WINSUN, 2014). La I3DMC ha atrapado la atención de CEMEX y HOLCIM, afirmando su interés por desarrollar estas tecnologías y aprovecharlas en el mercado mexicano (CEMEX, 2022; HOLCIM México, 2024). No obstante, esto se realiza en colaboración con la empresa COBOD de impresoras 3D de concreto, por lo que las innovaciones referidas son sólo para las tintas cementantes. La I3DMC requiere del desarrollo tecnológico de las tintas cementantes y las impresoras 3D con características específicas: (i) las tintas asocian propiedades que facilitan su impresión en 3D (p.ej., capacidad de extrusión, edificación y bombeo, así como el tiempo disponible para realizar la extrusión, etc.) y pueden elaborarse con base en distintos materiales además del cemento Portland (CP), como los cementos activados alcalinamente y los geopolímeros, tierra arcillosa, materiales de desecho, etc. (Be more 3D, 2024; Colorado y col., 2020). Posteriormente, la tinta cementante impresa se endurece y debe presentar propiedades mecánicas, de durabilidad y sostenibilidad que sean competitivas con respecto del concreto convencional (Colorado y col., 2020; Motalebi y col., 2023; Nohedi y col. 2022; Robayo-Salazar y col, 2023; Şahin y col., 2022). (ii) La impresora 3D requiere una estructura de soporte y sistemas de extrusión, bombeo, movimiento en tres direcciones (X, Y y Z), etc. Además, aunado a la contribución a la sostenibilidad del procedimiento constructivo, la impresora 3D debe presentar componentes que permitan un alto desempeño y durabilidad, minimizando los mantenimientos bajo las condiciones adecuadas (Jo y col., 2020; Şahin y col., 2022).

Por otra parte, la IC en México busca alternativas sostenibles para lograr una EC, como las soluciones a los problemas de vivienda, calidad y espacio, incluyendo la asequibilidad, calidad y resistencia de los materiales, pisos de tierra, vivienda provisional, durabilidad y mantenimiento, entre otros. Esto es debido a las declaraciones de ONU-Hábitat que estimó desde 2019 que el 38.4% de las viviendas en México son inadecuadas (ONU-Hábitat, 2019). Por lo tanto, la I3DMC es una propuesta de base tecnológica que podría contribuir a la construcción de vivienda digna, asequible y sostenible (ViDAS) conforme a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2015). No obstante, la investigación y desarrollo tecnológico en esta área es limitada en México (Perales-Santilla y col., 2024; Ruiz-Jaramillo, 2021), por lo cual se requiere precisar el estado del arte a nivel internacional de la I3DMC con el fin de analizar su idoneidad según el contexto nacional y brindar las directrices para brindar soluciones innovadoras que mitiguen el cambio climático mientras transforman la IC para lograr la construcción de ViDAS. Esto puede incluir el desarrollo de tecnología mexicana en torno a:

(i) tintas cementantes convencionales con base en concretos y morteros que optimicen el uso del CP; (ii) tintas cementantes de bajo carbono que sustituyen parcialmente el uso de CP por materias primas alternativas (piedra caliza, arcillas calcinadas, subproductos de la industria energética, agroindustrial, etc.); (iii) tintas de cementantes alternativos que usen 0% clinker como los cementos activados alcalinamente, geopolímeros, etc.; (iv) sistemas de construcción modular; (v) impresoras 3D de mezclas cementantes; (vi) diseño eficiente y sostenible de viviendas con base en la optimización estructural, de la durabilidad y extensión de vida útil, energética (p.ej., el uso de energías renovables como paneles solares, arquitectura bioclimática, materiales avanzados como termoaislantes, ventanas inteligentes, etc.), de recursos hídricos (filtros para reutilización de aguas grises, etc.) y otros. Asimismo, se debe resaltar la importancia de la vinculación entre los sectores

de la sociedad para promover una mayor transferencia tecnológica desde el sector científico al industrial, que transforme la investigación en PIB a largo plazo. Las alianzas estratégicas entre el sector industrial, público y científico, también permitirán que la IC ejerza un rol como agente de transformación de EC para otras empresas y la sociedad, favoreciendo la adaptación eficiente ante los retos de la sostenibilidad.

Por lo tanto, se presenta un análisis del estado del arte para la I3DMC en términos de las propiedades mecánicas, de durabilidad, sostenibilidad y costos, así como del panorama de la vivienda en México, utilizando como base las condicionantes internacionales con el fin de elucidar los requerimientos actuales para alcanzar la ViDAS. En este contexto, debido a su distinción como punta de lanza en el desarrollo de tecnológico del país, en este trabajo se presenta un análisis del Estado de Nuevo León (NL) para determinar su idoneidad para emprender el desarrollo de ViDAS mediante I3DMC en función de sus condiciones y potencial como lugar adecuado. Se espera que esta investigación contribuya a la difusión, discusión e impulso de esta tendencia internacional, con el objetivo de catalizar el posicionamiento de México como un referente para América Latina en el desarrollo de tecnologías de I3DMC con base en la EC para la generación de ViDAS, mejorando la competitividad, calidad de vida y el desarrollo sostenible de Nuevo León, México y la región. Consecuentemente, en las siguientes secciones se analizan (i) las problemáticas de la vivienda en México y el estado de NL, (ii) las condiciones que definen la vivienda digna conforme a los estándares nacionales e internacionales, comparando el estado actual de la vivienda en México, (iii) el estado del arte de la I3DMC en términos de desempeño mecánico, por durabilidad y sostenibilidad, con el fin de discutir su potencial de aplicación en México.

2. LA PROBLEMÁTICA DE LA VIVIENDA EN MÉXICO

Tanto a nivel global como en México, existe una creciente problemática de vivienda que abarca: (i) déficit de viviendas, (ii) vivienda informal, (iii) falta de acceso a financiamiento o poder adquisitivo. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México presentó un déficit de 8.2 millones de viviendas en 2021 y 60.6 millones de personas con ingreso por debajo de la línea de bienestar (PIDLB), imposibilitando su acceso a una vivienda (INEGI, 2021). Por su parte, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) reportó que en el país existen 14 millones de familias sin medios para comprar o construir una vivienda, situación que ha empeorado en las últimas tres décadas (Instituto de la Vivienda, 2021). Asimismo, ONU-Hábitat estimó en 2019 que el 38.4% de la población mexicana habita una vivienda inadecuada en términos de materiales de construcción, falta de servicios públicos (p.ej., el acceso a la red de agua potable), así como hacinamiento, lo cual es referido como carencias por calidad y espacios de vivienda (CCEV) (Tecnológico de Monterrey, 2021; ONU-Hábitat, 2019). Estas problemáticas se atribuyen al incremento constante de la población, que incluye migrantes de países centroamericanos, así como al aumento de los precios de las viviendas en conjunto con el decaimiento del poder adquisitivo (INEGI, 2023).

Al respecto, la Encuesta Nacional de Vivienda del 2020 del INEGI (INEGI, 2021) mostró que el mayor problema estructural de las viviendas son las filtraciones de agua (44.2%), grietas y cuarteaduras (40.8%), lo cual propicia un mayor consumo de energía por calefacción y refrigeración, así como problemas de salud. Además, la falta de mantenimiento induce reparaciones mayores en el futuro, causando un impacto ambiental significativo por el uso de materiales y energía. INEGI (2021) destacó que el 58.5% del total de las viviendas en México reportó la necesidad de algún procedimiento constructivo para mejoramiento o ampliación de espacios; no obstante, la mayoría de los programas nacionales de subsidio incentivan la construcción de nuevas viviendas (p.ej., el 66% de los apoyos entregados por CONEVAL fueron para la adquisición de vivienda nueva entre 2013-2018) (Tecnológico de Monterrey, 2021). Cabe mencionar que el

Gobierno de México reportó que los problemas de vivienda se concentran al sur del país, por lo que se incrementaron los subsidios en estas regiones en el plan de vivienda 2021-2024 (Gobierno de México, 2023b).

Respecto del impacto ambiental, el Programa del Medio Ambiente de la ONU (PNUMA, 2020) reportó que la construcción comercial y residencial representa el 39% de las emisiones de CO₂ emitidas a la atmosfera, el análisis incluyó todas las actividades industriales y humanas que consumen energía a nivel global. Esto es debido a la construcción de nuevas edificaciones y la operación de las existentes (por calefacción, iluminación, etc.). Adicionalmente, la IC consume aproximadamente un 40% de los materiales pétreos (grava, arena, etc.), 25% de las maderas, 16% del agua, 40% de la energía primaria y genera el 40% de los desechos de un país (Tabla 1) (Interempresas, 2020; PNUMA, 2020; Rosas-Díaz y col., 2022).

Dentro de una edificación, se ha estimado que la construcción convencional supone entre el 40%-60% de la huella ambiental en función del tipo de estructura, pero en general, estos procesos de construcción involucran el uso de combustibles fósiles y una alta demanda energética, las cuales son las principales fuentes de CO₂, razón por la que todo el sector tiene un fuerte impacto ambiental. Asimismo, se estima que la construcción convencional de vivienda residencial emite 441-561 kg-CO₂/m², aunque esto varía según las prácticas de construcción y los materiales utilizados (Interempresas, 2020). La Comisión Nacional de Vivienda reportó que el 50% de las emisiones contaminantes pertenecen a la IC, mientras que SEMARNAT indicó que en 2021 se generaron 6.5 millones de toneladas de desechos en México, siendo el 11% provenientes de la IC. De lo anterior se concluyó que se requiere mayor impulso a la construcción sostenible de vivienda hasta reducir un 30% el consumo de recursos naturales, 35% las emisiones de CO₂, 30%-50% el consumo de energía y 50%-90% los costos asociados a los desechos, esto ante la estimación de 7'000,000 de viviendas que generarán 25'000,000 de toneladas de gases de efecto invernadero para 2050 (Tabla 1) (Senado de la República, 2021).

Tabla 1. Análisis comparativo para la estimación del impacto ambiental de la industria de la construcción y las metas para su reducción en 2050 para México (Interempresas, 2020; PNUMA, 2020; Rosas-Díaz y col., 2022; Senado de la República, 2021).

Estimación del impacto ambiental actual en México		Metas para la reducción del impacto ambiental en México para 2050	
Impacto ambiental	Porcentaje (%)	Impacto ambiental	Porcentaje (%)
Consumo* de materiales pétreos (grava, arena, etc.)	40	Reducción del consumo de recursos naturales	30
Consumo* de maderas	25	Reducción de las emisiones de CO ₂	35
Consumo* de agua	16	Reducción del consumo de energía	30-50
Consumo* de energía primaria	40	Reducción de los costos asociados con los desechos	50-90
Generación* de desechos industriales	40		

*Consumo o generación en relación con el total disponible en el país.

Por otra parte, desde 2012 (Lozano y col., 2022) se tiene reporte de 20'000,000 de mexicanos que habitan en vivienda de interés social con características medias-bajas de sostenibilidad, ya que cumplen apenas con los estándares mínimos establecidos en la normatividad nacional, con un alto gasto en vivienda y transporte (mayor al 40% del ingreso), una pobre integración social, e impactos

ambientales por manejo de aguas residuales y huella de carbono. Aunado a esto, las desarrolladoras de vivienda actualmente optan por desarrollar modelos medio, residencial y plus, disminuyendo el parque de viviendas de interés social más del 50% entre 2017 y 2022, sin que se espere la mitigación de esta problemática en el corto plazo, lo cual incrementa el costo de la vivienda comercialmente disponible (El Economista, 2022a).

En cuanto a las soluciones a estas problemáticas, la Arq. Tatiana Bilbao presentó en Bienal de Arquitectura de Chicago en 2015, proyectos de vivienda familiar flexible de 43 m² que se pueden construir por \$8,000-\$14,000 dólares, algunos detalles de la construcción son: (i) el núcleo de esta vivienda se construye con block de concreto y módulos circundantes de madera más ligeros y baratos, permitiendo futuras expansiones; (ii) en su primera fase, es diseñada para tener 2 dormitorios, 1 baño y 1 sala/comedor con 5 m de altura, con la capacidad de expandirse a 5 dormitorios en su última fase; (iii) incluye ecotecnologías para maximizar la eficiencia energética (ArchDaily, 2015; Instituto de la Vivienda, 2021). No obstante, la estrategia apuesta por materiales baratos como la madera que requieren un mantenimiento significativo, siendo menos durables que el block, el ladrillo o el concreto.

Por otro lado, existen organismos federales que ofrecen apoyos económicos (Instituto de la Vivienda, 2021): CONAVI, Fondo Nacional de Habitaciones Populares (FONHAPO, subsidia a PIDLB no-derechohabientes, p.ej.: con \$40,000-53,000 para construir o adquirir vivienda, \$15,000-20,000 para ampliarla o \$10,000-15,000 para mejorarla), Fondo de Vivienda del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (FOVISSSTE, subsidia a trabajadores del ISSSTE), la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF, otorga créditos hipotecarios a no-derechohabientes a través de sociedades financieras) y programas de mejoramiento urbano (buscan mejorar las condiciones de vida de comunidades y colonias de escasos recursos y altas tasas de marginación y violencia, rehabilitando espacios públicos y viviendas que tienen posesión, pero no certeza jurídica del suelo que ocupan, regularizando la vivienda para que soliciten otros apoyos y servicios públicos). Cabe señalar que, a pesar de los esfuerzos antes mencionados, la asequibilidad de la vivienda en el país disminuyó 6.8% según el reporte del Estado Actual de la Vivienda en México de la SHF, por lo que un balance de las estrategias y resultados indicó que los programas de subsidio han sido una respuesta favorable, pero no garantizan el derecho a la vivienda adecuada al sujetarse a un crédito hipotecario (Tecnológico de Monterrey, 2021).

Todo lo anterior enmarca el panorama general de los problemas de vivienda en México y muestra la necesidad de promover nuevas estrategias más sostenibles que proporcionen a la población una ViDAS ante el contexto actual, especialmente para las PIDLB, aunque sin perder de vista que el sector de la vivienda es una de las principales actividades económicas del país, aportando más de un billón de pesos sólo en 2021 (5.7% del PIB). Además, la construcción de vivienda generó 2'366,767 de puestos de trabajo (5.8% del total nacional) (INEGI, 2023). Por lo tanto, construir ViDAS debe sostener el papel preponderante de la IC en el desarrollo económico del país.

2.1. La vivienda en Nuevo León

En el estado de NL, INEGI indicó que el total de las viviendas habitadas en 2020 fue de 2'037,261 (4.7% del total nacional), de las cuales 286,185 (14.05% del total) estuvieron deshabitadas y 95,820 (0.05% del total) fueron de uso temporal (INEGI, 2020; Instituto de la Vivienda, 2021). En términos de rezago habitacional, 71,958 viviendas presentaron condiciones de hacinamiento y otros aspectos que afectan la calidad de vida de los ocupantes, tales como el deterioro de los materiales, la construcción con materiales precarios (cartón, palma, paja, etc.), piso de tierra, falta de sanitarios o electricidad, etc. De hecho, se registraron: 398,158 viviendas con un dormitorio (19.54% del total, mayormente en Monterrey, Guadalupe y Apodaca), 13,939 con piso de tierra (concentradas en Monterrey, Juárez y General Escobedo) y 41,011 en hacinamiento (principalmente en García,

General Escobedo y Juárez) (Instituto de la Vivienda, 2021). Todo lo anterior se resumen en la Tabla 2.

En términos de población, en 2022 se registraron 5'748,442 de habitantes, de los cuales el 92% habitaron en los 18 municipios de la zona metropolitana, siendo esto un factor crucial para el aumento de demanda de viviendas. NL se ubicó en el 7° lugar nacional por el número de habitantes, pero con respecto de la composición de la población y los hogares, ocupó el 1° lugar en la recepción de migrantes mexicanos y extranjeros (113,541 personas registradas en 2020), que buscaron mejores oportunidades laborales. Además, el 50.4% de la población es económicamente activa con un salario promedio mensual de \$8,980 (Gobierno de México, 2023a; Instituto de la Vivienda, 2021), asociando un número importante de PIDLB sin un ingreso suficiente para disponer de la canasta básica alimentaria y gastos adecuados de salud, vestido, transporte, educación o vivienda; así mismo existen personas en condiciones similares que requieren mejorar su vivienda por CCEV como pisos de tierra, muros y techos de mala calidad, hacinamiento, etc. El informe de pobreza de CONEVAL en 2020 mostró que 1'123,100 de habitantes (21.1% de la población) son PIDLB en NL, los cuales no tienen capacidad para acceder a una vivienda digna bajo las condiciones actuales del mercado. Esto se traduce en 330,323 viviendas considerando el promedio de 3.4 personas/hogar de acuerdo con el INEGI (2020). Además, existen 162,700 personas (3.1% de la población) o 47,853 viviendas con CCEV, que requieren apoyo urgente para mantenimiento o ampliación; esto también se relaciona con sus ingresos limitados, llevando a los habitantes a anteponer la satisfacción de otras necesidades básicas de supervivencia (INEGI, 2020).

Tabla 2. Estado de la vivienda en Nuevo León según INEGI (2020).

Condición de la vivienda	Cantidad de viviendas
Viviendas habitadas	2'037,261
Viviendas deshabitadas	286,185
Viviendas de uso temporal	95,820
Viviendas con problemas de calidad y espacio como deterioro en los materiales, uso de materiales precarios, pisos de tierra, falta de sanitarios y electricidad, hacinamiento, etc.	71,958
Vivienda con un solo dormitorio	398,158
Viviendas con hacinamiento	41,011

Respecto del impacto ambiental, INEGI posicionó a NL como uno de los seis estados que generan la mitad de los desechos del país (4.4% del total) (Milenio, 2018), mientras que la Secretaría de Desarrollo Sustentable (2020) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) informó que las actividades de construcción contribuyen con el 10.77% de las emisiones de PM10 en el estado. Asimismo, la Facultad de Arquitectura de la UANL reportó que la construcción de vivienda sostenible puede influir positivamente en los costos de construcción en serie, mostrando un ahorro de consumo energético y de agua del 36% y 30% (Paz-Pérez, 2016). Por otro lado, resaltó que la cantidad de viviendas de NL sin habitar y sin mantenimiento agravan el impacto ambiental, ya que: (i) implican la explotación de recursos que actualmente no cubren ninguna necesidad, (ii) la degradación prematura y/o continua de las viviendas disminuye su vida útil, (iii) lo que lleva a la necesidad de construir nuevas viviendas, (iv) así como a la demolición y generación de desechos en el futuro, (v) gastos innecesarios por mantenimientos correctivos que superan los preventivos, etc. Además, llama la atención que la suma de las viviendas deshabitadas y en uso temporal se equiparó a las requeridas para las PIDLB y con CCEV registradas en NL, lo cual sugiere la necesidad de buscar nuevas soluciones para (i) lograr la asequibilidad de una vivienda digna para

el sector de la población más vulnerable y (ii) mejorar las condiciones para la población menos vulnerable.

En cuanto a las estrategias estatales y los resultados obtenidos tenemos que: la Cámara Nacional de Desarrollo y Promoción de Vivienda (CANADEVI) indicó en 2022 que el 35% de las familias no tiene acceso a una vivienda digna, advirtiendo además un rezago del 35% en la colocación de viviendas, lo cual se asoció con factores como la guerra en Ucrania, la variación de las tasas de interés, el alza en los insumos para la construcción y el impuesto verde (El Economista, 2022b). Asimismo, CANADEVI reportó que la meta en el 2022 fue colocar 40,000-42,000 viviendas, mientras que la demanda de créditos fue de 62,000, esto en contraste con la colocación promedio anual de 65,000 viviendas que se presentaba en los años previos a la pandemia por COVID-19. Por lo tanto, hubo un déficit de 16,000 viviendas, destacando que se requerirán cerca de 20,000 el próximo año, pero sólo se garantizaron 4,000. Adicionalmente, la llegada de la empresa Tesla al municipio de Santa Catarina demandará 13,000 viviendas para 35,000 empleados y sus familias, según la dirección del Instituto de Vivienda de NL (IVNL). Por su parte, el INFONAVIT en NL comunicó en abril de 2023 acomodará 46,000 créditos de vivienda (2,000 más que en 2022), contando con el alta de 30,000 en el Registro Único de Vivienda en ese momento (El Economista, 2023).

Se reportó que las personas adquieren los créditos, pero sus ingresos no les permiten pagarlos y, aunque en el sector bancario existen recursos disponibles, hay poca solicitud de préstamos debido a que el producto es muy caro. De hecho, NL es el segundo estado con mayor demanda de vivienda, solo después de Ciudad de México (CDMX), presentando un costo promedio de vivienda de \$4'017,532, el cual está por encima del resto del país con excepción de CDMX con \$8'057,000 (Instituto de la Vivienda, 2021; Tecnológico de Monterrey, 2021). Según CANADEVI, el 33% de la vivienda demandada supera los \$300,000 y el 35% alcanza los \$800,000. De hecho, el alza en los precios de la vivienda también golpea gravemente a los jóvenes que inician su vida laboral, ya que no pueden acceder a una vivienda digna, teniendo que rentar sin la posibilidad de adquirir un patrimonio hasta una edad madura (en el mejor de los casos), con una deuda de por vida o sólo consiguiendo una vivienda en la periferia de la zona urbana que implica traslados largos y costosos, con un enorme impacto en su calidad de vida que agravan más la brecha económica en México.

Así, INFONAVIT promovió tasas de interés entre 3.5%-5% para 131,000 trabajadores de ingresos bajos (El Economista, 2023), con un límite de préstamo de \$2'407,347 para comprar una vivienda nueva o existente (el monto del préstamo otorgado dependió de la capacidad de pago, salario y edad del solicitante) (Expansion, 2023). Por otro lado, el Gobierno de NL propuso a los no-derechahabientes un programa de subsidios mediante el FOMERREY, para adquirir una vivienda suficiente, asequible y adecuada. Además, redujo el impuesto verde por extracción de recursos pétreos de 1.5 a 0.8, fomentando una disminución en los precios de los materiales de construcción, mientras que los gobiernos municipales incentivarán la exención de impuestos sobre adquisición de inmuebles (ISAI). Asimismo, se solicitó al INFONAVIT la realización estratégica de nuevos fraccionamientos (CentroUrbano, 2023), por lo que la CANADEVI promocionó los beneficios de la verticalización de la vivienda, ya que 150 personas contenidas en 25 hectáreas de terreno pueden contar con todos los servicios en el mismo lugar (El Economista, 2022b).

3. LA VIVIENDA DIGNA Y SUS CONTRASTES EN MÉXICO

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (art. 4º) indica que toda familia tiene derecho a disfrutar de una vivienda digna y decorosa, lo cual significa que el Estado tiene la obligación de respetar, proteger y desarrollar acciones que permitan a las personas disponer de una vivienda adecuada y su adquisición no debe ser excesiva, comprometiendo la satisfacción de otras necesidades (Tecnológico de Monterrey, 2021). Asimismo, la ONU declaró la vivienda como un

derecho humano, económico, social y cultural, debiendo ser adecuada en: seguridad de tenencia, disponibilidad de servicios, habitabilidad, accesibilidad, ubicación, adecuación cultural y asequibilidad. Resaltó que su costo debe ser accesible para todas las personas sin poner en peligro el disfrute de otras necesidades básicas y derechos humanos, por lo que una vivienda es asequible si los gastos asociados requieren menos del 30% del ingreso de una persona (ONU-Hábitat, 2019). Lastimosamente, existe una brecha importante entre estos requerimientos y la realidad en México. Los tipos de vivienda en México son (Tecnológico de Monterrey, 2021): (i) Vivienda formal, desarrollada por particulares privados en suelo urbano habitable; su característica esencial es la tenencia de la tierra, es construida con licencias y permisos, cumple con niveles de habitabilidad (espacio, seguridad estructural, iluminación, ventilación, reglamentos de construcción, servicios urbanos básicos de agua, drenaje, electricidad, vialidad y acceso a equipamiento urbano, educación, salud, comercio, recreación y trabajo). (ii) Vivienda informal, desarrollada por las familias mediante autoconstrucción y autogestión en suelo no urbanizable (de preservación ecológica, riesgo natural o socio organizativo), sin seguridad en la tenencia de la tierra, no cumple los requerimientos de habitabilidad. (iii) Vivienda rural, edificada en un entorno rural de producción agropecuaria, sobre suelo ejidal comunal con población < 10,000 habitantes, existe seguridad de tenencia de la tierra, con niveles de habitabilidad mínimos (seguridad estructural, iluminación, ventilación, puede carecer de servicios sanitarios y de energía). (iv) Vivienda rural indígena, desarrollada por las familias mediante autogestión y autoconstrucción comunitaria en suelo rural indígena ejidal comunal, de población < 10,000 habitantes con características étnicas de usos y costumbres, cumpliendo con niveles de habitabilidad tradicionales, sin servicios básicos ni equipamiento urbano.

Por otra parte, el IVNL (2021) señala que las causas a los problemas de la vivienda en NL son: (i) Los bajos ingresos, asociando incapacidad para ahorrar y realizar mantenimientos a las viviendas, llevando a un estado precario y sin acceso a alguna solución. (ii) La vivienda provisional (asentamientos irregulares), son personas con pobreza sin acceso al mercado formal de vivienda; ilegalmente acceden a un suelo barato y autoconstruyen con materiales percederos y poco resistentes, en zonas riesgosas de difícil acceso a servicios básicos, promoviendo problemas de salud y condiciones inseguras ante desastres naturales, etc. (iii) Procesos de autoconstrucción insuficiente por la falta de soluciones habitacionales inmediatas para la subsistencia, falta de conocimientos o de una supervisión adecuadas. La obra avanza conforme la disponibilidad de recursos y, por la falta de capacitación para construir, asocia problemas de salud por uso de materiales, distribución deficiente de espacios, cocinas en dormitorios, falta de sanitarios, desperdicio de materiales, etc. Esto acentúa los impactos ambientales. (iv) Bajo nivel educativo-cultural, complicando la inserción exitosa en el mercado laboral y la movilidad social. El promedio de escolaridad en NL es de 10.7 años, pero resalta que el acceso a una educación no asegura el aprendizaje de calidad, limitando las oportunidades del individuo.

Asimismo, según el IVNL (2021) los efectos de los problemas de la vivienda son: (i) El deterioro de la vivienda por falta de mantenimiento, agravando los daños persistentes (estructurales, humedad, pisos de tierra, grietas en paredes o falta de puertas y ventanas), lo cual afecta la calidad de vida. (ii) Mayor vulnerabilidad ante desastres naturales; las viviendas provisionales tienen una alta probabilidad de afectarse, destruirse, sufrir accidentes o problemas de integridad. (iii) Viviendas con riesgo estructural, sin servicios ni espacios de calidad. Es un efecto de la autoconstrucción y el asentamiento en terrenos apartados o irregulares sin preparación para su conexión a la red pública de agua, drenaje o electricidad, haciendo complicada, peligrosa o ilegal su provisión. Además, las viviendas irregulares o descuidadas corren el riesgo constante de sufrir daños estructurales en cualquier momento, ofreciendo una deficiente protección del exterior.

Todo lo anterior señala la necesidad de implementar un nuevo enfoque para dar solución a los problemas de la vivienda en México, con el objetivo de alcanzar ViDAS. Por lo tanto, en la

siguiente sección se discute el estado del arte de la I3DMC en términos de EC y la idoneidad para lograr su aplicación en la IC de México, lo cual incluye el análisis de las condiciones para el Estado de Nuevo León como primer escenario.

4. LA IMPRESIÓN 3D DE MEZCLAS CEMENTANTES Y SU POTENCIAL DE APLICACIÓN EN MÉXICO

Para comprender las ventajas de la I3DMC, se debe señalar que en Latinoamérica y México predominan los métodos convencionales de construcción informal y la autoconstrucción como el concreto hecho en obra, resultando en viviendas sobrediseñadas, de baja calidad, el uso intensivo de recursos, la alta generación de desperdicio de materiales, los procedimientos precarios, el almacenamiento inadecuado, la mala planeación y otras características típicas de los países en desarrollo (Villagrán-Zaccardi y col., 2022). Por lo tanto, mitigar la autoconstrucción es uno de los grandes retos de la IC latinoamericana para alcanzar las metas de sostenibilidad, lo cual involucra estrategias como sustituir el uso del cemento empaquetado por (Mendoza-Rangel y col., 2023, Villagrán-Zaccardi y col., 2022): (i) Cemento y mortero empaquetado de baja huella de carbono y contenido de clinker (fase del cemento que asocia el mayor impacto ambiental en la producción del CP). (ii) Concreto y mortero pomezclado, así como estructuras de concreto prefabricadas, las cuales permiten optimizar las propiedades y cantidades de material. No obstante, asocia un impacto ambiental por el uso de CP y el transporte al sitio de la obra. (iii) La I3DMC, la cual integra la digitalización y automatización en el proceso constructivo mediante una impresora robótica multifuncional operada a partir de un diseño modelado en 3D.

Resalta que la I3DMC ofrece ventajas únicas (OSHA, 2022; Robayo-Salazar y col., 2022; Villagrán-Zaccardi y col., 2022): (i) Un potencial ilimitado para la construcción y verticalización eficiente de viviendas, apartamentos, puentes y cuarteles en zonas de guerra activa. (ii) Los diseños tienen opciones ilimitadas de creatividad, originalidad y complejidad, debido a la libertad del diseño simétrico y asimétrico. Esto permite la optimización estructural o arquitectónica, reduciendo la brecha entre la ingeniería y el diseño, integrando la arquitectura bioclimática, ecotecnologías, materiales inteligentes, etc. Las anteriores son ventajas relacionadas con la precisión y control de este proceso constructivo. (iii) La IC es el 9° espacio profesional más peligroso en EUA con el 21% del total de muertes anuales (OSHA, 2022). La I3DMC reduce la demanda de mano de obra convencional, requiriendo poco personal especializado. Esto también evita problemas por autoconstrucción y falta supervisión adecuada. (iv) La I3DMC minimiza el uso de cimbra, ya que la colocación de capas sobre capas de las mezclas cementantes de curado rápido permiten autosostenerse, mitigando el uso de madera, aluminio o acero. (v) Permite el diseño de tintas de cementos, morteros y concretos de baja huella de carbono, así como su elaboración por especificación, ya que integra un sistema de mezclado similar al concreto pomezclado o prefabricado. Asimismo, las tintas pueden elaborarse con desechos industriales y materiales regionales para sustituir el CP (p.ej., por escorias, cenizas volantes, cenizas de bagazo de caña, arcilla calcinada, piedra caliza, cementos activados alcalinamente, etc.), dependiendo de las propiedades deseadas (p.ej., aislamiento térmico, acústico, resistencia mecánica, durabilidad, etc.). Cabe mencionar que están en desarrollo mezclas cementantes con potencial de captación del CO₂ ambiental, las cuales podrían ser una opción interesante en el futuro de la impresión 3D (Kaliyavaradhan y col., 2020). (vi) La I3DMC simplifica la planeación de obra y elimina el impacto ambiental por el transporte asociado con el suministro de concreto pomezclado o prefabricados.

En este contexto, se deben resaltar los avances alcanzados por las empresas de I3DMC a nivel mundial. Por ejemplo, la empresa china Winsun presentó los siguientes desempeños en comparación con la construcción convencional (WINSUN, 2014; ArchDaily, 2014): (i) La construcción de 10 casas en 24 h y un edificio de oficinas en Dubai, reduciendo un 30% el tiempo

de construcción. (ii) El ahorro en costos de construcción y mano de obra del 80%. (iii) La reducción del 30% al 60% de los desechos en función del tamaño de los elementos impresos. (iv) El 50% del concreto utilizado procedió de desechos de la construcción. Por su parte, siendo pioneros en el mundo, el gobierno de los Emiratos Árabes Unidos y Dubai manifestaron en su 3D Printing Strategy en 2015 que el 25% de sus edificios serán impresos para 2025, reduciendo un 70% la mano de obra y 90% los costos, mientras que el tiempo de construcción es el 10% del empleado en la construcción convencional, según la Dubai Future Foundation. La iniciativa incluye la impresión de productos de iluminación, cimentaciones, juntas de construcción, instalaciones, parques, edificios humanitarios y vivienda móvil (ArchDaily, 2018). Asimismo, respecto de la construcción modular con I3DMC, en 2021 en Países Bajos se entregó la primera vivienda de 94 m² compuesta por 24 elementos impresos en fábrica y transportados al sitio de construcción, integrando techos y muros inclinados en un diseño de arquitectura bioclimática con aislamiento térmico y conexión a red de calefacción, logrando un coeficiente de rendimiento energético de 0.25 de una vivienda altamente confortable y energéticamente eficiente (ArchDaily, 2021a). Cabe mencionar que las propiedades de confort térmico y acústico se pueden esperar en la I3DMC, debido a la personalización del diseño y la adaptación de las condiciones del entorno, el uso de materiales o sistemas aislantes eficientes, así como la precisión y consistencia de la técnica. De hecho, García-Alvarado y col. (2020) reportaron que la IC en Chile está interesada en la I3DMC por las envolventes con altas capacidades térmicas y sismorresistentes en vivienda asequible. La primera, debido al sistema de extrusión en dos muros paralelos con un vacío interno; mientras que la segunda requiere de un diseño especializado. En cuanto a la construcción en zonas marginadas, existe reporte de la empresa estadounidense ICON y la organización New Story que en 2019 imprimieron dos casas para familias de PIDLB en Tabasco. En este caso, se logró que la tinta de concreto aprovechara los recursos locales, obteniendo un aspecto texturizado y blanquecino de la impresión 3D (ArchDaily, 2021b).

Las ventajas que ofrece la I3DMC y los avances que presenta esta industria, se relacionaron con las propiedades físicas, mecánicas, de durabilidad y sostenibilidad que se pueden alcanzar con los elementos impresos en 3D. Por ejemplo, en comparación con el concreto convencional, se ha logrado que la I3DMC alcance un desempeño mecánico y de durabilidad cuasi-isotrópico similar o superior por medio del uso de aditivos y mezclas de alto desempeño, funcionando como monolitos y evitando los puntos débiles en las uniones entre capas (CEMEX, 2022; Ma y col., 2019; MARQ, 2021; Murcia y col., 2020; Ye y col., 2021). La Tabla 3 muestra algunos ejemplos comparativos para las propiedades mecánicas. Se debe resaltar que a nivel industrial se ha alcanzado una resistencia similar entre los elementos impresos en 3D y los elaborados en la construcción convencional, pero las empresas deben desarrollar sus propias tintas utilizando los materiales cementantes, agregados y aditivos químicos regionales, considerando las condiciones ambientales ya que actualmente no existen estándares internacionales que regulen su manufactura y, por lo tanto, la evaluación del desempeño de los elementos I3DMC se ha realizado con base en empatar las propiedades estandarizadas para el concreto convencional o desarrollando normativas locales (Be more 3D, 2024). Aunado al desarrollo de normativa, otro reto importante en el desarrollo de la I3DMC es la incorporación de diferentes tipos de materiales (p.ej., desechos industriales, geopolímeros, tierras y arcillas, etc.) para elaborar las tintas cementes que logren simultáneamente las propiedades reológicas óptimas para su impresión en 3D y el desempeño mecánicas en estado endurecido (Ahmed, 2023; Song y Li, 2021).

Tabla 3. Comparación de propiedades mecánicas para concreto convencional e impreso en 3D.

Propiedad	Material constructivo	
	Concreto convencional	Concreto impreso en 3D
Porosidad (Rahul y col., 2019)	9-11%	7%, el mejoramiento se debió a una mayor compactación y empaquetamiento debido al proceso de extrusión. 11% en las interfaces debido a las irregularidades del filamento.
Fuerza de unión por cortante directo (Rahul y col., 2019; Ye y col., 2021)	7-8 MPa.	Disminuyó de 22-29% en las capas verticales y 24% en las horizontales, lo cual se asoció al tiempo de deposición entre capas.
Resistencia de compresión (Baz y col., 2020; Liu y col., 2021; Özalp y Yilmaz, 2020; Rahul y col., 2019; Ye y col., 2021)	38-75 MPa.	Disminuyó de 13-21% en las tres direcciones debido a la porosidad en las interfaces de las capas; los resultados son similares en ensayos Pull Out. Pero aumentó 3-18% al reforzar con fibra u optimizar los parámetros de impresión.
Resistencia de flexión (Arunothayan y col., 2020; Joh y col., 2020; Rahul y col., 2019; Ye y col., 2021)	8.5-15.1 MPa.	Disminuyó de 33-40% en dirección paralela a la unión de capas, pero aumentó de 18-19% en dirección perpendicular; lo anterior se asoció con la porosidad. Reforzar con fibra da resultados similares.
Resistencia de tensión (Wolfs y col., 2019)	~4 MPa.	Reducción de ~10% indistintamente de la dirección. A mayor tiempo de deposición entre capas, menor la resistencia.

Con respecto de la durabilidad de las tintas y las impresoras 3D, ambos presentan un mantenimiento mínimo a largo plazo si (Jo y col., 2020; Nohedi y col., 2022): (i) la tinta es optimizada para lograr la menor cantidad de juntas y uniones, reduciendo las filtraciones de agua o aire; (ii) la impresora 3D recibe limpieza continua para evitar el endurecimiento de las tintas en los sistemas de extrusión y bombeo. Específicamente, los elementos I3DMC ha mostrado resultados de durabilidad variables con respecto de la construcción convencional (Tabla 4), lo cual radica en la optimización del diseño de la mezcla y los parámetros de impresión para lograr la densificación necesaria en el elemento impreso en 3D, impidiendo la penetración de cloruros, sulfatos y otros agentes de deterioro (Natives3D, 2018; Nohedi y col., 2022; Rehman y col., 2021; Xiao y col., 2021).

Por lo tanto, optimizar el proceso de extrusión es clave porque modifica la morfología de los poros y la compacidad del elemento impreso en 3D para limitar el ingreso de los agentes agresivos (El Inaty y col., 2022). Por otra parte, la precisión y consistencia de la I3DMC contribuyen al control de calidad, disminuyendo la variabilidad de las propiedades de durabilidad. No obstante, también es posible el uso de materiales avanzados para disminuir los problemas estructurales o de durabilidad, p.ej., en caso de requerirse un refuerzo en el elemento impreso en 3D, es posible introducir varillas, alambre o fibras de acero, basalto, polipropileno, etc. (Ding y col., 2020; El Inaty y col., 2022; Robayo-Salazar y col., 2023; Sikora y col., 2022; Song y Li, 2021; Zhang y col., 2021). Cabe mencionar que la investigación de elementos impresos en 3D para diferentes condiciones de exposición y agentes agresivos sigue en curso, lo cual debe adaptarse a las regiones del país, evaluándose por largos periodos de tiempo y buscando la optimización de las propiedades de durabilidad usando materiales locales (Mendoza-Rangel y Díaz-Aguilera, 2023; Song y Li, 2021).

Tabla 4. Comparación de la durabilidad para concreto convencional e impreso 3D.

Propiedad o exposición	Material constructivo	
	Concreto convencional	Concreto impreso en 3D
Cloruros (Van Der Putten y col., 2020)	Área de ingreso y penetración de cloruros de 7-35 días fue de 10-15% y 18-20%, respectivamente.	Área de ingreso y penetración de cloruros de 7-35 días fue de 30-48% y 30-50%, respectivamente. Un mayor tiempo de impresión aumentó la porosidad y el ingreso del cloruro.
Tiempo para la contracción por evaporación de agua (Mohelich y col., 2020)	3-6 hrs.	1.2-2 hrs, la disminución se asoció con una mayor porosidad en la interfaz de las capas.
Altas temperaturas (240°C) (Cicione y col., 2021)	Contenido de aire de 6%. Resistencia de flexión y compresión de 6 y 58 MPa, respectivamente.	Contenido de aire de 5.1%. Resistencia de flexión y compresión de 5 y 68 MPa, respectivamente. El mejoramiento se asoció a una mayor porosidad que mitigó el desprendimiento por acción de las presiones hidrotérmicas internas.
Ácido sulfúrico (El Inaty y col., 2022)	Pérdida de masa del 1% (84 días) y 3.5% (140 días). La resistencia de compresión y flexión disminuyeron de 69 a 44 MPa (36%) y de 13 a 11 MPa (15%), respectivamente.	Pérdida de masa del 0.8% (84 días) y 4% (140 días). La resistencia de compresión y flexión disminuyeron de 30 a 27 MPa (10%) y de 12 a 11 MPa (8%). El mejor desempeño se asoció con una menor porosidad.

Con respecto del impacto ambiental y la sostenibilidad de los elementos de I3DMC en comparación con el concreto convencional (Figura 1), se reportaron reducciones en (i) las emisiones de CO₂ del 12%-88%, (ii) el impacto ambiental asociado con la arena y acero del 20%-50%, (iii) el consumo energético del 86-87%, (iv) la energía incorporada del 12%-55%, (v) el potencial de calentamiento global del 55%-77%, (vi) la toxicidad del ambiente de 4%-53%; así como (vii) un aumento en la productividad del 47-48.1% (Motalebi y col., 2023). Otros aspectos de sostenibilidad se comparan en la Tabla 5. Es interesante mencionar que estos resultados estuvieron asociados al uso del cemento Portland ordinario (CPO), y podrían mejorarse interesantemente utilizando tintas de cementantes alternativas desarrolladas para su impresión 3D en Nuevo León, México como los activados alcalinamente de metacaolín (MC) con altas cantidades de piedra caliza pulverizada (PC) (hasta 80%), los cuales se desarrollaron considerando criterios de Diseño Eficiente de EC tales como utilizar MC de media-alta pureza, optimizar la ruta de transformación del caolín-metacaolín que minimizó el tiempo de calcinación, desarrollando metodologías de diseño y optimización de la composición química para maximizar las propiedades mecánicas, de durabilidad y sostenibilidad, etc. (Díaz-Aguilera, 2024). Recientemente, estos cementantes fueron validados para utilizarse en impresión 3D logrando resultados satisfactorios sin la necesidad de utilizar aditivos químicos (Perales-Santillan y col., 2024).

Los resultados preliminares mostraron que solamente la tinta cementante presentó una reducción del 77.5% en las emisiones de CO₂ asociadas con el proceso de fabricación en relación con el CPO (Díaz-Aguilera, 2024), lo cual debe añadirse a la contribución del proceso constructivo por impresión 3D. Cabe mencionar que esta mezcla optimizada con 80%PC superó por 228.5 unidades

de diseño eficiente (ude) al CPO, según un indicador de EC propuesto que consideró el desempeño mecánico, por durabilidad y sostenibilidad; mientras que una mezcla optimizada con 30%PC lo superó por 1147.2 ude (Díaz-Aguilera, 2024). Además, otro estudio de estos cementantes optimizados usando MC de alta pureza, mostró una reducción del 42.6% en el costo de producción con respecto de un cemento Portland compuesto (CPC) (Perez-Cortes y Escalante-Garcia, 2020). El anterior es un ejemplo de las tintas cementantes en desarrollo en Nuevo León, México (UANL-FIC, 2023), el cual sugiere que las tecnologías de I3DMC pueden ser aún más eficientes en combinación con otros desarrollos mexicanos.

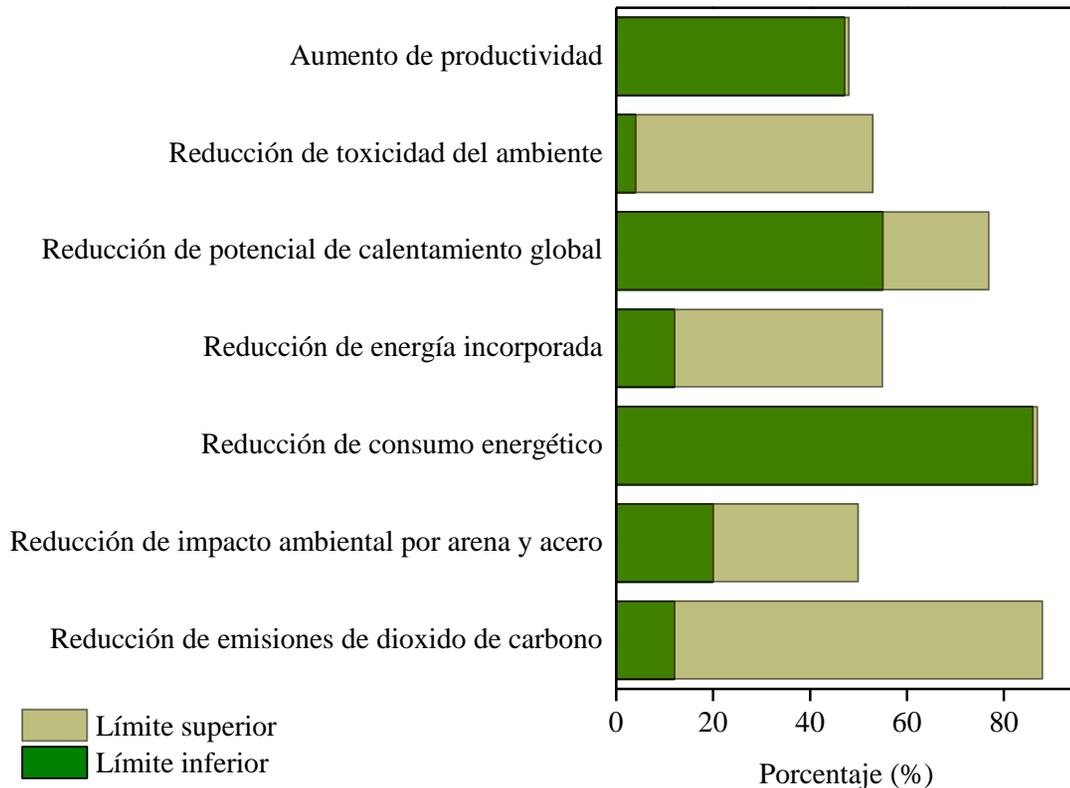


Figura 1. Ventajas en los aspectos del impacto ambiental de la impresión 3D de materiales cementantes con respecto del concreto convencional (adaptado de Motalebi y col., 2023).

