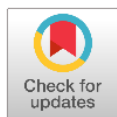




Artículo de investigación



Estrategia de micromodelado de columnas de concreto reforzado: validación frente a ensayos cíclicos

Micromodeling strategy for reinforced concrete columns: validation against cyclic tests

Esteban Mateo Narváez Vásquez¹ , Edén Bojórquez Mora¹ , Pablo David Quinde Martínez²

¹Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Cd. Universitaria, Blvd. de las Américas y Blvd. Universitarios, S/N C.P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México

²Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del Azuay, Av. 24 de Mayo 7-77 y Hernán Malo, Cuenca, Ecuador

Autor de correspondencia: Esteban Mateo Narváez Vásquez, Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Cd. Universitaria, Blvd. de las Américas y Blvd. Universitarios, S/N C.P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. Correo electrónico: estebanmateonarvaezvasquez.fic@uas.edu.mx. ORCID: 0009-0008-9950-6197.

Recibido: 15 de abril del 2026

Aceptado: 8 de Julio del 2026

Publicado: 27 de agosto del 2026

Resumen. - La simulación del comportamiento cíclico en columnas de concreto reforzado mediante modelos de fibras o plasticidad concentrada requiere calibraciones para capturar efectos de confinamiento, cortante o modos de falla localizados. En este artículo se propone una estrategia de micromodelado implementada en OpenSees, caracterizada por una parametrización simplificada donde las propiedades constitutivas se derivan exclusivamente de la resistencia a compresión del concreto y la fluencia del acero. El concreto se representa mediante un modelo de daño plástico con regularización por energía de fractura, mientras que el acero de refuerzo incorpora pandeo post-fluencia y degradación cíclica. La metodología fue validada frente a seis especímenes experimentales con relaciones de carga axial entre 0.00 y 0.22. Los resultados demuestran índices de ajuste promedio de 0.90. El modelo capturó la formación de la rótula plástica y la degradación post-pico, confirmando que la interacción mecánica y el confinamiento emergen naturalmente de la formulación sin necesidad de hipótesis de daño o regiones plásticas predefinidas.

Palabras clave: Micromodelado; Concreto reforzado; Energía histerética.

Abstract. - Simulating the cyclic behavior of reinforced concrete columns using fiber or lumped plasticity models requires calibrations to capture the effects of confinement, shear, or localized failure modes. This article proposes a micromodeling strategy implemented in OpenSees, characterized by simplified parameterization where the constitutive properties are derived exclusively from the concrete's compressive strength and the steel's yield strength. The concrete is represented by a plastic damage model with fracture energy regularization, while the reinforcing steel incorporates post-yield buckling and cyclic degradation. The methodology was validated against six experimental specimens with axial load ratios between 0.00 and 0.22. The results demonstrate average fit indices of 0.90. The model captured the formation of the plastic hinge and post-peak degradation, confirming that mechanical interaction and confinement emerge naturally from the formulation without the need for predefined damage hypotheses or plastic regions.

Keywords: Micromodeling; Reinforced concrete; Hysteretic energy.



1. Introducción

La simulación numérica de elementos de concreto reforzado sometidos a cargas cíclicas sigue siendo un desafío en la ingeniería estructural, debido a la interacción compleja entre procesos como la fisuración del concreto, la plastificación del acero de refuerzo y el efecto del confinamiento en zonas comprimidas. En marcos resistentes a momento, las columnas de concreto reforzado constituyen elementos críticos, ya que, su capacidad para desarrollar deformaciones inelásticas estables y disipar energía, controlan en gran medida el desempeño sísmico global de la estructura [1].

Los enfoques más comunes para simular la respuesta no lineal de estos elementos pueden agruparse en modelos de plasticidad concentrada y modelos de plasticidad distribuida tipo fibras. Los primeros representan la inelasticidad mediante rótulas plásticas de longitud finita, con alta eficiencia computacional para el análisis de marcos completos. Sin embargo, su capacidad predictiva está limitada a los mecanismos incluidos en la formulación y en el proceso de calibración experimental, lo que restringe su aplicabilidad cuando el comportamiento estructural involucra modos de falla no considerados explícitamente en su formulación.

Los modelos de fibras distribuyen la inelasticidad a lo largo del elemento mediante la integración de secciones transversales discretizadas, lo que permite capturar de manera natural la interacción entre carga axial y flexión. No obstante, al basarse en relaciones constitutivas uniaxiales, fenómenos tridimensionales como la interacción cortante–flexión, el pandeo local del refuerzo o el deslizamiento acero–concreto deben introducirse mediante formulaciones adicionales o calibraciones empíricas. Adicionalmente, la dependencia de los resultados respecto a la longitud de integración puede derivar en problemas de localización numérica [2].