Asimismo, se deben considerar el impacto sobre la economía y las condiciones laborales al analizar la sostenibilidad de la I3DMC. Inicialmente, no se esperaba una masificación en el uso de la I3DMC en México, lo cual disminuiría drásticamente la contratación de personal de la construcción. Esto es considerado como una desventaja de la I3DMC, aunque también sugiere la necesidad de una actualización en la IC mediante capacitación especializada del personal (Amhed, 2023; De Schutter y col., 2018). No obstante, las múltiples ventajas de la I3DMC la colocan como una de las tecnologías más sostenibles y rentables por explotar, tal como lo confirma el crecimiento exponencial de la inversión en esta tecnología que se experimenta actualmente, lo cual se refleja en el número de empresas que ya operan en países desarrollados como EUA, China, Emiratos Árabes, Canadá, Japón y España (ArchDaily, 2018; Be more 3D, 2024; Motalebi y col., 2023; Winsun, 2014). De hecho, la empresa CEMEX (2022) en colaboración con la empresa internacional de impresoras COBOD, anunció en septiembre de 2023 la introducción de la primera impresora 3D de concreto en México con el fin de innovar en el desarrollo de tintas elaboradas de concreto, lo cual muestra el interés de introducir la tecnología de I3DMC en el mercado mexicano. Cabe mencionar que adquirir y poner en operación una impresora de COBOD (2023) ronda los \$400,000-\$1'000,000 de dólares, volviéndola de acceso relativamente difícil en países en

desarrollo. Todo lo anterior significa que la tecnología de I3DMC se está investigando intensamente a nivel mundial con el fin de introducirla progresivamente en los mercados y la clave está en el desarrollo de impresoras 3D funcionales, robustas y durables, así como de tintas cementantes con la capacidad de ser impresa, resistencia mecánica, durabilidad y bajo impacto ambiental (Robayo-Salazar y col., 2023).

Tabla 5. Comparación en aspectos de sostenibilidad para concreto convencional e impreso 3D.

Aspecto de sostenibilidad	Material constructivo	
	Mampostería y concreto convencional (colado en sitio)	Concreto impreso en 3D
Reducción de desperdicio de material (Buswell y col., 2007; Nematollahi y col., 2017; Sanjayan y col. 2019)	Puede generar más desperdicios en proyectos que requieren correcciones por cortes o errores humanos.	Permite una reducción significativa del desperdicio debido a la precisión por la automatización del proceso, minimizando cortes.
Uso de materiales sostenibles (Ding y col., 2020; Li y col., 2024; Xiao y col., 2021)	Normalmente usa materiales convencionales de mayor impacto ambiental debido a la extracción de materias primas y el proceso de fabricación. Depende en gran medida de los materiales disponibles localmente, que pueden no ser sostenibles.	Puede utilizar materiales de construcción más sostenibles debido al diseño de las tintas cementantes, (p.ej., concreto reforzado con fibras naturales, materiales reciclados, etc.).
Eficiencia energética (Abdalla y col., 2021; Alkhalidi y col., 2020; He y col., 2020)	Requiere medidas adicionales para mejorar la eficiencia energética, como la instalación de aislamiento después de la construcción. Las juntas de construcción pueden representar puntos de fuga de energía si no se sellan correctamente.	La capacidad de integrar aislamiento térmico y otras características mejora la eficiencia energética de la vivienda. La reducción de las juntas de construcción puede disminuir los puntos de fuga de energía.
Durabilidad y mantenimiento (Ahmed y col., 2023; de Souza y col., 2024; Schuldt y col., 2021)	La durabilidad depende de la calidad del concreto asociada con la mano de obra. Puede requerir mantenimiento regular para reparar grietas y evitar el deterioro.	Puede ser más duradero y requerir menos mantenimiento a largo plazo debido a la uniformidad y resistencia del material. Menor riesgo de deterioro por corrosión debido al uso de materiales no metálicos.
Huella de carbono (De Schutter y col., 2018; Khan y col., 2021; Mohan y col., 2022)	Puede ser mayor debido a la cantidad de energía requerida para la fabricación del concreto y el transporte de materiales. Requiere de equipos de alto consumo de combustibles fósiles.	Puede ser menor en comparación con la construcción convencional debido a la reducción de la energía, desechos y materiales.

Otro aspecto de interés relacionado con la sostenibilidad de la I3DMC es el costo de la construcción de vivienda, por lo tanto, se realizó un análisis comparativo de costo/m² entre la construcción convencional y la I3DMC (Tabla 6), considerando que: (i) el costo promedio para la vivienda convencional en México desde 2019 hasta 2024 aumentó de \$5,777.5-\$6,213/m² a \$6,896.55-\$9,266/m², mientras que el costo directo de vivienda de interés social aumentó 2.07% de marzo de 2023 a marzo de 2024 (CMIC-CEICO, 2023; GAMA Arquitectura, 2024; GRUPO QVICK, 2023; Miranda, 2019); (ii) Kreiger y col. (2019) estimaron que la construcción de vivienda impresa en 3D alcanzó una reducción de costo del 10-25% o 25-37% con respecto de utilizar mampostería o concreto convencional, respectivamente; asimismo, en 2023 se estimó que la reducción de costo con respecto de la construcción convencional alcanzó el 50% en India, mientras que, el costo promedio en Rusia alcanzó los \$4770/m²; por otro lado, en 2018 la empresa ICON imprimió casas de 60 m² por un costo promedio de \$2800/m² en Austin, planteando reducirlo a \$1200/m² en el Salvador (EnteUrbano, 2020; Forbes México, 2018; Kreiger y col. 2019; Vijayalaxmi y col., 2023). Así, para un estrato socioeconómico medio y bajo, se puede estimar que el costo en México podría reducirse de \$6,000-\$9,000/m² a \$1,700-\$4,500/m², involucrando adicionalmente la reducción de los desperdicios en obra, flexibilidad de diseño y menor tiempo de construcción. Cabe mencionar que la composición general de la relación ganancia/costo de las construcciones ronda los 2/1-3/1 y se puede establecer que el 50% del costo de construcción es por mano de obra y 50% por materiales.

Tabla 6. Comparación de costo/m² de la construcción convencional e impresión 3D para México.

Producto	Precio por m ² de construcción (MXN)	Características	Población beneficiada
Vivienda de construcción convencional (modular)	\$6000 – \$9,000	Cuentan con garantía durante el primer año. Características aislantes. Diseños preestablecidos. Alto costo para la población en pobreza y pobreza extrema	Clase baja y media, individuos o parejas con/sin hijos
Vivienda de concreto impreso en 3D	\$1,700 – \$4,500	Reducción de desperdicios en obra. Diseños flexibles. Menor costo de mano de obra. Menor tiempo de construcción.	

Un segundo análisis puede realizarse considerando que el desempeño de las tecnologías de I3DMC permiten (i) la construcción de viviendas asegurando la calidad de los materiales y la durabilidad, así como la seguridad estructural de los materiales, incluso ante desastres naturales, (ii) incidir positivamente en los créditos y apoyos sin importar su naturaleza, esto debido a la reducción de los costos de la vivienda, así como (iii) proporcionar las características de habitabilidad estipuladas por ONU-Hábitat (2019) y el IVNL (2021), especialmente acercando la meta del 30% del ingreso determinado para la vivienda asequible (ONU-Hábitat, 2019). Así, sería posible financiar un costo de \$8mil-\$14mil dólares en 5-8 años (ArchDaily, 2015) al considerar como ejemplo el ingreso promedio en NL (Gobierno de México, 2023a) y el costo del proyecto de la Arq. Tatiana Bilbao, no obstante, su proyecto fue diseñado para construcción convencional, por lo que utilizar I3DMC supondría una mejora de resistencia, durabilidad, sostenibilidad, costos, etc.

De esta manera, la construcción de vivienda por I3DMC promueve por sus características el alcance de la ViDAS de una manera que no se habían propuesto anteriormente en la IC, en contraste con diversificar los apoyos a los solicitantes, pero no tratan con el problema medular de la vivienda actual: su costo. Esto le brindaría acceso a ViDAS al sector vulnerable de la población, pero

también sugiere el alcance de niveles de sostenibilidad superiores a la población con un ingreso mayor, ya que, por el costo de la vivienda comercial convencional, se podrían adicionar tecnologías de alta eficiencia energética, recubrimientos y cementantes autorreparables o fotocatalíticos para la captura de CO₂, ventanas inteligentes, paneles y calentadores solares, diseños bioclimáticos usando geometrías complejas, etc. No obstante, hace falta investigación y desarrollo de tecnología mexicana en materia de tintas cementantes e impresoras 3D con base en los criterios de diseño eficiente de EC, haciendo disponibles estas tecnologías a la población y los desarrolladores de vivienda de manera más asequible en nuestro país.

4.1. Análisis la circularidad de la ViDAS impresa en 3D: posible escenario para México

En favor del desarrollo sostenible del país y con base en tecnología mexicana, la construcción con I3DMC fomenta una drástica disminución de costos, la cual sería suficiente para brindar ViDAS a las PIDLB. Esto podría disminuir de manera importante los problemas socioambientales con estrategias como: (i) aprovechar los subsidios actuales para adquirir-mejorar-ampliar una vivienda, facilitando el acceso a financiamientos y previniendo la morosidad por los montos menores, los cuales serían más proporcionales al ingreso de las PIDLB. Esto reduce los tiempos de financiamiento y, sobre todo, permite respetar el límite del 30% del ingreso establecido por ONU-Hábitat (2019) que determina una vivienda asequible, así como solucionar las CCEV, lo que por otro lado apoya a la satisfacción del resto de las necesidades básicas. (ii) La eficiencia del proceso constructivo por I3DMC resulta en la generación de vivienda rápida de costo asequible, permitiendo abatir el déficit de vivienda, incluso con una demanda alta. Esto también promueve una planeación urbana mejorada que logre la colocación y evite las viviendas deshabitadas construidas con I3DMC. (iii) El acceso de las PIDLB al mercado de la ViDAS mitiga el problema de la vivienda informal (p.ej., autoconstrucción, falta de mantenimiento, precariedad, crecimiento urbano descontrolado, poca integración social, asentamiento en zonas de preservación ecológica, vulnerabilidad ante fenómenos naturales, riesgo estructural, poca protección del exterior, etc.), debido al cumplimiento de los requerimientos para una vivienda digna y decorosa según ONU-Hábitat y la Constitución Mexicana, es decir, viviendas construidas mediante materiales duraderos, resistentes y de calidad en pisos, muros y techos de I3DMC, utilizando un diseño eficiente energética, estructural y arquitectónicamente que optimice los espacios, su funcionalidad, el consumo energético, el confort y el uso de recursos de la vivienda, cumpliendo con permisos y reglamentos de construcción en suelo urbanizable de vivienda formal, realizada bajo la supervisión especializada en I3DMC, asegurando el acceso a servicios públicos y disminuyendo el hacinamiento y rezago habitacional. (iv) Asimismo, puede dar solución a los problemas de mejoramiento y ampliación de vivienda, vivienda provisional, así como en espacios públicos en comunidades y colonias. Cabe señalar que los elementos impresos tienen mejores propiedades en comparación con el block, el ladrillo o la madera, por lo que minimizan la necesidad de mantenimientos, extendiendo la vida útil, por lo que pueden mejorar otras propuestas de vivienda asequible como el de Tatiana Bilbao (ArchDaily, 2015). (v) Todo lo anterior mejora la calidad de vida y salud de los habitantes, mientras que la reducción del impacto ambiental de la IC podría alcanzar las metas de sostenibilidad mientras mantiene su papel preponderante en el país en términos económicos. Además, se debería dar lugar a alianzas estratégicas y políticas públicas para facilitar la adquisición de ViDAS impresas en 3D, principalmente para PIDLB.

En términos de los ODS (Naciones Unidas, 2015), la I3DMC incide mediante la disminución de las emisiones de CO₂, demanda energética, generación de desechos, uso intensivo de recursos naturales, y aumentando la reutilización de subproductos y recursos locales, esto conforme se desarrollen procesos y tecnologías más eficientes: (i) La I3DMC permite el uso eficientemente los materiales de construcción, dosificando y depositando cantidades precisas de agua, cemento, aditivos, agregados pétreos, etc. Esto reduce la extracción en canteras, desechos de obra, así como

las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de materiales, lo cual indirectamente también promueve un costo asequible de ViDAS. Asimismo, la ocupación de ViDAS evita asentamientos irregulares en zonas eco-protegidas, fomentando el crecimiento controlado de las ciudades. Lo anterior incide en el ODS-6 de agua limpia y saneamiento, ODS-7 de energía asequible y no contaminante, así como el ODS-15 de vida de ecosistemas terrestres. (ii) Ya que se optimiza la eficiencia e impacto ambiental mediante la digitalización y automatización de un robot multifuncional, y promueve la construcción modular, se incide en el ODS-9 de industria, innovación e infraestructura y ODS-12 de producción y consumo responsable. (iii) La construcción de ciudades por impresión 3D mitiga el cambio climático debido a las prácticas de bajo impacto ambiental, el diseño eficiente, bioclimático y sostenible, la extensión de la durabilidad, la optimización de recursos, etc. Además, requiere de alianzas estratégicas del sector público y privado para lograr los ODS, el desarrollo de investigación y nuevas tecnologías mexicanas para la construcción de ViDAS. Esto incide en el ODS-11 de ciudades y comunidades sostenibles, ODS 13 de acción por el clima y ODS-17 de alianzas para lograr los ODS. (iv) Otros beneficios de la I3DMC se relacionan con: el ODS-3 de salud y bienestar, al mejorar la calidad de vida de las personas; ODS-8 de trabajo decente y crecimiento económico, al crear nuevas oportunidades económicas, empresas y modelos de negocio sostenibles; ODS-4 de educación de calidad, porque el desarrollo tecnológico de I3DMC permite a los estudiantes aprender simultáneamente de diseño, ciencia, ingeniería y procesos de manufactura de forma práctica.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo sostenible de México mediante la aplicación de la Economía Circular en la Industria de la Construcción brinda soluciones como la impresión 3D de mezclas cementantes, lo cual permitiría brindar la vivienda digna, asequible y sostenible a la población en general, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas y del Gobierno Federal. Esto es por las diversas ventajas asociadas a la automatización del proceso constructivo mediante un robot, destacando (i) la disminución de la mano de obra, los accidentes y errores humanos, (ii) la optimización en el uso de materiales y control de calidad de las propiedades debido a la precisión durante el procedimiento de mezclado, bombeo e impresión de las mezclas cementantes, así como (iii) el alto desempeño constructivo, que reduce los tiempos de construcción y permite la construcción modular mediante prefabricados impresos en 3D. Lo anterior implica una reducción importante del impacto ambiental y los costos (desde \$6,000-\$9,000/m² hasta \$1,700-\$4,500/m²) con respecto de la construcción convencional según las estimaciones actuales, pero superando en calidad por desempeño mecánico y de durabilidad a otras propuestas sostenibles existentes o igualando el desempeño del concreto convencional mediante la optimización adecuada de las propiedades de los elementos impresos en 3D. No obstante, es posible alcanzar ventajas superiores utilizando (i) tecnologías mexicanas de cementantes alternativos o materiales de desecho para las tintas, (ii) además de implementar, por el mismo costo de la vivienda comercial convencional, tecnologías avanzadas de alta eficiencia energética, captura de CO₂, ecotecnologías, diseños arquitectónicos bioclimáticos, etc. Se espera que este trabajo contribuya en la difusión y discusión en torno a las soluciones nacionales para la integración de (i) la economía circular en la industria de la construcción, (ii) conseguir la vivienda digna, asequible y sostenible, así como (iii) el desarrollo de la tecnología mexicana de impresoras 3D y tintas cementantes, dando lugar a empresas de base tecnológica en esta área.

6. AGRADECIMIENTOS

J.H. Díaz-Aguilera, J.R. Zapata-Padilla, S. Mares-Chávez, F.D. Anguiano-Pérez, M.I. Velásquez-Hernández, E.E. Espino-Robles, J.I. Alvarado-López y J.A. Mendoza-Jiménez agradecen al CONAHCYT por las becas brindadas para los CVU 929098, 946425, 1346629, 554927, 1041129, 1305949, 994896 y 591308, respectivamente.

8. REFERENCIAS

- Abdalla, H., Fattah, K.P., Abdallah, M., Tamimi, A.K. (2021), *Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House*. Sustainability. 13:11978. <https://doi.org/10.3390/su132111978>.
- Adesina, A. (2020), *Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions*. Env. Challen. 1:100004. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>
- Adesina, A. (2021), *Circular Economy in the Concrete Industry*. Build. Eng. 43:103233. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233>
- Ahmed, G.H. (2023) *A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability*. J. Build. Eng. 66:105863. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105863>
- Alkhalidi, A, Hatuqay, D. (2020), *Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study*. J. Build. Eng. 30:101286. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101286>
- ArchDaily (2015), *Tatiana Bilbao’s \$8,000 House Could Solve Mexico’s Social Housing Shortage*. Accesado el 28 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.com/775233/tatiana-bilbao-8000-house-could-solve-mexicos-social-housing-shortage>
- ArchDaily (2018), *Dubai planifica imprimir en 3D el 25% de sus nuevos edificios en 2025*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.mx/mx/901205/dubai-planifica-imprimir-en-3d-el-25-percent-de-sus-nuevos-edificios-en-2025>
- ArchDaily (2021a), *El futuro es ahora: Casas impresas en 3D comienzan a ser habitadas en los Países Bajos*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.mx/mx/961093/el-futuro-es-ahora-casas-impresas-en-3d-comienzan-a-ser-habitadas-en-los-paises-bajos#:~:text=los%20Pa%C3%ADses%20Bajos-,El%20futuro%20es%20ahora%3A%20Casas%20impresas%20en%203D%20comienzan%20a,habitadas%20en%20los%20Pa%C3%ADses%20Bajos&text=Si%20hace%20algunos%20a%C3%B1os%20la,que%20ha%20llegado%20para%20quedarse>.
- ArchDaily (2021b), *La estética de la automatización: análisis de una vivienda asequible impresa en 3D*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.mx/mx/964468/la-estetica-de-la-automatizacion-analisis-de-una-vivienda-asequible-impresa-en-3d>
- Arunothayan, R., Nematollahi, B., Bong, S.H., Ranade, R., Sanjayan, J. (2020), *Hardened Properties of 3D Printable Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete for Digital Construction Applications*. Rheol. Proc. Constr. Mater. 23: 355–362). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22566-7_41
- Baskar, S., Sharma, R., Chinnappan, A., Sehrawat, R. (2021), *“Handbook of Solid Waste Management”*, Singapore, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7525-9_64-1
- Baz, B., Aouad, G., Leblond, P., Al-Mansouri, O., D’hondt, M., Remond, S. (2020). *Mechanical assessment of concrete – Steel bonding in 3D printed elements*. Constr. Build. Mater. 256:119457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119457>
- Be more 3D (2024), *Por fin construcción y sencillez unidas*. Accesado el 11 de abril de 2024 en: <https://bemore3d.com/>

Buswell, R.A., Soar, R.C., Gibb, A.G.F., Thorpe A. (2007), *Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*. Automation in Construction, Volume 16, Issue 2, Pages 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>.

CEMEX (2022), *CEMEX es la primera compañía que introduce impresión 3D con concreto en México*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: [https://www.cemexmexico.com/-/cemex-es-primera-compa%C3%B1a-que-introduce-impresi%C3%B3n-3d-con-concreto-en-m%C3%A9xico#:~:text=CEMEX%20es%20Primera%20Compa%C3%B1a%20que%20Introduce%20Impresi%C3%B3n%203D%20con%20Concreto%20en%20M%C3%A9xico,-Monterrey%2C%20M%C3%A9xico%2004&text=CEMEX%2C%20S.A.B.%20de%20C.V.%20\(%E2%80%9C,y%20de%20grado%20de%20construcci%C3%B3n](https://www.cemexmexico.com/-/cemex-es-primera-compa%C3%B1a-que-introduce-impresi%C3%B3n-3d-con-concreto-en-m%C3%A9xico#:~:text=CEMEX%20es%20Primera%20Compa%C3%B1a%20que%20Introduce%20Impresi%C3%B3n%203D%20con%20Concreto%20en%20M%C3%A9xico,-Monterrey%2C%20M%C3%A9xico%2004&text=CEMEX%2C%20S.A.B.%20de%20C.V.%20(%E2%80%9C,y%20de%20grado%20de%20construcci%C3%B3n).

CentroUrbano (2023), *Nuevo León presenta su Programa Especial de Vivienda 2022-2027*. Accesado el 29 de septiembre de 2023 en: <https://centrourbano.com/vivienda/nuevo-leon-programa-vivienda/>

Cicione, A., Kruger, J., Richard, Walls, S., Van Zijl, G. (2021), *An experimental study of the behavior of 3D printed concrete at elevated temperatures*. Fire Safety J. 120:103075. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103075>.

CMIC-CEICO (2023), *Principales variaciones en el precio de los insumos y su impacto en las obras*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: https://www.cmic.org.mx/comisiones/Tematicas/costosyp/Informes_IPP/2023/CEICO_Informe_Octubre_2023.pdf

Colorado, H. A., Velásquez, E. I. G. Monteiro, S. N. (2020), *Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives*. J. Mater. Res. Tech. 9(4):8221-8234. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062>

De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G., Agusti-Juan, I. (2018), *Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials*. Cem. Concr. Res. 112:25–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>

De Souza, E.A., Borges, P.H., Stengel, T., Nematollahi, B., Bos, F.P. (2024), *3D printed sustainable low-cost materials for construction of affordable social housing in Brazil: Potential, challenges, and research needs*. J. Build. Eng. 87:108985. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108985>

Díaz-Aguilera, J.H. (2024), *“Estudio del diseño eficiente, optimización, durabilidad y sostenibilidad de una pasta de cemento activado alcalinamente con base en metacaolín y piedra caliza”*, Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Ding, T., Xiao, J., Zou, S., Zhou, X (2020), *Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers*. Compos. Struct., 254:112808. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112808>

El Economista. (2022a). *Hay que hacer algo rápido: Gene Towle sobre la falta de oferta de vivienda social*. Accesado el 29 de agosto de 2023 en: <https://www.eleconomista.com.mx/econohabitat/Hay-que-hacer-algo-rapido-Gene-Towle-sobre-la-falta-de-oferta-de-vivienda-social-20220325-0091.html>

El Economista (2022b), *Canadevi advierte rezago del 30% en colocación de vivienda en Nuevo León*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Canadevi-advierete-rezago-del-30-en-colocacion-de-vivienda-en-Nuevo-Leon-20220921-0129.html>

El Economista (2023), *Nuevo León se presentará un programa para complementar créditos por déficit de 16,000 viviendas*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Nuevo-Leon-se-presentara-un-programa-para-complementar-creditos-por-deficit-de-16000-viviendas-20230423-0008.html>

- El Inaty, F., Baz, B.A., Aouad, G. (2022). *Long-term durability assessment of 3D printed concrete*. J. Adhesion Sci. Technol. 37:1-16. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2102717>
- EnteUrbano (2020), *¿Cuánto cuesta una casa impresa en 3D?*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: https://enteurbano.com/cuanto-cuesta-una-casa-impresa-en-3d/#google_vignette
- European Parliament (2023), *Circular economy: definition, importance and benefits*. Accessed 17 April 2024 in: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Forbes México (2018), *100 casas serán construidas con impresoras 3D en El Salvador*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: <https://www.forbes.com.mx/casas-seran-construidas-con-impresoras-3d-en-el-salvador/>
- Fořt, J., Černý, R. (2020), *Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios*. Was. Manag. 118:510-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.004>
- García-Alvarado, R., Martínez, A., González, L., Auat, F. (2020), *Projections of 3D-printed construction in Chile*. Rev. Ing. Constr. 25:60-72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100060>
- GAMA Arquitectura (2024), *¿Cuánto cuesta construir una casa en México?*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: <https://www.tallergama.com/cuanto-cuesta-construir-una-casa/>
- Gobierno de México (2023a), *Data México: Nuevo León*. Accesado el 27 de septiembre de 2023 en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/nuevo-leon-nl>
- Gobierno de México (2023b), *Conferencia Matutina Jueves 9 de febrero de 2023*. Accesado el 5 de octubre de 2023 en <https://www.youtube.com/watch?v=et4AjkIs8w>
- GRUPO QVICK (2023), *¿Cuánto cuesta construir una casa en 2024? – México*. Accesado el 18 de abril de 2024 en: <https://www.grupoqvick.com/post/cu%C3%A1nto-cuesta-construir-una-casa-en-2023#:~:text=Construir%20una%20casa%20de%20inter%C3%A9s,es%20de%20%2423%2C762.37%2F%20m%20promedio>
- He, Y., Zhang, Y., Zhang, C., Zhou, H. (2020), *Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall*. Energy Build. 222:110110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110110>
- HOLCIM México (2024), *Impresión 3d en la construcción: transformando el futuro con holcim*. Accesado el 18 de abril de 2024 en: <https://www.holcim.com.mx/impresion-3d>
- Hossain, M. U., Ng, S. T., Antwi-Afari, P., Ben Amor (2020), *Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction*. Ren. Sust. Ener. Rev. 130:109948. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>
- INEGI (2020), *Panorama sociodemográfico de México 2020*. Accesado el 26 de septiembre de 2023 en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197926.pdf
- INEGI (2021), *Encuesta Nacional de Vivienda 2020*. Accesado el 27 de septiembre de 2023 en: <https://inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/envi/ENVI2020.pdf>
- INEGI (2023), *Indicador mensual de la actividad industrial por entidad federativa 2023*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/imaief/imaief2023_06.pdf
- Instituto de la Vivienda (2021), *Diagnostico Instituto de la Vivienda de Nuevo León*. Accesado el 9 de octubre de 2023 en: https://pbr-sed.nl.gob.mx/sites/default/files/diagnostico_ivnl.pdf

- Interempresas (2020), *Arquitectura y construcción*. Accesado el 28 de septiembre de 2023 en: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/298814-Cada-metro-cuadrado-construido-en-edificacion-residencial-supone-441-Kg-de-CO2.html>
- Jo., J.H., Jo, B.W., Cho, W., Kim, J.H. (2020). *Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials*. Int. J. Concr. Struct. Mater. 14:13. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>
- Joh, C., Lee, J., Bui, T.Q., Park, J., Yang, I.H. (2020), *Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete*. Materials, 13(21):4919. <https://doi.org/10.3390/ma13214919>
- Kaliyavaradhan, S. K., Tung-Chai, L., Mo, K. H. (2020), *CO2 sequestration of fresh concrete slurry waste: Optimization of CO2 uptake and feasible use as a potential cement binder*. J. CO2 Util. 42:101330. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101330>
- Khan, S.A., Koç, M., Al-Ghamdi, S.G. (2021), *Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications*. J. Clean. Prod. 303:127027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>
- Kreiger, E., Kreiger, M., Case, M. (2019), *Development of the Construction Processes for Reinforced Additively Constructed Concrete*. Additive Manufact. 28:39-49. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.015>
- Liu, C., Yue, S., Zhou, C., Sun, H., Deng, S., Gao, F., Tan, Y. (2021), *Anisotropic mechanical properties of extrusion-based 3D printed layered concrete*. J. Mater. Sci. 56(30):16851–16864. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06416-w>
- Lozano, G.O., Sánchez, O.S. (2022), *Vivienda en México, un problema de calidad, de habitabilidad, del barrio y de la ciudad. Variantes a la medición del rezago*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: https://revistaeypp.flacso.org.ar/files/revistas/1667932268_143-171.pdf
- Ma, G., Li, Z., Wang, L., Wang, F., Sanjayan., J. (2019), *Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing*. Constr. Build. Mater. 202:770-783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
- MARQ (2021). *Se logra impresión 3D del concreto más resistente*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: <https://marq.mx/es/se-logra-impresion-3d-del-concreto-mas-resistente/>
- Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., Bernal, S. A. (2022), *Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration*. J. Clean. Produc. 362:132486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>
- Murcia, D.H., Genedy, M., Taha., M.M.R. (2020), *Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete*. Constr. Build. Mater. 262:120559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120559>
- Maury-Ramírez, A., Illera-Perozo, D., Mesa, J. A. (2022), *Circular Economy in the Construction Sector: A Case Study of Santiago de Cali (Colombia)*. Sust. 14(3):1923. <https://doi.org/10.3390/su14031923>
- Mendoza-Rangel, J.M., Díaz-Aguilera, J.H. (2023), *Circular economy in the Latin American cement and concrete industry: a sustainable solution of design, durability, materials, and processes*. Revista ALCONPAT. 13:328-348. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>
- Milenio (2018), *NL, entre los estados que generan más basura: Inegi*. Accesado el 26 de septiembre de 2023 en: <https://www.milenio.com/estados/nl-entre-los-estados-que-generan-mas-basura-inegi>
- Miranda, P.E. (2019), “*Análisis de costos entre vivienda de interés social vertical y vivienda de interés social horizontal en San Juan del Río*”, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Mohan, M.K., Rahul, A.V., van Dam, B., Zeidan, T., De Schutter, G., Van Tittelboom, K. (2022) *Performance criteria, environmental impact and cost assessment for 3D printable concrete mixtures*. Resour. Conserv. Recycl. 181:106255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106255>

- Moelich, G.M., Kruger, J., Combrinck, R. (2020), *Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete*. Compos. Part B: Eng., 200:108313. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108313>.
- Motalebi, A., Khondoker, M.A.H., Kabir, G. (2023). *A Systematic Review of Life Cycle Assessments of 3D Concrete Printing*. Sust. Operat. Computs. 5:41-50. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.08.003>
- Natives3D (2018). *Sika, el especialista en impresión 3D de concreto*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: <https://www.3dnatives.com/es/sika-impresion-3d-de-concreto-220520182/>
- Nematollahi, B., Xia, M., Sanjayan, J. (2017), “*Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies*.” en: 34th ISARC, Taipei (Taiwan), pp. 260-267. <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0035>.
- Nodehi, M., Aguayo, F., Nodehi, S.E., Gholampour A., Ozbakkaloglu, T. & Gencil O. (2022). *Durability properties of 3D printed concrete (3DPC)*. Autom. Constr. 142:104479. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104479>
- NoParast, M., Hematian, M., Ashrafiyan, A., Amiri, M. J. T., Jafari, H. A. (2021), *Development of a non-dominated sorting genetic algorithm for implementing circular economy strategies in the concrete industry*. Sust. Prod. & Cons. 27:933-946. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.009>
- OSHA (2022), *Commonly Used Statistics | Occupational Safety and Health Administration*. Accesado el 31 de agosto de 2023 en: <https://www.osha.gov/data/commonstats>
- Özalp, F., Yilmaz, H.D. (2020), *Fresh and Hardened Properties of 3D High-Strength Printing Concrete and Its Recent Applications*. Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng., 44(S1):319–330. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00370-4>
- Perales-Santillan, M.E., Díaz-Aguilera, J.H., Mendoza-Rangel, J.M. (2024), *Evaluation of the rheological behavior for alkaline-activated cements of metakaolin and limestone for its potential application in 3D printing*. Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01363-3>
- Paz-Pérez, C.A. (2016), “*El impacto de la sustentabilidad en la vivienda en serie de nuevo león*”, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Pérez-Cortes, P., Escalante-García, J.I. (2020), *Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaoline A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers*. J. Crean. Prod. 273:123118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123118>
- Rahul, A.V., Santhanam, M., Meena, H., y Ghani, Z. (2019), *Mechanical characterization of 3D printable concrete*. Constr. Build. Mater., 227:116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>
- Robayo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., Villaquirán-Cacedo, M.A., Arjona, S.D. (2023), *3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector*. Autom. Constr. 146:104693. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
- Rosas-Díaz, F., García-Hernández, D.G., Mendoza-Rangel, J.M., Terán-Torres, B., Galindo-Rodríguez, S.A., Juárez-Alvarado, C.A. (2022), *Development of a Portland Cement-Based Material with Agave salmiana Leaves Bioaggregate*. Maters. 17:6000. <https://doi.org/10.3390/ma15176000>
- Ruiz-Jaramillo, C. (2021), “*Development of a cement-based extrusion system for application in 3D printing*”, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Şahin, H. G., Mardani-Aghabaglou, A. (2022), *Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review*. Constr. Build. Maters. 316:125865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125865>
- Sanjayan, J.G., Nazari, A., Nematollahi, B. (2019), “*3D concrete printing technology: construction and building applications*”, MA: Butterworth-Heinemann, Cambridge, England.

- Schuldt, S.J., Jagoda, J.A., Hoisington, A.J., Delorit J.D. (2021), *A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments*. Autom. Constr. 125:103642. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103642>
- Secretaría de Desarrollo Sustentable (2020), *Norma ambiental estatal NAE-SDS-002-2019*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <http://aire.nl.gob.mx/docs/normatividad/NAE-SDS-002-2019.pdf>
- Senado de la República (2021), *El 50 por ciento de las emisiones contaminantes pertenecen al sector de la construcción*. Accesado del 26 de septiembre de 2023 en: <http://comunicacion.senado.gob.mx/index.php/informacion/boletines/50135-el-50-por-ciento-de-las-emisiones-contaminantes-pertenecen-al-sector-de-la-construccion.html>
- Sikora, P., Techman, M., Federowicz, K., El-Khayatt, A.M., Saudi, H.A., Elrahman, M.A., Hoffmann, M., Stephan, D., Chung, S.Y., (2022) *Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens*. C. Stud. Constr. Mater. 17:e01320. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01320>
- Song, H., Li, X. (2021). *An Overview on the Rheology, Mechanical Properties, Durability, 3D Printing, and Microstructural Performance of Nanomaterials in Cementitious Composites*. Materials. 14:2950. <https://doi.org/10.3390/ma14112950>
- Tecnológico de Monterrey. (2021). *Los matices de la vivienda en México*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: <https://futurociudades.tec.mx/es/los-matices-de-la-vivienda-en-mexico>
- UANL-FIC (2023), *1er Simposio del Cuerpo Académico Consolidado de Tecnología del Concreto “La Industria de la Construcción y la Economía Circular: Estrategias y Avances en Sostenibilidad”*. Accessed 21 May 2024 in: <https://fic.uanl.mx/1er-simposio-cactc2023/>.
- UN-Habitat (2019), *Elements of adequate housing*. Accessed 25 September 2023 in: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/elementos-de-una-vivienda-adeuada>
- United Nations (2015), *Sustainable development goals*. Accessed 1 September 2023 in: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- UNEP (2020), *Building sector emissions hit record high in 2019: UN report*. Accessed 28 September 2023 in: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/emisiones-del-sector-de-los-edificios-alcanzaron-nivel#:~:text=Eficiencia%20de%20recursos-,Emisiones%20del%20sector%20de%20los%20edificios%20alcanzaron%20nivel,2019%3A%20Informe%20de%20la%20ONU&text=La%20operaci%C3%B3n%20y%20construcci%C3%B3n%20de,2%20relacionadas%20con%20la%20energ%C3%ADa.>
- Van Breugel, K. (2017). “Ageing Infrastructure and Circular Economy: Challenges and Risks”, in: *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, CSEE’17, Barcelona (España)*, pp. 1-8.
- Van Der Putten, J., De Volder, M., Van den Heede, P., De Schutter, G., Van Tittelboom, K. (2020), *3D Printing of Concrete: The Influence on Chloride Penetration*, RILEM Inter. Conf. Concr. Digital Fabric. 28(2):500-507. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_51
- Velvizhi, G., Shanthakumar, S., Das, B., Pugazhendhi, A., Priya, T.S., Ashok, B., Nanthagopal, K., Vignesh, R., Karthick, C. (2020), *Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy*. Sci. Total Environ. 731:138049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138049>
- Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-Acosta, A., Tobón, J., John, V.M. (2022), *Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality*. RILEM techn. Let. 7:30-46. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155>

- Vijayalaxmi, J., Parth, S. (2023), *Comparative analysis of concrete 3D printing and conventional construction technique for housing*. Innov. Proc. Mater. Additive Manufac. 177-190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-86011-6.00011-8>
- WINSUN (2014), *Company news*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: <http://www.winsun3d.com/En/News/index/p1/2>
- Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M. (2019), *Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion*. Cem. Concr. Res., 119:132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
- Xiao, J., Han, N., Zhang, L., Zou, S. (2021), *Mechanical and microstructural evolution of 3D printed concrete with polyethylene fiber and recycled sand at elevated temperatures*. Constr. Build. Mater. 293:123524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123524>
- Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A.I., Fawzy, S., Rooney, D.W., Pow-Seng, Y. (2022), *Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues*. Env. Chem. Let. 21:55-80. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
- Ye, J., Cui, C., Yu, J., Yu, K., Xiao, J. (2021), *Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber*. Compos. Part B: Eng., 211:108639. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108639>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Yang, L., Liu, G., Chen, Y., Yu, S., Du, H. (2021), *Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials*. Mater. Struct. 54:1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01632-x>

Cementos activados alcalinamente basados en piedra caliza-ceniza volante: Efecto de la activación con MgO-NaOH, resistencia a la compresión y productos de reacción

I. E. Betancourt-Castillo¹ , O. Burciaga-Díaz^{2*} 

*Autor de Contacto: oswaldo.bd@saltillo.tecnm.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.737>

Recibido: 25/04/2024 | Correcciones recibidas: 12/05/2024 | Aceptado: 14/05/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

Este estudio investiga los efectos de la activación alcalina con MgO-NaOH sobre la resistencia a la compresión y los productos de reacción de los cementos activados alcalinamente con polvo de piedra caliza (PCLz) y ceniza volante de Clase C (CV). Los resultados mostraron que las sustituciones de 25%<PCLz<75% permitieron 25-76 MPa a los 360 días de curado, obteniendo la mayor resistencia con 25%PCLz-75%CV y 50%PCLz-50%CV con 10 y 12% NaOH-MgO respectivamente. Los resultados sugieren que el PCLz participa en las reacciones de hidratación como agente de relleno y nucleante mientras que la CV es el principal contribuyente al avance de las reacciones químicas. La difracción de rayos X (XRD), el análisis térmico (TA) y microscopía electrónica de barrido (SEM) indicaron la formación de productos del tipo M-S-H y C, N-A-S-H, además de fases carbonatadas como hidrotalcita, gaylussita y pirssonita. No se observaron trazas de MgO sin reaccionar, lo que indica su completa incorporación en los productos de reacción.

Palabras clave: Cementos activados alcalinamente; polvo de caliza; ceniza volante; activación alcalina; propiedades mecánicas; caracterización microestructural.

Citar como: Betancourt-Castillo, I. E., Burciaga-Díaz, O. (2024), “Cementos activados alcalinamente basados en piedra caliza-ceniza volante: Efecto de la activación con MgO-NaOH, resistencia a la compresión y productos de reacción”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 141 – 156, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.737>

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/I.T. de Saltillo, Saltillo, Coahuila, México

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor I.E. Betancourt-Castillo contribuyó con la escritura del borrador original, investigación, recopilación de datos, análisis formal de resultados, interpretación y discusión de resultados, el autor O. Burciaga-Díaz con la idea original, revisión y edición del artículo, conceptualización, supervisión del proyecto y adquisición de fondos.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

Alkali-activated cements based on limestone-fly ash: Effect of the MgO-NaOH activation, compressive strength and reaction products

ABSTRACT

This study investigates the effects of alkaline activation with MgO-NaOH on the compressive strength and reaction products of alkali activated cements of limestone powder (PCLz) and Class C fly ash (CV). Results showed that substitutions of 25%<PCLz<75% allowed 25-76 MPa at 360 days of curing, obtaining the highest strength with 25%PCLz-75%CV and 50%PCLz-50%CV with 10 and 12% NaOH-MgO, respectively. The results suggest that PCLz participates in hydration reactions as a filler and nucleating agent while the CV is the main contributor to the advance of the chemical reactions. X-ray diffraction (XRD), Thermal analysis (TA) and Scanning Electron Microscopy (SEM) indicated the formation of M-S-H, and C, N-A-S-H-type products, in addition to carbonate phases such as hydrotalcite, gaylussite, and pirssonite. Traces of unreacted MgO were not observed indicating its whole incorporation into the reaction products.

Keywords: alkali-activated cements; limestone powder; fly ash; alkaline-activation; mechanical properties; microstructural characterization.

Cimentos ativados alcalinamente à base de calcário-cinzas volantes: Efeito da ativação com MgO-NaOH, resistência à compressão e produtos de reação

RESUMO

Este estudo investiga os efeitos da ativação alcalina com MgO-NaOH na resistência à compressão e nos produtos de reação dos cimentos ativados alcalinamente com pó de calcário (PCLz) e cinzas volantes de Classe C (CV). Os resultados mostraram que substituições de 25% < PCLz < 75% permitiram resistências à compressão de 25-76 MPa aos 360 dias de cura, obtendo a maior resistência com 25% PCLz-75% CV e 50% PCLz-50% CV com 10 e 12% NaOH-MgO respectivamente. Os resultados sugerem que o PCLz participa das reações de hidratação como agente de enchimento e nucleante, enquanto o CV é o principal contribuinte para o avanço das reações químicas. A difração de raios-X (XRD), análise térmica (TA) e microscopia eletrônica de varredura (SEM) indicaram a formação de produtos do tipo M-S-H e C, N-A-S-H, além de fases carbonatadas como hidrotalcita, gáilussita e pirssonita. Vestígios de MgO não reagido não foram observados, indicando sua completa incorporação nos produtos de reação.

Palavras-chave: Cimentos ativados alcalinamente; pó de calcário; cinza volante; ativação alcalina; propriedades mecânicas; caracterização microestrutural.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La industria del cemento está experimentando actualmente una transformación significativa, impulsada por un esfuerzo colectivo para adoptar prácticas sostenibles y reducir el impacto ambiental. Este cambio implica un enfoque multidisciplinario destinado a promover la reutilización de materiales de desecho, implementar tecnologías de bajo impacto ambiental, optimizar el diseño de materiales para mayor eficiencia y reducir el factor de clinker, como un componente primario de la producción de cemento tradicional (Villagrán-Zaccardi et al., 2022).

Un avance notable es el desarrollo de cementos activados alcalinamente, que incorporan materiales como piedra caliza pulverizada y otras alternativas como subproductos industriales. Estos cementos han surgido como una alternativa más sostenible al cemento Portland, ofreciendo numerosas ventajas en diversos aspectos de la sostenibilidad. Se ha demostrado que reducen costos, disminuyen los requisitos de energía de producción, disminuyen las emisiones de CO₂ y contribuyen a los objetivos de economía circular a través de principios de diseño eficientes (Alsaman et al., 2021; Mendoza-Rangel et al., 2023). Además, los cementos activados alcalinamente exhiben propiedades mecánicas y de durabilidad favorables, lo que mejora aún más su consideración como materiales de construcción sostenibles.

De particular interés ha sido uso de subproductos como la ceniza volante para mejorar la sostenibilidad de estos materiales cementosos (Mohamed et al., 2023). Este enfoque no solo ayuda a minimizar los residuos, sino que también resalta el compromiso de la industria con la maximización de la eficiencia de recursos y la minimización del impacto ambiental (Juenger et al., 2019).

La piedra caliza es un mineral naturalmente abundante en la corteza terrestre con alta cristalinidad y la ceniza volante (CV) es un subproducto industrial derivado de la quema de carbón mineral en plantas de generación de energía con una producción anual de aproximadamente 750 millones de toneladas, de las cuales el 80% se deposita en vertederos (Temujin et al., 2019). Estos materiales ofrecen propiedades interesantes y son una alternativa viable al cemento Portland tradicional al reducir las emisiones de carbono asociadas con la producción de clinker (R.M. Andrew, 2018). La piedra caliza se usa comúnmente para producir cemento Portland, sin embargo, en los últimos años ha ganado interés como precursor cementante en cementos activados alcalinamente (Chan y Zhang et al., 2023). Su uso en cementos substituidos también parece ser prometedor ya que pueden exhibir una durabilidad mejorada y un rendimiento a largo plazo, lo que los hace atractivos para una variedad de aplicaciones de construcción; sin embargo, se necesita más investigación (Hosam M. Saleh y Samir B. Eskander, 2020; Díaz-Aguilera, 2024).

La activación alcalina de cementos mezclados utilizando una combinación de óxido de magnesio (MgO) e hidróxido de sodio (NaOH) ha sido poco explorada como una estrategia prometedor para mejorar la reactividad y el rendimiento de las materias primas. La activación alcalina implica la disolución y recombinación de fases amorfas contenidas en la ceniza volante, lo que lleva a la consolidación de productos cementicios estables. Ambos procesos resultan en la precipitación de geles del tipo C,N-A-S-H y otras fases secundarias que contribuyen a la resistencia mecánica y durabilidad (O. Burciaga-Díaz et al., 2018). La incorporación de polvo de piedra caliza también beneficia las propiedades mecánicas debido al efecto de relleno y nucleación experimentado bajo el ambiente alcalino; además, este es un material ampliamente abundante y de bajo costo.

El uso de MgO en combinación con NaOH ofrece varias ventajas. El MgO actúa como un catalizador, acelerando las reacciones de disolución y polimerización durante la activación alcalina. También promueve la formación de geles del tipo M-S-H, lo que mejora las propiedades mecánicas (Juan et al., 2021; Jiang et al., 2023). Por otro lado, el NaOH es un fuerte activador alcalino que mejora la reactividad de diversos materiales cementantes suplementarios (SCMs por sus siglas en inglés).

El uso de activadores de NaOH y MgO en cementos representa un aspecto fundamental de las prácticas de construcción sostenible. Si bien ambos activadores contribuyen al proceso de activación alcalina, es imperativo evaluar su idoneidad desde el punto de vista de la sostenibilidad. En ciertas regiones geográficas, la producción de MgO puede implicar un menor impacto ambiental en comparación con el NaOH, ofreciendo así una ventaja potencial en términos de sostenibilidad (Mendes et al., 2021; Hongqiang et al., 2023). Esta consideración subraya la importancia de evaluar y discutir las implicaciones ambientales asociadas con la elección de los agentes activantes en procesos de activación alcalina.

A pesar de los potenciales beneficios de la activación alcalina, la optimización del proceso de activación y la caracterización de los materiales resultantes siguen siendo un desafío clave. Las propiedades de los cementos activados están influenciadas por varios factores, incluida la composición de la mezcla, la relación MgO/NaOH, las condiciones de curado y la concentración del activador. Comprender las interacciones entre estos factores es esencial para adaptar las propiedades de los cementos activados para cumplir con requisitos específicos de rendimiento. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo investigar los efectos de las mezclas de MgO-NaOH como activadores alcalinos en la evolución de la resistencia a la compresión y la microestructura de cementos de polvo de piedra caliza y ceniza volante mezclados, variando sistemáticamente los parámetros de activación y caracterizando los materiales resultantes. Los resultados obtenidos se basaron en el uso de DRX, MEB y análisis térmico gravimétrico que permitieron la evaluación detallada de la microestructura y composición de fases de pastas activadas alcalinamente, proporcionando información sobre su desempeño en tiempos de curado prolongados. El objetivo principal fue comprender los mecanismos involucrados en el proceso de activación alcalina y su efecto sobre las propiedades de cementos activados de piedra caliza-CV hasta 360 días de curado. Los hallazgos contribuyen al desarrollo de materiales cementicios sostenibles que incorporan altas cantidades de materiales de bajo costo y disponibles.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Para la preparación de las pastas activadas alcalinamente, se utilizaron piedra caliza comercial y ceniza volante Clase C-CV como los principales precursores sólidos. La Tabla 1 muestra la composición química determinada por fluorescencia de rayos X para ambos materiales. Se observa que el polvo de caliza (PClz) está compuesto principalmente por CaO en forma de calcita, con una densidad de 2.8 g/cm³ (medida en base a la norma ASTM C 188-17, 2017) y un área superficial de 450 m²/kg determinada por el ensayo de permeabilidad al aire Blaine (ASTM C204 - 11, 2011). Por otro lado, la CV contiene SiO₂ y Al₂O₃ con área superficial de 525 m²/kg y cantidades menores de MgO contenidas en la fase vítrea del subproducto. El PClz, se obtuvo mediante molienda de arena caliza comercial con tamaño de partícula <4mm durante 25 minutos en un molino de bolas, para reducir el tamaño de partícula del material y mejorar su reactividad, mientras que la ceniza volante Clase C se utilizó tal como se recibió.

Tabla 1. Composición química (determinada por Fluorescencia de rayos x) y propiedades físicas de los precursores solidos utilizados

	Oxidos (% en peso)										Densidad, (kg/m ³)	PPI*	Area sup. m ² /kg
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	Na ₂ O			
PClz	56.84	1.052	---	0.28	---	---	0.63	0.054	--	0.052	2.8	41	450
CV	19.4	42.23	23.03	3.47	2.02	1.24	0	4.42	--	--	---	0.06	525

*PPI= Perdidas por ignición

La Figura 1a) muestra los patrones de difracción de rayos X del polvo de caliza y la CV. Se observaron fases cristalinas de calcita para PClz con diferentes intensidades, con uno de los picos más prominentes alrededor de $29^\circ 2\theta$. En contraste, la CV mostró un halo amorfo entre $20-40^\circ 2\theta$, que relacionado con la estructura vítrea presente en el material. Se ha reportado que la fase amorfa está relacionada con la reactividad del material bajo condiciones alcalinas para formar fases cementicias. Por lo tanto, se podría anticipar que el contacto de la CV con una solución alcalina promoverá la ruptura de la estructura molecular para formar nuevas fases cementantes (Guanqi et al., 2023). Algunas fases cristalinas adicionales detectadas fueron cuarzo, mullita y hematita (Vivek et al., 2019) como se puede ver en la Figura (a). Por otro lado, la Figura (b) muestra información sobre la distribución del tamaño de partícula para ambos materiales. Se observa que la CV tiene un $d_{50}=10.9 \mu\text{m}$ mientras que el PClz es más grueso con un $d_{50}=17.9 \mu\text{m}$. Las partículas de caliza mostraron una morfología irregular mientras que la CV exhibió una morfología esférica típica como se observa en las Figuras (c) y (d) respectivamente. Como activantes alcalinos, se utilizaron polvo de MgO y pellets de NaOH; ambos grado reactivo. La reactividad del MgO fue de 32 s medida por el ensayo de ácido acético descrito previamente por (Shand, 2006).

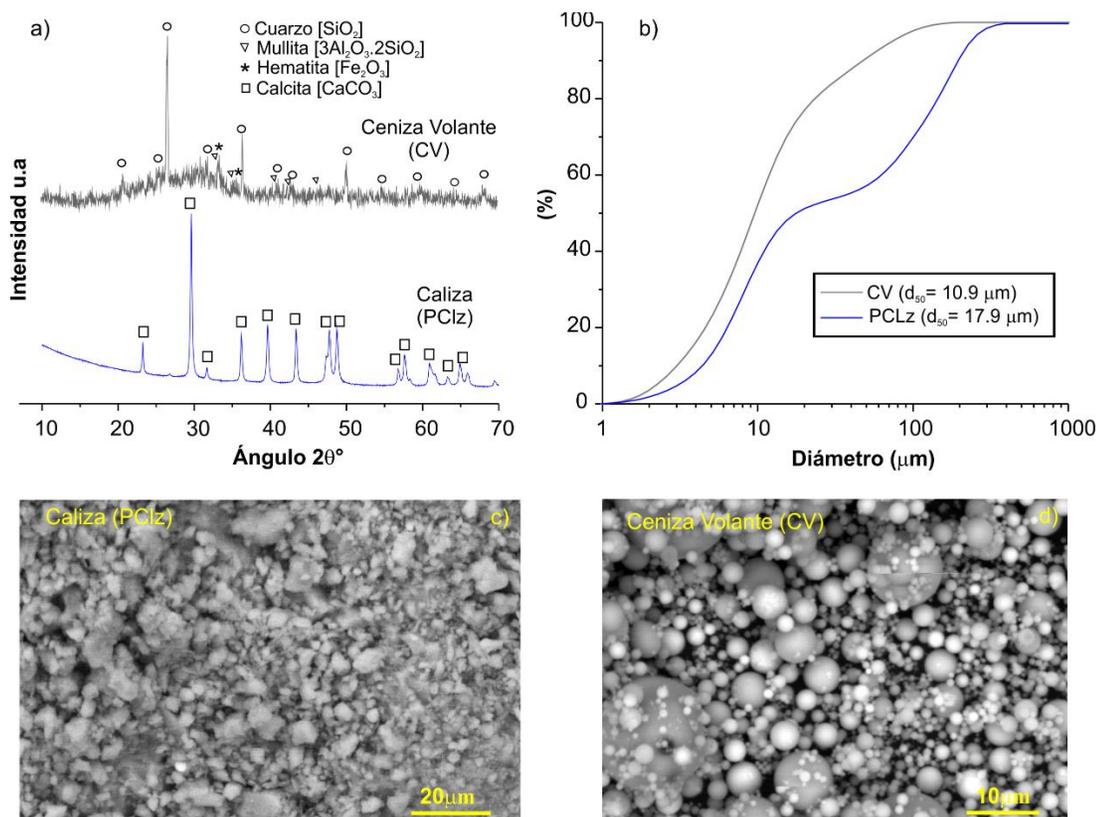


Figura 1. Patrones de DRX de PClz y CV clase C a), resultados de distribución de tamaño de partícula (Burciaga-Díaz et al. 2023), morfología del PClz c) y morfología de la CV d).

2.2 Preparación de muestras

Para la activación química de los materiales, se utilizó una mezcla de MgO:NaOH en una proporción de 1:1 como agente activador, acompañado de agua para disolver los precursores sólidos, en una proporción de agua/ligante = 0.25 relativa a la masa del ligante (PClz + CV). Las mezclas frescas se curaron a 40°C durante 24 horas, seguido de un curado posterior a 20°C hasta 360 días. Las concentraciones del activador alcalino utilizado se presentan en la Tabla 2. Se evaluaron nueve formulaciones de pastas, variando las proporciones de PClz/CV de 100/0, 75/25,

50/50, 25/75, a 0/100. Las pastas se activaron con 8%, 10%, 12%, 14% y 16% de MgO-NaOH (en proporción 1:1) y se representaron con la nomenclatura MO-NH en la línea de ID. Para el estudio, se utilizaron muestras de referencia correspondientes a las pastas con 100% CV (MO-NH-0-12) y 100% PClz (MO-NH-100-12) para comparar el rendimiento de las formulaciones activadas alcalinamente que incorporan diferentes cantidades de PClz/CV.

Tabla 2. Composición de las pastas formuladas.

ID	PCl _z (% peso)	CV (% peso)	Mezcla activantes relación 1:1 (% peso)
MO-NH-25-10	25	75	10
MO-NH-25-14	25	75	14
MO-NH-75-10	75	25	10
MO-NH-75-14	75	25	14
MO-NH-50-8	50	50	8
MO-NH-50-16	50	50	16
MO-NH-0-12	0	100	12
MO-NH-100-12	100	0	12
MO-NH-50-12	50	50	12

Las soluciones alcalinas se prepararon disolviendo MgO y NaOH en agua en proporciones apropiadas para cada formulación. Posteriormente, las pastas se prepararon agregando los precursores en polvo a la solución previamente preparada con agitación constante durante 3 minutos. Las pastas se vaciaron a moldes cúbicos de 2.5 cm. Las pastas se vibraron durante 20 segundos para eliminar el aire atrapado, y los moldes se cubrieron con paños húmedos y plástico para evitar pérdidas de humedad. Posteriormente, los cementos activados alcalinamente se colocaron en una cámara isotérmica a 40°C. Después de 24 horas, las muestras cúbicas se desmoldaron y se almacenaron en bolsas de plástico, continuando con su curado hasta 360 días a 20°C.

Después de 1, 7, 14, 28, 90, 180 y 360 días, se utilizó una prensa hidráulica con una velocidad de carga constante de 300 N/s para medir la resistencia a la compresión de 4 cubos seleccionados al azar, reportando el valor promedio. Después de las pruebas, se recogieron fragmentos sólidos y se sumergieron en acetona. Después de 24 horas, se retiró la acetona y los fragmentos recogidos se secaron en horno durante 2 días a 40°C para detener las reacciones de hidratación. Varios artículos en la literatura han informado sobre la interrupción de la hidratación del cemento cuando se expone a solventes orgánicos como la acetona, lo cual ha demostrado ser efectivo. Sin embargo, vale la pena mencionar que los solventes pueden inducir interacciones físicas con los hidratos, lo que resulta en contracciones microestructurales y la condensación potencial de productos secundarios. Sin embargo, las técnicas de caracterización disponibles no proporcionan suficiente información sobre la formación de subproductos que pudieran dificultar una interpretación adecuada (Zhang y Scherer, 2021).

2.3 Caracterización

Los fragmentos recolectados fueron pulverizados manualmente en un mortero de ágata y tamizados a través de un tamiz #140 para su posterior caracterización por difracción de rayos X (DRX) (PANalytical, Empyrean) en un rango de 10°-80° (2θ) con una velocidad de paso de 0.03°/s utilizando radiación CuKα. Para el análisis termogravimétrico, se utilizó un analizador térmico simultáneo ATG/ADT SDT Q-600 con un crisol de alúmina, con una velocidad de calentamiento

de 10°C/min hasta 900°C para evaluar los cambios de masa y los eventos exotérmicos y endotérmicos asociados con la descomposición y formación de productos de reacción. Las muestras seleccionadas fueron montadas en resina epoxi, pulidas y analizadas bajo un microscopio electrónico de barrido (MEB) (JEOL JSM-6610 LV) con un accesorio de espectroscopía de dispersión de energía (EDS) (Oxford Instruments X-max) de 20 mm². Las imágenes se obtuvieron de áreas representativas en el modo de electrones retrodispersados (BSE) a 500x con una corriente de 20 kV en modo de alto vacío

3. RESULTADOS

3.1 Resistencia a la compresión

La Figura 1 muestra los resultados de resistencia a la compresión (RC) para los cementos activados alcalinamente PClz-CV como precursores sólidos, basados en la cantidad de caliza y % MgO-NaOH, hasta 360 días de curado. Para la mayoría de los sistemas, se observó un aumento en la RC desde el primer día de curado, lo que sugiere que la combinación de agentes alcalinos promovió una disolución efectiva de especies reactivas y la condensación de productos de reacción con buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, el sistema con 100% caliza (MO-100-12) no mostró ningún aumento en la resistencia en ninguna fecha de curado, lo que sugiere que las condiciones de activación para este sistema no favorecieron la disolución de la caliza y la formación de productos cementantes.

El gráfico muestra que a medida que aumenta la presencia de PClz en la formulación, del 25% al 50%, las propiedades mecánicas disminuyeron, incluso para adiciones de 75% (MO-NH-75-10, MO-NH-75-14). Se ha reportado que la adición de PClz del 30% promovieron ganancias efectivas de resistencia a la compresión en sistemas de cemento Portland, debido al Ca²⁺ liberado de la caliza que participa en reacciones de hidratación y por su efecto de relleno según Gao et al. (2015).

Por otro lado, la pasta MO-NH-25-10 (con 25% PClz-75% CV) desarrolló la mayor resistencia a la compresión (CS) de 76 MPa a los 360 días de curado. Además, las formulaciones que contenían 50% PClz-50% CV con 8% y 16% de activador lograron niveles de RC entre 7.4-11.7 MPa y 48.3-49.2 MPa a 1 y 360 días de curado, respectivamente, lo cual es interesante considerando la alta cantidad de PClz (50%) presente en las formulaciones. Es importante destacar que la pasta MO-NH-50-12 se elaboró dos veces para confirmar la reproducibilidad de la experimentación. La resistencia a la compresión se mantuvo muy similar hasta los 360 días, con una desviación estándar de aproximadamente 5 MPa, lo que demuestra una buena reproducibilidad de los resultados. La tendencia positiva en el desarrollo de la resistencia a la compresión indicó que el uso de MgO combinado con NaOH favorece la formación de cementos estables, incluso hasta los 360 días de curado. Los resultados son interesantes, considerando que la mayoría de los reportes en la literatura suelen centrarse en propiedades evaluadas dentro de períodos de curado de hasta 28 días. Estudios adicionales que evalúen propiedades a tiempos más prolongados (es decir, hasta 360 días) como se propone en esta investigación son necesarios para comprender mejor los efectos de PClz y las mezclas de NaOH-MgO en la estabilidad de los cementos activados alcalinamente. En este sentido, las muestras evaluadas demostraron estabilidad dimensional a pesar de la presencia de MgO, que se sabe que puede formar fases expansivas como la brucita (Mg(OH)₂) en ligantes base cemento Portland, lo que sugiere su papel significativo en la formación de productos de reacción estables.

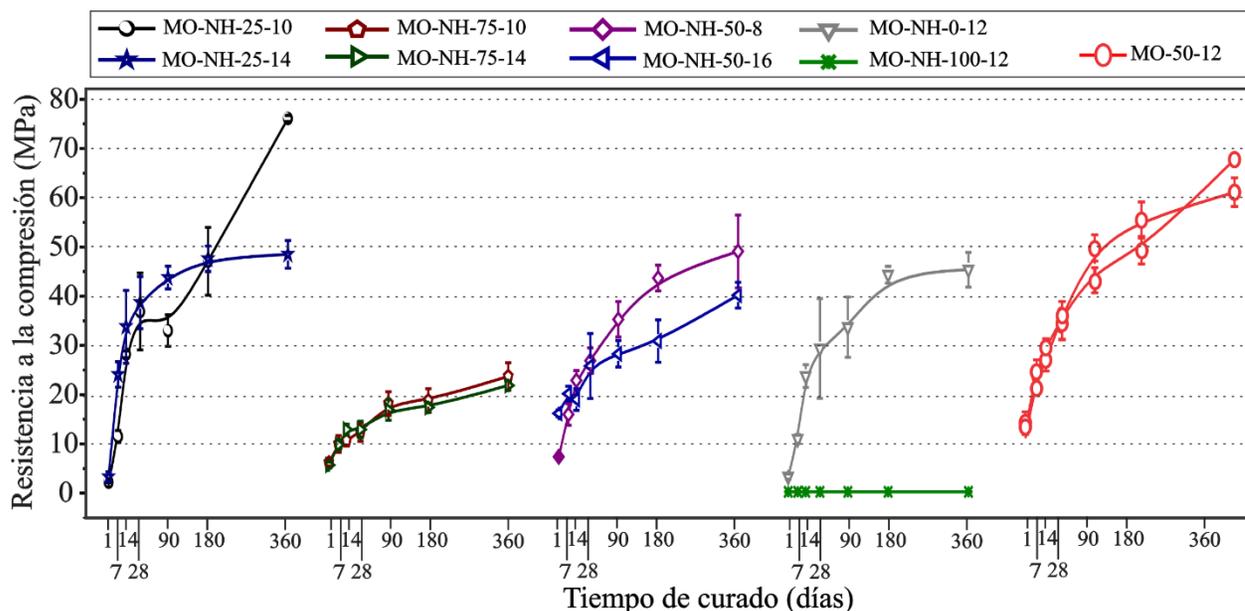


Figura 1. Resistencia a la compresión vs tiempo de pastas activadas con MgO-NaOH hasta 360 días de curado.

3.2 Difracción de rayos-X (DRX)

La Figura 2 muestra los patrones de difracción de rayos X (DRX) de las pastas MO-0-12, MO-25-10 y MO-50-12, a 28 y 180 días de curado; como referencia, se incluyen los patrones caliza y CV sin reaccionar. Las pastas analizadas fueron elegidas en función de los niveles más altos de resistencia a la compresión observados a 360 días. Después del proceso de activación química de los precursores sólidos, los patrones no experimentaron diferencias importantes en comparación con los precursores iniciales (PCLz y ceniza volante). Las reflexiones de la calcita permanecieron y se observó un halo amorfo entre $25\text{-}35^\circ 2\theta$ a partir de los 28 días de curado en adelante, que se asoció con la fase vítrea de la CV y la posible formación de productos de reacción desordenados como geles de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) con incorporación de Na y Al en su estructura. En cementos activados alcalinamente, el C-S-H ($5\text{CaO}\cdot 3\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se ha reportado a $29.4^\circ 2\theta$ (CaCO_3 , PDF # 01-086-2340), dificultando su detección debido a su naturaleza poco cristalina/amorfa y por la superposición con los picos de calcita (CaCO_3) (Mobasher et al. 2016). Sin embargo, según los resultados de resistencia a la compresión en ambas fechas de curado, esta fase podría formarse, ya que es la fase principal responsable de las propiedades mecánicas en los cementos activados alcalinamente, según lo informado por Taewan Kim y Yubin Jun (2018). Cuando la cantidad de PCLz aumentó al 50% en los cementos activados alcalinamente, la intensidad del halo amorfo disminuyó debido a un efecto de disolución causado por la adición de la caliza en la que la cantidad de calcita cristalina atenuó los productos amorfos, como se puede observar en la formulación MO-50-12 en comparación con MO-0-12 y MO-25-10.

También se detectaron algunas reflexiones menores de gaylusita [$(\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$; PDF # 002-0122)] y pirsonita [$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$; PDF # 24-1065] en todas las pastas, las cuales se formaron debido a la disolución parcial de la calcita con los activadores químicos (Ortega-Zavala et al. 2019; Firdous et al. 2021). Además, en todos los patrones de difracción, se detectaron algunas reflexiones cristalinas de baja intensidad de hidrotalcita [$\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$; PDF # 014-0191] en. Fei Jin et al. (2015) reportaron que esta fase llena los poros de la microestructura y aumenta las propiedades mecánicas, lo que también podría haber contribuido a los valores de resistencia a la compresión observados en diferentes fechas de curado; la hidrotalcita se forma comúnmente en cementos activados alcalinamente que contienen Mg en su composición (Shade et al. 2022). Por

último, se identificaron reflexiones de cuarzo, que pueden estar presentes en la materia prima y actuar como relleno inerte.

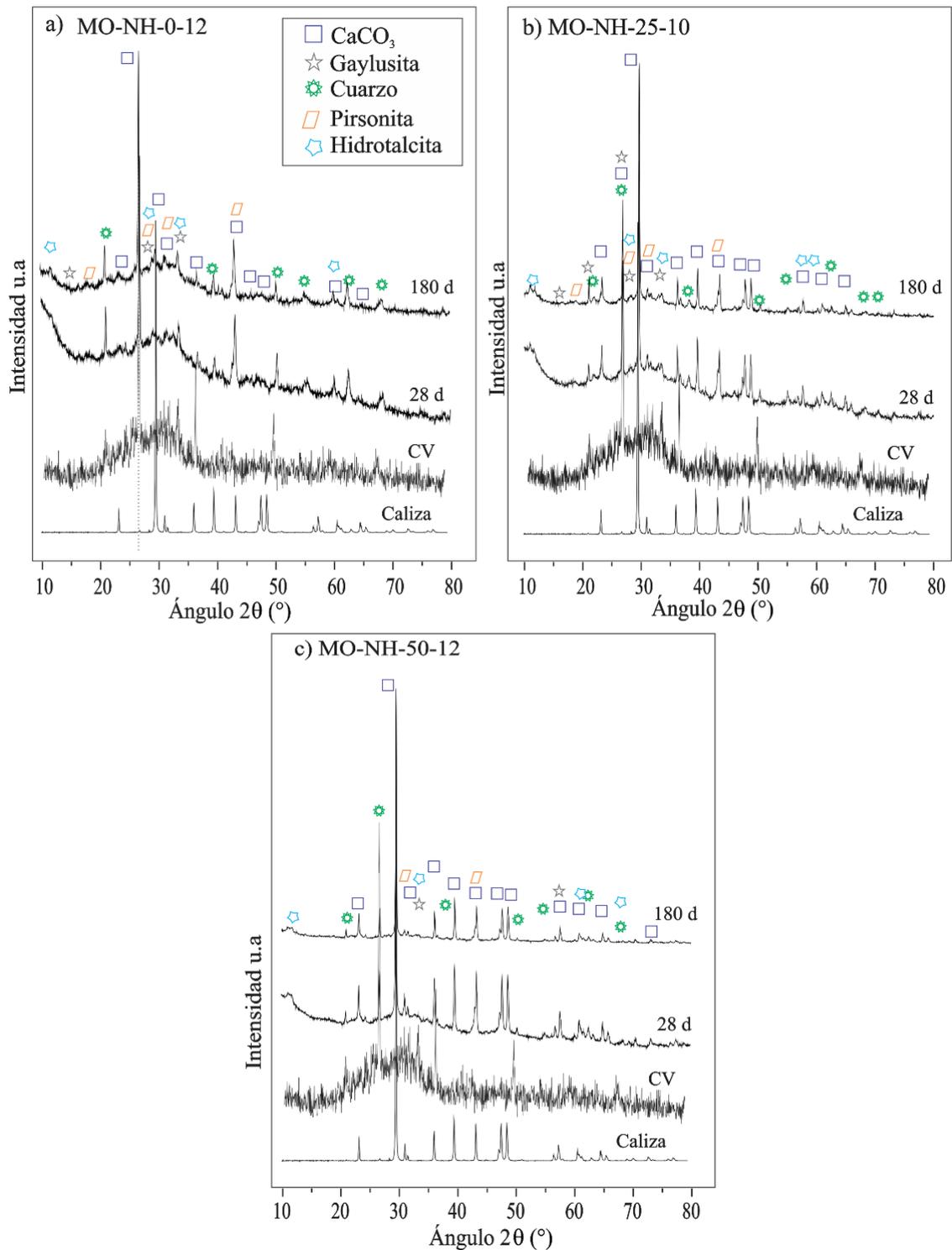


Figure 2. XRD patterns for different pastes MO-0-12 (a), MO-25-10 (b) and MO-50-12 at 28 and 180 days of curing.

3.3 Análisis térmico

La Figura 3 muestra los resultados de análisis termogravimétrico para los sistemas de caliza y CV activados alcalinamente a 28 y 180 días de curado, en términos de pérdida de peso y su derivada. Para ambas fechas de curado y para todos los sistemas, se observaron diversas pérdidas de peso correspondientes a eventos endotérmicos. Hasta los 200°C, ocurrió la deshidratación progresiva de productos como el C-S-H. Esta es la fase principal responsable de la ganancia de propiedades mecánicas en los cementos hidratados. Además, puede ocurrir la descomposición de fases hidratadas como Mg-(A)-S-H intermezcladas con C-S-H. En las pastas que contenían más del 25% de PClz, también se observó la descomposición de pirsonita y gaylussita. La presencia de estas fases sugiere que, durante las reacciones de hidratación y con el tiempo, la piedra caliza se disolvió parcialmente, liberando iones Ca^{2+} y CO_3^{2-} favoreciendo la formación de los carbonatos mencionados (pirsonita y gaylussita) además de C-S-H, en acuerdo con Wang, D. et al. 2018.

A medida que la temperatura aumentó hasta los 400°C, ocurrió la descomposición de hidrotalcita, también conocida como hidróxidos de doble capa de Mg-Al. Burciaga-Díaz et al. (2018) reportaron pérdidas de peso similares entre 550-600°C en cementos de escoria de alto horno activados con una mezcla de 4-8% de MgO-NaOH, que relacionaron con la deshidroxilación de grupos hidroxilo (Mg-OH) unidos a iones Mg^{2+} presentes en fases de silicato de magnesio hidratado (M-S-H) formadas por la interacción del MgO añadido con la sílice reactiva de la estructura amorfa de la CV en el ambiente alcalino. Se observa que la presencia de MgO detectada previamente en el análisis químico en la CV sin reaccionar se encapsula dentro de la fase vítrea del precursor, como indicó previamente la ausencia de cualquier fase cristalina discernible en el análisis de difracción de rayos X (XRD). Más que funcionar como un activador alcalino, el MgO se considera como un aditivo en este contexto. Cuando se combina con NaOH, el MgO ejerce un efecto sinérgico, facilitando la formación de fases cementantes clave como geles de M-S-H (Hidrato de Silicato de Magnesio) e hidrotalcita. Estas fases contribuyen significativamente a la resistencia mecánica y durabilidad de los cementos activados alcalinamente, mejorando sus características de rendimiento general (Xinyuan et al. 2017). Alrededor de los 750°C, el pico endotérmico detectado se relacionó con la descomposición de CaCO_3 presente en la PClz no reactiva utilizada como precursor cementante (caliza) en base a la siguiente reacción $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (Karunadasa et al., 2019). A los 180 días de curado, los termogramas no presentaron cambios significativos, pero las pérdidas de masa fueron mayores en el rango de 50-250°C en comparación con las de los 28 días. Esto sugiere que a edades tardías, la formación de productos como el C,N-A-S-H fue mayor, en acuerdo con el aumento de la resistencia a la compresión observado en las diferentes formulaciones.

Aparentemente, la relación PClz-CV influyó en la formación de M-S-H como se puede observar en las muestras MO-NH-25-10 y MO-NH-50-12 en comparación con MO-NH-0-12, que no mostró su formación. Todas las fases discutidas se observaron mejor en las curvas derivadas, que muestran señales endotérmicas bien definidas correspondientes a las etapas de descomposición de los productos precipitados.

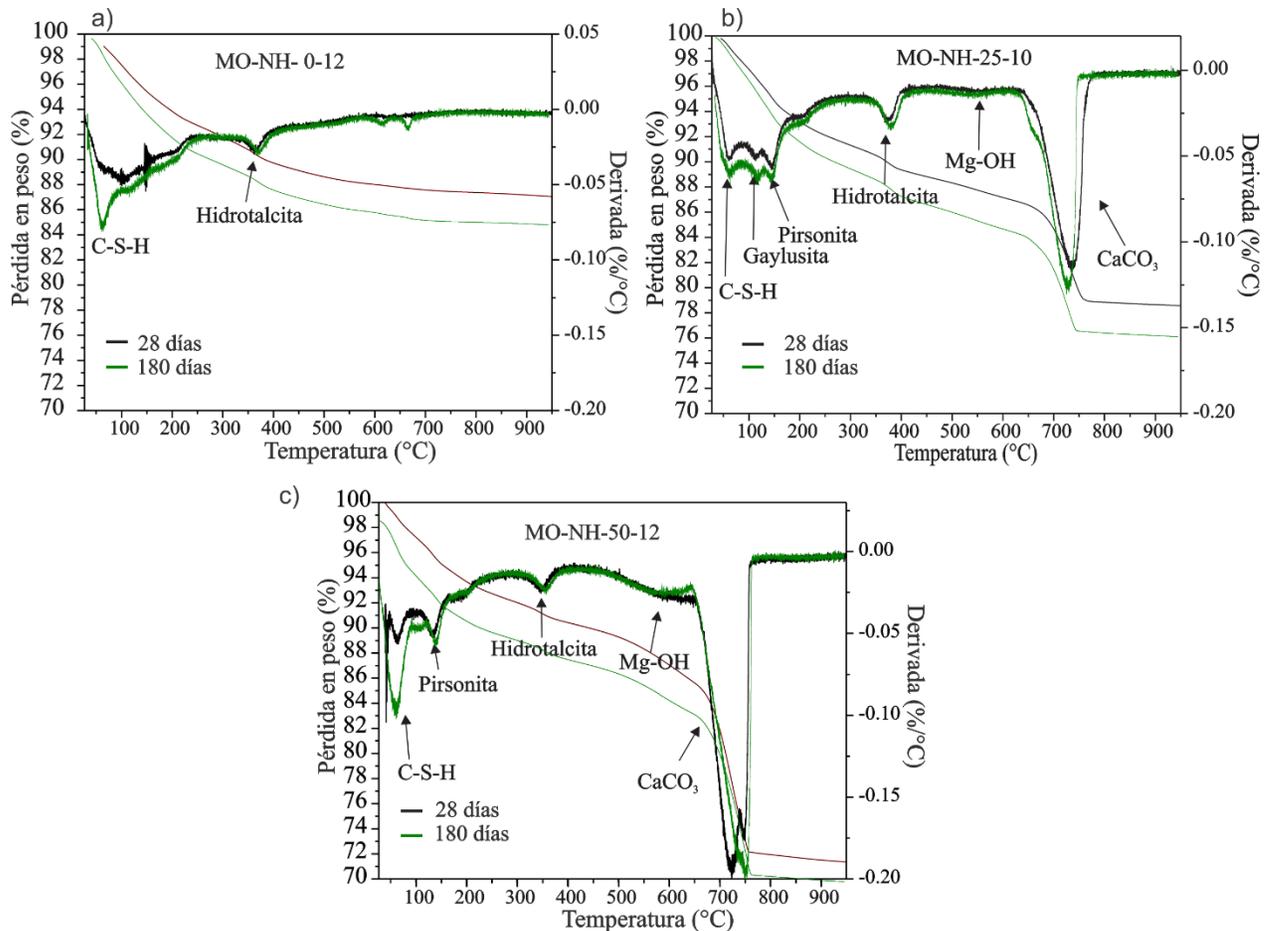


Figura 3. Resultados de análisis térmico gravimétrico y su derivada de las pastas MO-0-12 (a), MO-25-10 (B) y MO-50-12 (C) a 28 y 180 días.

3.4 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La Figura 4 muestra microestructuras por electrones retrodispersados a los 28 días de curado para las pastas MO-0-12, MO-25-10 y MO-50-12; su elección se consideró en base a su alta resistencia a la compresión. En general, se pudieron observar partículas de caliza identificadas por su morfología irregular y lisa, mientras que las partículas de CV presentaron morfología esférica y tono gris claro, encontradas parcialmente y totalmente reaccionadas. En la pasta MO-NH-0-10, la microestructura contiene partículas de CV sin reaccionar dispersas homogéneamente en una matriz de productos de reacción de tono gris oscuro. Alrededor de algunas partículas de CV se identificaron anillos de reacción correspondientes a fases cementantes precipitadas producidas por la interacción de la CV con la solución de MgO-NaOH, especialmente en las pastas MO-NH-25-10 y MO-NH-50-12. La baja porosidad observada en las diferentes pastas fue consistente con los valores de resistencia a la compresión observados a 28 días, que superaron los 29 MPa. Con PClz por encima del 25% en sustitución de CV, la microestructura fue más densificada, lo que sugiere que las condiciones de activación favorecieron la disolución de especies reactivas y la formación de productos de reacción que mejoraron la resistencia mecánica. Un estudio previo (Kalinkin et al. 2020) vinculó la presencia de PClz en pastas de CV con una reacción más intensiva y acelerada que en ausencia de PClz, lo que sugiere la aceleración del proceso de geopolimerización por la participación activa de CaCO_3 como sitios de nucleación en concordancia con la consolidación observada en las microestructuras. Por otro lado, para la formulación MO-50-12, se observó una interfase densa entre las fronteras de grano de caliza y la matriz de producto de reacción, lo que

permitió que su resistencia a la compresión estuviera entre los valores más altos obtenidos dentro de estas formulaciones.

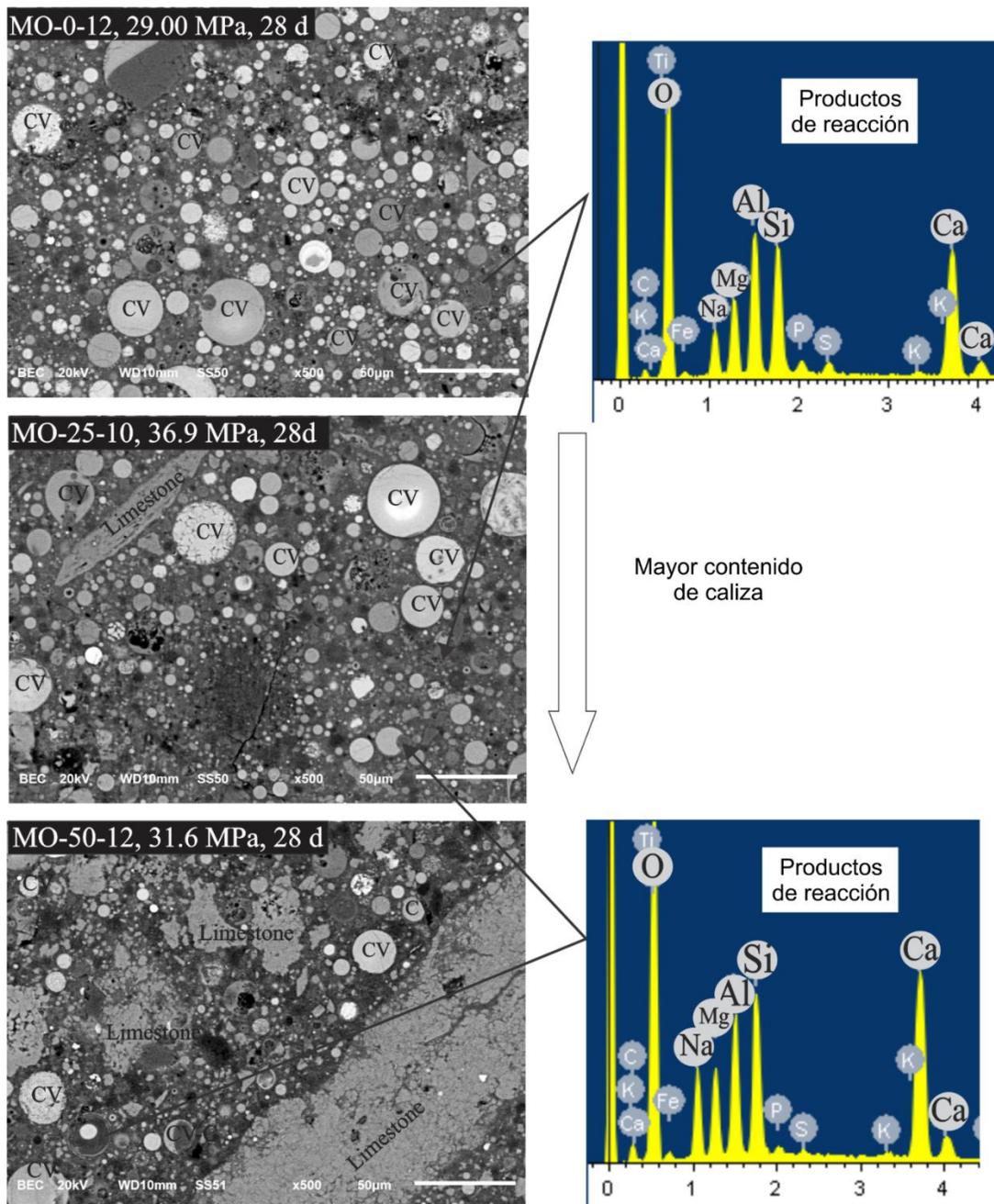


Figura 4. Resultados de microscopía electrónica de barrido de muestras MO-0-12, MO-25-10 y MO-50-12 a 28 días.

La cantidad relativamente alta de caliza no reaccionada en la pasta MO-50-12 podría haber actuado como relleno, reforzando las microestructuras. Este efecto ocurrió debido a que las partículas de caliza llenaron los espacios disponibles entre partículas, densificando las microestructuras, como lo reportado previamente por Li et al. (2020). Sin embargo, es posible que el PClz haya participado parcialmente en los procesos de hidratación al formar C,N-A-S-H, actuando como agente de nucleación, en acuerdo con Xiang et al. (2018). Los resultados de espectroscopía por energía dispersiva confirmaron la formación de productos de reacción con alta concentración de Al, Si, Ca,

Mg y Na, en acuerdo con la precipitación de geles de tipo C,N-A-S-H (Walkley et al., 2016). Los anillos de reacción alrededor de las partículas de CV mostraron concentraciones más altas de Ca que los productos de reacción, indicando diferencias en la composición química de las fases precipitadas.

Finalmente, no se identificaron partículas de MgO sin reaccionar, lo que indica su participación efectiva en las reacciones químicas e incorporación en los productos para formar geles de tipo M-S-H y fases de hidrotalcita (Bernard et al. 2017; Lauermannová et al. 2020), como se discutió anteriormente.

4. CONCLUSIONES

Considerando los resultados de resistencia a la compresión, el uso de MgO-NaOH facilitó la disolución efectiva de la mezcla caliza y CV. Especialmente, las muestras con 50% de PClz-50% de CV y 25% de PClz-75% de CV, con 12% y 10% de NaOH-MgO respectivamente, exhibieron resistencias a la compresión de 69 y 76 MPa, respectivamente, lo que sugiere la participación activa tanto de la CV como PClz en las reacciones de hidratación. Los resultados de DRX y análisis térmico indicaron la disolución parcial de PClz en condiciones alcalinas, dando lugar a la formación de fases carbonatadas, mientras que la CV actuó como el material más reactivo que contribuye al aumento de la resistencia.

Las observaciones por MEB en etapas revelaron que PClz mejoró la resistencia mediante un efecto de relleno, lo que resultó en una densificación de la microestructura. Sin embargo, concentraciones de PClz superiores a 75% ocasionaron una reducción sustancial en la resistencia a la compresión debido a efectos de dilución. El análisis por MEB y EDS sugirió la formación de microestructuras de baja porosidad caracterizadas por altas concentraciones de Si, Al, Ca, Mg y Na, asociadas con la formación de C-S-H (con incorporación de Al y Na), M-S-H, gaylusita, pirsonita e hidrotalcita. Además, la presencia de MgO como aditivo no mostró efectos perjudiciales en las pastas activadas alcalinamente dentro del período de curado de 360 días. Estos hallazgos destacan el potencial del PClz para utilizarse en sustitución parcial de la CV. En general, este estudio presenta resultados que pueden servir de base para formular otros cementos activados alcalinamente que incorporan PClz en combinación con precursores cementosos más reactivos.

5. AGRADECIMIENTOS

I.E. Betancourt Castillo agradece al CONACYT por la beca doctoral 711629 otorgada para cursar estudios de posgrado en el TecNM campus Saltillo. Los autores también agradecen el apoyo financiero otorgado por el proyecto 5609.15 del Tecnológico Nacional de México y las instalaciones proporcionadas por el Instituto Tecnológico de Saltillo para el desarrollo de la investigación.

6. REFERENCIAS

- Villágran-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-Acosta, A., Tobón, J., Jhon. V. M. (2022). *Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality*. RILEM Technical Letters, 7: 30-46.
- Alsaman, A., Assi, L. N., Kareem, R. S., Carter, K., Ziehl, P. (2021). *Energy and CO2 emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete*, Cleaner Environmental Systems, 3, 100047, <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100047>.
- Mendoza-Rangel, J. M., Díaz-Aguilera, J. H. (2023). *Circular economy in the Latin American*

- cement and concrete industry: a sustainable solution of design, durability, materials, and processes. *Revista ALCONPAT*, 13(3), 328 - 348. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>
- Mohamed, O. A., Najm, O., Ahmed, E. (2023) *Alkali-activated slag & fly ash as sustainable alternatives to OPC: Sorptivity and strength development characteristics of mortar*, *Cleaner Materials*, 8, 100188, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100188>.
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., Bernal, S. A. (2019), *Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights*, *Cement and Concrete Research*, 122, 257-273, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>.
- Temuujin, J., Surenjav, E., Ruescher, C. H., Vahlbruch, J. (2019), *Processing and uses of fly ash addressing radioactivity (critical review)*, *Chemosphere*, 216, 866-882, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.112>.
- Chan, C. L., Zhang, M. (2023), *Effect of limestone on engineering properties of alkali-activated concrete: A review*, *Construction and Building Materials*, 362, 129709, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129709>.
- Ortega-Zavala, D. E., Santana- Carrillo, J. L., Burciaga Díaz, O. Escalante-García. J. I. (2019). *An initial study on alkali activated limestone binders*. *Cement and Concrete Research*. 120, 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.002>
- Dehui Wang, Caijun Shi, Nima Farzadnia, Zhenguang Shi, Huangfei Jia, Zhihua Ou. (2018). *A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures*. *Construction and Building Materials*. 181, 659-672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>
- Fei Jin, Kai Gu, Adel Abdollahzadeh, and Abir Al-Tabbaa (2015). *Effects of different reactive MgOs on the hydration of MgO-Activated GGBS paste*. *J. Mater. Civ. Eng.* 27. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001009](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001009)
- Saleh, H. M., Eskander, S. B. (2020). *18 – Innovative cement-based materials for environmental protection and restoration*, in: *Samui Pijush, Kim, Dookie, R. Iyer Nagesh, Chaudhary Sandeep* (Eds.), *New Materials in Civil Engineering*, Butterworth-Heinemann, pp. 613-641. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03623.x>
- Díaz-Aguilera, J. H. (2024). *Estudio del diseño eficiente, optimización, durabilidad y sostenibilidad de una pasta de mortero activado alcalinamente con base en metacaolín y piedra caliza*. Doctorado thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/27180>
- Xiang, J., Liu, L., Cui, X., He, Y., Zheng, G., Shi, C. (2018). *Effect of limestone on rheological, shrinkage and mechanical properties of alkali – Activated slag/fly ash grouting materials*. *Construction and Building Materials*. 191, 1285-1292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.209>
- Burciaga-Díaz, O., Betancourt-Castillo, I. E. (2018). *Characterization of novel blast-furnace slag cement pastes and mortars activated with a reactive mixture of MgO-NaOH*. *Cement and Concrete Research*. 105, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.002>
- Kalinkin, A. M., Gurevich, B. I., Myshenkov, M. S. Chislov, M. V., Kalinkina, E. V., Zvereva, I. A., Cherkezova-Zheleva, Z., Paneva, D., Petkova, V. (2020). *Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymers: Effect of Calcite Addition and Mechanical Activation*. *Minerals*. 10(9):827. <https://doi.org/10.3390/min10090827>
- Juan, H., Weihao, Z., Wenbin, B., Tingting, H., Junhong, H., Xuefeng, S. (2021). *Effect of reactive MgO on hydration and properties of alkali-activated slag pastes with different activators*, *Construction and Building Materials*, 271, 121608, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121608>
- Jiang, Y., Jia, Y., Zou, X., Zhang, J., Zou, Y. (2023). *Evolution mechanism of the low-carbon MgO-*

- based alkali-activated system under different heat-treatment conditions. *Materials Science and Technology*, 39(18), 3220–3228. <https://doi.org/10.1080/02670836.2023.2245659>.
- Mendes, B. C., Pedroti, L. G., Maurício, C., Vieira, F., Marvila, M., Azevedo, A. R. G. Franco de Carvalho, J. F., Ribeiro, J. C. L. (2021) *Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review*, *Journal of Building Engineering*, 35, 2021, 102010, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102010>.
- Hongqiang, M., Xiaomeng L., Xuan, Z., Xiaoyan N., Youliang F. (2022) *Effect of active MgO on the hydration kinetics characteristics and microstructures of alkali-activated fly ash-slag materials*, *Construction and Building Materials*, 361, 129677, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129677>.
- ASTM C188-17. (2017). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, ASTM international, West Conshohocken, PA.
- ASTM C204 – 11. (2011). *Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus*. ASTM international, West Conshohocken, PA.
- Guanqi, W., Biqin, D., Guohao, F., Yanshuai W. (2023). *Understanding reactive amorphous phases of fly ash through the acidolysis*, *Cement and Concrete Composites*, 140, 105102, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105102>.
- Vivek, G., Salman, S., Sandeep, C. (2019) *Characterization of different types of fly ash collected from various sources in Central India*, *Materials Today: Proceedings*, 18, Part 7, 5076-5080, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.503>.
- Shand, M. A. (2006). *The Chemistry and Technology of Magnesia*, Wiley, Hoboken, NJ, USA.
- Zhang, Z., Scherer, G. W. (2021), *Physical and chemical effects of isopropanol exchange in cement-based materials*, *Cement and Concrete Research*, 145, 106461, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106461>.
- Wang, D, Gao, X., Wang, R., Larsson, S., Benzerzour, M. (2020). *Elevated curing temperature-associated strength and mechanisms of reactive MgO-activated industrial by-products solidified soils*. *Marine Georesources & Geotechnology*, 38(6), 659–671. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1610817>
- Xinyuan K, Bernal, S. A., Provis, J. L. (2017). *Uptake of chloride and carbonate by Mg-Al and Ca-Al layered double hydroxides in simulated pore solutions of alkali-activated slag cement*, *Cement and Concrete Research*, 100, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.015>.
- Karunadasa, K. S. P., Manoratne, C. H., Pitawala, H.M., Rajapakse, R.M.G. (2019). *Thermal decomposition of calcium carbonate (calcite polymorph) as examined by in-situ high temperature X-ray powder diffraction*, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 134, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.05.023>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022369719301970>)
- Wang, Z., Park, S., Khalid, H. R., Lee, H. K. (2021) *Hydration properties of alkali-activated fly ash/slag binders modified by MgO with different reactivity*, *Journal of Building Engineering*, 44, 103252. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103252>.
- Firdous, R., Hirsch, T., Klimm, D., Lothenbach, B., Stephan, D. (2021). *Reaction of calcium carbonate minerals in sodium silicate solutions and its role in alkali-activated systems*. *Minerals Engineering*. 165, 106849. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106849>.
- Schade, T., Bellmann, F., Middendorf, B. (2022). *Quantitative analysis of C-(K)-A-S-H-amount and hydrotalcite phase content in finely ground highly alkali-activated slag/silica fume blended cementitious material*, *Cement and Concrete Research*, 153, 2022, 106706, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106706>.
- Burciaga-Díaz, O., Betancourt-Castillo, I. E., Escalante-García, J. I. (2023). *Limestone and class C fly ash blends activated with binary alkalis of Na₂CO₃-NaOH and MgO-NaOH: Reaction products and environmental impact*. *Cement and Concrete Composites*, 137, 104949.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104949>

Andrew, R. M. (2019), *Global CO₂ emissions from cement production*, Earth Science Data (1928-2018), <http://doi.org/10.5194/essd-2019-152>.

Mobasher, N., Bernal, S. A., Provis, J. L. (2016) *Structural evolution of an alkali sulfate activated slag cement*, Journal of Nuclear Materials, Volume 468, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.11.016>.

Li, C. H., Jiang, L. (2020). *Utilization of limestone powder as an activator for early-age strength improvement of slag concrete*, Construct. Build. Mater. 253, 119257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119257>.