Como alternativa, el micromodelado permite representar explícitamente la respuesta del material a nivel constitutivo. En este enfoque, la fisuración, el confinamiento del concreto y la localización del daño emergen de manera natural como resultado de la solución numérica, sin necesidad de definir a priori la ubicación de zonas plásticas o regiones de daño. Debido a estas características, el micromodelado ha sido frecuentemente empleado en el análisis de estructuras cuasi-frágiles como la mampostería [3-6], mientras que su aplicación en elementos de concreto reforzado ha sido considerablemente más limitada [7-10]. Aplicaciones de micromodelado en elementos de concreto reforzado sometidos a cargas cíclicas siguen siendo escasas en la literatura.

En este trabajo se propone una estrategia de micromodelado para columnas de concreto reforzado implementada en OpenSees [11]. La formulación adopta una parametrización simplificada en la que las propiedades constitutivas del modelo se derivan exclusivamente de la resistencia a compresión del concreto (f'_c) y la resistencia de fluencia del acero (f_y), estimando los restantes parámetros mediante formulaciones analíticas cerradas. Esta característica permite definir el modelo sin recurrir a procedimientos de calibración específicos para cada espécimen. La metodología se valida mediante la simulación de seis especímenes provenientes de dos campañas experimentales independientes [12], que abarcan un rango de relación de carga axial normalizada $0.00 < \frac{P}{A_g \cdot f'_c} < 0.22$. Los resultados muestran que el enfoque propuesto reproduce la respuesta cíclica de las columnas con índices de ajuste promedio superior a 0.90 en los parámetros de respuesta evaluados.



2. Estado del Arte

En el ámbito del concreto reforzado, el micromodelado ha evolucionado desde el análisis de fenómenos locales hacia la simulación de elementos estructurales completos. Ruiz Carmona [13] combinó modelos cohesivos para estudiar la iniciación, propagación y transición entre modos de falla en vigas de concreto reforzado.

En el uso de modelos triaxiales para el análisis de columnas de concreto reforzado, Kang et al. [14] demostraron la viabilidad de representar la falla de columnas mediante modelos constitutivos tridimensionales, destacando que la captura adecuada de los modos de falla requiere representar explícitamente el estado de esfuerzos triaxiales que se desarrolla en la zona confinada. Extendiendo esta línea, Markou y Papadrakis [15] demostraron que el uso de elementos sólidos tridimensionales con refuerzo embebido permite reproducir el comportamiento no lineal de diversas configuraciones de con buena concordancia experimental.

De forma similar, Fawaz y Murcia-Delso [8] desarrollaron un esquema tridimensional detallado para columnas de concreto reforzado sometidas a carga lateral cíclica, incorporando modelos constitutivos avanzados para el concreto, deslizamiento acero-concreto y fatiga de bajo número de ciclos en el refuerzo.

Moharrami y Koutromanos [16] desarrollaron un marco tridimensional basado en el método explícito de elementos finitos, integrando modelos constitutivos avanzados para el concreto y el acero que incluyen fractura por fatiga de bajo ciclo (“low-cycle fatigue”) y pandeo de barras, validado en ensayos estáticos cíclicos y dinámicos en columnas y muros de concreto reforzado. Aunque estos enfoques reproducen la degradación de resistencia y la localización del daño, requieren una cantidad elevada de parámetros constitutivos y calibración específica por espécimen, lo que limita su aplicabilidad en validaciones sistemáticas.

Recientemente, Shamsi y Sümer [17] exploraron estrategias de modelado por elementos finitos para el análisis del comportamiento cíclico de marcos de concreto reforzado, confirmando la viabilidad de enfoques tridimensionales en este tipo de estructuras.

En el contexto del modelado numérico de materiales cuasi-frágiles, Petracca et al. [18] desarrollaron un modelo de daño plástico basado en el esquema de integración IMPL-EX, implementado en OpenSees. Este enfoque mejora la estabilidad numérica en materiales con ablandamiento por deformación. Aunque este modelo fue desarrollado y validado originalmente para estructuras de mampostería, su formulación es aplicable en elementos de concreto reforzado.