Lauermannová, A-M., Paterová, I., Patera J., Skrbek, K., Jankovský, O., Bartůněk, V. (2020) *Hydrotalcites in Construction Materials*. Applied Sciences. 10(22):7989. <https://doi.org/10.3390/app10227989>

Walkley, B., San Nicolas, R., Sani, M. A., Rees, G. R., Hanna, J. V., van Deventer, J. S. J., John L. Provis, J. L. (2016). *Phase evolution of C-(N)-A-S-H/N-A-S-H gel blends investigated via alkali-activation of synthetic calcium aluminosilicate precursors*, Cement and Concrete Research, 89, 2016, 120-135, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.010>.

Bernard, E., Lothenbach, B., Rentsch, D., Pochard, I., Dauzères, A. (2017). *Formation of magnesium silicate hydrates (M-S-H)*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 99, 2017,142-157, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.005>.

Taewan Kim and Yubin Jun. (2018). *Mechanical Properties of Na₂CO₃-Activated High-Volume GGBFS Cement Paste*. Advances in Civil Engineering. Vol. 2018, Article ID 8905194, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/8905194>

Ávila-López, U., Almanza-Robles, J.M., Escalante-García, J. I. (2015). *Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods*. Constr. Build Mater. 82, 296-303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.085>

Gao, X., Yu, Q. L., Brouwers. H. J. H. (2015). *Properties of alkali activated slag-fly ash blends with limestone addition*. Cement and Concrete Composites, 59, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.007>

Comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de concreto celular de autoclave con diferentes escalas

J. L. Varela-Rivera^{1*} , J. Cacep-Rodríguez¹ ,
L. E. Fernández-Baqueiro¹ , J. A. Moreno-Herrera¹ 

*Autor de contacto: vrivera@correo.uady.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.725>

Recibido: 12/02/2024 | Correcciones recibidas: 03/04/2024 | Aceptado: 24/04/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

Se presenta un estudio sobre el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de concreto celular de autoclave (CCA). Se ensayaron cinco muros confinados de CCA a escala reducida sujetos a cargas laterales. Las variables estudiadas fueron el factor de escala geométrica y la relación de aspecto de los muros. Se consideraron escalas 1:2 y 1:3. Con base en el comportamiento de los muros a escala reducida y natural se determinaron factores de escala experimentales. Los factores de escala geométrica existentes se compararon con los correspondientes experimentales. Se concluye que los factores de escala geométrica pueden utilizarse para predecir la resistencia a cortante y resistencia máxima a cortante de los muros con escalas 1:2 y 1:3. Los factores de escala geométrica sólo pueden utilizarse para predecir la rigidez y la distorsión asociados con la resistencia máxima a cortante.

Palabras clave: muros confinados; concreto celular de autoclave; escalamiento; comportamiento a cortante; cargas cíclicas reversibles en el plano.

Citar como: Varela-Rivera, J. L., Cacep-Rodríguez, J., Fernández-Baqueiro, L. E., Moreno-Herrera, J. A. (2024), “Comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de concreto celular de autoclave con diferentes escalas”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 157 – 173, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.725>

¹ Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería: Mérida, Yucatán, MX.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Varela-Rivera contribuyó con la conceptualización (30%), la metodología (40%), la supervisión (50%) y el análisis formal (30%) del programa experimental y la redacción del borrador original (50%). El autor Cacep-Rodríguez contribuyó con la conceptualización (30%), la metodología (30%) y el análisis formal (40%) del programa experimental y la redacción del borrador original (50%). El autor Fernández-Baqueiro contribuyó con la conceptualización (20%), la supervisión (25%) y el análisis formal (20%) del programa experimental, y la revisión y edición del borrador original (50%). El autor Moreno-Herrera contribuyó con la conceptualización (20%), la metodología (30%), la supervisión (25%) y el análisis formal (10%) del programa experimental, y la revisión y edición del borrador original (50%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación.

Cualquier discusión, incluyendo la respuesta de los autores, se publicará en el primer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

Shear behavior of autoclaved aerated concrete confined masonry walls with different scales

ABSTRACT

An experimental study on the shear behavior of autoclaved aerated concrete (AAC) confined masonry walls is presented. A total of five reduced-scale walls were tested in the laboratory under reverse lateral loads. Variables studied were the geometric scaling factor and the aspect ratio of walls. Scales considered were 1:2 and 1:3. Based on the behavior of the reduced- and corresponding full-scale walls experimental scaling factors were determined. Existing geometric scaling factors were compared with corresponding experimental scaling factors. It was concluded that geometric scaling factors can be used to predict the shear strength and maximum shear strength of walls with scales of 1:2 and 1:3. Geometric scaling factors can only be used to predict stiffness and drift ratios associated with the maximum shear strength of walls.

Keywords: confined walls; autoclaved aerated concrete; scaling; shear behavior; in-plane reverse cyclic loads.

Comportamento ao cisalhamento de paredes de alvenaria confinadas de concreto aerado autoclavadas com diferentes escalas

RESUMO

É apresentado um estudo experimental sobre o comportamento ao cisalhamento de paredes de alvenaria confinadas de concreto aerado autoclavado (CAA). Cinco paredes confinadas em escala reduzida foram testadas sob cargas laterais. As variáveis estudadas foram o fator escala geométrica e a proporção das paredes. As escalas consideradas foram 1:2 e 1:3. Com base no comportamento das paredes em escala reduzida e real foram determinados fatores de escala experimental. Os fatores de escala geométrica existentes foram comparados com os fatores obtidos experimentalmente. Concluiu-se que fatores de escala geométrica podem ser utilizados para prever a resistência ao cisalhamento e a resistência máxima ao cisalhamento de paredes com escalas de 1:2 e 1:3. Fatores de escala geométrica só podem ser usados para prever a rigidez e a distorção associadas à resistência máxima ao cisalhamento.

Palavras-chave: paredes confinadas; concreto celular autoclavado; escalação; comportamento de cisalhamento; cargas laterais reversas no plano.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6 antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos para uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, e ISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Pedro Castro Borges, Ph.D. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza de acuerdo con el código COPE y con la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de mampostería son ampliamente utilizadas en la industria de la construcción en muchos países del mundo (Tena-Colunga et al., 2009). Los muros de mampostería confinada se construyen utilizando diferentes tipos de piezas, por ejemplo, tabiques de arcilla, bloques de concreto y bloques de concreto celular de autoclave (CCA), entre otros. Entre los problemas de la industria de la construcción con mampostería se encuentran el control de calidad en la fabricación de bloques y la calidad de la mano de obra durante la construcción de muros. En el primer caso, existen piezas fabricadas con un control de calidad bajo y en ocasiones, piezas fabricadas a mano sin un control de calidad. En el segundo caso, en ocasiones los muros se construyen por trabajadores con poca o nula experiencia. Por otro lado, el mortero utilizado en la construcción de muros de mampostería es tradicionalmente menos resistente que las piezas. Lo anterior resulta en muros con un comportamiento a cortante asociado con agrietamientos en las juntas de la mampostería.

Los muros confinados de CCA se construyen siguiendo los procesos constructivos típicos de la mampostería.; sin embargo, su comportamiento a cortante es similar al observado en un muro monolítico, por ejemplo, un muro de concreto reforzado. Esto se debe al uso de un mortero de pared delgada que proporciona una buena adherencia entre los bloques de CCA. El mortero de pared delgada es más resistente que las piezas de CCA. Las propiedades del mortero de pared delgada se especifican en la norma ASTM C1660 (ASTM C1660, 2018). Las piezas de CCA son fabricadas con un alto control de calidad. Las propiedades del CCA se especifican en la norma ASTM C1693 (ASTM C1693, 2017) y RILEM (Aroni, 1993). En los Estados Unidos de América, existen requisitos para el diseño de muros de CCA no reforzados y reforzados interiormente, pero no se incluyen muros confinados de CCA (TMS 402/602, 2022). En México, existen requisitos para el diseño de muros confinados construidos con piezas de concreto o arcilla, pero no se consideran explícitamente muros confinados de CCA (NTCM, 2020).

Hoy en día es una realidad que existen pocos estudios experimentales sobre el comportamiento de estructuras de mampostería a escala natural sujetas a cargas laterales (Aldemir et al., 2017; Chourasia et al., 2016; Gokmen et al., 2019; Henderson et al., 2003; Seible et al., 1994; Shahzada et al., 2012; Tanner et al., 2005a; Yi et al., 2006). Esto se debe principalmente a limitaciones económicas y de espacio en los laboratorios. Una alternativa ha sido el estudio de estructuras de mampostería a escala reducida; sin embargo, el número de estudios experimentales es aún reducido (Abrams y Paulson, 1991; Alcocer et al., 1999; Benedetti et al., 1998; Henderson et al., 1994; Lourenço et al., 2013; San Bartolomé et al., 2009; Tomažević, 1987; Tomažević y Weiss, 1991; Wu et al., 2017). Otra opción ha sido el estudio de elementos individuales de las estructuras, por ejemplo, los muros de mampostería. En este caso, se existe un mayor número de estudios experimentales realizados por diferentes autores (Bose y Rai, 2014; Pérez-Gavilán et al., 2015; Tena-Colunga et al., 2009; Tomažević et al., 1996; Tomažević y Gams, 2012; Tomažević y Klemenc, 1997; Varela-Rivera et al., 2018; Varela-Rivera et al., 2019; Varela-Rivera et al., 2023; Yu et al., 2013). En dichos estudios se consideraron muros de mampostería a escala natural y reducida. Los muros a escala reducida son importantes para ahorrar materiales y tiempo entre otros.

Se realizó una revisión de la literatura para identificar estudios experimentales sobre el comportamiento de estructuras de CCA y muros de CCA sujetos a cargas laterales. Como resultado, se encontraron dos estudios sobre el comportamiento de estructuras de CCA a escala natural (Gokmen et al., 2019; Tanner et al., 2005a). En ambos casos se consideraron estructuras de dos niveles con muros reforzados interiormente. En el primer caso se estudió el comportamiento a cortante de los muros, y en el segundo el comportamiento a flexión. Similarmente, se encontró un estudio sobre el comportamiento de estructuras de CCA a escala reducida (Tomažević y Gams,

2012). Se consideraron estructuras de tres y cuatro niveles con muros reforzados interiormente. Las estructuras se construyeron con una escala reducida de 1:4. El estudio se enfocó en el comportamiento a cortante de los muros. Por otro lado, se encontraron algunos estudios sobre el comportamiento a flexión y cortante de muros no reforzados, reforzados interiormente, diafragma y confinados de CCA a escala natural (Penna et al., 2018; Ravichandran y Klingner, 2012; Shing et al., 1990; Tanner et al., 2005b; Tomaževič y Gams, 2012; Varela-Rivera et al., 2018; Varela-Rivera et al., 2023). En este último caso, se encontraron dos estudios donde se propusieron ecuaciones de diseño para determinar la resistencia a cortante y flexo-cortante de muros confinados de CCA junto con correspondientes recomendaciones de diseño por flexión (Varela-Rivera et al., 2018; Varela-Rivera et al., 2023). Adicionalmente, se encontraron tres estudios sobre el comportamiento a cortante de muros de CCA a escala reducida (Bose y Rai, 2014; Tomaževič y Gams, 2012; Zhenggang et al., 2017). En el primer caso se consideraron muros reforzados interiormente, en el segundo y tercer casos muros diafragma. Los muros se construyeron con escalas reducidas de 2:5, 1:2 y 1:4, respectivamente.

Con base en la revisión de la literatura presentada anteriormente se observa que las estructuras de CCA a escala natural y reducida se estudian de forma independiente, es decir, no se compara el comportamiento de las estructuras a escala reducida con el correspondiente a las estructuras a escala natural. Por ejemplo, no se comparan el patrón de agrietamiento, la resistencia, la rigidez y la distorsión de las estructuras de CCA a escala natural y reducida. El comportamiento de estas estructuras debe compararse no sólo en el rango lineal sino también en el rango no lineal. Similarmente, se observa la misma situación para el caso de los muros de CCA; es decir, no se compara el comportamiento de los muros a escala natural y reducida. Además, se observa que no existen estudios experimentales sobre el comportamiento de estructuras de CCA a escala natural o reducida construidas con muros confinados. Sólo se encontraron dos estudios experimentales sobre muros reforzados interiormente de CCA a escala natural (Gokmen et al., 2019; Tanner et al., 2005a). Lo anterior muestra la necesidad de estudiar el comportamiento de estructuras CCA construidas con muros confinados para comprender mejor su comportamiento global bajo cargas laterales. Esto se puede hacer considerando estructuras a escala reducida. Como primer paso, es deseable estudiar sólo el comportamiento de los muros confinados de CCA a escala reducida y comparar los resultados con los obtenidos de los correspondientes muros confinados de CCA a escala natural.

En este estudio se evaluó el comportamiento a cortante de cinco muros confinados de CCA a escala reducida. Los muros se ensayaron bajo cargas laterales en el plano cíclicas reversibles. Se construyeron dos muros a escala 1:2 y tres a escala 1:3. Las variables de estudio fueron el factor de escala geométrica y la relación de aspecto de los muros. Se obtuvieron curvas carga lateral – distorsión para los muros. El comportamiento a cortante de los muros confinados de CCA a escala reducida se comparó con el observado para los muros de CCA a escala natural correspondientes obtenidos de la literatura. Las comparaciones se basaron en el patrón de agrietamiento, la resistencia, la rigidez y la distorsión de los muros confinados de CCA. Estas comparaciones se utilizaron para determinar factores de escala experimentales para los muros a escala reducida estudiados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Muros espécimen y propiedades de materiales

En este estudio se consideraron cinco muros confinados de CCA a escala reducida, dos con una escala 1:2 y tres con una escala 1:3 (Tabla 1). Los muros confinados de CCA a escala natural control fueron estudiados previamente por los autores (Varela-Rivera et al., 2023). Dichos muros se representan en la Tabla 1 con una escala 1:1. La altura (H), la longitud (L) y el espesor (t) de

los muros se presentan en la Tabla 1. La altura del muro se consideró hasta el punto de aplicación de la carga (Figura 1). Las variables de estudio fueron el factor de escala geométrica y la relación de aspecto (H/L) de los muros (Tabla 1). El factor de escala geométrica para la resistencia a cortante se definió como la relación entre el área de la sección transversal gruesa de un muro a escala reducida y la correspondiente de un muro a escala natural. El factor de escala geométrica para la rigidez se definió como la relación entre el parámetro $(I/H^3 + A/H)$ de un muro a escala reducida y el correspondiente de un muro a escala natural, donde I es el momento de inercia de la sección transversal gruesa del muro. En dicho parámetro se incluyen deformaciones por flexión y cortante. El factor de escala geométrica para la distorsión se definió como la relación entre el parámetro $[(I/H^3 + A/H)/H]$ de un muro a escala reducida y el correspondiente de un muro a escala natural.

Se consideró un esfuerzo axial de compresión de 0.29 MPa para los muros. Dicho esfuerzo corresponde a una estructura de CCA de un nivel. En el análisis de cargas gravitacionales se asumió que las estructuras se construyen utilizando muros y losas de CCA. Se consideraron bloques sólidos de CCA para los muros. Para los muros a escala 1:1, las dimensiones de los bloques fueron 0.15 x 0.20 x 0.61 m (espesor x altura x longitud). Para los muros a escalas 1:2 y 1:3, las dimensiones de los bloques se redujeron aproximadamente por un factor de 2 y 3, respectivamente. Las piezas se cortaron utilizando una sierra cinta eléctrica y, en ocasiones, un serrucho de mano como se recomienda para la construcción en CCA.

Tabla 1. Detalles de los muros confinados de CCA.

Muro de CCA	Escala	H (m)	L (m)	t (mm)	H/L
W1-11*	1:1	2.40	1.95	150	1.23
W2-11*	1:1	2.40	1.24	150	1.94
W3-11*	1:1	2.40	0.91	150	2.64
W1-12	1:2	1.20	0.98	75	1.23
W2-12	1:2	1.20	0.62	75	1.94
W1-13	1:3	0.80	0.65	50	1.23
W2-13	1:3	0.80	0.41	50	1.94
W3-13	1:3	0.80	0.30	50	2.64

*Varela-Rivera et al. (2023)

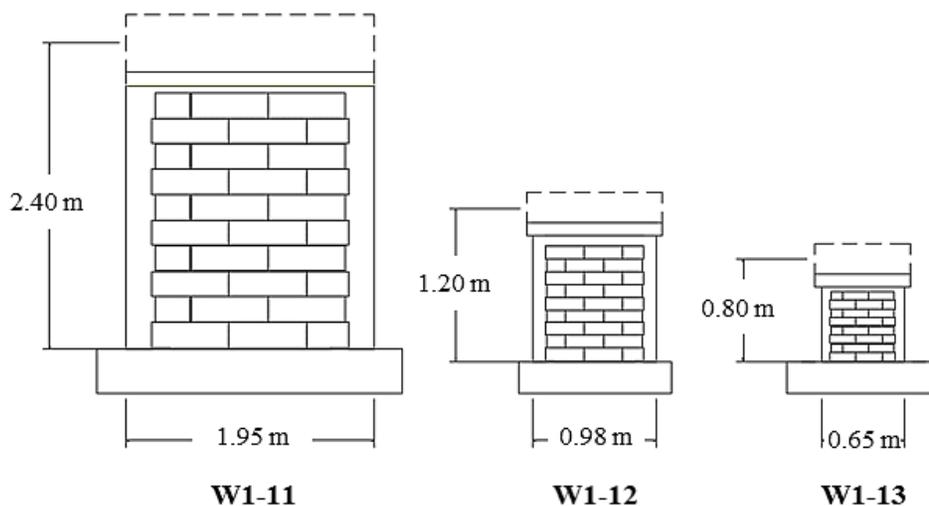


Figura 1. Esquema de los muros confinados de CCA.

El muro W1-11 se diseñó para inducir un agrietamiento por cortante diagonal y los muros W2-11 y W3-11 para inducir un agrietamiento por flexo-cortante (Varela-Rivera et al., 2023). Los muros a escala reducida se diseñaron para inducir un agrietamiento por cortante diagonal. Las dimensiones finales de las secciones transversales (ST) y los detalles del acero de refuerzo de los castillos (EC) de los muros se presentan en la Tabla 2. La altura de la sección transversal de los castillos de los muros a escala 1:2 fue de 110 mm (Tabla 2). Esta altura fue necesaria para inducir el agrietamiento por corte diagonal de los muros. El refuerzo longitudinal (RL) consistió en barras de acero corrugadas con una resistencia de fluencia nominal de 412 MPa. El refuerzo transversal (RT) consistió en barras de acero lisas con una resistencia de fluencia nominal de 248 MPa. Este tipo de acero liso es ampliamente utilizado en México en estructuras de mampostería y concreto reforzado. No se utilizó refuerzo transversal para los muros a escala reducida (Tabla 2). Esto se debió a las dimensiones reducidas de las secciones transversales de los castillos. El tamaño máximo del agregado grueso del concreto de los castillos de los muros a escalas 1:1 y 1:2 fue de 19 mm y 9.52 mm, respectivamente. Para los muros a escala 1:3 se utilizó mortero en lugar de concreto. Las proporciones por volumen del mortero fueron de 1:2 (cemento Portland: arena). La relación de aspecto final de los muros se presenta en la Tabla 1. La resistencia a compresión especificada para el concreto de los castillos de los muros a escala de 1:1 fue de 14.7 MPa. La resistencia a compresión especificada para el concreto y el mortero de los castillos de los muros a escalas 1:2 y 1:3 fue de 19.6 MPa. El cambio en la resistencia a compresión se asoció con el cambio en la resistencia a compresión mínima del concreto especificada en la nueva versión de las Normas Técnicas de Mampostería de la Ciudad de México (NTCM, 2020). Los muros correspondientes con escalas diferentes, por ejemplo, los muros W1-11, W1-12 y W1-13 tuvieron la misma relación de aspecto.

Las propiedades mecánicas del CCA, el mortero de nivelación, el mortero de pared delgada, y el concreto y el mortero de los castillos de los muros se presentan en la Tabla 3. Todas las propiedades se determinaron utilizando muestras de tamaño regular de acuerdo con las especificaciones de las normas ASTM correspondientes (Tabla 3) (ASTM C109, 2021; ASTM C1693, 2017; ASTM C39, 2023). No se consideró ninguna reducción en el tamaño de las muestras correspondientes para los muros a escala reducida.

Tabla 2. Detalles de los castillos de los muros.

Muro de CCA	ST de los EC (mm)	RL	RT
W1-11 (a) W2-11 y W3-11 (b)		4#3	#2@ 200 mm
W1-12 a W2-12		1#4	-
W1-13 (a) W2-13 y W3-13 (b)		1#3	-

Tabla 3. Propiedades de los materiales de los muros.

Propiedad	Muro de CCA	ASTM	Promedio (MPa)	CV
Resistencia a compresión del CCA (f_{CCA})	W1-11 a W3-11	C1693	5.28	0.04
	W1-12 a W2-12		4.69	0.02
	W1-13 a W3-13		5.28	0.04
Resistencia a compresión del mortero de nivelación ($f_{j1:3}$)	W1-11 a W3-11	C109	22.36	0.03
	W1-12 a W2-12		17.92	0.02
	W1-13 a W3-13		14.59	0.05
Resistencia a compresión del mortero de pared delgada (f_{jMPD})	W1-11 a W3-11	C109	17.81	0.02
	W1-12 a W2-12		10.52	0.02
	W1-13 a W3-13		17.81	0.02
Resistencia a compresión del concreto de los castillos (f_c)	W1-11 a W3-11	C39	15.85	0.02
	W1-12 a W2-12		25.10	0.07
Resistencia a compresión del mortero de los castillos ($f_{j1:2}$)	W1-13 a W3-13	C109	23.92	0.02

2.2 Construcción de muros

La construcción de los muros confinados de CCA se realizó por un trabajador experimentado. Los bloques se traslaparon en su longitud media. La primera hilada de bloques se colocó utilizando mortero en proporciones por volumen 1:3 (cemento Portland: arena) y mortero de pared delgada. El primero se utilizó en la junta horizontal de nivelación y el segundo en las juntas verticales. Las hiladas de bloques subsecuentes se colocaron utilizando mortero de pared delgada. El espesor promedio del mortero de nivelación de los muros a escalas 1:1, 1:2 y 1:3 fue de aproximadamente 10 mm, 5 mm y 3.3 mm, respectivamente. El espesor promedio del mortero de pared delgada de los muros a escalas 1:1, 1:2 y 1:3 fue de aproximadamente 3 mm, 2 mm y 2 mm, respectivamente. La construcción de los muros se realizó de la siguiente manera: primero se colocaron las hiladas de bloques y luego se colocó el concreto de los castillos. Finalmente, se colocó el concreto de la cadena superior. Se utilizó un dentado de 25 mm en los bloques extremos de las hiladas impares de los muros a escala 1:1. Este dentado se redujo por un factor de 2 y 3 para los muros a con escalas 1:2 y 1:3, respectivamente. En la Figura 1 se presenta el esquema de los muros W1-11, W1-12 y W1-13.

2.1 Sistema de carga de los muros

Los muros confinados de CCA a escala reducida se ensayaron bajo carga axial constante y cargas laterales incrementales cíclicas reversibles hasta la falla. Las cargas axiales se determinaron utilizando el esfuerzo axial de compresión de 0.29 MPa junto con la longitud y el espesor correspondientes de los muros (Tabla 1). Las cargas laterales se aplicaron utilizando un marco de reacción metálico, una viga carga metálica y un actuador hidráulico de dos vías (Figura 2a). La carga lateral se midió utilizando una celda de carga de tensión-compresión tipo dona. Esta carga se verificó utilizando dos transductores de presión. Los muros se anclaron a una losa de reacción móvil la cual se ancló al piso de reacción del laboratorio. La carga axial se aplicó utilizando una viga balancín, una viga de repartición, dos barras roscadas y un actuador hidráulico (Figura 2b). La presión en el actuador se mantuvo constante durante el ensaye mediante un controlador de

presión mecánico (Edison, 1994). La carga axial se midió utilizando dos celdas de carga tipo dona. Esta carga se verificó utilizando un transductor de presión. Los muros a escala natural fueron ensayados en condiciones similares (Varela-Rivera et al., 2023).

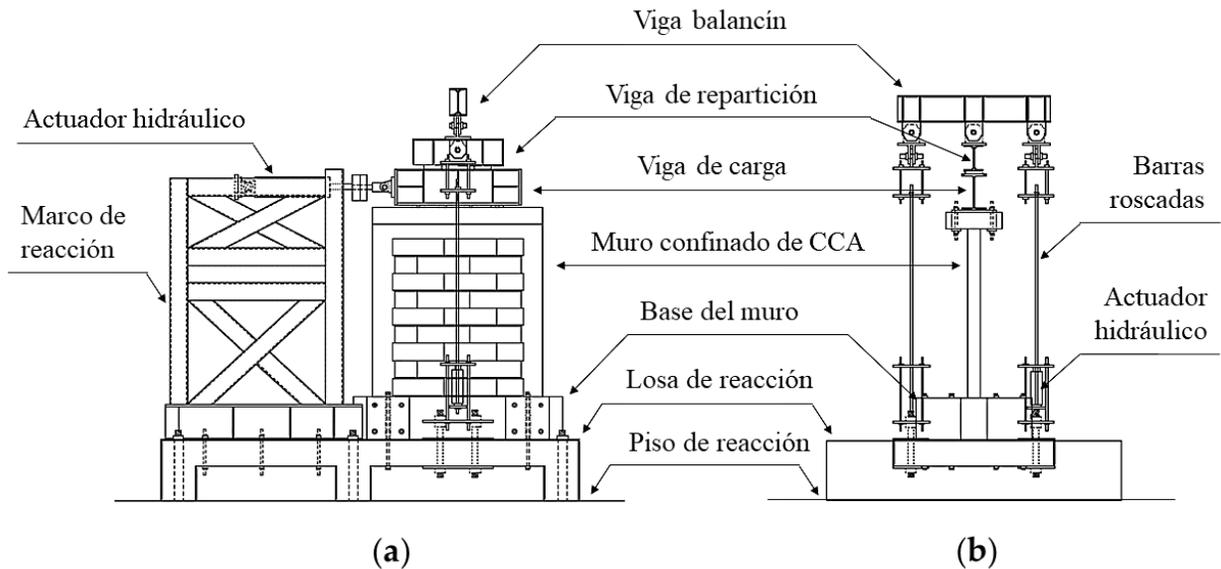


Figura 2. Sistema de carga de los muros. (a) Sistema de carga lateral; (b) Sistema de carga axial.

2.2 Instrumentación y protocolo de carga de los muros

Los desplazamientos horizontales y verticales de los muros a escala reducida se midieron utilizando potenciómetros lineales de polea (PP). Los desplazamientos relativos entre la viga de carga y el muro, el muro y la losa de reacción móvil, y la losa de reacción móvil y el piso de reacción se midieron utilizando potenciómetros lineales de vástago (PL). En la Figura 3 se presenta una vista típica de la instrumentación de los muros. En dicha figura, CCD se refiere a la celda de carga tipo dona. El protocolo de carga utilizado para el ensaye de los muros se basó en el especificado en las Normas Técnicas de Mampostería de la Ciudad de México (NTCM, 2020). Este protocolo tiene cuatro ciclos reversibles iniciales controlados por carga y ciclos posteriores controlados por distorsión. Para los muros a escala natural se utilizaron una instrumentación y un protocolo de carga similares (Varela-Rivera et al., 2023).

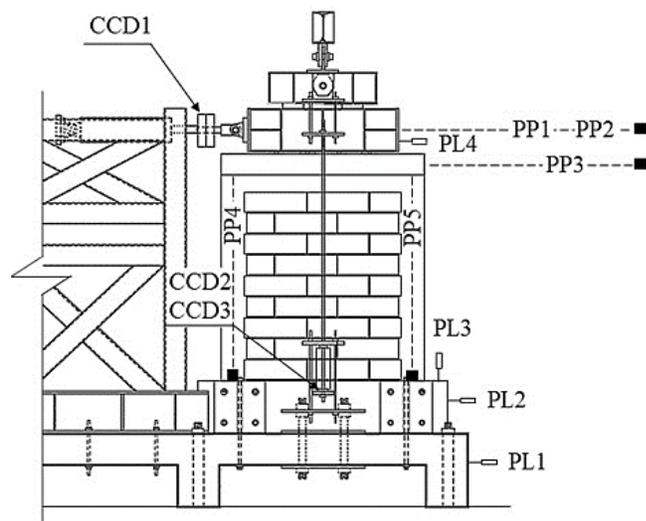


Figura 3. Vista típica de la instrumentación del muro.

3. RESULTADOS

3.1 Propiedades de materiales

Las propiedades mecánicas promedio del CCA, el mortero de nivelación, el mortero de pared delgada, el concreto y el mortero de los castillos de los muros se presentan en la Tabla 3. Los coeficientes de variación (CV) correspondientes se incluyen en dicha tabla. La resistencia a compresión promedio del CCA de los muros a escala 1:2 fue 11% menor que la obtenida para muros a escalas 1:1 y 1:3. Similarmente, la resistencia a compresión promedio del mortero de pared delgada de los muros a escala 1:2 fue 41% menor que la obtenida para muros a escalas 1:1 y 1:3. El CCA y el mortero de pared delgada de los muros a escala 1:2 fueron obtenidos de diferentes fabricantes. El comportamiento a cortante de los muros a escala reducida no se afectó por dichas diferencias en las propiedades, como se describe más adelante.

3.1 Comportamiento global de muros a escala reducida

El comportamiento de los muros a escala 1:2 fue en general similar. El comportamiento se caracterizó por la formación de grietas horizontales por flexión en la parte inferior de los castillos. Posteriormente, se observaron grietas diagonales por cortante en el panel de los muros junto con nuevas grietas por flexión a lo largo de la altura de los castillos. Para el caso del muro W2-12, se observaron grietas por flexo-cortante antes de la formación de grietas diagonales por cortante. Durante el diseño de este muro, se observó que la predicción de las cargas asociadas con ambos tipos de agrietamiento, fueron similares. Al incrementar la distorsión, se observaron nuevas grietas diagonales en el panel del muro, formando el patrón de agrietamiento final tradicional en forma de “X”. La falla de los muros se asoció con la propagación de grietas diagonales por cortante en los extremos de los castillos. El comportamiento de los muros a escala 1:3 fue, en general, similar al observado para el muro W1-12. El patrón de agrietamiento final y el tipo de falla de los muros a escala 1:3 fueron similares a los observados para los muros a escala 1:2. El patrón de agrietamiento de los muros a escala reducida, asociado con la carga lateral máxima, se presenta en la Figura 4. Las curvas carga lateral – distorsión de dichos muros se presentan en la Figura 5.

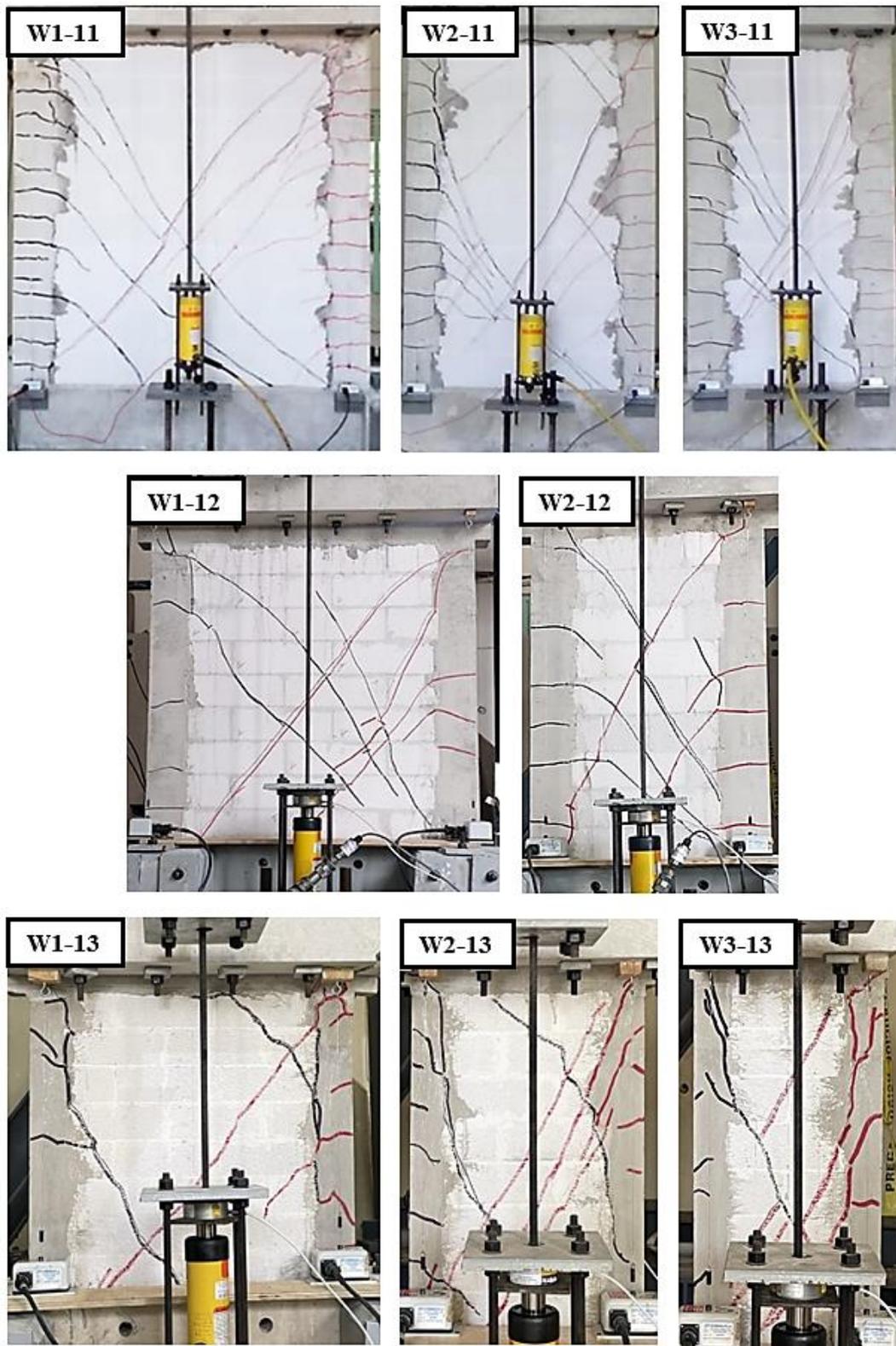


Figura 4. Patrón de agrietamiento de los muros asociado con la carga lateral máxima.

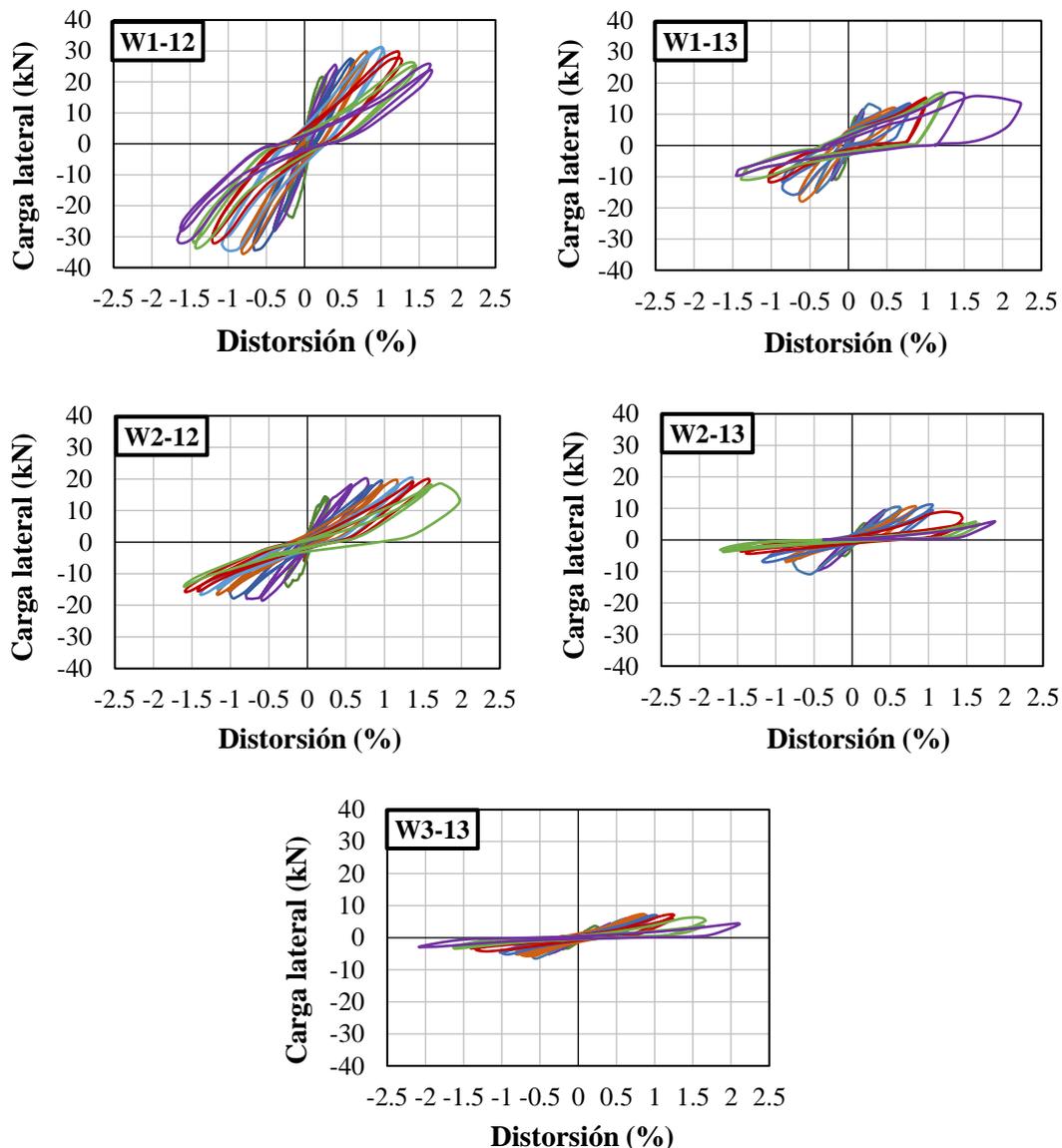


Figura 5. Curvas carga lateral – distorsión de los muros a escala reducida.

4. DISCUSIÓN

4.1 Patrón de agrietamiento de muros con diferentes escalas

El patrón de agrietamiento de los muros a escalas 1:1, 1:2 y 1:3 se presenta en la Figura 4. Dicho patrón se asoció con la carga lateral máxima de los muros en los ciclos de carga positivos. El patrón de agrietamiento de los muros a escalas 1:1, 1:2 y 1:3 fue en general similar (Figura 4). Dicho patrón se caracterizó principalmente por la formación de grietas horizontales por flexión a lo largo de la altura de los castillos y grietas diagonales por cortante en el panel de CCA de los muros. Para el caso de los muros W2-11, W3-11 y W2-12 se observaron algunas grietas por flexo-cortante como se describió anteriormente. Las grietas diagonales observadas en los muros se formaron en las piezas de CCA y no en las juntas, es decir, no se observaron grietas escalonadas. Esto significa que los muros confinados de CCA se comportaron como muros monolíticos. Lo anterior se debió a que el mortero de pared delgada fue más resistente que los bloques de CCA (Tabla 3). Las grietas escalonadas se observan comúnmente en muros confinados construidos con piezas de arcilla o concreto, con un mortero más débil que las piezas. Con base en esta comparación, se observó que

el patrón de agrietamiento de los muros no depende de las escalas geométricas ni de las relaciones de aspecto de los muros estudiados.

4.1 Resistencia a cortante de muros con diferentes escalas

La resistencia a cortante experimental (V_c) de los muros se presenta en la Tabla 4. Dicha resistencia se asoció con el primer agrietamiento por cortante diagonal (CD) o el primer agrietamiento por flexo-cortante (FC). Sólo se consideraron ciclos de carga positivos. La resistencia a cortante máxima experimental (V_m) de los muros se incluye en la Tabla 4. Dicha resistencia se asoció con la carga lateral máxima observada en los ciclos de carga positivos. La resistencia a cortante de los muros con la misma escala aumentó conforme la relación de aspecto disminuyó (Tabla 4). Por ejemplo, la resistencia a cortante del muro W1-13 con una relación de aspecto de 1.23 fue 144 % mayor que la del muro W3-13 con una relación de aspecto de 2.64. Se determinaron factores de escala experimentales para la resistencia a cortante (ER_c) de los muros a escalas 1:2 y 1:3 (Tabla 4). Los factores de escala se calcularon como la relación entre la resistencia a cortante de los muros a escala reducida y la de los muros a escala natural correspondientes. Estos factores de escala están relacionados con el comportamiento lineal de los muros. Similarmente, se determinaron factores de escala experimentales para la resistencia a cortante máxima (ER_m) de los muros a escalas 1:2 y 1:3 (Tabla 4). En este caso, los factores de escala están relacionados con el comportamiento no lineal de los muros. Los valores promedio de ER_c y ER_m para los muros a escala 1:2 fueron 0.27 y 0.24, respectivamente. Similarmente, los valores promedio de ER_c y ER_m para los muros a escala 1:3 fueron 0.10 y 0.13, respectivamente. Para los muros a escalas 1:2 y 1:3, los factores de escala geométrica para la resistencia a cortante (EGR) fueron 0.25 y 0.11, respectivamente (Tabla 4). Se observó que los factores de escala geométricos y experimentales para la resistencia a cortante y resistencia a cortante máxima de los muros fueron similares. La resistencia a cortante de los muros está asociada principalmente con el área de la sección transversal gruesa de los muros, por ejemplo, la longitud y el espesor de los muros.

Tabla 4. Factores de escala experimentales para la resistencia a cortante de los muros.

Muro de CCA	H/L	V_c (kN)	Tipo de grieta	ER_c	ER_c promedio	V_m (kN)	ER_m	ER_m promedio	EGR
W1-11*	1.23	101.40	CD	1	1	140.51	1	1	1
W2-11*	1.94	45.44	FC	1		74.53	1		
W3-11*	2.64	35.53	FC	1		48.08	1		
W1-12	1.23	21.24	CD	0.21	0.27	29.85	0.21	0.24	0.25
W2-12	1.94	14.48	FC	0.32		19.48	0.26		
W1-13	1.23	9.07	CD	0.09	0.10	12.09	0.09	0.13	0.11
W2-13	1.94	5.31	CD	0.12		11.28	0.15		
W3-13	2.64	3.71	CD	0.10		7.30	0.15		

*Varela-Rivera et al. (2023)

4.2 Rigidez de muros con diferentes escalas

La rigidez secante experimental asociada con la resistencia a cortante (K_c) y con la resistencia a cortante máxima (K_m) de los muros se presenta en la Tabla 5. Sólo se consideraron ciclos de carga positivos. Se determinaron factores de escala experimentales para la rigidez secante asociada con la resistencia a cortante (EK_c) y con la resistencia a cortante máxima (EK_m) de los muros a escalas 1:2 y 1:3 (Tabla 5). Los valores promedio de EK_c y EK_m para los muros a escala 1:2 fueron 0.36 y 0.48, respectivamente. Similarmente, los valores promedio de EK_c y EK_m para los muros a escala 1:3 fueron 0.44 y 0.40, respectivamente. Para los muros a escalas 1:2 y 1:3, los factores de escala

geométrica para la rigidez (EGK) fueron 0.50 y 0.33, respectivamente (Tabla 5). Para los muros a escala 1:2 el factor de escala geométrica para la rigidez fue mayor que EK_c y similar a EK_m (Tabla 5). Con base en lo anterior, se observa que K_c se sobreestimó y K_m se predijo bien con los factores de escala geométrica. Para los muros a escala 1:3, el factor de escala geométrica para la rigidez fue menor que EK_c y EK_m (Tabla 5). Con base en lo anterior, se observa que K_c y K_m se subestimaron con los factores de escala geométrica. Los factores de escala experimentales para la rigidez incluyen la contribución del acero de refuerzo, del concreto de los castillos y del panel de CCA de los muros. Lo anterior se considera generalmente utilizando las propiedades de la sección transversal transformada de los muros; sin embargo, los factores de escala geométrica para la rigidez se calcularon utilizando las propiedades de la sección transversal gruesa de los muros.

Tabla 5. Factores de escala experimentales para la rigidez de los muros.

Muro de CCA	H/L	K_c (kN/cm)	EK_c	EK_c promedio	K_m (kN/cm)	EK_m	EK_m promedio	EGK
W1-11*	1.23	297.86	1	1	77.34	1	1	1
W2-11*	1.94	126.33	1		30.58	1		
W3-11*	2.64	41.28	1		16.59	1		
W1-12	1.23	87.63	0.29	0.36	30.68	0.40	0.48	0.50
W2-12	1.94	53.64	0.42		16.96	0.55		
W1-13	1.23	135.56	0.46	0.44	25.22	0.33	0.40	0.33
W2-13	1.94	42.61	0.34		13.51	0.44		
W3-13	2.64	21.66	0.52		7.38	0.44		

*Varela-Rivera et al. (2023)

4.3 Distorsión de muros con diferentes escalas

La distorsión experimental asociada con la resistencia a cortante (δ_c) y con la resistencia a cortante máxima (δ_m) de los muros se presenta en la Tabla 6. Sólo se consideraron ciclos de carga positivos. La distorsión de los muros con la misma escala aumentó conforme la relación de aspecto aumentó (Tabla 6). Por ejemplo, la distorsión del muro W3-13 con una relación de aspecto de 2.64 fue 163% mayor que la del muro W1-13 con una relación de aspecto de 1.23. Se determinaron factores de escala experimentales para la distorsión asociada con la resistencia a cortante ($E\delta_c$) y con la resistencia a cortante máxima ($E\delta_m$) de los muros a escalas 1:2 y 1:3 (Tabla 6). Los valores promedio de $E\delta_c$ y $E\delta_m$ para los muros a escalas 1:2 fueron 1.46 y 1.01, respectivamente. Similarmente, los valores promedio de $E\delta_c$ y $E\delta_m$ para los muros a escalas 1:3 fueron 0.74 y 0.95, respectivamente. Para los muros a escalas 1:2 y 1:3, los factores de escala geométrica para la distorsión ($EG\delta$) fueron ambos 1.0 (Tabla 6). Con base en lo anterior, se observa que para los muros a escala 1:2, el factor de escala geométrica para la distorsión fue menor que $E\delta_c$ y similar a $E\delta_m$. Para los muros a escala 1:3, el factor de escala geométrica fue mayor que $E\delta_c$ y $E\delta_m$. Lo anterior se asoció con las mismas razones descritas anteriormente para los factores de escala experimentales para la rigidez.

Tabla 6. Factores de escala experimentales para la distorsión de los muros.

Muro de CCA	H/L	δ_c (%)	$E\delta_c$	$E\delta_c$ promedio	δ_m (%)	$E\delta_m$	$E\delta_m$ promedio	EG δ
W1-11*	1.23	0.14	1	1	0.76	1	1	1
W2-11*	1.94	0.15	1		1.02	1		
W3-11*	2.64	0.36	1		1.21	1		
W1-12	1.23	0.20	1.42	1.46	0.81	1.07	1.01	1
W2-12	1.94	0.22	1.50		0.96	0.94		
W1-13	1.23	0.08	0.59	0.74	0.60	0.79	0.95	1
W2-13	1.94	0.16	1.04		1.04	1.03		
W3-13	2.64	0.21	0.60		1.24	1.02		

*Varela-Rivera et al. (2023)

5. CONCLUSIONES

Se evaluó el comportamiento a cortante de cinco muros confinados de CCA a escalas reducidas 1:2 y 1:3. El comportamiento de los muros confinados de CCA a escala reducida se comparó con el de los muros confinados de CCA a escala natural correspondientes obtenidos de Varela-Rivera et al. (2023). Con base en las comparaciones correspondientes, se presentan las siguientes conclusiones:

1. El patrón de agrietamiento de los muros a escalas 1:1, 1:2 y 1:3 fue en general similar. Dicho patrón se caracterizó principalmente por la formación de grietas horizontales por flexión a lo largo de la altura de los castillos y grietas diagonales por cortante en el panel de CCA de los muros. Lo anterior indica que el patrón de agrietamiento de los muros no depende de las escalas geométricas ni de las relaciones de aspecto de los muros estudiadas.
2. Para los muros a escalas 1:2 y 1:3, los factores de escala geométrica para la resistencia a cortante y resistencia a cortante máxima fueron similares a los factores de escala experimentales correspondientes. Lo anterior indica que la resistencia a cortante y la resistencia a cortante máxima de los muros a escalas 1:2 y 1:3 se pueden predecir utilizando factores de escala geométrica.
3. Para los muros a escala 1:2, el factor de escala geométrica para la rigidez fue mayor que el observado para la resistencia a cortante, pero fue similar al observado para la resistencia a cortante máxima. Para muros los a escala 1:3, el factor de escala geométrica para la rigidez fue menor que los observados para la resistencia a cortante y la resistencia a cortante máxima. Los factores de escala geométrica se pueden utilizar para predecir la rigidez asociada con la resistencia a cortante máxima de los muros a escala 1:2; sin embargo, no se recomiendan para los muros a escala 1:3.
4. Para los muros a escala 1:2, el factor de escala geométrica para la distorsión fue menor que el observado para la resistencia a cortante, pero fue similar al observado para la resistencia a cortante máxima. Para los muros a escala 1:3, el factor de escala geométrica fue mayor que los observados para la resistencia a cortante y resistencia a cortante máxima. No se recomiendan factores de escala geométrica para predecir la distorsión asociada con la resistencia a cortante de los muros a escalas 1:2 y 1:3. Los factores de escala geométrica se pueden utilizar para predecir la distorsión asociada con la resistencia a cortante máxima de los muros a escalas 1:2 y 1:3.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), número de proyecto: 288718. El CCA fue proporcionado por Aircrete México y Litecrete México. El segundo autor recibió una beca del CONAHCYT. Los autores agradecen el trabajo realizado por los siguientes exalumnos de posgrado: Eduardo Ricalde-Canto y Edwin Sánchez-Dorantes.

7. REFERENCIAS

- Abrams, D., Paulson T. J. (1991), *Modeling Earthquake Response of Concrete Masonry Building Structures*. ACI Struct. J. 88(4):475-485. <https://doi.org/10.14359/3093>
- Alcocer, S. M., Murià-Vila, D., Peña-Pedroza, J. I. (1999). “Comportamiento dinámico de muros de mampostería confinada” en: Series del Instituto de Ingeniería, 616, UNAM: Ciudad de México, México. (en español).
- Aldemir, A., Binici, B., Canbay, E., Yakut, A. (2017), *Lateral load testing of an existing two-story masonry building up to near collapse*. B. Earthq. Eng. 15(8):3365-3383. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9821-3>
- Aroni, S., de Groot, G. J., Robinson, M. J., Svanholm, G., Wittman, F. H. (1993), “*Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing, and Design: RILEM Recommended Practice*”. 1ra. ed., E & FN Spon: Londres, UK.
- ASTM Internacional. (2017). *ASTM C1693/C1693-11: Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC)*. West Conshohocken, PA, EUA. <https://doi.org/10.1520/C1693-11R17>
- ASTM Internacional. (2021). *ASTM C109/C109M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 - in. or [50 - mm] Cube Specimens)*. West Conshohocken, PA, EUA. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-21
- ASTM Internacional. (2023). *ASTM C39/C39M-23: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA, EUA. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-23
- Benedetti, D., Carydis, P., Pezzoli, P. (1998), *Shaking table tests on 24 simple masonry buildings*. Earthq. Eng. Struct. D. 27(1):67-90. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199801\)27:1<67::AID-EQE719>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199801)27:1<67::AID-EQE719>3.0.CO;2-K)
- Bose, S., Rai, D. C. (2014). “*Behavior of AAC Infilled RC Frame Under Lateral Loading*” en: Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska.
- Chourasia, A., Bhattacharyya, S. K., Bhandari, N. M., Bhargava, P. (2016), *Seismic Performance of Different Masonry Buildings: Full-Scale Experimental Study*. J. Perform. Constr. Fac. 30(5):1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000850](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000850)
- Edison Hydraulic Load Maintainers (1994), “*Operation and Maintenance Manual*”. Edison Hydraulic Load Maintainers, Paradise, CA, EUA.
- Gokmen, F., Binici, B., Aldemir, A., Taghipour, A., Canbay, E. (2019), *Seismic behavior of autoclaved aerated concrete low-rise buildings with reinforced wall panels*. B. Earthq. Eng. 17(7):3933-3957. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00630-3>
- Henderson, R. C., Fricke, K. E., Jones, W. D., Beavers, J. E., Bennett, R. M. (2003), *Summary of a Large- and Small-Scale Unreinforced Masonry Infill Test Program*. J. Struct. Eng., 129(12):1667-1675. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:12\(1667\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1667))
- Lourenço, P. B., Avila, L., Vasconcelos, G., Alves, J. P., Mendes, N., Costa, A. C. (2013), *Experimental investigation on the seismic performance of masonry buildings using shaking table testing*. B. Earthq. Eng. 11:1157-1190. <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9410-7>

- Normas Técnicas Complementarias. (2020). *NTCM: Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería* (en español). Ciudad de México, México.
- Penna, A., Magenes, G., Calvi, G. M., Costa, A. A. (2008). “*Seismic Performance of AAC Infill and Bearing Walls with Different Reinforcement Solutions*” en: Proceedings of the 14th International Brick and Block Masonry Conference, Sidney, Australia.
- Pérez-Gavilán, J. J., Flores, L. E., Alcocer, S. M. (2015), *An Experimental Study of Confined Masonry Walls with Varying Aspect Ratios*. Earthq. Spectra. 31(2):945-968. <https://doi.org/10.1193/090712eqs284m>
- Ravichandran, S. S., Klingner, R. E. (2012), *Behavior of Steel Moment Frames with Autoclaved Aerated Concrete Infills*. ACI Struct. J. 109(1):83-90. <https://doi.org/10.14359/51683497>
- Rosado-Gruintal, A. I. (2014). *Desempeño elástico y plástico del concreto fabricado con agregados reciclados de origen calizo de residuos de demolición*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán. (en español).
- San Bartolomé, A., Delgado, E., Quiun, D. (2009). “*Seismic behavior of a two-story model of confined adobe masonry*” en: Proceedings of the 11th Canadian Symposium, Toronto, Ontario, Canadá.
- Shahzada, K., Khan, A. N., Elnashai, A. S., Ashraf, M., Javed, M., Naseer, A., Alam, B. (2012), *Experimental Seismic Performance Evaluation of Unreinforced Brick Masonry Buildings*. Earthq. Spectra. 28(3):1269-1290. <https://doi.org/10.1193/1.4000073>
- Seible, F., Priestley, M. J. N., Kingsley, G. R., Kürkchübasche, A. G. (1994), *Seismic Response of Full-Scale Five-Story Reinforced Masonry Building*. J. Struct. Eng. 120(3):925-946. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:3\(925\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(925))
- Shing, P. B., Schuller, M., Hoskere, V. S. (1990), *In-Plane Resistance of Reinforced Masonry Shear Walls*. J. Struct. Eng. 116(3):619-640. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:3\(619\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:3(619))
- Tanner, J. E., Varela-Rivera, J. L., Klinger, R. E. (2005), *Design and Seismic Testing of Two-Story, Full Scale Autoclaved Aerated Concrete Assemblage Specimen*. ACI Struct. J. 102(1):114-119. <https://doi.org/10.14359/13536>
- Tanner, J. E., Varela-Rivera, J. L., Klinger, R. E., Brightman, M. J. (2005), *Seismic Testing of Autoclaved Aerated Concrete Shear-Walls: A Comprehensive Review*. ACI Struct. J. 102(3):374-382. <https://doi.org/10.14359/14408>
- Tena-Colunga, A., Juárez-Ángeles, A., Salinas-Vallejo, V. H. (2009), *Cyclic Behavior of Combined and Confined Masonry Walls*. Eng. Struct. 31(1):240-259. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.08.015>
- The Masonry Society. (2022). *TMS 402/602-22: Building Code Requirements and Specifications for Masonry Structures (Formerly ACI 530)*. Longmont, CO.
- Tomaževič, M. (1987), *Dynamic modelling of masonry buildings: Storey mechanism model as a simple alternative*. Earthq. Eng. Struct. D. 15(6):731-749. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290150606>
- Tomaževič, M., Gams, M. (2012), *Shaking Table Study and Modelling of Seismic Behavior of Confined AAC Masonry Buildings*. B. Earthq. Eng. 10(3):863-893. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9331-x>
- Tomaževič, M., Klemenc, I. (1997), *Seismic behavior of confined masonry walls*. Earthq. Eng. Struct. D. 26(10):1059-1071. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199710\)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199710)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M)
- Tomaževič, M., Lutman, M., Petkovic, L. (1996), *Seismic Behavior of Masonry Walls: Experimental Simulation*. J. Struct. Eng. 122(9):1040-1047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:9\(1040\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:9(1040))

- Tomažević, M., Weiss, P. (1991). “*Seismic behavior of masonry buildings: reinforced versus unreinforced masonry*” en: Proceedings of the 9th International Brick and Block Masonry Conference, Berlín, Alemania, pp. 552-559.
- Varela-Rivera, J. L., Fernández-Baqueiro, L., Alcocer-Canché, R., Ricalde-Jiménez, J., Chim-May, R. (2018), *Shear and Flexural Behavior of Autoclaved Aerated Concrete Confined Masonry Walls*. ACI Struct. J. 115(5):1453-1462. <https://doi.org/10.14359/51706828>
- Varela-Rivera, J. L., Fernández-Baqueiro, L., Gamboa-Villegas, J., Prieto-Coyoc, A., Moreno-Herrera, J. (2019), *Flexural Behavior of Confined Masonry Walls Subjected to In-Plane Lateral Loads*. Earthq. Spectra. 35(1):405-422. <https://doi.org/10.1193/112017eqs239m>
- Varela-Rivera, J. L., Fernández-Baqueiro, L., Moreno-Herrera, J. (2023), *Shear and Flexure-Shear Strengths of Autoclaved Aerated Concrete Confined Masonry Walls*. ACI Struct. J. 120(3):207-215. <https://doi.org/10.14359/51738511>
- Wu, F., Wang, H. T., Li, G., Jia, J. Q., Li, H. N. (2017), *Seismic performance of traditional adobe masonry walls subjected to in-plane cyclic loading*. Mater. Struct. 50(69):1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0927-0>
- Yi, T., Moon, F. L., Leon, R. T., Kahn, L. F. (2006), *Lateral Load Tests on a Two-Story Unreinforced Masonry Building*. J. Struct. Eng. 132(5):643-652. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:5\(643\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:5(643))
- Yu, J., Cao, J., Fei, T. (2013), *Experimental Study on Improving Seismic Behavior of Load-Bearing Masonry Wall Made of Autoclaved Aerated Concrete*. Trans. Tianjin Univ. 19(6):419-424. <https://doi.org/10.1007/s12209-013-2121-6>
- Zhenggang, C., Peng, D., Feng, F., Ming, F. (2017), *Cyclic testing and parametric analyses of the fabricated steel frames infilled with autoclaved aerated concrete panels*. Adv. Struct. Eng. 20(4):629-640. <https://doi.org/10.1177/1369433216659288>

Un acercamiento a la correlación de imágenes digitales para mediciones de especímenes de mampostería en laboratorio

J. H. Chávez-Gómez¹, M. Mesa-Lavista^{1*}, J. Álvarez Pérez¹, F. Yépez-Rincón¹,
E. Valencia-Guzmán¹, R. González-Alcorta¹

*Autor de Contacto: mmesal@uanl.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.705>

Recibido: 24/10/2023 | Correcciones recibidas: 09/04/2024 | Aceptado: 27/04/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

El objetivo del trabajo es emplear la técnica de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) para analizar los desplazamientos en muretes de mampostería sometidos a compresión axial, sin usar un programa comercial. Se desarrolló un algoritmo empleando el método numérico de Newton Raphson para este propósito. Los resultados obtenidos fueron comparados con las mediciones del transductor diferencial lineal variable (LVDT), validando la eficacia del algoritmo y comparándolos con estudios previos, con errores aceptables. Este trabajo forma parte de un proyecto en curso en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, estableciendo las bases para futuras investigaciones sobre la implementación de la técnica para la obtención de patologías y estados deformacionales en estructuras de mampostería. Como principal conclusión se llegó a la determinación que el DIC podrá ser empleado como un método de medición fiable de desplazamientos y deformaciones en ensayos de laboratorio.

Palabras clave: correlación de imágenes digitales; mampostería.

Citar como: Chávez-Gómez, J. H., Mesa-Lavista, M., Álvarez Pérez, J., Yépez-Rincón, F., Valencia-Guzmán, E., González-Alcorta, R. (2024), “Un acercamiento a la correlación de imágenes digitales para mediciones de especímenes de mampostería en laboratorio”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 174 – 190, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.705>

¹Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo los autores J.H. Chávez-Gómez, M. Mesa-Lavista, y J. Álvarez Pérez contribuyeron equitativamente con la concepción metodológica del proyecto (33% cada uno). El autor E. Valencia-Guzmán contribuyó con la instrumentación del método DIC (90%) y la autora F. Yépez-Rincón (10%). E. Valencia-Guzmán contribuyó con la programación del método (80%) y J.H. Chávez-Gómez (20%). Los autores J.H. Chávez-Gómez (20%), M. Mesa-Lavista (20%), J. Álvarez Pérez (20%), F. Yépez-Rincón (20%), R. González-Alcorta (20%) contribuyeron de manera equitativa en la escritura y conclusiones generales del trabajo. Todos los autores participaron en el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

An approach to digital images correlation for measurements of masonry specimens in laboratory

ABSTRACT

The aim of the work is to employ the Digital Image Correlation (DIC) technique to analyze displacements in masonry wall specimens under axial compression, without using commercial software. An algorithm was developed using the Newton Raphson numerical method for this purpose. The results obtained were compared with measurements from the Linear Variable Differential Transformer (LVDT), validating the effectiveness of the algorithm and comparing them with previous studies, with acceptable errors. This work is part of an ongoing project at the Civil Engineering Institute of the Autonomous University of Nuevo León, laying the groundwork for future research on the implementation of the technique for obtaining pathologies and deformation states in masonry structures. As the main conclusion, it was determined that DIC can be used as a reliable method for measuring displacements and deformations in laboratory tests.

Keywords: digital image correlation; masonry.

Uma abordagem à correlação de imagens digitais para medições de espécimes de alvenaria em laboratório

RESUMO

O objetivo do trabalho é empregar a técnica de Correlação de Imagens Digitais para analisar deslocamentos em muros de alvenaria submetidos a compressão axial, sem usar um programa comercial. Um algoritmo foi desenvolvido empregando o método numérico de Newton Raphson para este propósito. Os resultados obtidos foram comparados com as medições do transdutor diferencial linear variável, validando a eficácia do algoritmo e comparando-os com estudos anteriores, com erros aceitáveis. Este trabalho faz parte de um projeto em andamento no Instituto de Engenharia Civil da Universidade Autônoma de Nuevo León, estabelecendo as bases para futuras pesquisas sobre a implementação da técnica para a obtenção de patologias e estados de deformação em estruturas de alvenaria. Como principal conclusão, chegou-se à determinação de que o DIC pode ser utilizado como um método confiável para medir deslocamentos e deformações em ensaios de laboratório.

Palavras-chave: correlação de imagens digitais; alvenaria.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La Correlación de imagen digital (*Digital Image Correlation*, DIC por sus siglas en inglés) es un método de medición óptica, preciso y práctico; capaz de mapear un campo completo de desplazamientos en un objeto de interés que ha sido deformado. Consiste en realizar un procesamiento de imágenes fotográficas tomadas a una superficie previamente preparada con un patrón de puntos aleatorios. Esta superficie sufre deformaciones por estar sometida a un estado de cargas. Con el empleo del procesamiento de imágenes se es capaz de obtener el campo de desplazamientos en una estructura específica. Es una alternativa a los dispositivos tradicionales de medición y puede mapear un campo de desplazamientos completo. Actualmente, se está llevando a cabo un proyecto que tiene como objetivo evaluar la efectividad de la técnica de correlación de imagen digital en muretes de mampostería. Los muretes fueron fabricados en el laboratorio con bloques huecos de concreto, y sometidos a compresión axial. Dentro de este proyecto, además; se emplea el tradicional método de medición de los desplazamientos con el empleo de un transductor eléctrico de desplazamiento (Linear Variable Differential Transformer, LVDT por sus siglas en inglés). Estos dos métodos fueron comparados en el presente proyecto de investigación para validar la técnica del DIC.

El desarrollo de la técnica de DIC ha ocurrido desde su origen en los años 80 y ha estado en constante cambio y evolución con el objetivo de reducir el costo computacional y aumentar su aplicabilidad.

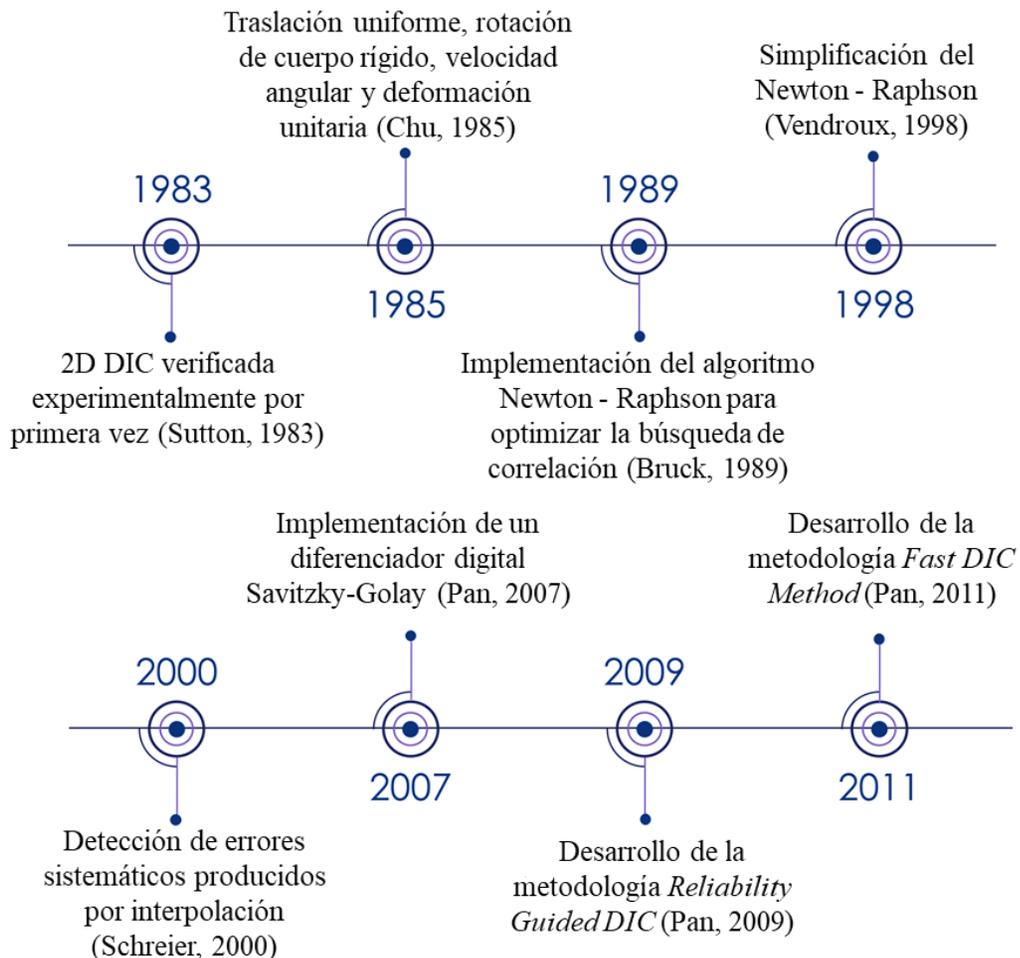


Figura 1. Línea del tiempo de la evolución del método del DIC

En la Figura 1 se presenta en una línea del tiempo, la evolución de su implementación. Sin embargo, a partir del año 2010 (Destrebecq et al., 2011), comenzó su implementación en algunos problemas de la ingeniería civil tales como: vigas de concreto reforzado, muros de mampostería (Mojsilović and Salmanpour, 2016), entre otros (Bruck et al., 1989; Chu et al., 1985; Pan, 2009; Pan and Li, 2011; Schreier et al., 2009; Schreier et al., 2000; Vendroux and Knauss, 1998).

1.1 Técnicas del DIC

DIC tiene diferentes ramas que dependen del objetivo de la experimentación, a su vez, cada una de ellas se puede ejecutar con diferentes metodologías que han surgido de la evolución de la técnica. Las variantes ya establecidas de DIC son 2D-DIC, 3D-DIC y DVC que cumplen la tarea de obtener deformaciones 2D, deformaciones 3D y deformaciones volumétricas respectivamente (Hubert et al., 2010). Las metodologías incluyen factores como los algoritmos de correlación, formas de preparación de la superficie, métodos de interpolación y calibración.

Se le conoce a 2D-DIC como la variante de correlación de imagen digital que sólo necesita una cámara (Bermudo Gamboa et al., 2019). Este es un método de medición óptico sin contacto que utiliza los principios de la mecánica del medio continuo para extraer el campo de los desplazamientos de un objeto sujeto a una carga (Sutton et al., 2008). Una de las principales ventajas de esta variante, es que reduce considerablemente el tiempo de implementación porque no siempre necesita una calibración previa a la captura de imágenes; teniendo una reducción en el costo computacional y brinda como resultados precisiones comparables a las variantes de 3D-DIC en problemas de esfuerzos (y/o) deformaciones planos (Bermudo Gamboa et al., 2019). Sin embargo, presenta como desventajas la incapacidad de no detectar los movimientos fuera del plano y que la cámara debe estar perpendicular a la superficie del objeto (Sutton et al., 2008). En ese sentido cada movimiento fuera de plano, tanto por rotación o translación, lo interpretará como un desplazamiento, esto se puede comprobar de forma teórica con las ecuaciones del modelo de cámara *pinhole* (Sutton et al., 2008).

Stereo DIC o 3D DIC es un método ya establecido usado para la reconstrucción de la forma de los objetos y para el análisis tridimensional del tensor de deformaciones (Zhenxing Hu et al., 2010). Para la aplicación de este se emplean 2 cámaras para obtener el campo de desplazamientos tridimensional de un objeto físico. Posteriormente se utiliza la técnica *Stereovision binocular* para reconstruir una escena 3D desde dos puntos de vista distintos mediante una triangulación (Orteu, 2009). Esto es posible debido a las suposiciones de que se conoce la posición relativa y orientación de las cámaras y que las proyecciones de cada cámara, estén sincronizados para que correspondan a un mismo punto físico P del objeto de estudio (Orteu, 2009). Esta variante 3D no tiene las limitantes que el 2D DIC ya que puede usarse para hacer mediciones en objetos de múltiples geometrías y con movimientos fuera de plano. La principal desventaja radica en la aplicación de la técnica, tanto para la calibración como para el algoritmo de correlación (Bermudo Gamboa et al., 2019).

La Correlación volumétrica digital (DVC) es una extensión del 2D-DIC (Jiroušek et al., 2011). DVC toma los conceptos de patrón de puntos, registro de imagen y la correlación de subconjuntos y los expande al volumen de un objeto de interés (Quintana et al., 2016). El registro de imagen no se hace con cámaras, más bien se utilizan técnicas como *computed tomography*, *confocal imaging microscope* y *magnetic resonance imaging* que son principalmente usados en la ingeniería de la Biomecánica (Hubert et al., 2010). Estos métodos preceden al DIC y eran típicamente usados para obtener información de las dimensiones y la densidad del material, sin embargo, con el surgimiento de DVC esta información tiene un mayor potencial (Quintana et al., 2016). En vez de utilizar pintura como patrón de puntos como en el 2D-DIC, el registro de imagen está basado en las características del espécimen (Quintana et al., 2016). La técnica está basada en realizar un escaneo inicial con los métodos de registro de imagen mencionados para obtener el volumen de referencia

sin deformación. Posteriormente, una fuerza externa se aplica y se hacen escaneos secuenciales y de forma consecutiva que representen el proceso de deformación del objeto (Hubert et al., 2010). Finalmente, con subconjuntos cúbicos de voxels se hace una correlación para encontrar los desplazamientos u , v y w en las imágenes deformadas (Quintana et al., 2016). La ventaja de este método es que se obtiene un campo completo de desplazamientos de los volúmenes, no sólo de la superficie del objeto como en las variantes 2D-DIC y 3D-DIC (Jiroušek et al., 2011). La desventaja es que se requiere equipos especializados y las aplicaciones son más limitadas a microestructuras de la Biomecánica y en problemas específicos de la Mecánica de los medios continuos (Buljac et al., 2018).

Debido a las limitaciones que se presentan en el equipamiento necesario para la aplicación del DIC, se decidió implementar la variante 2D-DIC en la presente investigación. Elaborando un algoritmo que permita obtener el campo de desplazamientos en el procesamiento de las imágenes.

1.2 Aplicaciones del DIC en ingeniería civil

DIC ha sido aplicada en diferentes áreas de la Ingeniería y la Biomecánica. Referente a la Ingeniería Civil se ha empleado principalmente a problemas estructurales de vigas (Sutton et al., 1983), mampostería (Allaoui et al., 2018; Mojsilović and Salmanpour, 2016; Zahra et al., 2021; Zahra et al., 2023) y puentes (Dhanasekar et al., 2019; Malesa et al., 2010), entre otras problemáticas de la ingeniería civil. En estas estructuras la información relevante son las deformaciones y la medición de propagación y geometría de las grietas. Esta última de gran importancia en el análisis de las patologías en las estructuras.

En la investigación de (Malesa et al., 2010) se emplearon 2 cámaras para la adquisición de imágenes en diferentes puntos de un puente de tamaño real en Polonia. La metodología seguida fue utilizar un sensor global y local para capturar imágenes del puente mientras un tren de 120 Toneladas pasaba y se regresaba repetidamente en 4 velocidades distintas. Se realizaron más de 30 experimentos capturando de 20 a 80 imágenes por ensayo. Los resultados de la experimentación se compararon con un modelo de elemento finito del puente y los resultados del DIC concordaron satisfactoriamente.

La técnica del DIC también se aplicó satisfactoriamente en vigas de concreto reforzado. En la investigación de (Fayyad and Lees, 2014) se realizaron 2 series de 7 vigas de concreto reforzado, cada una se ensayó a flexión a 3 puntos. Emplearon una cámara tipo DSLR con una resolución de 5472 x 3648 pixeles. Ellos utilizaron el software Geo PIV que utiliza un criterio de correlación cruzada normalizada. Extrajeron la información en cada espécimen de la propagación de la abertura de las grietas. Esto fue comparado con un C-Clip gauge y se encontró que el método DIC es efectivo para visualizar y cuantificar las propiedades de fractura en el concreto reforzado y para monitorear las grietas en las vigas de concreto reforzado.

En la investigación de (Mojsilović and Salmanpour, 2016) se ensayaron 10 muros de mampostería a los cuales se les aplicó el método 2D DIC. Para capturar las imágenes se probó con dos cámaras diferentes, la Nikon D3 con 12.1MP y Nikon D800E con 36.3MP. Por cada espécimen ensayado se tomaron aproximadamente 500 imágenes. El procesamiento de imágenes fue realizado con el software VIC 2D y el criterio de correlación fue el de diferencias cuadradas normalizada. Se encontró una buena relación entre los desplazamientos medidos por DIC y por LVDTs tanto en direcciones horizontales, diagonales y verticales.

El método de 2D DIC fue aplicado por (Allaoui et al., 2018) para medir el comportamiento a compresión de un prisma de dos hileras de ladrillo. Los autores emplearon el software de correlación 7D y una cámara comercial con un dispositivo de carga acoplada (CCD). En esta investigación, referente al DIC, se delimitó y optimizó el tamaño de las cuadrículas en la junta de mortero para lograr el correcto procesamiento de las imágenes.

Los investigadores (Howlader et al., 2021) realizaron ensayos en 8 paredes perforadas de

mampostería sin refuerzo. Los ensayos se llevaron a cabo a escala real bajo carga cíclica en el plano y carga vertical de pre compresión constante. Para medir la deformación de las paredes durante las pruebas y capturar el agrietamiento completo, utilizaron el método 2D DIC en paralelo con instrumentación tradicional de LVDTs. Las imágenes fueron analizadas utilizando el software VIC-2D para validar exitosamente los resultados DIC contra las mediciones registradas por los LVDTs.

Por su parte, (Zahra et al., 2021) aplicaron igualmente el método 2D DIC para la determinación de las deformaciones en ensayos a compresión de prismas de mampostería de bloques huecos de concreto. Los autores utilizaron una cámara monocromática a una velocidad de 10 cuadros por segundo. Posteriormente, compararon los resultados obtenidos con la técnica DIC con micro-modelos de elementos finitos.

Más recientemente, (Zahra et al., 2023) han aplicado la técnica del DIC para obtener las deformaciones por tensión producidas en un panel de mampostería ensayado a flexión fuera del plano. Se empleó una cámara monocromática, que permitió realizar el análisis de deformación/tenacidad. En esta investigación también emplearon el método 2D DIC en un análisis lateral del panel.

De acuerdo con la literatura consultada, se puede concluir que la técnica del DIC se ha aplicado satisfactoriamente en diferentes problemas estructurales en el campo de la ingeniería civil. Debido a la fortaleza que ha demostrado tener la técnica para la medición del campo de las deformaciones y la detección de inicio y propagación de las grietas, se decidió comenzar a aplicar la técnica en los proyectos de investigación en curso. En ese sentido se planteó como objetivo de esta investigación evaluar la efectividad del método 2D DIC en muretes de mampostería fabricados en nuestro laboratorio (FIC-UANL) bajo carga de compresión axial según la normativa europea (Eurocode-6, 2005).

2. METODOLOGÍA

El proyecto se llevó a cabo desarrollando la siguiente metodología:

- 1) *Preparación de los especímenes en el laboratorio.* Como parte del proyecto en el que se desarrolló esta investigación, se establecieron 3 etapas fundamentales: (i) caracterización de los materiales (bloques y mortero) según las normas (NMX-C-036-ONNCCE-2013, 2013; NMX-C-061-ONNCCE-2015, 2015), (ii) construcción de los especímenes, y (iii) ensayo de los especímenes a compresión según la normativa europea (Eurocode-6, 2005). Se elaboraron 7 muretes de 5 hileras de bloques y medios bloques del N°6 de dimensiones modulares de 400x150x200mm (Longitud x ancho x altura). Los bloques fueron adquiridos en una empresa local. La resistencia promedio de los bloques fue de 6.61 MPa en área bruta y las dimensiones de los muretes fueron de 104 cm de altura y 61 cm de espesor. Los muretes se ensayaron a compresión axial como parte de otro proyecto de investigación en curso que persigue otros objetivos específicos.
- 2) *Preparación del marco de carga.* Se preparó el marco de carga como se observa en la Figura 2. Se colocó un LVDT para la medición de los desplazamientos, y su posterior comparación con los resultados obtenidos al emplear la técnica del DIC.
- 3) *Preparación de la técnica del DIC.* La preparación de la técnica consistió en agregar una capa de pintura blanca en el centro del espécimen, y rociar con aerosol negro la capa de pintura blanca. Esto generó un patrón de puntos que posteriormente fueron analizados con la toma de fotografías para obtener la imagen deformada a medida que avanzaba el ensayo (ver Figura 3). La Figura 3A, muestra 4 muretes que se prepararon con las características de la cámara F5 con ISO 500 y una velocidad de obturación de 1/13 s. En la Figura 3B, se presentan los otros 3 muretes con las características de la cámara F5 con ISO 250 y una velocidad de obturación

de 1/25 s. Adicionalmente, se utilizaron puntos de control en cada prueba para el cálculo posterior de los errores debido a posibles movimientos del sistema de captura de fotos o del marco de carga. Los puntos de control se muestran en la Figura 3C.

- 4) *Captura de imágenes.* Para la captura de imágenes se empleó una Cámara NIKON D5600 lentes 18mm a 58 mm de 24 MPX con control remoto y un trípode marca Manfrotto. Además, se emplearon dos fuentes de luz marca GTC luz fría 3900 lm con paraguas fotográfico, como se aprecia en la Figura 4. La captura de imágenes se realizó mientras se ensayaban los muretes a compresión axial.
- 5) *Algoritmo DIC.* Para la aplicación de la técnica del DIC, se elaboró un algoritmo en el lenguaje de programación Python. En la referencia (Valencia-Guzmán, 2021) se puede consultar el script del algoritmo. Para el desarrollo de este, se utilizaron diferentes métodos y recomendaciones de investigaciones precedentes (Su et al., 2019). Para el algoritmo, se siguió el diagrama de flujo que se presenta en la Figura 5 y la metodología que se explica a continuación (Figura 6).

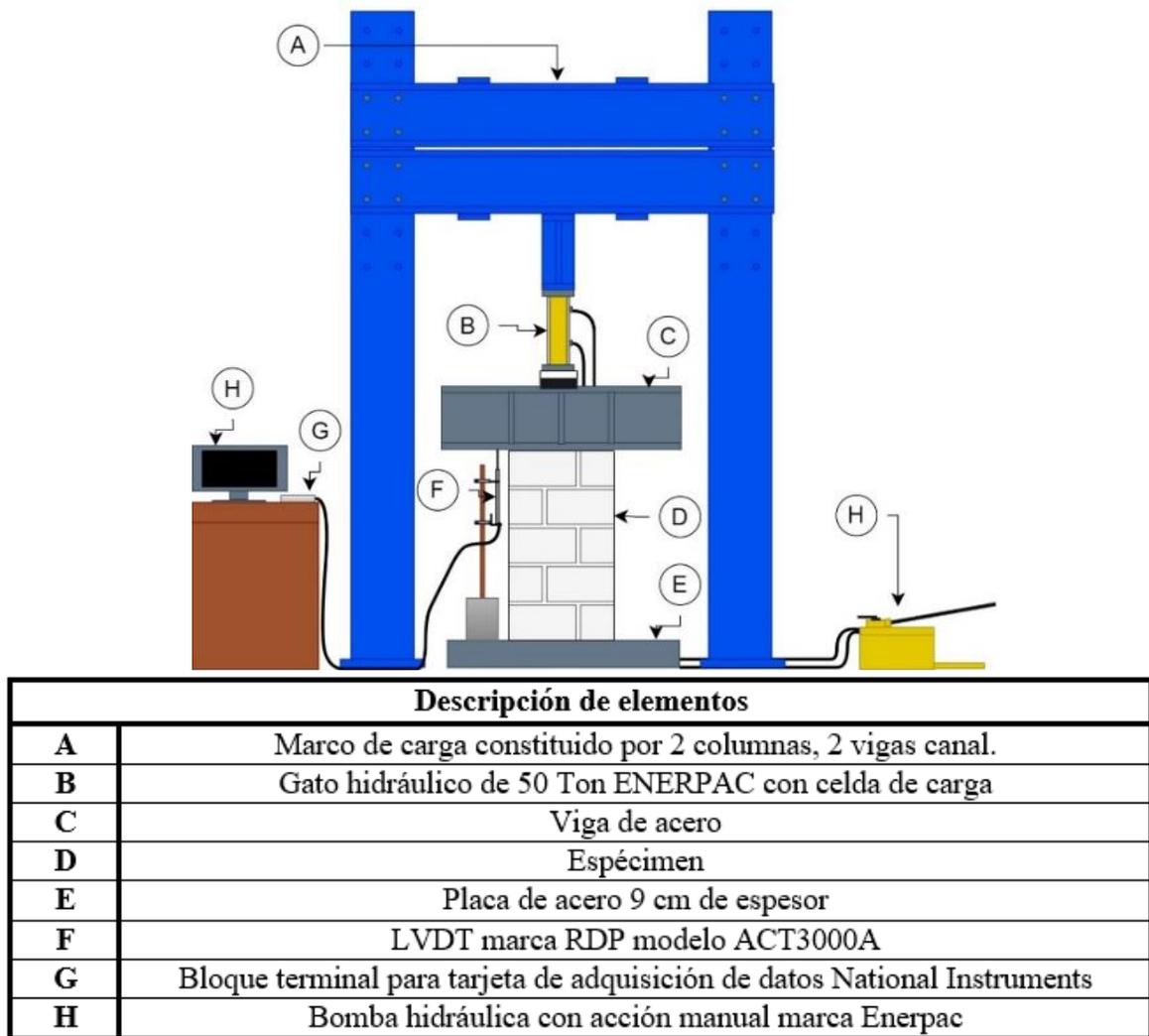


Figura 2. Esquema del marco de carga para el ensayo del espécimen

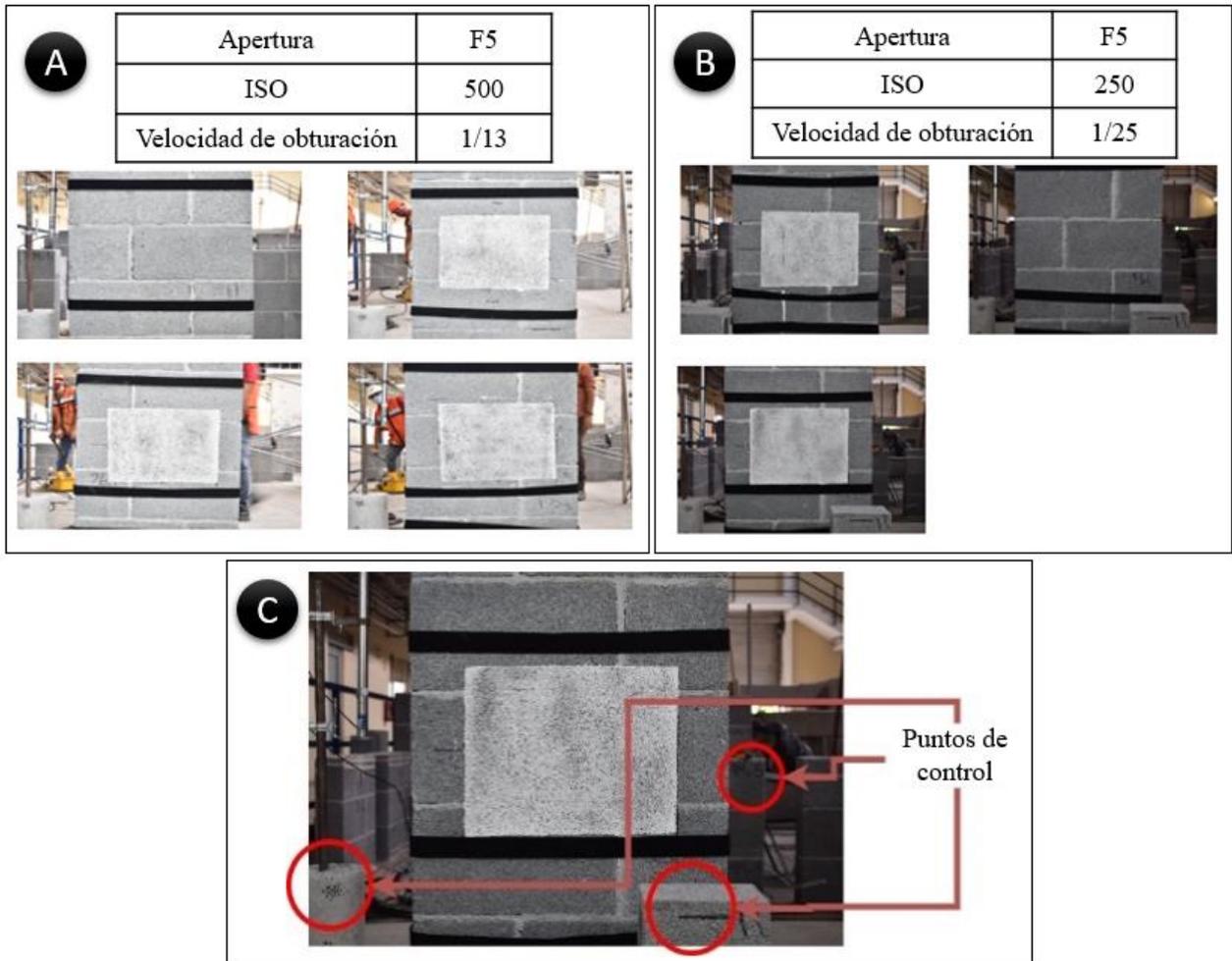


Figura 3. Preparación de la técnica del DIC. A) Muretes para prueba con cámara ISO 500, velocidad de obturación 1/13 s y apertura F5, B) muretes para prueba con cámara ISO 250, velocidad de obturación 1/25 s y apertura F5, C) puntos de control empleados para la experimentación



Figura 4. Ensayo en el laboratorio e implementación de la técnica para la captura de imágenes.

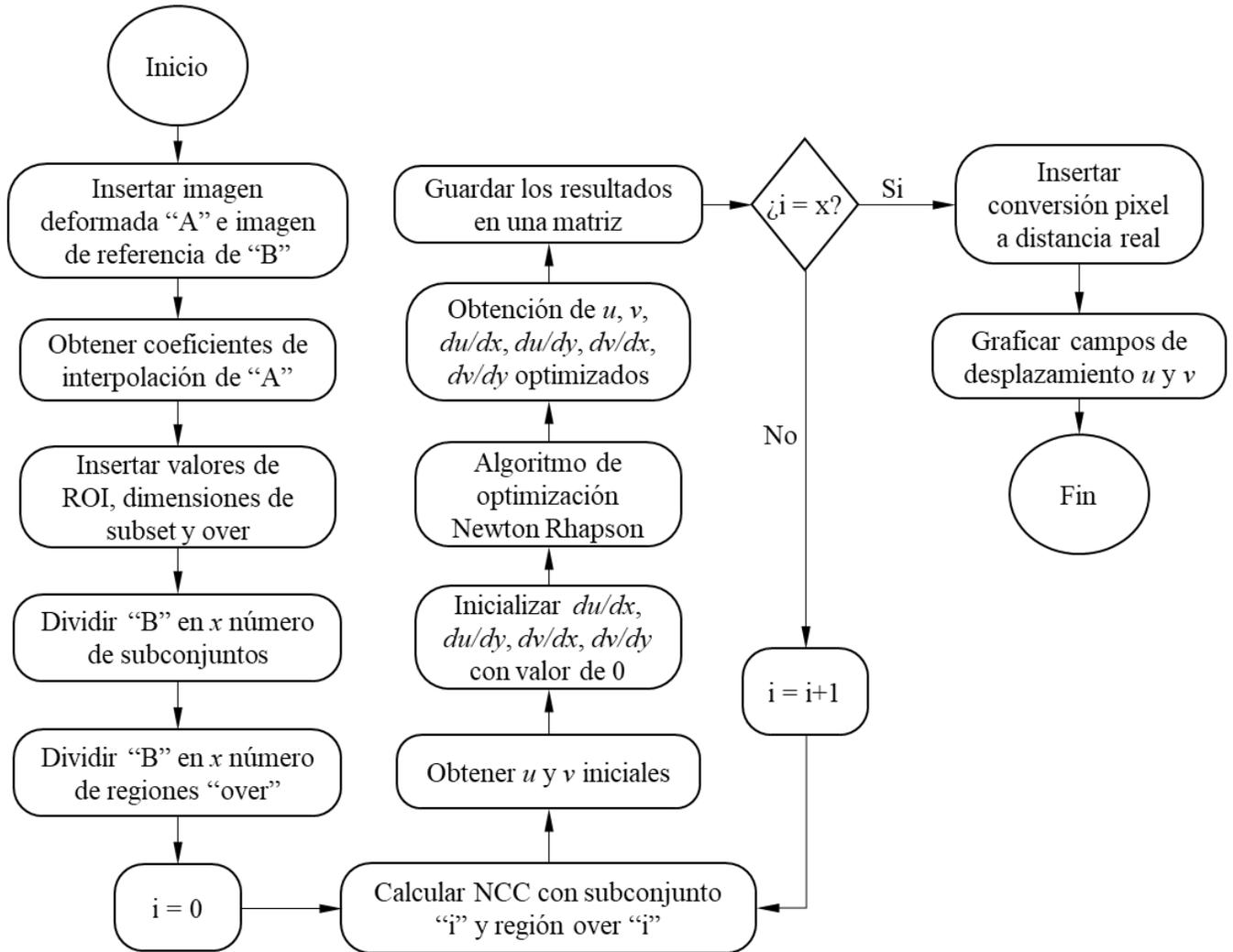


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo elaborado para la aplicación de la técnica del DIC (Valencia-Guzmán, 2021)

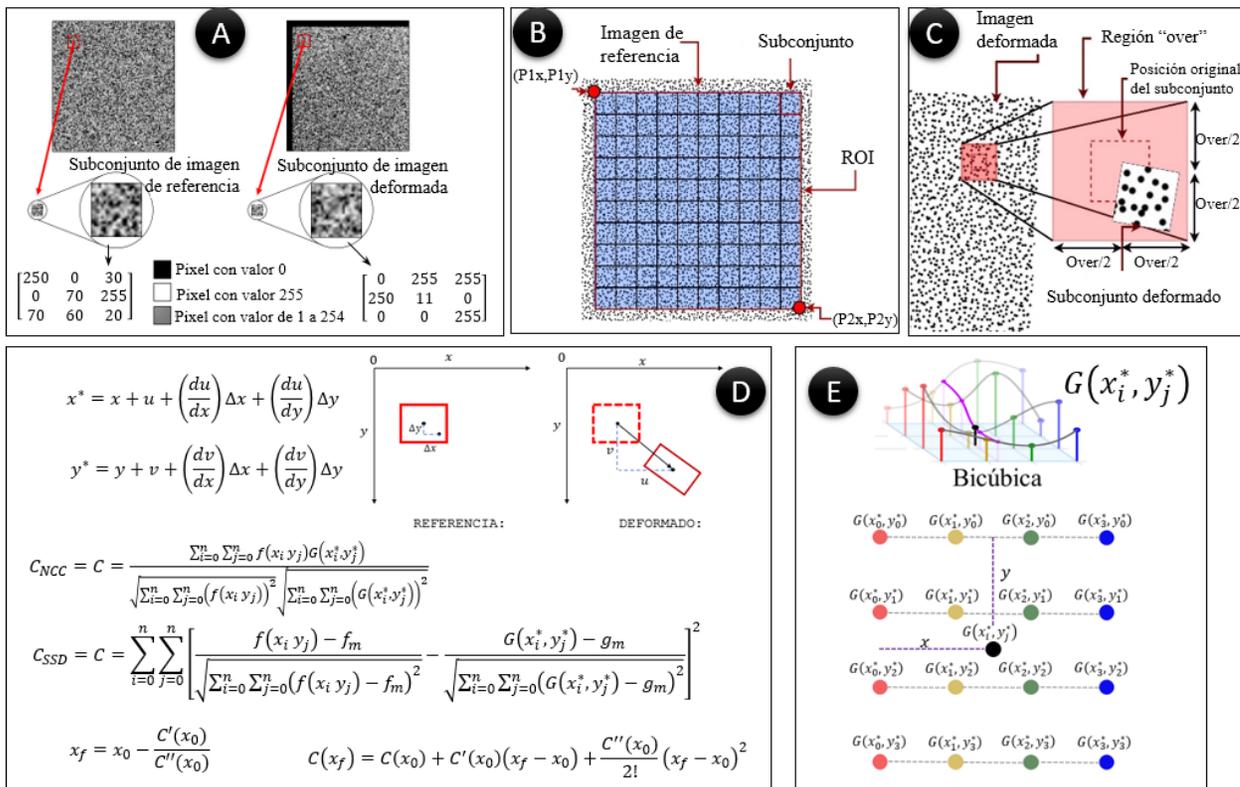


Figura 6. Metodología seguida para la implementación del algoritmo (Valencia-Guzmán, 2021)

En la Figura 6, se presenta la metodología para la implementación del algoritmo empleado para la aplicación de la técnica del DIC en el presente trabajo. Primeramente, se obtuvo un subconjunto del patrón de puntos en la imagen de referencia y el mismo subconjunto en la imagen deformada posterior al ensaye (Figura 6A). Los subconjuntos fueron clasificados en pixeles en la siguiente escala de grises: 0 (negro) a 255 (blanco). Posteriormente, se subdividieron los subconjuntos de manera optimizada, seleccionando la región de referencia conocida como “región de interés” (*Region Of Interest*, ROI por sus siglas en inglés) (Figura 6B). Una vez definidos los subconjuntos dentro del ROI, se determina la posición de la búsqueda dentro de la imagen deformada. Esto se realiza definiendo una distancia arbitraria “over”, que depende de las deformaciones máximas esperadas (Figura 6C). En la Figura 6D, se presentan las ecuaciones que se emplearon para la determinación de las coordenadas de los puntos deformados (x^*, y^*) a partir de los desplazamientos horizontales (u) y verticales (v). Para ello se emplearon las funciones de interpolación en estado no deformado $f(x_i, y_j)$ y deformado $G(x_i^*, y_j^*)$. Para el cálculo de los coeficientes de correlación se aplicó el criterio de Correlación Cruzada Normalizada (C_{NCC}) y de Diferencias al Cuadrado de Suma Cero (C_{SSD}) (Pan et al., 2010). La búsqueda de los valores extremos de correlación es mediante el método de Newton Raphson (Steven and Raymond, 2015). Para obtener las funciones de interpolación ‘ f ’, ‘ G ’ y ‘ C ’, se empleó el criterio de interpolación bicúbica (Figura 6E), ya que la demanda computacional es relativamente baja en comparación con otros métodos de interpolación (Schreier et al., 2000).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El algoritmo propuesto fue verificado mediante una imagen sintética en el software libre *Speckle Generator*. El error máximo relativo en términos del campo de desplazamientos (u , v , α) en la verificación del algoritmo fue de 0.053% para el desplazamiento horizontal, u , en un determinado subconjunto en condiciones idóneas, es decir, no existieron distorsiones, y no existieron movimientos no deseados (ver Tabla 1).

Tabla 1. Errores en traslaciones y rotación

Variables	Valor Esperado	Valor obtenido	Error relativo
u	32.897 px	32.9144 px	0.053%
v	-36.5146 px	-36.497 px	0.048%
α	0.0523599 rad	0.0521625 rad	0.378%

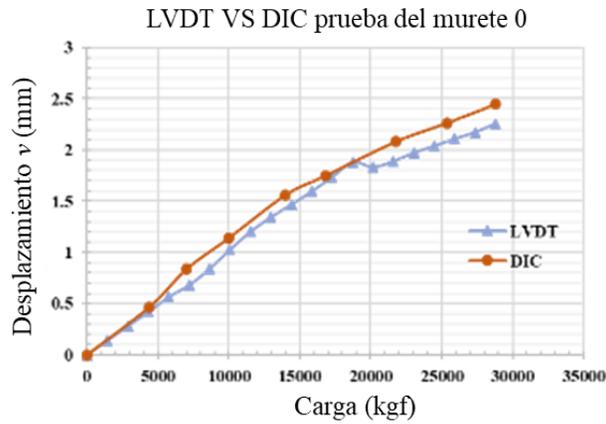
Posteriormente a la comprobación del algoritmo, se obtuvieron los gráficos de carga vs desplazamiento de cada prueba realizada en intervalos de carga previamente seleccionados (ver Figura 7 y Figura 8). Debido a que los LVDT solo registran el desplazamiento lineal vertical en un segmento de recta (l_0) y la técnica del DIC tiene entre 1000 a 4000 puntos dependiendo de la superficie de referencia del murete, se optó por obtener un promedio de los desplazamientos verticales sobre la línea (l_D) al centro de la superficie de referencia (ver Figura 9), para efectuar la comparación entre los resultados del DIC y el LVDT.

De las pruebas realizadas a los 7 muretes, en el espécimen 4, no fue posible capturar la información del LVDT. En la Figura 7 y la Figura 8 se muestran los resultados de los muretes ensayados, denominados como prueba 0, 1, 2, 3, 5 y 6. También, se muestran los errores relativos calculados entre los desplazamientos obtenidos por las mediciones del LVDT y los obtenidos con la técnica del DIC.

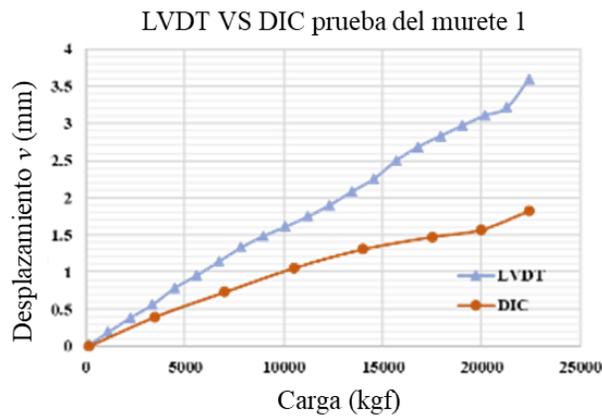
Se obtuvo una diferencia absoluta máxima de 1.77 mm en la prueba del murete 1 (Figura 7) y un error relativo promedio máximo de 54.37% en la prueba del murete 3 (Figura 8). Estos errores son sustanciales y pueden ser atribuidos a las siguientes razones:

- (1) Movimientos no deseados de la placa y el trípode.
- (2) En la prueba del murete 3, se evidenció la aparición y propagación de una grieta, lo que arrojó valores irregulares y subconjuntos irreconocibles.
- (3) Distorsión del lente.

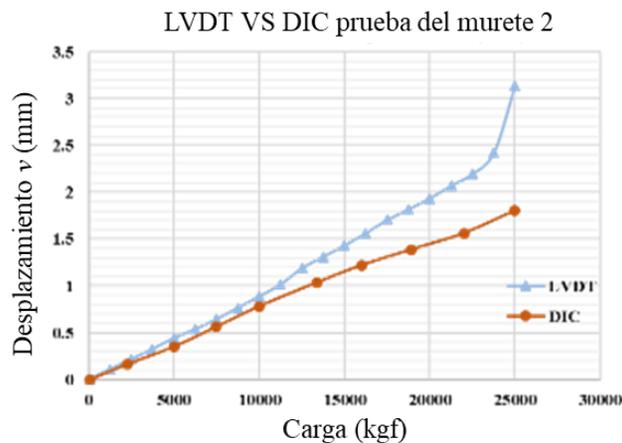
Mediante los puntos de control que se muestran en la Figura 3, se verificó que no hubo movimientos significativos del trípode. En los muretes de las pruebas 0, 2, 5 y 6, se observaron errores promedio más bajos que fueron del 10.99%, 21.65%, 5.47% y 20.22% respectivamente. Sin embargo, es importante destacar que estos errores todavía superan la precisión deseada, especialmente en las pruebas que superan los niveles de cargas de 15000 kgf (15 toneladas), donde se registran las mayores diferencias.



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
0	0	0	0	0.00
4400	1	0.46884	0.42461	10.42
7017	2	0.83672	0.66432	25.95
10000	3	1.14050	1.01596	12.26
14000	4	1.55988	1.43100	9.01
16800	5	1.74735	1.68510	3.69
21800	6	2.08113	1.89955	9.56
25400	7	2.26296	2.08188	8.70
28800	8	2.44464	2.25545	8.39
Error promedio				10.99

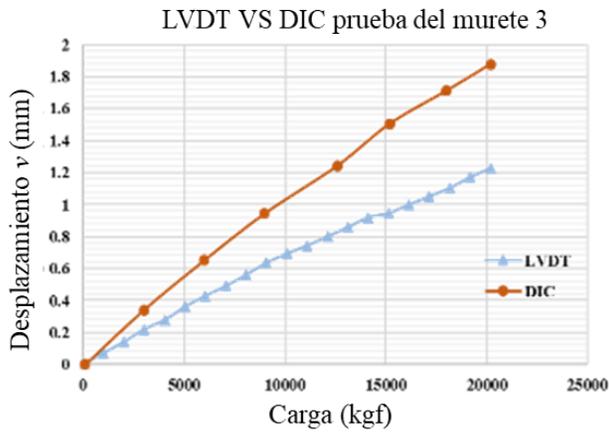


Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
140	0	0	0	0.00
3500	1	0.39987	0.59235	-32.49
7000	2	0.73110	1.19257	-38.70
10500	3	1.05501	1.66167	-36.51
14000	4	1.30750	2.16988	-39.74
17500	5	1.47337	2.77619	-46.93
20000	6	1.57064	3.08693	-49.12
22400	7	1.82140	3.59156	-49.29
Error promedio				-41.83

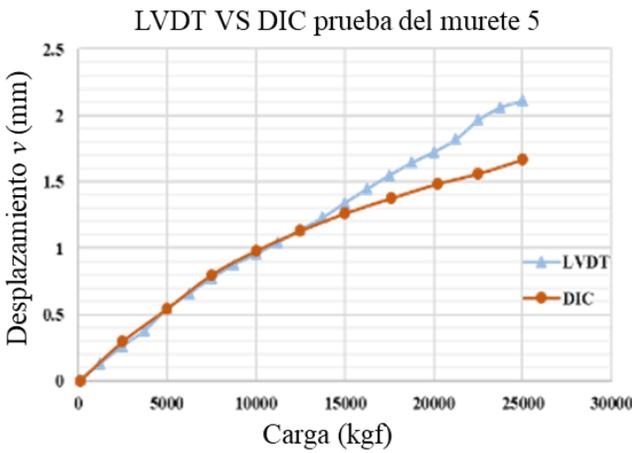


Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2300	1	0.16446	0.19899	-17.35
5000	2	0.34966	0.44025	-20.58
7500	3	0.56413	0.64394	-12.39
10000	4	0.78138	0.88666	-11.87
13400	5	1.03805	1.27676	-18.70
16000	6	1.22117	1.53646	-20.52
18900	7	1.38908	1.83196	-24.18
22000	8	1.56459	2.14444	-27.04
25000	9	1.80847	3.13240	-42.27
Error promedio				-21.65

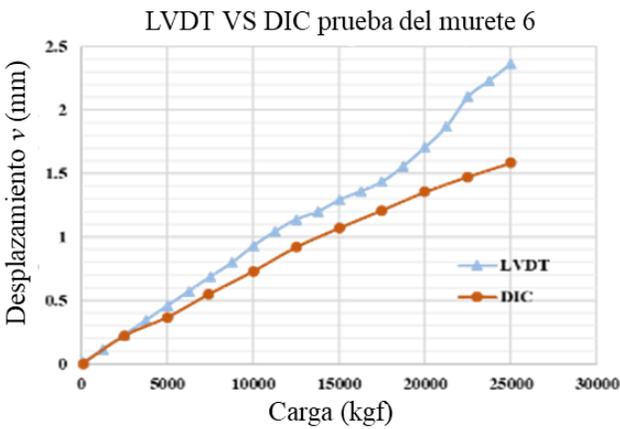
Figura 7. Resultados de la comparación entre el LVDT y el DIC para los muretes 0, 1 y 2.



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
3000	1	0.33960	0.21630	57.00
6000	2	0.65058	0.42292	53.83
9000	3	0.94384	0.62682	50.58
12600	4	1.24236	0.82598	50.41
15200	5	1.50514	0.94703	58.93
18000	6	1.71005	1.09216	56.58
20200	7	1.87693	1.22462	53.27
Error promedio				54.37



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2500	1	0.29695	0.26187	13.40
5000	2	0.54353	0.54129	0.41
7500	3	0.79931	0.77204	3.53
10000	4	0.98015	0.95489	2.64
12500	5	1.13096	1.14003	-0.79
15000	6	1.26176	1.34216	-5.99
17600	7	1.37609	1.55677	-11.61
20200	8	1.48394	1.73981	-14.71
22500	9	1.56148	1.96488	-20.53
25000	10	1.66718	2.11064	-21.01
Error promedio				-5.47



Carga (kgf)	Foto	DIC (mm)	LVDT (mm)	Error %
100	0	0	0	0.00
2500	1	0.21805	0.22858	-4.61
5000	2	0.36459	0.45716	-20.25
7400	3	0.54477	0.67659	-19.48
10000	4	0.72692	0.92808	-21.68
12500	5	0.91711	1.13738	-19.37
15000	6	1.06770	1.28948	-17.20
17500	7	1.20852	1.43366	-15.70
20000	8	1.35222	1.70581	-20.73
22500	9	1.47283	2.10386	-29.99
25000	10	1.58116	2.36550	-33.16
Error promedio				-20.22

Figura 8. Resultados de la comparación entre el LVDT y el DIC para los muretes 3, 5 y 6.

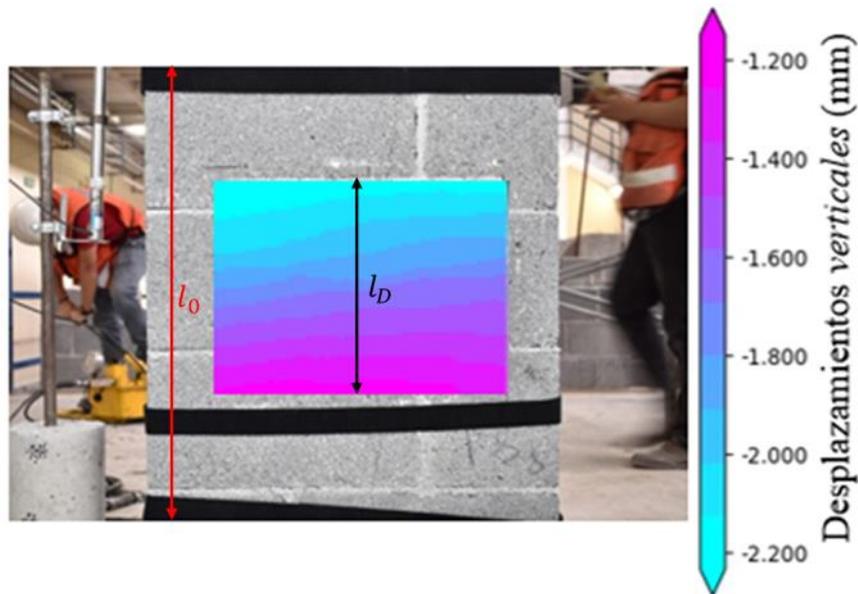


Figura 9. Resultados de los desplazamientos verticales obtenidos mediante el algoritmo empleado en el DIC para la prueba del murete 5 con una carga máxima de 25000 kgf.

En la Figura 9, se aprecian los resultados referentes a los desplazamientos verticales para el murete de la prueba 5 en la foto tomada instantes antes de la falla, con una carga máxima de 25000 kgf. Estos desplazamientos se obtuvieron en todo el dominio medido con la aplicación de la técnica DIC.

En la investigación de (Zahra et al., 2021), se realizaron ensayos experimentales de prismas a compresión con bloques huecos de concreto de características similares al de la presente investigación. Con el empleo de la técnica del método 2D-DIC, presentaron sus resultados en términos de las deformaciones. En la Tabla 2 se presenta una comparativa en términos de los desplazamientos promedio máximos verticales a compresión axial. Se puede observar que los errores relativos estuvieron en el orden de 21%, tomando como patrón los presentados en la investigación de (Zahra et al., 2021). Estas diferencias se atribuyen a las variaciones que existen entre las dos investigaciones como por ejemplo la forma de los especímenes (prisma vs muretes). Sin embargo, los resultados obtenidos son alentadores y motivan a continuar implementando la técnica en las líneas de investigación experimental.

Tabla 2. Comparación de los resultados obtenidos con investigaciones precedentes

Referencia	Deformaciones verticales máximas en compresión	Desplazamientos promedios máximos verticales en compresión
(Zahra et al., 2021)	0.007 mm/mm	2.8 mm
Presente investigación, desplazamientos verticales instantes antes de la falla	-	2.2 mm
	Error relativo	21%

4. CONCLUSIONES

- El algoritmo propuesto fue verificado de manera eficaz mediante el empleo de una imagen sintética en el software libre *Speckle Generator*. El error relativo máximo obtenido en el campo de desplazamientos fue de 0.053% para el desplazamiento horizontal.
- Al comparar los desplazamientos verticales entre la técnica del DIC y el LVDT, se encontró que presentan grandes errores relativos, siendo el promedio máximo de 54.37% en la prueba del murete 3. Esto es debido a factores como: distorsión del lente, movimientos no deseados y aparición de grietas o discontinuidades del medio.
- Se identificaron los factores que se necesitan calibrar para alcanzar la precisión deseada con la metodología implementada.
- Con esta investigación se inicia el proceso de implementación de la técnica de DIC y podrá servir como base para futuras investigaciones y trabajos experimentales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes del Instituto de Ingeniería civil de la FIC, UANL y al programa PAICYT: 595-IT-2022, 496-IT-2022 y 598-IT-2022.

6. REFERENCIAS

- Allaoui, S., Rekik, A., Gasser, A., Blond, E., Andreev, K. (2018). *Digital Image Correlation measurements of mortarless joint closure in refractory masonries*. Construction and Building Materials, 162, 334-344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.055>
- Bermudo Gamboa, C., Martín-Béjar, S., Trujillo Vilches, F. J., Castillo López, G., Sevilla Hurtado, L. (2019). 2D–3D Digital Image Correlation Comparative Analysis for Indentation Process. *Materials*, 12(24).
- Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., Peters, W. H. (1989). *Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction*. Experimental Mechanics, 29(3), 261-267. <https://doi.org/10.1007/BF02321405>
- Buljac, A., Jailin, C., Mendoza, A., Negggers, J., Taillandier-Thomas, T., Bouterf, A., Smaniotto, B., Hild, F., Roux, S. (2018). *Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges*. Experimental Mechanics, 58(5), 661-708. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0390-7>
- Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. (1985). *Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics*. Experimental Mechanics, 25(3), 232-244. <https://doi.org/10.1007/BF02325092>
- Destrebecq, J. F., Toussaint, E., Ferrier, E. (2011). *Analysis of Cracks and Deformations in a Full Scale Reinforced Concrete Beam Using a Digital Image Correlation Technique*. Experimental Mechanics, 51(6), 879-890. <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9384-9>
- Dhanasekar, M., Prasad, P., Dorji, J., Zahra, T. (2019). *Serviceability Assessment of Masonry Arch Bridges Using Digital Image Correlation*. Journal of Bridge Engineering, 24(2), 04018120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001341](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001341)
- Eurocode-6. (2005). *Design of masonry structures. In Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*.
- Fayyad, T. M., Lees, J. M. (2014). *Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture*. Procedia Materials Science, 3, 1585-1590. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>

- Howlader, M. K., Masia, M. J., Griffith, M. C. (2021). *Digital image correlation for the analysis of in-plane tested unreinforced masonry walls*. Structures, 29, 427-445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.051>
- Hubert, S., Jean-José, O., Sutton, M. A. (2010). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Jiroušek, O., Jandejsek, I., Vavřík, D. (2011). *Evaluation of strain field in microstructures using micro-CT and digital volume correlation*. Journal of Instrumentation, 6(01), C01039. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/01/C01039>
- Malesa, M., Szczepanek, D., Kujawińska, M., Świercz, A., Kołakowski, P. (2010). *Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique*. EPJ Web of Conferences, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014>
- Mojsilović, N., Salmanpour, A. H. (2016). *Masonry walls subjected to in-plane cyclic loading: application of digital image correlation for deformation field measurement*. International Journal of Masonry Research and Innovation, 1(2), 165-187. <https://doi.org/10.1504/IJMRI.2016.077473>
- NMX-C-036-ONNCCE-2013. (2013). *Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines*. In (pp. 10).
- NMX-C-061-ONNCCE-2015. (2015). *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*. In (pp. 12).
- Orteu, J.-J. (2009). *3-D computer vision in experimental mechanics*. Optics and Lasers in Engineering, 47(3), 282-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.11.009>
- Pan, B. (2009). *Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement*. Applied Optics, 48(8), 1535-1542. <https://doi.org/10.1364/AO.48.001535>
- Pan, B., Li, K. (2011). *A fast digital image correlation method for deformation measurement*. Optics and Lasers in Engineering, 49(7), 841-847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.02.023>
- Pan, B., Xie, H., Wang, Z. (2010). *Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching*. Applied Optics, 49(28), 5501-5509. <https://doi.org/10.1364/AO.49.005501>
- Quintana, K. T., Reu, P., Jimenez, E., Kramer, S. (2016). *Digital Volume Correlation for Materials Characterization* 19th World Conference on Non-Destructive Testing,
- Schreier, H., Orteu, J.-J., Sutton, M. A. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications* (1 ed.). Springer New York, NY. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Schreier, H. W., Braasch, J. R., Sutton, M. A. (2000). *Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation*. Optical Engineering, 39, 2915-2921.
- Steven, C. C., Raymond, P. C. (2015). *Métodos numéricos para ingenieros*.
- Su, Y., Zhang, Q., Fang, Z., Wang, Y., Liu, Y., Wu, S. (2019). *Elimination of systematic error in digital image correlation caused by intensity interpolation by introducing position randomness to subset points*. Optics and Lasers in Engineering, 114, 60-75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.10.012>
- Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., McNeill, S. R. (1983). *Determination of displacements using an improved digital correlation method*. Image and Vision Computing, 1(3), 133-139. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1)
- Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W., Orteu, J. J. (2008). *The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements*. Optics and Lasers in Engineering, 46(10), 746-757. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.005>
- Valencia-Guzmán, E. (2021). *Aplicación de correlación de imagen digital en muretes fabricados en laboratorio* Universidad Autónoma de Nuevo León].

- Vendroux, G., Knauss, W. G. (1998). *Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation*. *Experimental Mechanics*, 38(2), 86-92. <https://doi.org/10.1007/BF02321649>
- Zahra, T., Thamboo, J., Asad, M. (2021). *Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types*. *Journal of Building Engineering*, 38, 102213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102213>
- Zahra, T., Thamboo, J., Dorji, J., Asad, M., Kasinski, W., Nardone, A. (2023). *Out-of-plane flexural behaviour of reinforced mortarless concrete block masonry: An experimental study*. *Construction and Building Materials*, 384, 131448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131448>
- Zhenxing Hu, Huimin Xie, Jian Lu, Tao Hua, Jianguo Zhu. (2010). *Study of the performance of different subpixel image correlation methods in 3D digital image correlation*. *Applied Optics*, 49(21), 4044-4051. <https://doi.org/10.1364/AO.49.004044>

Sucesión numérico-vectorial para el análisis estructural gráfico de edificios históricos de mampostería con arcos y sistemas simétricos

C. Torres^{1*} , J. Rosas² , O. Pérez² 

*Autor de Contacto: ktcate2@hotmail.com; ctorresmo@ipn.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.717>

Recibido: 22/12/2023 | Correcciones recibidas: 10/05/2024 | Aceptado: 14/05/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es denotar la aplicación de la sucesión numérico-vectorial en el análisis estructural de edificios históricos de mampostería, con arcos y sistemas simétricos, incluyendo procesos matemáticos en el análisis gráfico antiguo, enfatizando la importancia de las cargas en la estabilidad estructural. Los análisis se basan en tres etapas fundamentales: reconocimiento del sistema constructivo del objeto patrimonial, discretización geométrica del sistema y análisis vectorial bajo diferentes consideraciones físicas. Así, las líneas de empuje se ven afectadas por las cargas, las condiciones de contorno y la historia del comportamiento estructural del objeto patrimonial. Las herramientas numéricas y computacionales ofrecen procesos de análisis gráfico más rápidos y precisos. Se concluye que estos métodos proporcionan resultados muy particulares y algunos de ellos son similares, por lo que se recomienda utilizar los métodos como complemento y no catalogar uno sobre el otro.

Palabras clave: Análisis estructural; edificios históricos; análisis vectorial; arcos de mampostería; método gráfico.

Citar como: Torres, C., Rosas, J., Pérez, O. (2024), “Sucesión numérico-vectorial para el análisis estructural gráfico de edificios históricos de mampostería con arcos y sistemas simétricos”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 191 – 210, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.717>

¹ Research professor at Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco (ESIA UT), Instituto Politécnico Nacional (IPN), 53950, Naucalpan de Juárez, Estado de México, México, <http://www.sepi.esiatec.ipn.mx>.

² Bachelor's student at Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco (ESIA UT), Instituto Politécnico Nacional (IPN), 53950, Naucalpan de Juárez, Estado de México, México, <http://www.esiatec.ipn.mx>.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor 1 contribuyó con el 100% de la idea original, dirección y escritura final, el autor 2 contribuyó con el 60% del escrito inicial del documento y con el 70% del dibujo de figuras y discusión de resultados, el autor 3 contribuyó con el 40% del escrito inicial y recolección de datos.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

Numerical-vector succession for the graphical structural analysis of historic masonry buildings with arches and symmetrical systems.

ABSTRACT

The objective of this research is to denote the application of numerical-vector succession in the structural analysis of historical masonry buildings, with arches and symmetrical systems, including mathematical processes in ancient graphic analysis, emphasizing the importance of loads in the structural stability. We based the analysis on three fundamental stages: recognition of the construction system of the heritage object, geometric discretization of the system and vector analysis under different physical considerations. Hence, the thrust lines are affected by the loads, boundary conditions and history of structural behaviour. Numerical and computational tools offer faster and more accurate graphic analysis processes. It is concluded that these methods provide very particular results and some of them are similar, therefore, it is recommended to use the methods as a complement and not to catalogue one over the other.

Keywords: structural analysis; historic buildings; vector analysis; masonry arches; graphic method.

Sequência vetorial-numérica para a análise estrutural gráfica de edifícios históricos de alvenaria com arcos e sistemas simétricos.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é denotar a aplicação da sucessão numérico-vetorial na análise estrutural de edifícios históricos de alvenaria, com arcos e sistemas simétricos, incluindo processos matemáticos na análise gráfica antiga, enfatizando a importância das cargas na estabilidade estrutural. Baseamos a análise em três etapas fundamentais: reconhecimento do sistema construtivo do objeto patrimonial, discretização geométrica do sistema e análise vetorial sob diferentes considerações físicas. Assim, as linhas de impulso são afetadas pelas cargas, pelas condições de fronteira e pela história do comportamento estrutural. As ferramentas numéricas e computacionais oferecem processos de análise gráfica mais rápidos e precisos. Conclui-se que estes métodos fornecem resultados muito particulares e alguns deles são semelhantes, por isso recomenda-se utilizar os métodos como complemento e não classificar um sobre o outro.

Palavras-chave: análise estrutural; edifícios históricos; análise vetorial; arcos de alvenaria; método gráfico.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis estructural de los edificios patrimoniales es una actividad que, además de practicarse desde hace siglos, en la actualidad ha adquirido un interés internacional, que se suma a diversos aspectos técnicos. La génesis de las teorías del comportamiento estructural de este tipo de edificios radica en un análisis vectorial (método gráfico) que determina el equilibrio de sus elementos, como arcos, bóvedas, cúpulas, pilares, estribos, contrafuertes, arbotantes, etc.

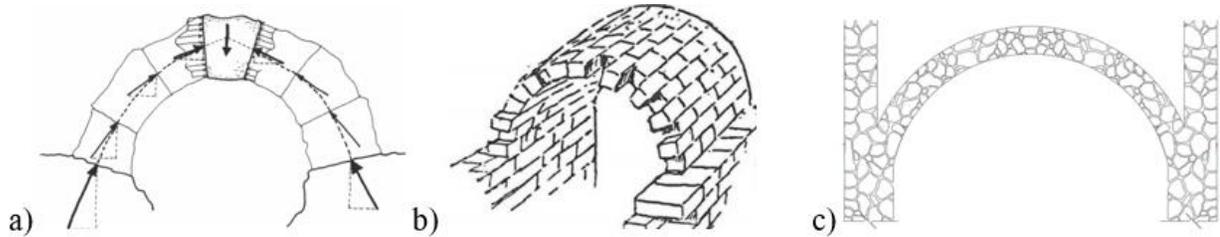


Figura 1. Varios tipos de arcos de mampostería utilizados en edificios históricos: a) sistema de dovelas con sillares irregulares (Huerta, S., 2006); b) sistema de dovelas con sillares regulares (Heyman, J., 1995) c) bóveda de mampostería irregular con mortero (Segovia, M. A., 2022).

En la figura 1 se muestran arcos con diferentes configuraciones de mampostería. Estos tipos de arcos son esenciales para definir el comportamiento estructural de los edificios históricos de mampostería. El Comité Científico Internacional para el Análisis y Restauración de Estructuras del Patrimonio Arquitectónico (ISCARSAH., 2003), es un comité técnico del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS, 2003), refiere en sus principios y directrices que las estructuras de los objetos patrimoniales deben ser conocidas y comprendidas en su totalidad, lo que conlleva la aplicación de métodos de análisis estructural antiguos para comprender el funcionamiento y comportamiento estructural, así como las técnicas que se utilizaron en el pasado para su construcción. En la actualidad, el análisis estructural ha evolucionado utilizando modelos analíticos y computacionales, acompañados de investigaciones experimentales que sustentan el proceso de evaluación estructural. Sin embargo, ambos tipos de análisis se enfrentan a diversas limitaciones. Por ello, aunque haya grandes avances en el análisis estructural computacional, el uso de herramientas antiguas sigue siendo esencial para intentar situarse en la posible visión del antiguo estructurista y comprender así el equilibrio estructural.

Para vislumbrar los problemas que implica el análisis de edificios históricos de mampostería no reforzada e irregular, se citan algunos investigadores de todo el mundo que trabajan en el tema, por mencionar algunos: Block, P., et. al., (2006), quienes afirman que la estática gráfica, las herramientas interactivas y de análisis límite basadas en procedimientos gráficos proporcionan métodos para caracterizar y evaluar la estabilidad estructural de sistemas complejos de mampostería que son eficientes y rápidos de procesar, Chávez M., (2005/2010) ha proporcionado información valiosa respecto al comportamiento estructural de sistemas completos de edificios patrimoniales y propiedades mecánicas de la mampostería, modelados con elementos finitos continuos. Por otro lado, Angelillo M., et al., (2014), han trabajado en procedimientos de análisis estructural de sistemas y elementos de mampostería histórica discretizados, considerando la interacción de contacto entre ellos. Durán D., et. al., (2022), quienes han estudiado las propiedades mecánicas de iglesias antiguas ubicadas en diferentes partes del mundo.

2. RECONOCIMIENTO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DEL OBJETO PATRIMONIAL

El objeto patrimonial analizado es un templo mexicano que data del siglo XVI, ubicado en el Estado de Hidalgo en el poblado de Santa Catarina, su estructura original fue realizada con piedras irregulares y argamasa de tierra del sitio, cuenta con 6 contrafuertes en los muros laterales, estos últimos sirven de base para la bóveda de cañón corrido que se encuentra confinada y cargada en su parte superior con tierra del sitio. La figura 2 muestra la construcción antes y después de integrar elementos de concreto reforzado y presenta indicios de su comportamiento estructural.



Figura 2. Templo de la Santa Catarina; a) edificio conservado (Biblioteca Tomás Navarro Tomás, 2023); b) estado actual del templo; c) y d) grietas en la clave y los riñones, respectivamente. Tomado de (Segovia, M. A., 2022).

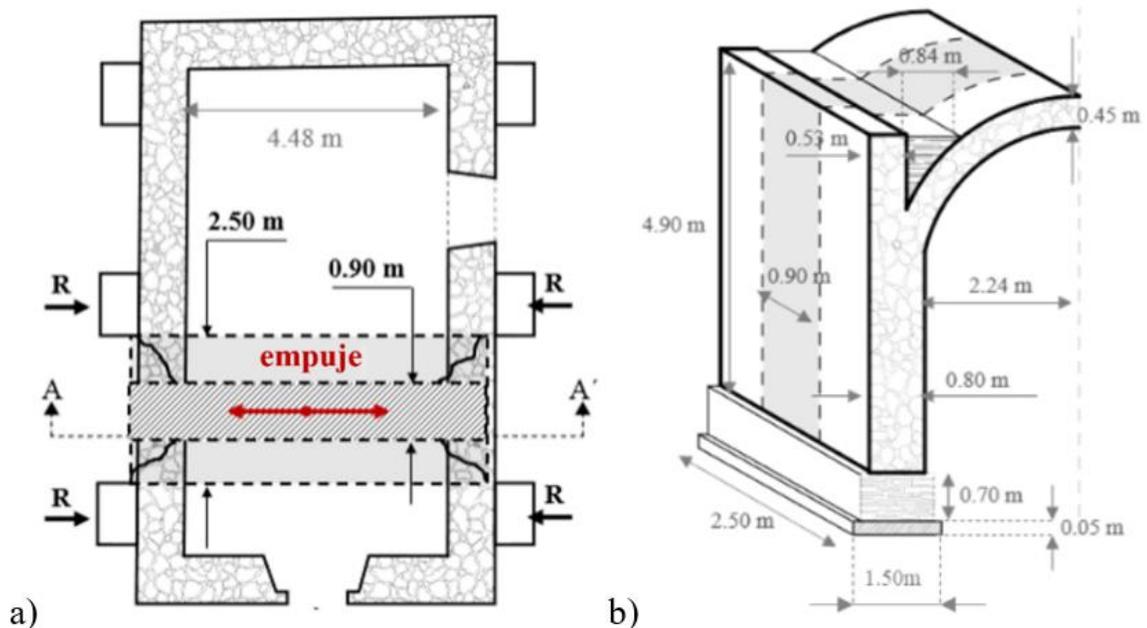


Figura 3. Franjas seleccionadas para el análisis; a) vista en planta; b) vista tridimensional de las franjas Fr1 y Fr2 con anchos de 0,90 m y 2,50 m, respectivamente. Dimensiones en metros.

3. DISCRETIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS SUBSISTEMAS

Se seleccionan las franjas con mayor susceptibilidad a deformarse lateralmente. Dado que no están totalmente restringidas por los contrafuertes (ver figura 4).

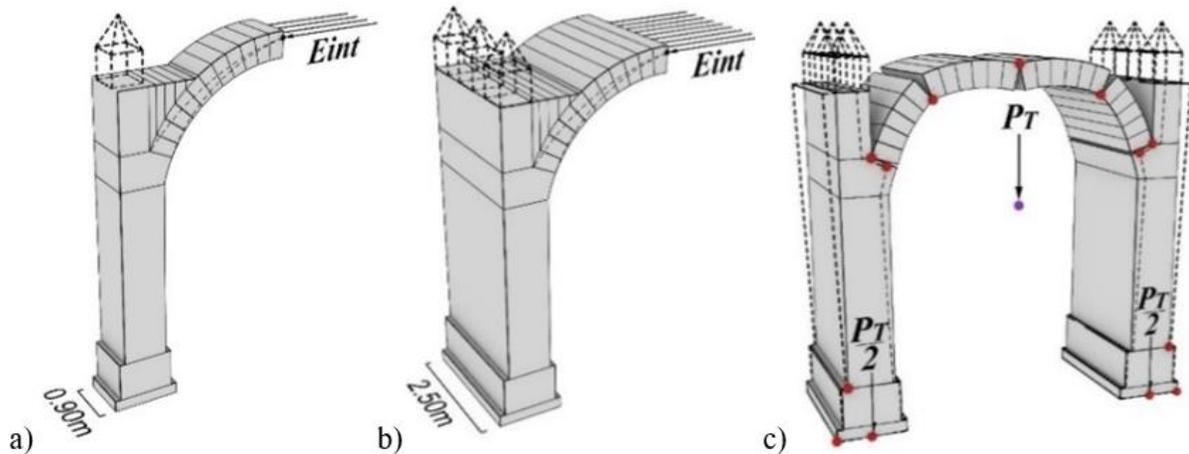


Figura 4. Vista en 3D de las franjas Fr (subsistemas) seleccionadas para el análisis, a) subsistema Fr1 de 0.90 m, b) subsistema Fr2 de 2.50 m de ancho, c) representación de la formación de bisagras en puntos específicos análogos a los del objeto patrimonial real (ver figura 3). Dimensiones en metros.

En la figura 4, para ambos sistemas, se ejemplifica el empuje horizontal intermedio (Eint) cercanamente al empuje mínimo (Emin) (ver figura 8). Teoría tomada de (Heyman, J., 1995; Huerta, S., 2004, Mas-Guindal; A. J., 2021). En los muros se adopta la fisuración por tensión diagonal a 45 grados, similar a la del concreto no reforzado (Meli, R. 2011). A diferencia de los edificios construidos actualmente con materiales y sistemas constructivos continuos, la formación de bisagras no representa como tal una degradación de la rigidez, sino que indica los puntos de equilibrio y los patrones de comportamiento de las condiciones físicas actuales del objeto patrimonial. Se discretizan geoméricamente los elementos estructurales pertenecientes a las franjas seleccionadas (ver figura 5), se modela la geometría con la tendencia de comportamiento estructural que presenta o ha presentado el objeto patrimonial, para ubicar los puntos de contacto y así visualizar la conformación de posibles bisagras, lo que sirve como base teórica para generar las divisiones virtuales en los modelos geométricos. Las líneas punteadas son posibles pináculos para redireccionar los vectores de empuje (ver figuras 6 y 10).

4. SUCESIÓN NUMÉRICO-VECTORIAL DEL SUBSISTEMA

El análisis vectorial consiste en la representación de fuerzas con determinadas magnitudes y direcciones que dan lugar a una secuencia de empujes o reacciones entre los distintos elementos volumétricos (bloques) que componen el sistema analizado; en este documento, este análisis se utiliza para la representación gráfica de las cargas gravitatorias generadas por cada uno de los bloques (ver figura 5) y para la simulación de los vectores resultantes. También se consideran elementos mecánicamente homogéneos e isótropos con resistencia prácticamente infinita, sin deslizamiento entre bloques y sin esfuerzos de tracción, según (Heyman, J. 1969; Huerta, S. 2004). Debido que el edificio cuenta con tierra compactada, se considera que ésta tiene una densidad de 1,600 kg/m³, cabe mencionar que la tierra puede tomar otros pesos en épocas de lluvia, ya que el

peso de la tierra húmeda, según (Minke, G. 1994) podría aumentar hasta 1,800 kg/m³. Debido a que el peso volumétrico es fundamental para mantener en equilibrio este tipo de estructuras, se utilizan 2,700 kg/m³, ya que, al determinar las líneas de empuje con un parámetro menor, éstas se salen de la geometría (ver figura 10). En cuanto a las características físicas determinadas por (Chávez, Mauricio M. 2010), encontró que el peso volumétrico posible de mampostería irregular unida con mortero de cal es de 1,627kg/m³.

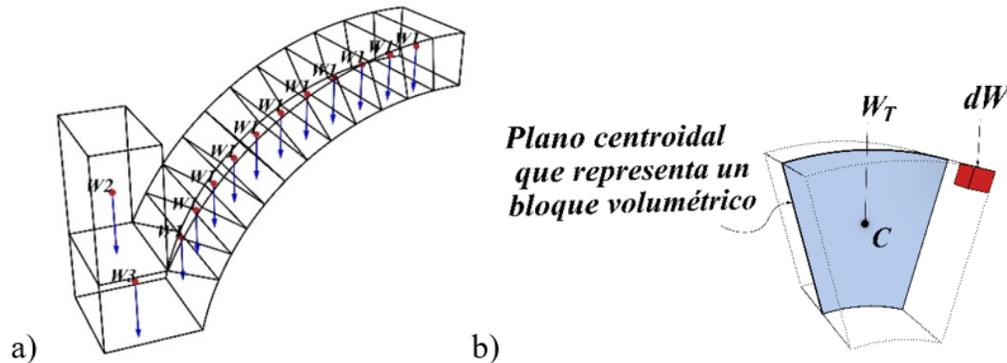


Figura 5. Centros de gravedad de los bloques que forman el sistema, a) fuerzas gravitacionales (W) concentradas en los elementos estructurales discretizados, b) peso total (WT) y peso diferencial (dW) de cada elemento atomizado, donde: C = Centro de gravedad.

En la figura 5, la teoría se tomó y adaptó de (Egor, P. P. y Toader, A. B. 1999; Goodno, B. J. y Gere, J. M., 2013; Hibbeler, R.C. 2016). Las variables vectoriales (\vec{W}_i) se representan con una flecha según (Spiegel, M. R. 1970).

Dado que el elemento discretizado es isotrópico y homogéneo, su peso total es la suma de los pesos diferenciales (ver ecuación 1 y figura 6b). (Hibbeler, R.C. 2016) menciona que, si un cuerpo está hecho de un material homogéneo, tiene una densidad constante y la fuerza generada por el peso del cuerpo pasa por un centro volumétrico (centro de gravedad). Aplicando estos principios al objeto presentado en la figura 5a, es posible visualizar los vectores gravitacionales que se cruzan con el centro de gravedad de cada elemento homogéneo y discretizado. La figura 6 ilustra los planos medios y su soporte matemático para localizar y representar los centros de gravedad de elementos volumétricos de tipo dovela, idealizados como elementos planos (áreas). Las ecuaciones (2)-(7) definen lo anterior; aplicando estas expresiones matemáticas, se determinan tanto las superficies de los planos discretizados de los bloques que representan los segmentos, como las ordenadas de sus centros de gravedad. El centro de gravedad se calcula con momentos de primer orden (Egor, P. P. y Toader, A. B. 1999; Goodno, B. J. y Gere, J. M. 2013).

$$\Sigma dW = W_T \tag{1}$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 dA_1 + x_2 dA_2 + \dots + x_n dA_n}{A} = \frac{\Sigma x dA_i}{A} \tag{2}$$

$$\bar{y} = \frac{y_1 dA_1 + y_2 dA_2 + \dots + y_n dA_n}{A} = \frac{\Sigma y dA_i}{A} \tag{3}$$

$$\Sigma dA_i = A \tag{3'}$$

$$\bar{x} = \frac{\int x dA}{\int dA} \quad (4)$$

$$\bar{y} = \frac{\int y dA}{\int dA} \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{2r \operatorname{sen} \alpha}{3\alpha} \quad (6)$$

$$A_{fc} = \alpha \cdot r^2 \quad (7)$$

Donde: dW = peso diferencial del elemento, W_T = Peso Total del elemento, x = distancia desde el eje “x” al centroide de dA , y = distancia desde el eje “y” al centroide de dA , dA = área diferencial, $i=1$ a n , n = número de los elementos discretizados, A = área total, A_{fc} = área del cono, α = ángulo, r = radio del sector circular.

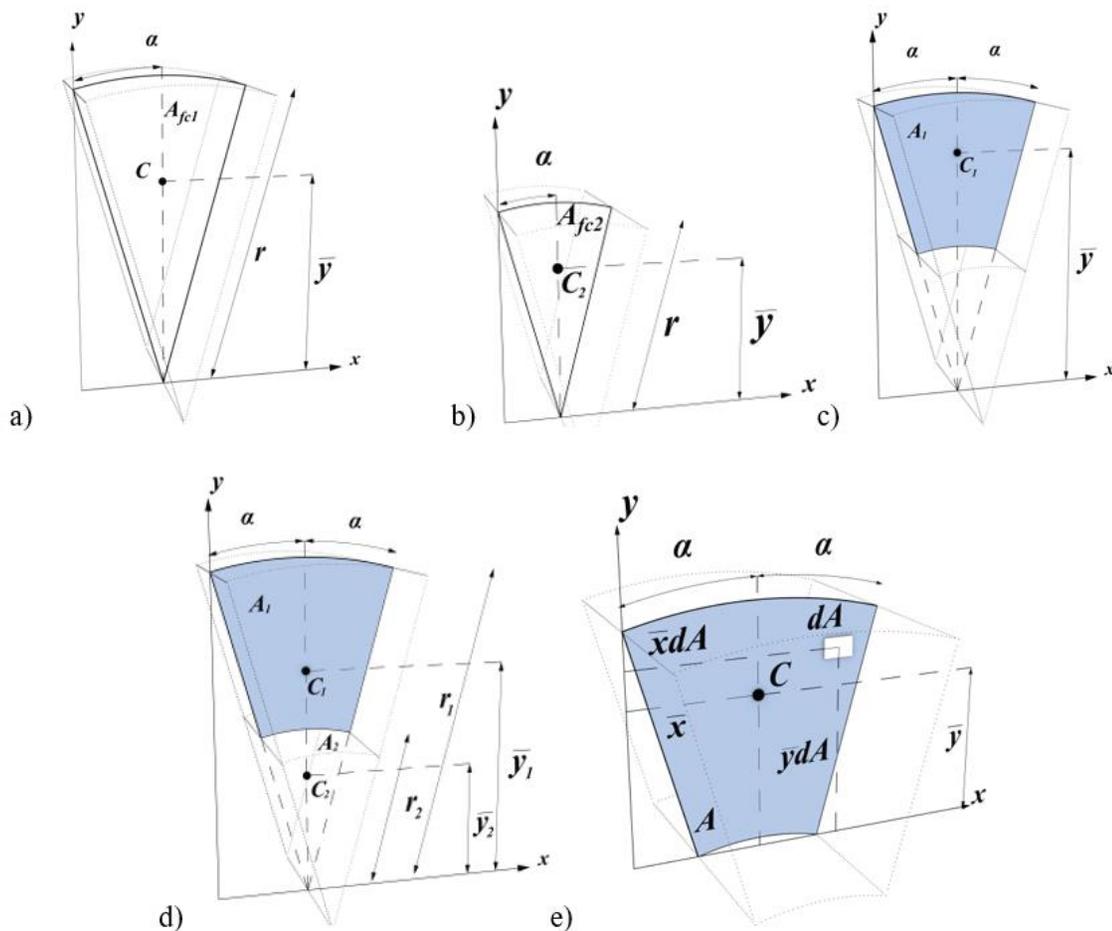


Figura 6. Secuencia matemática para obtener los centros de gravedad de los bloques, a) plano completo (Área) representativo de la forma original, b) plano a sustraer de la forma original, c) plano del segmento resultante, d) discretización de las propiedades geométricas de las áreas A1 y A2, e) Centro volumétrico del bloque discretizado como segmento resultante.

En la figura 6, A_{fc} = Área de la forma cónica, C_1 = Centro de gravedad de A_1 , C_2 = Centro de gravedad de A_2 , A_1 = Área que queda después de restar, A_2 = Área que se resta, α = Ángulo de apertura (en grados) del sector circular al eje centroidal, g = generatriz cónica, \bar{y}_1 = Distancia del eje “x” al centroide de A_1 , \bar{y}_2 = Distancia del eje “x” al centroide de A_2 , A = Área resultante, C = Centro de gravedad de A , dA = Área parcial, r = radio, El ángulo α se afecta por $(\pi/180)$ para convertir a radianes.

Con las expresiones numéricas mostradas en la figura 6 se obtienen las propiedades geométricas para el análisis del subsistema arco (ver figura 7). En la figura 6 se superponen los elementos discretizados (dovelas) para diferenciar el centro de gravedad en función de su posición referida a los ejes locales (x' , y'), sin embargo, para este caso todos los elementos del subsistema arco tienen el mismo peso volumétrico (ver tabla 3). La línea de empuje (línea de compresión) modifica su trayectoria sucesivamente cuando prácticamente interseca la línea vertical del centro de gravedad de cada segmento. En el caso de que la línea de compresión salga de la geometría, significa que la compresión estaría fuera del elemento y, por tanto, los bloques dejarían de estar en contacto entre sí en esa sección. El empuje mínimo se representa como una fuerza horizontal en la zona superior de los segmentos, comúnmente denominada extradós de dovela. En el caso de un sistema de gravedad simétrico, basta con analizar una mitad (ver figura 9) para conocer la trayectoria de la línea de empuje a compresión, por lo que es imprescindible determinar adecuadamente las cargas de gravedad y los centros de gravedad de cada uno de los bloques ya que de ello depende la correcta generación del empuje entre bloques adyacentes.

Table 1. Centros de gravedad numéricos y código de colores de los segmentos discretizados que componen el subsistema del arco (ver figura 7).

EL _i	CE _i	\bar{x}'_i (m)	\bar{y}'_i (m)
1		0.1547	0.2397
2		0.1756	0.2496
3		0.1945	0.2568
4		0.2114	0.2612
5		0.2259	0.2627
6		0.2379	0.2614
7		0.2473	0.2572
8		0.2541	0.2501
9		0.2580	0.2402
10		0.2591	0.2280
11		0.2571	0.2127

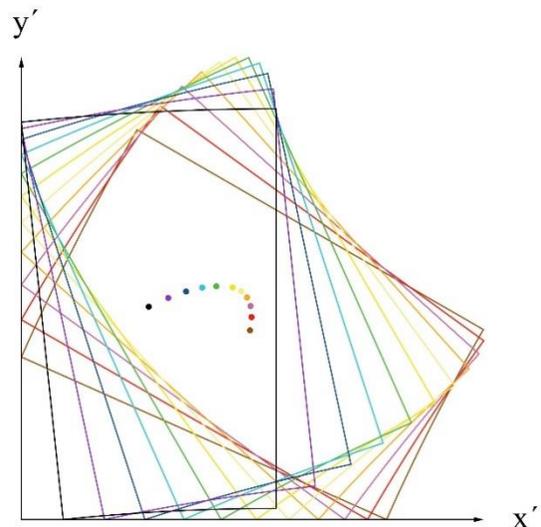


Fig. 7. Discretización virtual por bloques (dovelas) del subsistema arco, donde: EL: Elemento discretizado, CE: Color del elemento, A = Área del plano centroidal, $i=1$ a n , n = número de los elementos discretizados (11 para el subsistema arco del objeto de estudio, ver figuras 4 y 9).

Para determinar la trayectoria de la línea de empuje, emanada del subsistema tipo arco, es necesario seleccionar el lugar exacto y/o el más crítico posible en función del estado del objeto físico real. En caso de desarrollar el análisis con el empuje mínimo crítico, prácticamente intersectando el vértice, significaría que dicho subsistema se encuentra en colapso inminente. Para determinar la trayectoria de la línea de empuje, se puede utilizar el polígono funicular y el polígono de fuerzas

para proporcionar el flujo de fuerzas en los elementos estructurales de sistemas con formas alternativas (Markou, A. A. y Ruan, G. 2022). La figura 8 muestra el empuje horizontal mínimo y la modificación de su trayectoria en cada elemento (bloque), debido a la interacción con las fuerzas que actúan sobre los centros de gravedad. La Tabla 2 presenta las propiedades que representan y configuran cada elemento de los sistemas Fr1 y Fr2 con muros y cimientos.

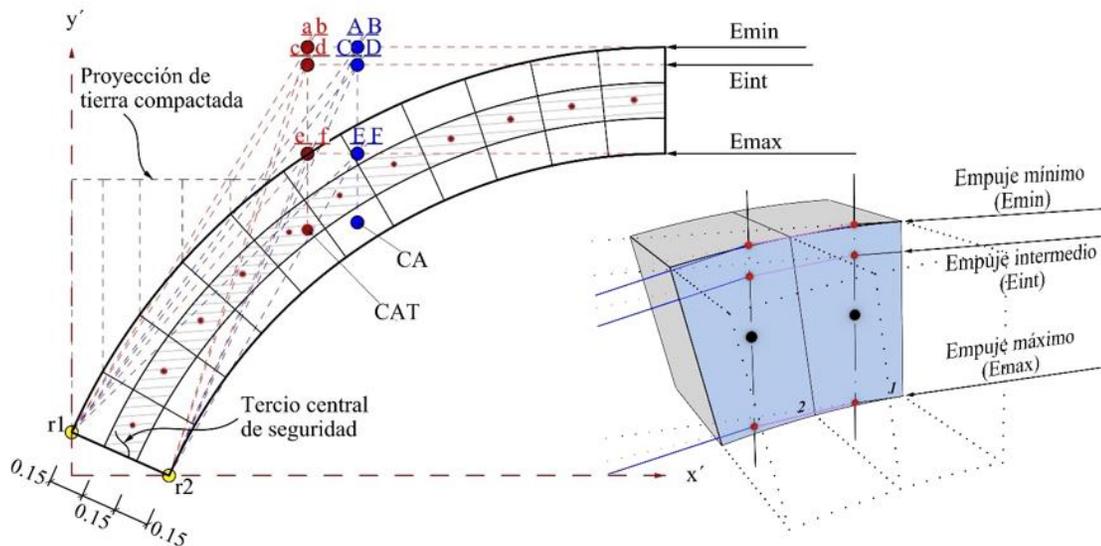


Fig. 8. Sucesión de vectores en cada segmento, generados por los empujes laterales, ilustrando la modificación de las trayectorias al intersectar la proyección de la línea vertical que pasa por el centro de gravedad de cada elemento. Arco del subsistema e identificación de las posibles trayectorias de las líneas de empuje y torsión en la base de la bóveda. Dimensiones en metros.

En la figura 8, E_{min} = Empuje mínimo, E_{int} = Empuje intermedio, E_{max} = Empuje máximo, $r1$ - $r2$: puntos de rotación. Nodos (a)-(f): intersecciones entre la línea vertical que pasa por el centroide del subsistema de arco de tierra compactada y los empujes vectoriales. Nodos (A)-(F): intersecciones entre la línea vertical que pasa por el centroide del subsistema arco sin tierra y los empujes vectoriales. CA y CAT: centros de gravedad de los subsistemas arco sin tierra y tierra compactada, respectivamente. Teoría tomada de (Barlow, William Henry 1846; Meli, R. 1998).

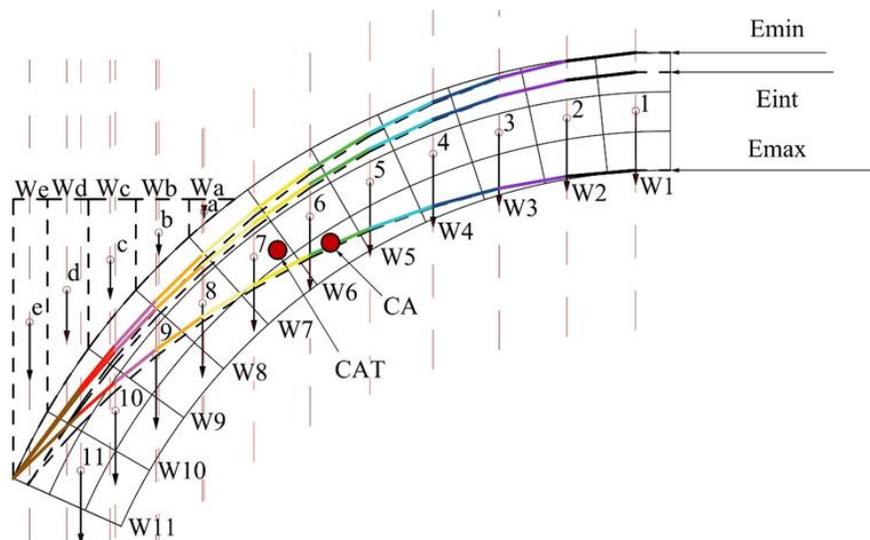


Fig. 9. Ubicación de las líneas de empuje cuando el subsistema arco tiende a rotar con respecto al punto "r1". Cabe mencionar que el punto de rotación "r1" fue elegido ya que así es como se

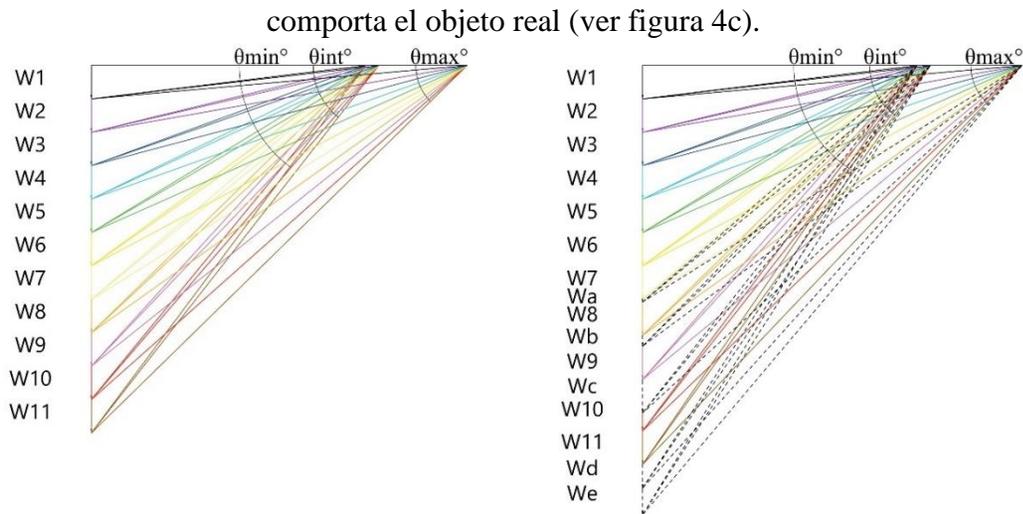


Fig. 9.1. Representación de líneas de empuje. Las líneas continuas representan el empuje de las dovelas y las punteadas el empuje de la tierra comprimida encima del arco, en la Tabla 3 se muestran las magnitudes de los empujes en este subsistema. Ambas figuras expresan las magnitudes en Emax, Eint, y Emin (ver figura 9).

Tabla 2. Magnitudes y ángulos de los vectores en el subsistema de arco sin tierra.

Subsistema de arco sin tierra									
Elemento	Emax			Eint			Emin		
	Vr _i (Kg)		θ°max	Vr _i (Kg)		θ°int	Vr _i (Kg)		θ°min
	Fr1	Fr2		Fr1	Fr2		Fr1	Fr2	
EL	3,248.85	9,024.58	0	2,464.03	6,844.53	0	2,350.48	6,529.11	0
1	3,261.63	9,060.08	5.07	2,480.85	6,891.25	6.68	2,368.11	6,578.08	7
2	3,299.67	9,165.75	10.07	2,530.66	7,029.61	13.18	2,420.24	6,722.89	13.79
3	3,362.11	9,339.19	14.91	2,611.55	7,254.31	19.35	2,504.70	6,957.50	20.21
4	3,447.63	9,576.75	19.55	2,720.77	7,557.69	25.09	2,618.38	7,273.28	26.15
5	3,554.57	9,873.81	23.94	2,855.06	7,930.72	30.34	2,757.66	7,660.17	31.53
6	3,681.05	10,225.14	28.04	3,011.07	8,364.08	35.08	2,918.88	8,108.00	36.36
7	3,825.14	10,625.39	31.86	3,185.61	8,848.92	39.33	3,098.62	8,607.28	40.63
8	3,984.93	11,069.25	35.39	3,375.81	9,377.25	43.12	3,293.85	9,149.58	44.47
9	4,158.61	11,551.69	38.63	3,579.17	9,942.14	46.49	3,501.97	9,727.69	47.84
10	4,344.52	12,068.11	41.60	3,793.58	10,537.72	49.49	3,720.83	10,335.64	50.82
11	4541.14	12,614.28	44.32	4,017.26	11,159.06	52.17	3,948.64	10,968.44	53.47

Donde: Emax= Empuje máximo, Eint= Empuje intermedio, Emin= Empuje mínimo, Vr= Vector de empuje perteneciente al elemento “i” (representado con magnitud), i=1 a n, n= Elementos discretizados, Eh= Empuje horizontal, θ= Ángulo en grados. Fr1 y Fr2, son subsistemas estructurales con espesores de 0.90m y 2.50m, respectivamente.

Tabla 3. Valores numérico-vectoriales de las propiedades físico-geométricas de los subsistemas Fr1 y Fr2, ordenados sucesivamente para el análisis vectorial.

EL _i	x _i (m)	y _i (m)	A _i (m ²)	V _i (m ³)		W _i (kg)		\vec{W}_i (cm)	
				Fr1	Fr2	Fr1	Fr2	Fr1	Fr2
1	0.1547	0.2397	0.1187	0.1068	0.2968	288.44	801.23	28.84	80.12
2	0.1756	0.2496							
3	0.1945	0.2568							
4	0.2114	0.2612							
5	0.2259	0.2627							
6	0.2379	0.2614							
7	0.2473	0.2572							
a	0.0573	0.0969	0.0122	0.0110	0.0306	17.61	48.91	1.76	4.89
8	0.2541	0.2501	0.1187	0.1068	0.2968	288.44	801.23	28.84	80.12
b	0.0874	0.2192	0.0492	0.0443	0.1230	70.87	196.87	7.09	19.69
9	0.2580	0.2402	0.1187	0.1068	0.2968	288.44	801.23	28.84	80.12
10	0.2591	0.2280							
c	0.0830	0.3386	0.0822	0.0740	0.2056	118.44	328.99	11.84	32.90
11	0.2574	0.2139	0.1187	0.1068	0.2968	288.44	801.23	28.84	80.12
d	0.0736	0.4648	0.1074	0.0966	0.2684	154.62	429.50	15.46	42.95
e	0.0622	0.5975	0.1218	0.1096	0.3044	175.35	487.08	17.53	48.71
12	0.4188	0.3036	0.5147	0.4633	1.2868	1250.79	3474.42	125.08	347.44
13	0.4000	1.6000	2.5600	2.3040	6.4000	6220.80	17280.01	622.08	1728.00
14	0.5250	0.3500	0.7350	0.6615	1.8375	1786.05	4961.25	178.61	496.13
15	0.6375	0.1000	0.2550	0.2295	0.6375	367.20	1020.00	36.72	102.00
f	0.2667	0.4149	0.4268	0.2024	0.6072	323.82	971.45	32.38	97.14
16	0.2667	0.5337	0.5694	0.5124	1.4235	1383.61	3843.36	138.36	384.34

Donde: EL= Elemento discretizado, A = Área del plano centroidal, i =1 a n, n= número de elementos discretizados, V= Volumen, W= Carga gravitacional, \vec{W} = Magnitud del vector que representa la carga gravitacional. Fr1 y Fr2, son subsistemas estructurales con espesores de 0.90m y 2.50m, respectivamente.

Las filas sombreadas representan los elementos discretos de tierra situados por encima de la bóveda (ver figura 9). Los valores referidos a la letra "f" representan los elementos "pináculo", donde los casos Fr1 y Fr2 tienen uno y tres pináculos, respectivamente (ver figura 10). La figura 10 y la tabla 4 presentan el análisis y los resultados de los subsistemas simétricos (con muro y cimentación) para los casos con y sin tierra en la parte superior de la bóveda, y con y sin pináculos.

Tabla 4. Magnitudes y ángulos de empujes por elemento en el sistema simétrico con muro y cimentación para las doce trayectorias posibles de la línea de empuje presentadas en la figura 10.

Subsistema simétrico con y sin tierra encima del arco									
Elemento	E _{max}			E _{int}			E _{min}		
	V _{r_i} (Kg)		θ° _{max}	V _{r_i} (Kg)		θ° _{int}	V _{r_i} (Kg)		θ° _{min}
	Fr ₁	Fr ₂		Fr ₁	Fr ₂		Fr ₁	Fr ₂	
EH	3,135.70	8,710.28	0	2,378.21	6,606.14	0	2,268.62	6,301.72	0
1	3,148.94	8,747.06	5.26	2,395.64	6,654.56	6.92	2,286.88	6,352.44	7.25
2	3,188.33	8,856.47	10.42	2,447.18	6,797.72	13.64	2,340.82	6,502.28	14.27
3	3,252.91	9,035.86	15.43	2,530.75	7,029.86	19.99	2,428.05	6,744.58	20.88
4	3,341.23	9,281.19	20.20	2,643.31	7,342.53	25.88	2,545.15	7,069.86	26.96
5	3,451.46	9,587.39	24.70	2,781.34	7,725.94	31.23	2,688.23	7,467.31	32.44
6	3,581.59	9,948.86	28.90	2,941.26	8,170.17	36.04	2,853.38	7,926.06	37.34
7	3,729.52	10,359.78	32.78	3,119.71	8,665.86	40.33	3,037.00	8,436.11	41.67
a	3,739.09	10,386.36	33.00	3,131.14	8,697.61	40.58	3,048.73	8,468.69	41.92
8	3,903.70	10,843.61	36.56	3,325.98	9,238.83	44.35	3,248.52	9,023.67	45.70
b	3,946.33	10,962.03	37.38	3,375.91	9,377.53	45.21	3,299.62	9,165.61	46.56
9	4,127.82	11,466.17	40.57	3,586.39	9,962.19	48.46	3,514.67	9,762.97	49.80
c	4,205.81	11,682.81	41.79	3,675.88	10,210.78	49.69	3,605.94	10,016.50	51.01
10	4,403.29	12,231.36	44.59	3,900.28	10,834.11	52.43	3,834.44	10,651.22	53.73
11	4,610.37	12,806.58	47.15	4,132.64	11,479.56	54.87	4,070.56	11,307.11	56.13
d	4,724.89	13,124.69	48.42	4,260.03	11,833.42	56.06	4,199.83	11,666.19	57.30
e	4,857.45	13,492.92	49.79	4,406.59	12,240.53	57.34	4,348.43	12,078.97	58.55
12	5,865.52	16,293.11	57.68	5,501.16	15,281.00	64.39	5,454.68	15,151.89	65.42
13	11,612.70	32,257.50	74.33	11,431.45	31,754.03	77.99	11,409.15	31,692.08	78.53
14	13,341.12	37,058.67	76.41	13,183.66	36,621.28	79.61	13,164.33	36,567.58	80.08
15	13,698.31	38,050.86	76.77	13,545.00	37,625.00	79.89	13,526.19	37,572.75	80.34
f	14,013.73	-	77.07	13,863.90	-	80.12	13,845.52	-	80.57
f	-	40,682.39	77.64	-	40,284.36	80.56	-	40,235.56	80.99
16	15,365.37	-	78.22	15,228.85	-	81.02	15,212.12	-	81.42
16	-	44,444.25	78.70	-	44,080.19	81.38	-	44,035.61	81.77

Donde: E_{max}= Empuje máximo, E_{int}= Empuje intermedio, E_{min}= Empuje mínimo, V_r= Vector de empuje perteneciente al elemento “i” (representado con magnitud), i=1 a n, n= Elementos discretizados, E_h= Empuje horizontal, θ= Ángulo en grados. Fr₁ y Fr₂, son subsistemas estructurales con espesores de 0.90m y 2.50m, respectivamente.

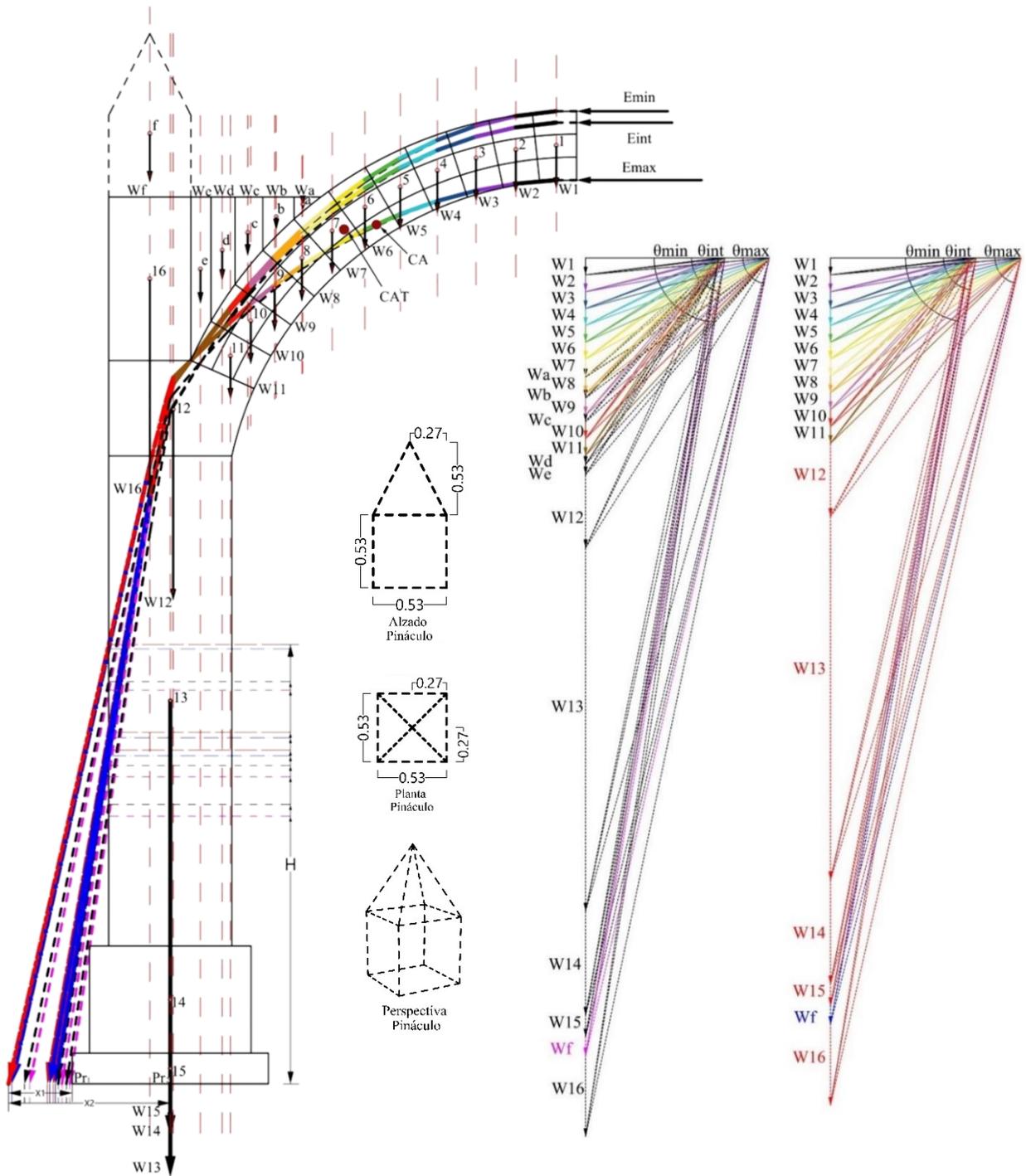


Figura 10. Análisis vectorial de los subsistemas simétricos, donde se pueden observar las magnitudes y direcciones de los empujes generados por todos los elementos, con y sin las cargas de tierra y pináculo.

En la figura 10, los vectores que representan las cargas W13, W14 y W15 se dibujaron con la mitad de longitud y su grosor se duplica para que sigan teniendo una magnitud gráficamente representativa. En esta figura sólo se muestra el análisis vectorial para Fr1 y las dimensiones se encuentran en metros. Nota: La línea negra punteada y sin flecha representa el empuje calculado con un peso volumétrico de la mampostería de 1627 kg/m^3 , la cual sale de la geometría.

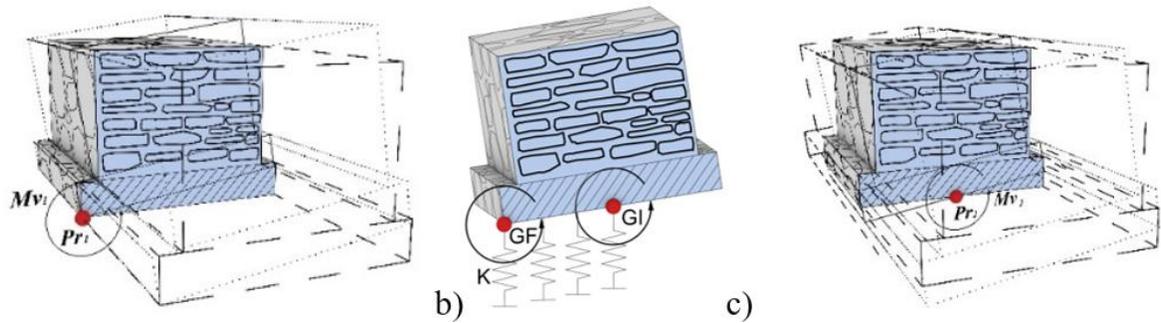


Figura 11. Momentos de volteo según el comportamiento de la cimentación en diferentes tipos de suelo. a) cimentación colocada sobre suelo no compresible, b) cimentación colocada sobre suelo medianamente compresible, c) cimentación colocada sobre suelo altamente compresible.

La figura 11 muestra los posibles momentos de volteo de los cimientos. La tabla 5 muestra las magnitudes y relaciones de los momentos de volteo actuantes (M_v) y resistentes (M_r) según los vectores resultantes para los diferentes subsistemas (ver figura 10). M_v = Momento de volteo, GI = Rotación inicial, GF = Rotación final, K = Rigidez vertical del suelo. Teoría tomada de (Meli, R. 2011) y adaptada por el autor.

Por otro lado, también se desarrollaron análisis digitales mediante software (Computers and Structures, Inc. 2023), basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Las Figuras 12 a 17 muestran las simulaciones del comportamiento estructural de la franja Fr1, que consideran la estructura continua y discontinua. En los modelos discontinuos, las separaciones de los elementos finitos se simularon en las zonas agrietadas de la bóveda en el objeto real. En los modelos continuos, no se simularon tales separaciones. Para la modelización se tuvieron en cuenta elementos de tipo cáscara plana (shell) y elementos de tipo sólido 3D. Según (Circolare, 2019), el módulo elástico (E), para todos los modelos, se tomó como 7036 kg/cm^2 . El módulo de Poisson de 0.17. La densidad de los materiales se consideró la misma que en los análisis gráficos.

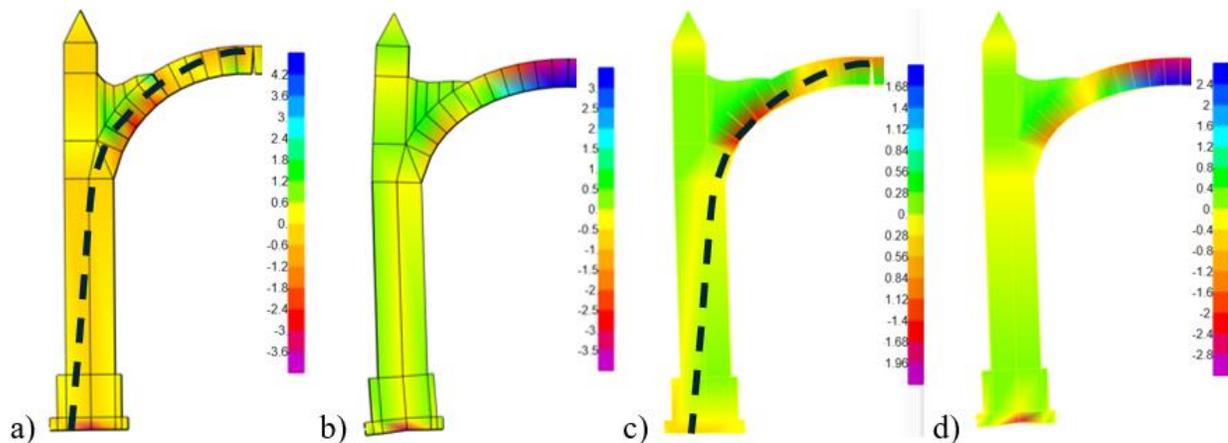


Figura 12. Esfuerzos en kg/cm^2 y comportamiento de las deformaciones en una mitad simétrica con pináculos, con relleno de tierra sobre la bóveda y con rotación libre en el centro de la cimentación. Casos: a) discontinuo con "shell". b) continuo con "shell". c) discontinuo con sólidos. d) continuo con sólidos.

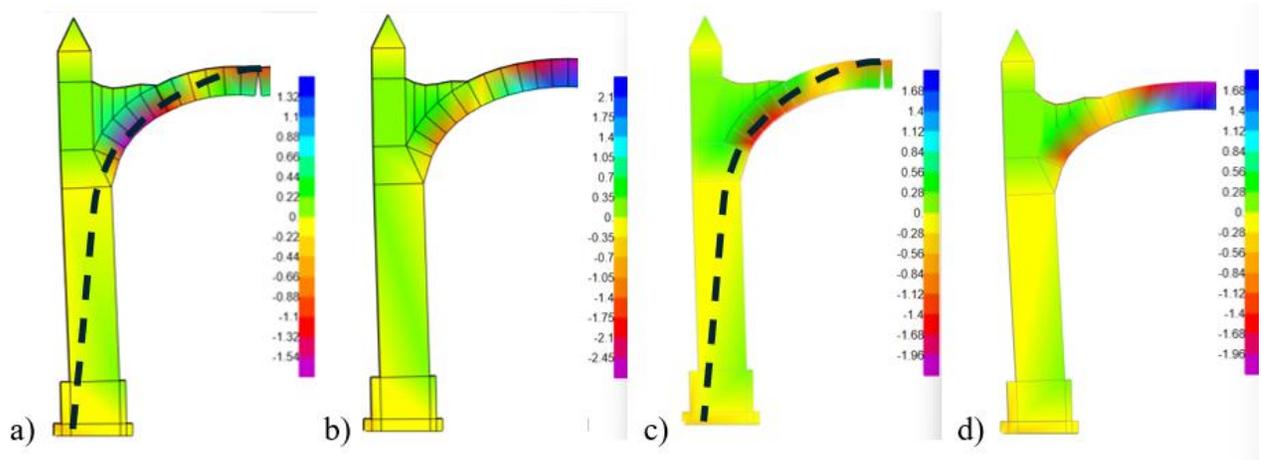


Figura 13. Esfuerzos en kg/cm^2 y comportamiento de las deformaciones en una mitad simétrica con pináculos, con relleno de tierra sobre la bóveda y con apoyo total de la cimentación. Casos: a) discontinuo con "shell". b) continuo con "shell". c) discontinuo con sólidos. d) continuo con sólidos.

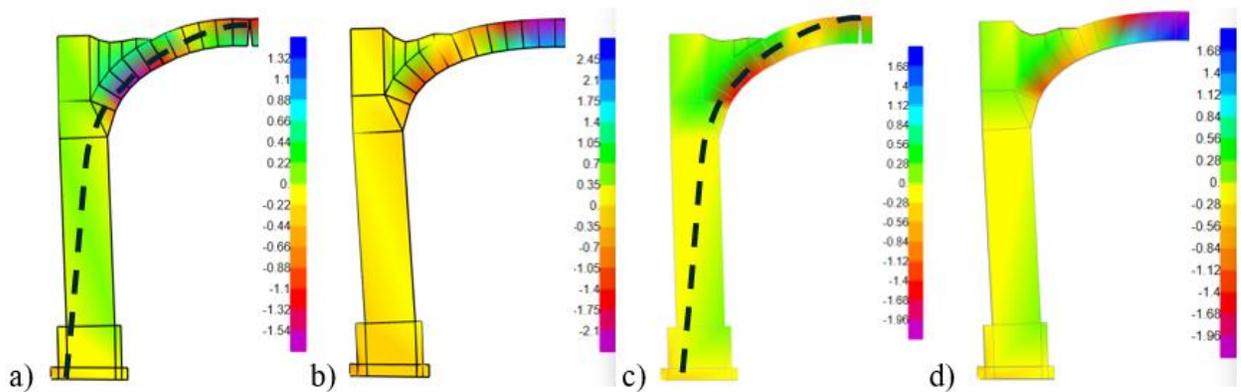


Figura 14. Esfuerzos en kg/cm^2 y comportamiento de las deformaciones en una mitad simétrica sin pináculos, con relleno de tierras sobre la bóveda y giro libre en el centro de la cimentación. Casos: a) discontinuo con "shell". b) continuo con "shell". c) discontinuo con sólidos. d) continuo con sólidos.

Los modelos de franjas Fr1 mostrados en las figuras 15a y 15b representan periodos de vibración en la dirección paralela al plano de $T=0,1$ s y $T=0,51$ s respectivamente, ambos casos, se desarrollaron con la base de cimentación simplemente apoyada.

Como se puede observar en las figuras 13 a 16, las líneas de compresión no salen de la geometría de las estructuras, ya que estos modelos de elementos finitos tienden a desarrollar equilibrio entre tensión y compresión en materiales elásticos continuos.

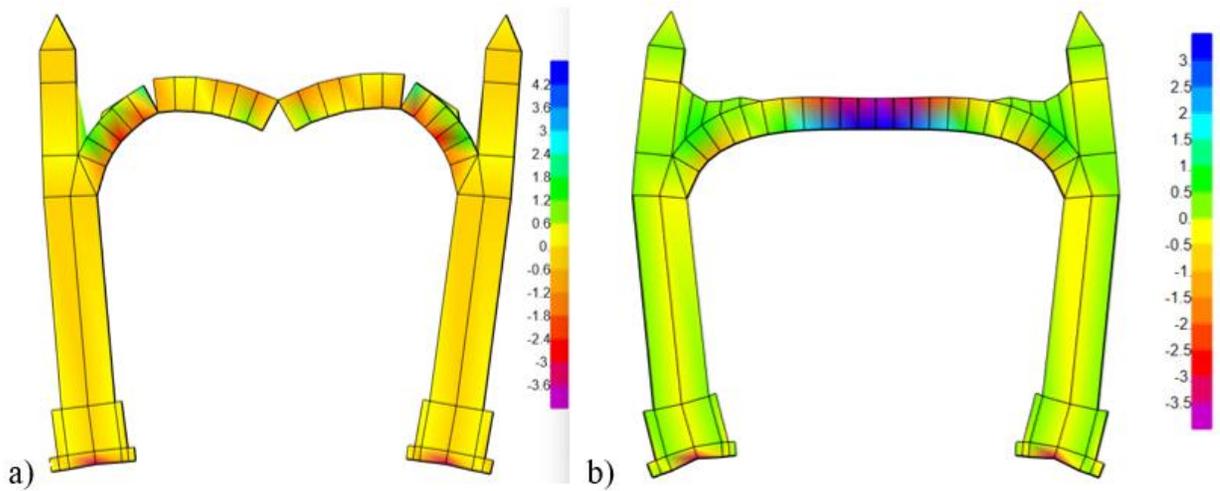


Figura 15. Simulación virtual del comportamiento estructural de la franja completa Fr1 mediante elementos finitos. a) Franja Fr1 modelada con elementos tipo "shell" discontinuos según la problemática que presenta el objeto real. b) Franja Fr1 modelada con elementos tipo "shell" continuos. Ambos modelos permiten la rotación en la cimentación.

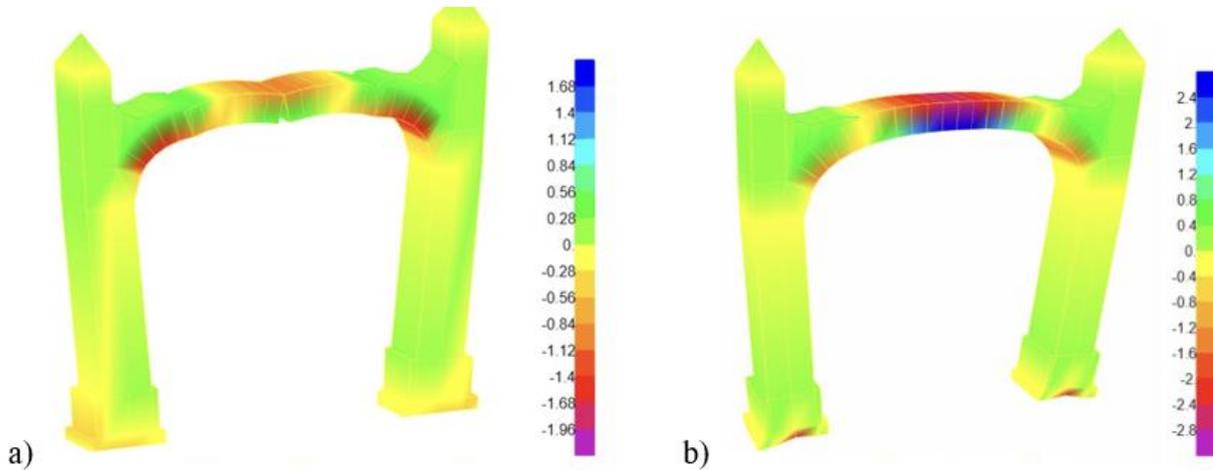


Figura 16. Simulación virtual del comportamiento estructural de la franja completa Fr1 mediante elementos finitos. a) Franja Fr1 modelada con elementos discontinuos de tipo sólido de acuerdo con la problemática que presenta el objeto real. b) Franja Fr1 modelada con elementos continuos de tipo sólido.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de ecuaciones matemáticas y su procesamiento computacional disminuyó el tiempo de trazos gráficos, dado que en una misma franja sistematizada se desarrollaron doce casos diferentes de comportamiento estructural y los resultados fueron más exactos, dada la precisión requerida por el análisis vectorial. El proceso de análisis de edificios históricos de mampostería con arcos y sistemas simétricos presentado en este trabajo puede ser aplicado en la investigación y en la práctica profesional de forma rápida y precisa, para encontrar las cargas necesarias para mantener el equilibrio estático estructural. El proceso matemático para determinar las áreas de dovelas se basa en arcos completamente curvos, en caso de requerir analizar arcos con segmentos rectos, estas ecuaciones matemáticas deben cambiarse.

Tabla 5. Resultados de las diferentes líneas de empuje en los subsistemas simétricos con muro y cimentación para las doce configuraciones posibles analizadas para Fr1.

ELEMENTO			Vuri (kg)	Py (Kg)	H (m)	X1 (m)	X2 (m)	θ°	Mv1 (kg-m)	Mr/ Mv1 (%)	Mv2 (kg-m)	Mr/ Mv2 (%)
Emin	c/t	c/p	15,212.12	14,916.55	2.57	0.28	0.92	78.69	4,176.63	200	13,723.23	61
		s/p	14,892.00	14,578.04	2.63	0.31	0.95	78.21	4,519.19	184	13,849.13	60
	s/t	c/p	14,697.62	14,347.17	2.84	0.29	0.93	77.46	4,160.68	200	13,342.87	62
		s/p	14,378.13	14,020.16	2.87	0.41	1.05	77.19	5,748.26	145	14,721.16	57
Eint	c/t	c/p	15,228.85	15,056.43	2.01	0.07	0.71	81.37	1,053.95	791	10,690.06	78
		s/p	14,909.09	14,725.74	2.08	0.09	0.73	81.01	1,325.32	629	10,749.79	78
	s/t	c/p	14,716.36	14,508.00	2.26	0.15	0.79	80.35	2,176.20	383	11,461.32	73
		s/p	14,397.29	14,184.28	2.29	0.16	0.80	80.13	2,269.49	367	11,347.43	73
Emax	c/t	c/p	15,365.37	15,206.82	1.75	0.02	0.66	81.76	304.14	2740	10,036.50	83
		s/p	15,048.51	14,879.78	1.82	0.04	0.68	81.41	595.19	1400	10,118.25	82
	s/t	c/p	14,864.51	14,672.47	2.14	0.11	0.75	80.78	1,613.97	516	11,004.35	76
		s/p	14,570.44	14,373.71	2.18	0.12	0.76	80.57	1,724.85	483	10,924.02	76

Donde: Py= Componente vertical del último vector (Vuri), H= Altura medida desde la superficie de contacto de los cimientos con el suelo hasta la intersección del último vector (Vuri) con la línea perimetral (frontera) del muro (Elemento 13 para este objeto de estudio), X= dimensión medida del punto de rotación en Py, Mv1= momento de volteo en suelo muy duro, Mv2= momento de volteo en suelo muy blando, Mr= momento resistente= 8334 kg-m, s/t= sin tierra, s/p= sin pináculos, c/t= con tierra, c/p= con pináculos. En esta tabla solo se presentan los resultados del subsistema Fr1, ya que son proporcionales en función del ancho de las franjas.

Al comparar los resultados del análisis gráfico con los obtenidos de los análisis con elementos finitos, se observa que el comportamiento estructural tiende a ser similar, pero con algunas particularidades, los muros tienden a girar hacia el exterior y la bóveda es propensa a bajar, donde la parte superior de la clave se desplaza hacia abajo por efectos gravitacionales. En los elementos modelados como discontinuos, el intradós de la clave tiende a tensarse y como la mampostería tiene muy poca resistencia a tracción, prácticamente nula, aunque sean dovelas, esa zona se abre provocando un giro en la zona o punto de contacto superior y genera así lo que en métodos gráficos se denomina empuje horizontal mínimo (Emin). Los resultados que más se asemejan al método gráfico son los modelos con elementos tipo cáscara (shell) donde la discontinuidad se considera tal y como se presenta en el objeto real. Por ejemplo: al comparar las fuerzas calculadas con el método estático gráfico en el caso donde se consideró discontinuidad, carga de tierra por encima de la

bóveda y pináculo, se obtuvo un empuje horizontal mínimo de 2268.62kg (ver tabla 4), y en el mismo caso modelado con elementos finitos, se obtuvo un esfuerzo en la misma zona de 0.33kg/cm², por lo tanto, al convertirlo en fuerza, se obtiene un empuje horizontal de 2970kg (ver figura 12a), por lo tanto, el Emin calculado con métodos gráficos, para este caso en particular, tuvo una diferencia de 24% menos en magnitud que el calculado con elementos finitos, esto se debe a la redistribución de elementos mecánicos y fuerzas, debido a la continuidad de los sistemas basados en elementos tipo cascara o sólidos. Por otro lado, para determinar la línea de empuje en los modelos de elementos finitos, se seleccionó cada delta de superficie de cada elemento cascara modelado para encontrar la compresión que representa la línea de empuje con el fin de graficarla.

6. CONCLUSIONES

En sistemas estructurales homogéneos, isotrópicos, infinitamente resistentes y sin deslizamiento entre elementos, puede modelarse solo la mitad simétrica. La selección de los puntos de rotación del subsistema arco está condicionada por la configuración que tenga, haya tenido o vaya a tener la estructura. Cuantas más divisiones virtuales o reales tenga el sistema, mayor será la precisión en la determinación y conformación de las bisagras y, por tanto, mayor será la certeza en la obtención de la posición de la línea de empuje.

El tipo de suelo contribuye al comportamiento de la superestructura, ya que pueden generarse efectos de segundo orden (P-Delta), debido al posible volteo de los cimientos. La contribución de las cargas de los pináculos en la parte superior de los muros y de la tierra en la parte superior de la bóveda se traduce en una mayor estabilidad frente a los efectos de volteo en muros y cimientos, en particular la presencia de la carga de tierra reubica la línea de empuje más cerca del tercio central geométrico de seguridad en el subsistema del arco. La integración de pináculos y tierra aumentó considerablemente la relación Momento resistente / Momento de volteo.

Al comparar las líneas de empuje a compresión de los modelos gráficos y de elementos finitos, se evidencia que existen algunas diferencias, ya que los elementos finitos utilizados en estos análisis tienen continuidad en la mayoría de los modelos, debido a que la mayor parte de ellos son continuos y presentan tracciones. Se concluye que estos métodos proporcionan resultados muy particulares y algunos de ellos son similares, por lo que se recomienda utilizar los métodos como complemento y no catalogar uno sobre el otro. Por último, es importante estudiar este tipo de estructuras con análisis de elementos de contacto.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Jorge Fernando Zárate Martínez por su apoyo en la corrección final en inglés. Gracias también a Elizabeth Amador por facilitar el acceso al edificio. A la Unidad Académica Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco (ESIA UT) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México.

8. REFERENCIAS

- Angelillo M., et al., (2014), "*Mechanics of Masonry Structures*", Editado por Maurizio Angelillo. Springer. Università di Salerno, Fisciano, Italy.
- Biblioteca Tomás Navarro Tomás, (19/10/2023), "*Escuela de Santa Catarina, Atotonilco El Grande en Hidalgo (México)*", <https://www.pinterest.com.mx/pin/334533078561349371/>
- Barlow, William Henry (1846). "*On the Existence (practically) of the line of equal Horizontal Thrust in Arches, and the mode of determining it by Geometrical Construction* ", Minutes and Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 5, pp. 179-180.

- Block, P., DeJong, M., Ochsendorf, J. A. (2006), "As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches". Nexus Network Journal - Vol 8, No. 2. <https://doi.org/10.1007/s00004-006-0015-9>.
- Chávez, Mauricio M., (2010), "Validación Experimental De Modelos Analíticos Para El Estudio Del Comportamiento Sísmico De Estructuras Históricas", México, UNAM, p. 24.
- Chávez, M. (2005), "Estudio experimental de las propiedades mecánicas de mamposterías de piedra natural", publicado por el Instituto de ingeniería UNAM. Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México.
- Chávez, M. (2010), "Validación experimental de modelos analíticos para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras históricas", publicado por el Instituto de Ingeniería UNAM. Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México.
- Circolare, (2019), Código italiano DM 14.1. Il Ministro: Toninelli
- Durán, D., Chávez m. M. (2022), "Mechanical properties of masonry stone samples extracted from Mexican colonial churches", Elsevier, coordinación de ingeniería estructural, instituto de ingeniería, universidad nacional autónoma de México, México, E01295, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01295>
- Goodno, B. J., Gere, J. M., (2013), "Mechanics of Materials (Ninth Edition)", Cengage Learning, U.S., pp. 26-27.
- Mas-Guindal, A. J. (2021). "Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban". Munilla-Lería, España-Madrid.
- Heyman, J. (1969), "Teoría, Historia Y Restauración De Estructuras De Fábrica", Inst. Juan de Herrera, México, pp. 1-1
- Heyman, J. (1995), "The Stone Skeleton Structural engineering of masonry architecture (First Publish)", Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 5-49.
- Hibbeler, R.C. (2016), "Ingeniería mecánica estática (decimosegunda edición)", Prentice Hall, Pearson Educación, México, pp. 447-456, 599.
- Huerta, S. (2004), "Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica", Inst. Juan de Herrera, Madrid, pp. 11-34.
- Huerta, S. (2006). "Galileo was wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches", E.T.S. de Arquitectura Universidad Politécnica de Madrid, Inst. Juan de Herrera, Nexus Network Journal 8 (2006), p. 26.
- ICOMOS International Council of Monument and Cities. (2003). "Principles for the analysis, conservation, and restoration of architectural heritage structures". Victoria Falls, Zambia. Retrieved from <http://www.icomos.org>
- ISCARSAH. (2003). "Recommendations for the analysis conservation, and structural restoration of architectural heritage". Course on Architectural Heritage Intervention of the College of Architects of Catalonia. Catalonia: ICOMOS.
- Markou, A. A., Ruan, G. (2022), "Graphic statics: projective funicular polygon", ELSEVIER, Department of Civil Engineering, Aalto University, Rakentajanaukio 4A, Espoo FI-00076, Finland, pp. 1394-1395.
- Mas-Guindal, A. J. (2021). "Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban". Munilla-Lería, España-Madrid, pp. 34-73.
- Mc Cormac, J. C., Brown, R. H. (2017), "Diseño de Concreto Reforzado (décima edición)", Alfaomega Grupo Editor, México, p. 355.
- Meli, R. (1998), "Ingeniería estructural de los edificios históricos", ICA, México, p. 10
- Meli, R. (2011), "Diseño Estructural (segunda edición)", Limusa Noriega Editores, México, p. p. 544, 552.
- Minke, G. (1994), "Manual de construcción en tierra, La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual", Editorial Fin de Siglo, Alemania, p. 25.

- Popov, E. P., Toader, A. B. (1999),” *Mecánica de Sólidos (Segunda Edición) Prentice Hall*”, Pearson Educación, México, p. 4.
- Computers and Structures, Inc. (2023), “*SAP2000: Integrated Software for Structural Analysis and Design*” (Version 23.1.0).
- Segovia, M. A. (2022), “*Análisis constructivo - estructural para determinar el comportamiento de un inmueble de mampostería del siglo XVI, Santa Catarina, Atotonilco del grande*”, Tesis del IPN, México, pp. 49, 77.
- Spiegel, M. R. (1970), “*Análisis vectorial, Teoría y 480 Problemas Resueltos*”, Serie SCHAUM, U.S.A., pp. 1-4

Impacto técnico y de costos de las diferencias en la clasificación funcional de los pavimentos de carreteras

J. L. C. Sousa^{1*} , C. L. Maia¹ , S. D. Vasconcelos¹ , F. H. L. Oliveira¹ 

* Autor de Contacto: levi.chaves@det.ufc.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.680>

Recibido: 03/03/2024 | Correcciones recibidas: 16/04/2024 | Aceptado: 24/04/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo analizar si existen diferencias en la clasificación del estado superficial de un pavimento de carretera flexible utilizando el Levantamiento Visual Continuo (LVC) y el Índice de Gravedad Global (IGG). Se seleccionó un segmento de carretera revestido con Concreto Asfáltico, con el objetivo de evaluar los costos asociados a cada clasificación. Debido a la limitación de un mayor tiempo para obtener el IGG, el análisis se limitó a ese segmento. Los resultados revelaron divergencias en las clasificaciones y costos de los métodos en los segmentos iniciales de la carretera. Se concluyó que el LVC ofreció mejores resultados que el IGG, atribuible a la subjetividad inherente de la evaluación humana. Además, se observó que los dos métodos se complementan en el análisis funcional de pavimentos de carreteras.

Palabras clave: evaluación; pavimentos; defectos; rehabilitación; carreteras.

Citar como: Sousa, J. L. C., Maia, C. L., Vasconcelos, S. D., Oliveira, F. H. L. (2024), "Impacto técnico y de costos de las diferencias en la clasificación funcional de los pavimentos de carreteras", Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 211 – 223, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.680>

¹ Departamento de Ingeniería del Transporte, Universidad Federal de Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor J. L. C. Sousa contribuyó con la actividad de recolección de datos, idea original, revisión bibliográfica (80%), redacción del trabajo (80%), discusión de los resultados y conclusiones (80%), la autora C. L. Maia contribuyó con la revisión bibliográfica (20%), redacción del trabajo (20%), discusión de resultados y conclusiones (20%), los autores S. D. Vasconcelos y F. H. L. Oliveira actúan como asesores y revisores del trabajo en su conjunto.

Licencia Creative Commons

Copyright (2024) es propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0). ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación.

Cualquier discusión, incluida la respuesta de los autores, se publicará en el primer número del año 2025, siempre que la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

Technical and cost impact of differences in functional classification of road pavements

ABSTRACT

This work aims to analyze whether there are differences in the classification of the condition of a flexible road pavement using Continuous Visual Survey (LVC) and the Global Gravity Index (IGG). A section of a road paved with Asphalt Concrete was selected to assess the costs associated with each classification. Due to the longer time required for obtaining IGG, the analysis was limited to this section. The results revealed discrepancies in classifications and costs between the methods in the initial segments of the road. It was concluded that LVC provided better results than IGG, attributed to the inherent subjectivity of human assessment. Additionally, it was observed that the two methods complement each other in the functional analysis of road pavements.

Keywords: evaluation; pavement; distress; rehabilitation; highways.

Impacto técnico e de custos das diferenças de classificação funcional de pavimentos rodoviários

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de analisar se existem diferenças na classificação da condição da superfície de um pavimento flexível rodoviário utilizando o Levantamento Visual Contínuo (LVC) e o Índice de Gravidade Global (IGG). Selecionou-se um trecho de em uma rodovia revestida com Concreto Asfáltico, visando a avaliação dos custos associados a cada classificação. Dada a exigência de um tempo maior para obtenção do IGG, a análise foi limitada a esse trecho. Os resultados revelaram divergências nas classificações e nos custos dos métodos nos segmentos iniciais da rodovia. Concluiu-se que o LVC ofereceu resultados melhores que o IGG, atribuíveis à subjetividade inerente à avaliação humana. Além disso, notou-se que os dois métodos se complementam na análise funcional de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: avaliação; pavimentos; defeitos; reabilitação; rodovias.

Informaciones legales

Revista ALCONPAT es una publicación trimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Rehabilitación de la Construcción, Internacional, A.C., Km 6, antigua vía a Progreso. Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de derechos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática de ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente la posición del editor.

La reproducción total o parcial del contenido y de las imágenes de la publicación es realizada de acuerdo con el código COPE y la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El estado general de la red vial brasileña empeoró en 2022 respecto al año anterior. De los 110.333 kilómetros evaluados por la Confederación Nacional del Transporte, el 66% fueron clasificados como Regular, Malo o Pésimo; en 2021, este porcentaje fue del 61,8% (CNT, 2022). La presencia de defectos en los pavimentos requiere, con el tiempo, inversiones para restaurar su estructura. Por lo tanto, la aplicación de métodos de evaluación de defectos tiene como objetivo; determinar las condiciones funcionales y estructurales de los pavimentos y ayudar a los gestores en el proceso de toma de decisiones respecto a los servicios de mantenimiento y rehabilitación (M&R).

Según CNT (2022), la condición de los pavimentos de las carreteras en el noreste de Brasil genera un aumento de los costos operacionales del transporte del 33,8%. Además, para recuperar esas carreteras, con acciones de emergencia de restauración y reconstrucción, se necesitan R\$ 20,18 mil millones. Este monto demuestra que el número de defectos en los pavimentos puede afectar directamente los costos de mantenimiento y rehabilitación, mostrando así la importancia de analizar el estado de los pavimentos de las carreteras.

Los métodos para evaluar el estado superficial de los pavimentos pueden llevarse a cabo de forma subjetiva u objetiva. Los métodos subjetivos consideran la opinión del profesional responsable del estudio y los métodos objetivos realizan un análisis cuantitativo de los defectos encontrados. El Departamento Nacional de Infraestructura del Transporte (DNIT) cuenta con procedimientos específicos para la realización de estas encuestas, como el Levantamiento Visual Continuo (LVC), un método subjetivo, y el Índice de Gravedad Global (IGG), un método objetivo. Por consiguiente, es evidente que pueden existir divergencias en las clasificaciones de una misma carretera entre los métodos LVC e IGG, resultando en disparidades en cuanto a las alternativas de M&R y los costos asociados.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo verificar el impacto técnico y de costos de M&R del estado de la superficie de un pavimento de carretera flexible, utilizando los métodos de Levantamiento Visual Continuo (LVC) e Índice de Gravedad Global (IGG).

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Es bien sabido que los pavimentos sufren degradación con el paso del tiempo debido a factores como el tráfico y el clima. Con ello surge la necesidad de realizar servicios de mantenimiento y rehabilitación (M&R) y, en algunos casos, la reconstrucción de los segmentos analizados.

Según Lira y Oliveira (2019), se debe definir el momento oportuno para realizar M&R en pavimentos viales, ya que el costo de recuperación aumenta rápidamente a medida que ocurre la degradación del pavimento. Además, el mal estado de las carreteras contribuye a la aparición de accidentes, que tienen elevados costes para la administración pública. Según la CNT (2022), el costo de los accidentes supera la inversión en carreteras con una diferencia de R\$ 4,69 mil millones. De esta forma, se puede definir la ejecución de intervenciones en pavimentos deteriorados con la ayuda de evaluaciones para identificar defectos en los pavimentos.

El DNIT (2003a y 2003b) establecen los criterios y equipos utilizados para realizar estudios de defectos en pavimentos viales, utilizando métodos subjetivos y objetivos, respectivamente. En la valoración subjetiva se realiza el Levantamiento Visual Continuo (LVC), utilizando dos personas a bordo de un vehículo a una velocidad de trabajo constante de 40 km/h. Con el LVC se determina el Índice de Gravedad Global Acelerado (IGGE), el Índice de Condición del Pavimento Flexible (ICPF) y, finalmente, el Índice de Condición Superficial (IES) (CAVALCANTE et al., 2018). En la evaluación objetiva, el reconocimiento se realiza a pie, verificando los defectos y llenando el inventario de ocurrencia como se detalla en el DNIT (2003a), y con base en los datos registrados y los factores de ponderación para cada tipo de defecto, se puede calcular el Índice de Gravedad Global (IGG). La clasificación funcional del pavimento para cada uno de estos índices varía de

Pésimo a Óptimo, según la división de la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del estado del pavimento por los métodos IGG y LVC.

LVC			IGG	Clasificación
Descripción	IES	Código	Límites	
$IGGE \leq 20$ y $ICPF > 3,5$	0	A	$0 < IGG \leq 20$	Óptimo
$IGGE \leq 20$ y $ICPF \leq 3,5$	1	B	$20 < IGG \leq 40$	Bueno
$20 \leq IGGE \leq 40$ y $ICPF > 3,5$	2			
$20 \leq IGGE \leq 40$ y $ICPF \leq 3,5$	3	C	$40 < IGG \leq 80$	Regular
$40 \leq IGGE \leq 60$ y $ICPF > 2,5$	4			
$40 \leq IGGE \leq 60$ y $ICPF \leq 2,5$	5	D	$80 < IGG \leq 160$	Malo
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF > 2,5$	7			
$60 \leq IGGE \leq 90$ y $ICPF \leq 2,5$	8	E	$IGG > 160$	Pésimo
$IGGE > 90$	10			

Fuente: Adaptado de DNIT (2003a) y DNIT (2003b)

Santos y Silva Júnior (2018) realizaron una evaluación de las condiciones superficiales del pavimento flexible de la Carretera TO-255, en un segmento de 39,1 km, mediante Levantamiento Visual Continuo (LVC). Los autores clasificaron el estado de conservación del pavimento y resaltaron la importancia de planificar medidas de M&R, para evitar empeorar las condiciones de la carretera.

Por su parte, Lira y Oliveira (2019) analizaron la influencia de las divergencias entre clasificaciones objetivas (IGG) y subjetivas (ICPF) para definir estrategias de M&R en las carreteras federales brasileñas. Los autores observaron que existe una tendencia del ICPF a clasificar el pavimento con mejores conceptos respecto a los verificados por el IGG debido a la interferencia de la percepción de los evaluadores en la indicación de las calificaciones.

Silva et al. (2018b) presentaron un procedimiento para inspeccionar el estado funcional de los pavimentos utilizando el Levantamiento Visual Continuo Computarizado (LVCI) utilizando el Método de Escaneo de Defectos. Los autores observaron que el LVCI aumenta la precisión de los inventarios de defectos del pavimento, ya que considera toda el área del carril de circulación a lo largo del segmento evaluado.

Para realizar una comparación entre métodos de levantamiento de defectos en pavimentos flexibles, en un segmento de la carretera BR-060 en el estado de Mato Grosso do Sul, Cavalcante et al. (2018) analizaron las diferencias entre los métodos brasileños y americanos. Los autores observaron que las especificaciones brasileñas dieron lugar a divergencias en los resultados finales, mientras que las normas estadounidenses tuvieron convergencia.

Silva et al. (2018a) realizaron un análisis comparativo entre el Índice de Gravedad Global (IGG) y el Índice de Estado de Superficie (IES), en un segmento de la Carretera BR-116 en el estado de Ceará. Al comparar los resultados obtenidos para los dos índices, los autores comprobaron una divergencia de conceptos en los extractos analizados. A través del IES se le asignó al pavimento una peor condición de degradación. Este hecho puede estar relacionado con la mayor subjetividad del método LVC.

Soncim y Fernandes Júnior (2015) desarrollaron un modelo para predecir el índice de condición de pavimentos flexibles basado en información de una base de datos de carreteras, proporcionada por el Departamento de Infraestructura de Transporte de Bahía. El modelo correlacionó el desempeño del ICPF con las variables edad, tráfico y lluvia. El modelo presentó un coeficiente de correlación igual a 0,64, mostrando evidencia de la validez de su aplicación, para las características de la red

vial en el estado de Bahía.

Para determinar el IGG para un segmento de la Carretera PE-095, ubicado en la ciudad de Caruaru – PE, Santos (2014) utilizó dos métodos: DNIT (2003) y evaluación objetiva de la superficie del pavimento de todo el segmento utilizando el método alternativo propuesto en el estudio. Con el IGG de 174, el estado de la carretera se puede clasificar, según el DNIT (2003), como pésimo, con los dos métodos utilizados.

Espíndola et al. (2018) analizaron las evaluaciones funcionales del segmento de la BR-104/AL, desde el enlace de la autopista AL-404 hasta la Praça Centenário, con una longitud de 32,47 km. Los resultados de IGG e IES fueron similares, pero los conceptos de IES indicaron una mayor gravedad del deterioro en la superficie del pavimento. La vía se encontraba en un estado de deterioro de moderado a alto, requiriendo restauración/mantenimiento en alrededor del 70% de los segmentos.

Con el objetivo de comparar la aplicación del Índice de Gravedad Global (IGG) en la evaluación funcional de cinco vías municipales de Caucaia, estado de Ceará, Silva et al. (2022) analizaron las vías antes y después de un proceso de restauración, permitiendo estimar la utilidad de los pavimentos en dos situaciones diferentes, además de analizar la inversión realizada en cada vía. Todas las calles inspeccionadas mediante el método IGG fueron clasificadas como Malas, destacando varios problemas superficiales en el pavimento. Tras las intervenciones de recalificación, se observó una mejora notable en el estado de utilización actual, lo que se tradujo en un aumento del confort de rodadura y de la seguridad del tráfico.

Marcolan et al. (2020) evaluaron funcionalmente el pavimento correspondiente a segmentos de la ERS-585 como una forma de verificar su estado y la necesidad de medidas correctivas. Los segmentos fueron clasificados como Malo y Pésimo según los conceptos asignados por el IGG, reflejando la necesidad de medidas de restauración del pavimento. Los principales defectos encontrados fueron: agrietamiento de piel de caimán interconectada, desgaste, baches y parches.

Con la intención de identificar y analizar los principales defectos existentes en la Av. María Merandoilina, Santos et al. (2021) investigaron los impactos causados en esta vía, utilizando LVC, para evaluar la calidad física de la avenida, con el objetivo de mostrar su clasificación y las reparaciones necesarias para restaurar la calidad de la avenida. La avenida tiene un IGGE de 40.3, un ICPF de 1.5 y un IES de 5. Los valores encontrados por la LVC clasificaron la vía como Mala. Moura (2017) evaluó el nivel de manifestaciones patológicas que aparecen en la carretera TO-164, en el segmento que conecta el municipio de Xambioá con el municipio de Araguañã, en Tocantins, con una longitud de 25 km, utilizando el método LVC los resultados indican que el 24% del segmento estudiado se encuentra en Buen estado, el 36% en Regular, el 26% en Malo y el 14% en Pésimo. Las opciones de reparación van desde un simple mantenimiento preventivo hasta la reconstrucción completa de las peores secciones.

Con el objetivo de analizar un trecho de la BR-222/CE, Sousa et al. (2022) adoptaron un método tanto objetivo como subjetivo para clasificar los segmentos seleccionados en esta sección. Los investigadores observaron que las clasificaciones coinciden en el 50% del segmento evaluado. Además, encontraron que, a pesar de los diferentes enfoques metodológicos, los índices pueden ser complementarios. El método subjetivo realiza una evaluación visual integral de todos los defectos a lo largo del segmento, mientras que el método objetivo realiza una evaluación cuantitativa en estaciones específicas a lo largo de la carretera. De esta manera, ambos métodos demuestran relevancia en el análisis del estado de la carretera, especialmente cuando se utilizan juntos.

3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación se dividió en tres etapas distintas, resumidas en el diagrama de flujo de la Figura 1. El segmento en estudio fue evaluado utilizando los instrumentos normativos y parámetros requeridos por el DNIT (2003a y 2003b).

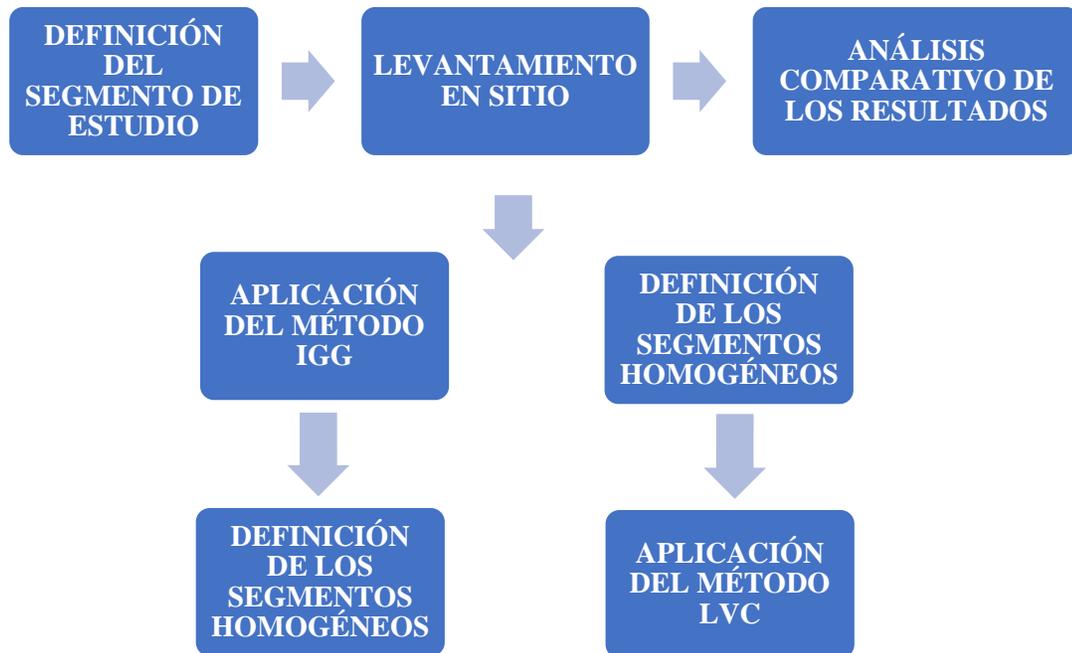


Figura 1. Etapas de la investigación.

El segmento estudiado se ubica en la Carretera BR-222, entre Forquilha y Fortaleza, Km 208 y Km 209, totalizando 2 km. La carretera analizada cuenta con una pista simple, con dos carriles de circulación, y su superficie es asfaltada. La elección de la carretera se justifica por el intenso tráfico, especialmente en los días hábiles, además de ser la principal vía de transporte que conecta la ciudad de Forquilha con la capital del estado de Ceará, Fortaleza.

El método LVC se realizó a una velocidad promedio de 30 a 40 km/h, a la que se pudieron registrar los defectos encontrados en la carretera. Para ello, los dos técnicos utilizaron una hoja de cálculo para registrar la aparición de defectos en la superficie del pavimento, dividiendo la pista en cuatro segmentos de 500 m cada uno, según DNIT (2003b). Los segmentos 1 y 2 corresponden al kilómetro 208 y los segmentos 3 y 4 corresponden al kilómetro 209. Con base en el levantamiento de campo se pudo determinar el valor del Índice de Condición de Pavimentos Flexibles y Semirrígidos (ICPF), así como el cálculo del Índice de Gravedad Global Acelerado (IGGE) y del Índice de Estado de Superficie (IES).

Al aplicar el IGG se estableció una señalización cada 20 metros alternados con relación al eje de la calzada, ya que el tramo en estudio es un carril simple. Se utilizaron seis segmentos, tomando como criterio la homogeneidad de defectos y hundimientos de la vía de las ruedas. En cuanto a la medición de depresiones de huellas de ruedas, se utilizó una celosía de aluminio estandarizada, con una varilla central móvil que tiene capacidad de medir con precisión de hasta 0,5 mm, según DNIT (2003a).

El DNIT (2003b) define que para cada clasificación existe una alternativa de intervención. Con base en esta información, se calcularon los costos asociados a cada actividad de mantenimiento y rehabilitación (M&R) de la carretera analizada utilizando el Sistema de Costos Viales (SICRO) y los Informes de Costos Promedio de Gestión. Estos sistemas fueron desarrollados por el Departamento Nacional de Infraestructura del Transporte (DNIT) y siguen los lineamientos establecidos en (DNIT, 2003c).

En este estudio se tuvieron en cuenta las composiciones de precios contenidas en el Informe SICRO Nordeste para el estado de Ceará, referido a la base de datos del mes de octubre/2022 (DNIT, 2022) y en el Informe de Costo Promedio de Gestión de julio/2017. (DNIT, 2017). Según (DNIT, 2006), los espesores recomendados para el recubrimiento asfáltico son entre 5 y 12,5 cm, y los espesores máximo y mínimo para la compactación de las capas granulares son 20 cm y 10 cm,

respectivamente. Con base en estos criterios, los costos calculados relacionados con las actividades de M&R en las secciones analizadas consideraron un espesor de 5 cm para el recubrimiento de concreto asfáltico y 15 cm de espesor para las capas granulares. A partir de los costos obtenidos, es posible comparar los valores de las intervenciones de M&R entre los métodos estudiados.

Luego de los análisis in situ y con los formularios diligenciados, se analizaron los resultados obtenidos para determinar el estado funcional del pavimento según las dos metodologías aplicadas. El estado de conservación del pavimento, determinado por los dos métodos, fue comparado entre sí, con el objetivo de analizar las diferencias técnicas entre LVC e IGG, con el objetivo de verificar las divergencias entre una evaluación objetiva y subjetiva y los costos respectivos.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En relación con LVC, se observó que los segmentos seleccionados presentaron diferentes tipos de defectos como fisuras aisladas, fisuras de piel de caimán, socavones, ondulaciones y exudación, cuyo puntaje resultó en un ICPF que varía de 2 a 4 según Tab (3). Las secciones 3 y 4 tienen un IGGE alto, demostrando así su condición crítica respecto a defectos del tipo: baches y parches. La Figura 2 muestra los defectos encontrados en los tramos analizados de la Carretera BR-222.



Figura 2 - Principales defectos encontrados en la BR-222: (a) parches y grietas cocodrilo (b) socavones (c) grietas transversales (d) baches y desgaste.

Con el ICPF y el IGGE fue posible determinar el IES y clasificar el pavimento en función de su estado de conservación. Los resultados se resumen en la Tabla 2. Con la división de los segmentos individuales de 500 m.

Tabla 2. Resumen de los resultados del LVC – Carretera BR-222 (Km 208 y Km 209).

Segmentos	Resultados		IES	
	ICPF	IGGE	Valor	Clasificación
Km 208 1 (500 m)	4	0	0	Óptimo
2 (500 m)	3	10,4	2	Bueno
Km 209 3 (500 m)	2	83,2	8	Pésimo
4 (500 m)	2	89,4	8	Pésimo

Los resultados observados en la Tabla 2 mostraron que los segmentos 1 y 2 presentaron una clasificación Óptimo y Bueno, respectivamente, mientras que los segmentos 3 y 4 presentaron un estado Pésimo, debido al alto número de defectos en el pavimento.

En relación al IGG, los resultados encontrados con las respectivas clasificaciones se presentan en la Tabla 3, la cual contiene los valores de los seis segmentos homogéneos entre el Km 208 y el Km 209 de la carretera estudiada.

Tabla 3. Resumen de los resultados del IGG – Carretera BR-222 (Km 208 y Km 209).

Segmentos	Resultados	
	IGG	Clasificación
Km 208 1 (240 m)	55	Regular
2 (260 m)	25	Bueno
3 (500 m)	65	Regular
Km 209 4 (240 m)	141	Malo
5 (500 m)	162	Pésimo
6 (260 m)	126	Malo

Se verificó que los resultados obtenidos en el IGG indican que ninguno de los segmentos presentó clasificación Óptimo, sólo el Segmento 2 presentó clasificación Buena, con exudación y parches en cinco estaciones. Los Segmentos 1 y 3 presentaron una clasificación Regular, el defecto más constante en el Segmento 1 fue la exudación encontrada en todas las estaciones, no identificándose grietas o fisuras aisladas, mientras que el Segmento 3 tiene principalmente presencia de grietas tipo 1, 2 y 3. Segmentos 4 y 6 fueron clasificados como Malo, ambos segmentos presentaron defectos como hundimientos, grietas y parches. El único segmento clasificado como Pésimo es el 5, en el que se encontraron defectos como baches, socavones, parches, grietas, hundimientos y desgaste. Las causas de estos defectos pueden estar asociadas a fallos ejecutivos, asentamientos diferenciales o a la propia acción del tráfico de vehículos pesados.

Además, se buscó hacer una comparación entre la evaluación mediante ambos métodos, con énfasis en el estado funcional de la carretera evaluada y los defectos encontrados en el pavimento. Para ello, en la Figura 3 se muestra un esquema de clasificación de secciones según el método utilizado.

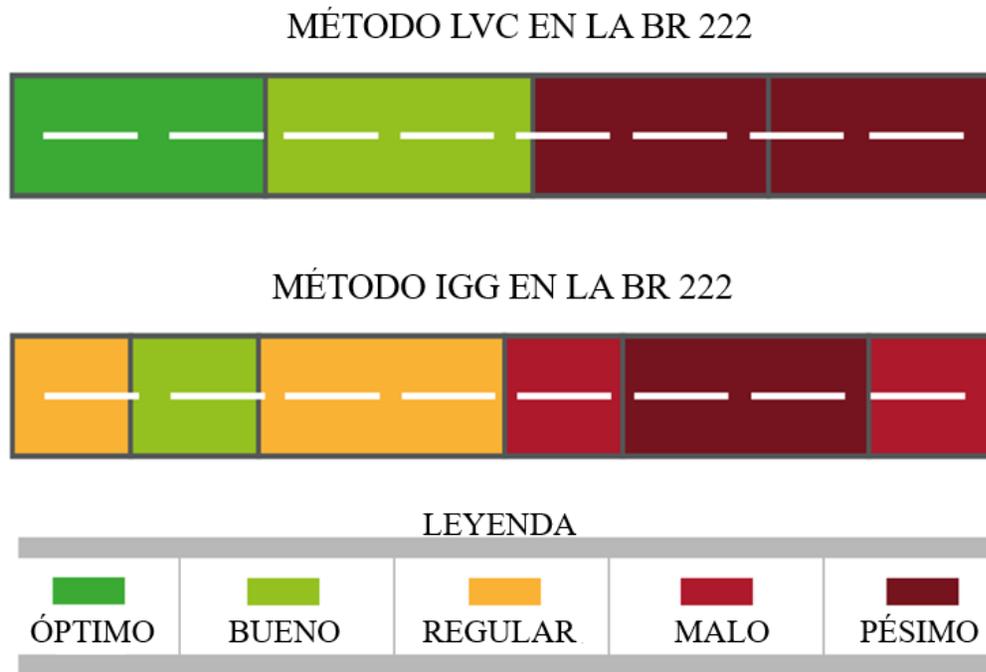


Figura 3. Comparativo de las clasificaciones de los métodos LVC y IGG.

Se observa que las divergencias entre los métodos son en su forma subjetiva u objetiva, ya que, mientras el IGG es una evaluación considerada como muestral, en la que se analizan los defectos encontrados en todas las estaciones del segmento elegido, el LVC se realiza de forma continua, es decir, la comprobación de defectos se realiza en toda la red viaria del segmento, sin embargo, se realiza de forma breve debido a la velocidad del vehículo, dejando margen de error por parte de los técnicos evaluadores. De esto se puede entender que debido a estas diferencias existen diferentes clasificaciones para los segmentos analizados en este estudio.

En cuanto al estado del pavimento, ambos métodos clasificaron los tramos del km 209 como Malo o Pésimo, demostrando que, a pesar de que el método LVC es subjetivo, un peor estado de la superficie puede ser identificado más fácilmente por los evaluadores, debido a la presencia de una mayor cantidad de defectos. Respecto al segmento 2, el método IGG lo clasificó como Bueno, mientras que el método LVC lo clasificó como Óptimo.

Varios autores han realizado estudios comparativos entre métodos de evaluación del estado de los pavimentos, ya sean objetivos o subjetivos (VIEIRA et al. 2016, CAVALCANTE et al. 2018, SILVA et al. 2018a, FERNANDES et al. 2018, SOUSA et al. 2022). Estos estudios demostraron que cada enfoque tiene sus ventajas y desventajas, contribuyendo a la comprensión del estado funcional de los pavimentos viales. Cabe señalar que, debido a los diferentes enfoques y enfoques en las evaluaciones, los métodos pueden complementarse entre sí de manera eficaz. Mientras que algunos métodos proporcionan un análisis cuantitativo (objetivo), otros proporcionan un análisis cualitativo (subjetivo).

La combinación de estos enfoques ayuda a llenar los vacíos, lo que resulta en una evaluación más completa del estado del pavimento. Por tanto, elegir el método más adecuado dependerá de las características específicas de cada situación, así como de sus limitaciones. La integración de diferentes métodos puede fortalecer la confiabilidad de las evaluaciones.

En la Tabla 4 se buscó presentar alternativas de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación (M&R) según la clasificación de cada segmento analizado. Además, también están representados los costos de M&R para cada una de las intervenciones propuestas.

Tabla 4. Alternativas de intervención y costos de M&R.

Clasificaciones	Alternativas de M&R	Costos unitarios		Costo (R\$/ Km)
Óptimo	No hacer nada	-	-	0,00
Bueno	Aplicación de lodo asfáltico	1,14	R\$/m ²	8.208,00
Regular	Corrección de puntos localizados	111,26	R\$/m ³	40.053,60
Malo	Restauración	833,33	R\$/m ³	1.200.000,00
Pésimo	Reconstrucción	1.620,83	R\$/m ³	2.334.000,00

Fuente: Adaptado de la Norma DNIT (2003b), DNIT (2022), DNIT (2017)

La diferencia en la clasificación del estado de conservación del pavimento da como resultado diferentes estrategias y costos de M&R. En este sentido, el método IGG, al ser un método objetivo, podrá clasificar con mayor precisión el estado del pavimento, ya que es independiente de la opinión del evaluador. Silva et al. encontraron resultados similares. (2018a). La Tabla 5 busca mostrar una comparación de valores entre ambos métodos.

Tabla 5. Costos de las alternativas de M&R y de mano de obra de estudios de campo.

LVC				IGG			
Seg.	Clas.	Ext. (m)	Costos (R\$)	Seg.	Clas.	Ext. (m)	Costos (R\$)
1	Óptimo	500	0,00	1	Regular	240	9.612,86
				2	Bueno	260	2.134,08
2	Bueno	500	4.104,00	3	Regular	500	20.026,80
3	Pésimo	500	1.167.000,00	4	Malo	240	288.000,00
				5	Pésimo	500	1.167.000,00
4	Pésimo	500	1.167.000,00	6	Malo	260	312.000,00
Costo de mano de obra			520,00	Costo de mano de obra			620,00
Costo Total (R\$):			2.338.624,00	Costo Total (R\$):			1.799.393,74

Se puede observar que el LVC tuvo un costo total superior al de IGG en aproximadamente un 30%. El LVC clasificó el km 209 como pésimo, por lo que el DNIT (2003b) recomienda la reconstrucción del segmento, siendo necesarios R\$ 2.334.000,00 para la rehabilitación de los tramos finales del segmento analizado. Los costos menores de R\$ 2.134,08 y R\$ 4.104,00, se presentaron en el Segmento 2, en ambos métodos, donde sólo se requiere la aplicación de lodo asfáltico. En el IGG, el mayor costo de M&R está en el segmento 5, totalizando R\$ 1.167.000,00, donde también es necesaria la reconstrucción del segmento.

Para integrar los dos métodos de forma complementaria, se calcularon los costos de mantenimiento y rehabilitación en los segmentos considerando la clasificación más desfavorable (regular, mala o pésima) entre el LVC y el IGG. En ese contexto, considerando el peor escenario de clasificación, se obtiene el valor total de R\$ 2.365.773,74. Se observa que, en relación con el método de mayor costo (LVC), la diferencia en la complementación de los métodos es de R\$ 27.149,74 para los segmentos evaluados.

En cuanto a los costos asociados a los levantamientos, al considerar sólo los costos de mano de obra responsable de los servicios de campo, la ejecución del LVC resultó en la asignación de una tarifa diaria para el técnico y otra para el conductor. Según lo estipulado por el DNIT (2021), estas tarifas diarias representan un costo de R\$ 310,00 y R\$ 210,00, respectivamente, totalizando R\$ 520,00. En cambio, en IGG, el técnico tardó dos días, resultando en un total de R\$ 620,00.

El Levantamiento Visual Continuo (LVC) arrojó que el Km 208 se encuentra en mejores condiciones que el Km 209, ya que los segmentos 1 y 2 recibieron calificaciones de Óptimo y Bueno, respectivamente, representando el 50% del segmento analizado, mientras que los segmentos 3 y 4 (50% restante) recibieron una calificación de Pésimo. El Índice de Gravedad Global (IGG) arrojó que los segmentos del km 208 fueron clasificados como Regular y Bueno, mientras que los segmentos del Km 209 fueron clasificados como Malo y Pésimo, confirmando que el Km 208 se encuentra en mejor estado de conservación del pavimento.

LVC tiene ventaja sobre IGG en términos de tiempo de ejecución, el cual duró aproximadamente 3 horas para determinar el Índice de Gravedad Global Acelerado (IGGE), el Índice de Condición de Pavimentos Flexibles y Semi-Rígidos (ICPF) y el Índice de Condición Superficial (IES) de la carretera, una desventaja asociada al hecho de que este método no considera todos los defectos, sólo considera grietas, deformaciones, baches y parches. En el Índice de Gravedad Global, existe la ventaja de que el método cubre una mayor variedad de defectos y se realiza a pie, en el que el evaluador puede efectivamente visualizar y verificar el defecto presente en la vía. Sin embargo, en cuanto a su duración, la recolección de datos del segmento analizado tomó alrededor de 12 horas, requiriendo así más tiempo por parte de los evaluadores.

El IGG contribuye a una evaluación detallada siendo objetivo, proporciona parámetros para el estado superficial del pavimento, generando un inventario de ocurrencia de defectos a través de formularios y clasificación de secciones. Finalmente, ambos métodos son fundamentales para comprender los defectos del pavimento, lo que permite actuar para minimizar estos problemas.

5. CONCLUSIÓN

Esta investigación tuvo como objetivo hacer una comparación entre dos métodos para evaluar defectos superficiales en pavimentos viales en carreteras, un método subjetivo y un método objetivo, respectivamente, el Levantamiento Visual Continuo (LVC) y el Índice de Gravedad Global (IGG). Se compararon las clasificaciones de las secciones del segmento elegido, además, fue posible comparar alternativas de intervención y costos de M&R.

Hubo diferencias en cuanto a la clasificación funcional de un mismo segmento entre los dos métodos de evaluación. El LVC presentó los dos segmentos iniciales con clasificación Bueno y Óptimo, mientras que los segmentos finales fueron clasificados como Pésimo, debido a la gran cantidad de defectos identificados. En el IGG, sólo un segmento fue clasificado como Bueno, dos segmentos fueron clasificados como Regular y la última mitad de la sección analizada recibió calificaciones de Malo y Pésimo.

En cuanto a los costos de mantenimiento y rehabilitación, se puede observar que la LVC presentó la necesidad de un costo mayor en relación con el IGG, debido a la clasificación de los segmentos finales que indican la necesidad de reconstrucción de la carretera.

Se sabe que diferentes clasificaciones del estado funcional del pavimento requieren diferentes estrategias y recursos de M&R, debiendo analizarse el método de levantamiento más adecuado, teniendo en cuenta aspectos como costo y tiempo del levantamiento, materiales, personal requerido, entre otros. Además, el IGG, al ser un método objetivo, puede ser más preciso a la hora de clasificar el estado de conservación del pavimento, ya que cuantifica los defectos existentes, sin depender de la opinión de evaluadores, como el LVC.

En este sentido, es importante resaltar que la complementariedad entre IGG y LVC puede ser estratégica. Mientras que IGG ofrece un enfoque cuantitativo (objetivo), proporcionando datos

específicos sobre los defectos, LVC aporta una evaluación cualitativa (subjetiva), identificando visualmente una variedad de defectos. La combinación de estos métodos puede proporcionar una visión más completa de la condición del pavimento, permitiendo una toma de decisiones más racional al definir estrategias de M&R. Por lo tanto, la elección entre IGG y LVC, o incluso su aplicación combinada, dependerá de las necesidades específicas de la evaluación del pavimento en cuestión.

6. REFERENCIAS

- Cavalcante, R. L., Fernandes Junior, J. L., Suárez, D. A. A. (2018), Análise Comparativa Entre Métodos de Levantamento de Defeitos em Pavimentos Flexíveis: Estudo de Caso na BR 060/MS. *46ªed. Revista Pavimentação*. 14 (1): 52-70.
- Confederação Nacional do Transporte. (2022), Pesquisa CNT Rodovias. Relatório gerencial.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2003a). *DNIT 006/2003 – PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2003b). *DNIT 008/2003 – PRO: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2003c) Diretoria Executiva. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes*. Volume 01: Metodologia e Conceitos - 3ª Edição - Brasília.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. (2006). *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. (2017). *CMG: Custos Médios Gerenciais*. Disponível en: [copy_of_anexoixcustomdiogerencialjulho2017.pdf \(www.gov.br\)](http://www.gov.br/copy_of_anexoixcustomdiogerencialjulho2017.pdf). Acceso en: 19 ene. 2023.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2021). Relatório de Consolidação dos Custos de Mão de Obra. Tabela de Preços de Consultoria - mes de referencia: octubre de 2021.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2022). Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO. Relatório Sintético de Composições de Custos CE, octubre/2022.
- Espíndola, A. C., Silva, C. A. U., Nobre Junior, E. F., Romeiro Junior, C. L. S. (2018). “Avaliação Funcional da Rodovia BR-104/AL–Trecho Urbano Da Cidade De Maceió/AL” in: Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, Gramado (Brasil), pp. 1398-1409.
- Fernandes, P. G. P. S.; Carvalho, P. H. F. C.; Nobre Júnior, E. F.; Oliveira, F. H. L. (2018). “Avaliação das condições de superfície de pavimentos rodoviários por meio do VSA e do IRI obtido por aplicativo para smartphones”. in: Anais do 32º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET), Gramado, Santa Catarina, pp. 1212-1221.
- Lira, M. N., Oliveira, F. H. L. (2019). “A Influência das Avaliações Objetiva e Subjetiva na Manutenção e Reabilitação de Rodovias Brasileiras” in: XX Congresso Ibero-Latino-Americano do Asfalto. Anais do Congresso Ibero-Latino-Americano do Asfalto, Guadalajara (México), pp. 1-10.
- Marcolan, C. M., Klamt, R. A., Knierim, L. S. (2020), Avaliação das Condições Funcionais de um Pavimento para Soluções de Restauração. *Revista de Engenharia e Tecnologia*. 12 (2):149-160. ISSN 2176-7270.
- Moura, M. A. S. (2017) “Avaliação de Manifestações Patológicas na TO-164 entre os Municípios De Xambioá e Araguaianã–TO”. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário Luterano de Palmas.

- Santos, D. C. M. F., Silva Júnior, F. V. (2018), Levantamento Visual Contínuo: Análise da Rodovia TO-255, trecho de Porto Nacional a Monte do Carmo. *Engineering Sciences*. 6 (1):10-20. <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2018.001.0002>
- Santos, T. S. P. (2014), “Comparação do método DNIT 006/2003 com Solução Alternativa para Determinação do Índice de Gravidade Global (IGG): avaliação de trecho da PE-95 Caruaru-Limoeiro”. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco.
- Santos, Y. R. P., Barbosa, C. E. B., Lima, J. J., Meneses, M. M. M., Nascimento, P. D. L. (2021), Classificação e Diagnóstico do Estado de Conservação de uma Via em Pavimentação Asfáltica do Município de Caruaru, Pernambuco, Brasil. *Research, Society and Development*. 10 (17): 1-12. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i17.24257>.
- Silva, J. P. O., Oliveira, F. H. L., Araújo, C. B. C. (2018a) Análise Funcional Comparativa de Trecho da BR-116 no Estado do Ceará. *Revista Tecnologia*. 39 (2): p. 1-21. <https://doi.org/10.5020/23180730.2018.7427>.
- Silva, R. C., Motta, L. M. G., Vianna, K. K. L., Souza Junior, J. G., Costa, D. P. (2018b) Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCI) Pelo Método da Varredura - Comparação com Outros Métodos. *Revista Estradas*. 23 (1): 64-70.
- Silva, S. O., Chaves, J. W. R., Almeida, L. C., Oliveira, F. H. L. (2022). “Avaliação Funcional De Vias Urbanas Por Meio Do Índice De Gravidade Global (IGG) -Estudo De Caso No Município De Caucaia-Ce”. in: Anais do 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)/47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), pp. 1011-1021.
- Soncim, S. P.; Fernandes Júnior, J. L. (2015), Modelo de Previsão do Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis. *Journal of Transport Literature*, 9 (3):25-29. <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v9n3a5>
- Sousa, J. L. C., Batista, J. C., Bastos, S. D. V., Nascimento, N. V., Barcelos, P. F., Ramos, S. P., Brasileiro, F. L. C. (2022), Avaliação da superfície de pavimentos flexíveis pelos métodos do IGG e LVC: na BR 222 (Trecho Forquilha- Fortaleza). *Brazilian Journal of Development*. 8(5): 36507–36519. DOI: 10.34117/bjdv8n5-250.
- Vieira, S. A., Pinho Júnior, A. A. E., Oliveira, F. H. L., Aguiar, M. F. P. (2016), Análise Comparativa de Metodologias de Avaliação de Pavimentos Através do IGG e PCI. *Conexões - Ciência e Tecnologia*, 10(3):20-30. ISSN 2176-0144. <https://doi.org/10.21439/conexoes.v10i3.799>.