En este contexto, el presente trabajo aborda esta brecha mediante una estrategia de micromodelado implementada en OpenSees. A diferencia de los enfoques previos, se propone una parametrización mínima derivada exclusivamente de la resistencia a compresión del concreto (f'_c) y la resistencia de fluencia del acero (f_y). La capacidad predictiva de esta estrategia se evalúa mediante la validación frente a una base de datos de seis especímenes que cubren un rango de carga axial normalizada de 0.00 a 0.22.



3. Metodología

3.1 Modelo constitutivo del concreto

El comportamiento del concreto se representó mediante un sólido continuo tridimensional utilizando el modelo constitutivo ASDConcrete3D [18]. Esta formulación se basa en un marco de daño plástico que incorpora ablandamiento elástico tanto en tracción como en compresión. La respuesta triaxial del material se definió mediante el criterio de fluencia de Drucker–Prager, el cual describe la superficie de falla en el espacio de esfuerzos invariantes. En particular, el incremento de resistencia y ductilidad asociados al confinamiento emergen de forma natural como un resultado del modelo, ya que, al representar explícitamente la interacción mecánica entre el concreto y el acero transversal, el estado de esfuerzos triaxiales modifica la respuesta del material [19] [20] sin necesidad de recurrir a modelos de confinamiento predefinidos, como los ampliamente utilizados modelos uniaxiales [21].

El modelo se desarrolló a partir de la resistencia nominal a compresión f'_c . El módulo de elasticidad se definió como $E_c = \frac{2 \cdot f'_c}{\varepsilon_o}$ [22], donde $\varepsilon_o = 0.002$ representa la deformación en la resistencia máxima. La resistencia a la tracción se estimó como $f_t = 0.33 \sqrt{f'_c}$ [23], y la energía de fractura en tracción como $G_t = 0.073 \cdot f'_c{}^{0.18}$ [24]. La energía de fractura volumétrica en compresión se calculó como $g_c = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_u - \varepsilon_o) \cdot f'_c$ [24], donde $\varepsilon_u = 0.0035$ [25] corresponde a la deformación última del concreto.

En los modelos constitutivos con ablandamiento por deformación, la energía disipada depende del tamaño del elemento finito empleado. La deformación inelástica se localiza en una banda cuyo espesor tiende a coincidir con la dimensión de la malla: una discretización más gruesa concentra el daño en un volumen mayor y sobreestima la energía disipada, mientras que una malla más fina la subestima y produce una respuesta numéricamente más frágil. Para mitigar la dependencia de los resultados respecto al tamaño de la malla, se empleó una técnica de regularización basada en la energía de fractura, introducida originalmente por Hillerborg et al. [26]. En este enfoque, la rama descendente de las curvas tensión–deformación se escala en función de la longitud característica del elemento finito (l_{ch}) [27]. De esta manera, la energía disipada por unidad de volumen se define como $G_c = g_c \cdot l_{ch}$. Los parámetros del modelo de concreto se presentan en la Tabla 1.

3.2 Modelo constitutivo del acero de refuerzo

El acero de refuerzo se modeló mediante el elemento uniaxial “Hysteretic” de OpenSees con el enfoque de fibras, adoptando la degradación cíclica de Dhakal y Maekawa [28], que reproduce el pandeo de barras y el estrangulamiento de los lazos histeréticos. Se descartó el modelo de Giuffrè-Menegotto-Pinto [29] debido a que no capturó adecuadamente la degradación cíclica observada experimentalmente en elementos de concreto reforzado. Los factores de estrangulamiento se fijaron en $\text{pinch}_x = \text{pinch}_y = 0.40$ conforme a [30].


Tabla 1. Parámetros del modelo de daño plástico del concreto por espécimen.

Espécimen	f'_c [MPa]	E_c [MPa]	f_t [MPa]	g_c [MPa]	G_c [N/mm]	G_t [N/mm]
Mo & Wang C1-1	24.9	24900	1.65	0.02	3.74	0.13
Mo & Wang C1-2	26.7	26700	1.71	0.02	4.01	0.13
Mo & Wang C1-3	26.1	26100	1.69	0.02	3.92	0.13
SAATU 1	43.6	43600	2.18	0.03	6.54	0.14
SAATU 4	32	32000	1.87	0.02	4.80	0.14
SAATU 6	37.3	37300	2.02	0.03	5.60	0.14

La interacción entre el concreto y el acero de refuerzo se definió mediante el “ASDEmbeddedNodeElement” de OpenSees, el cual vincula el nodo retenido (acero de refuerzo) con los nodos de soporte circundantes (volumen de concreto) mediante interpolación de los desplazamientos. Este enfoque asume compatibilidad cinemática perfecta y adherencia acero–concreto, sin considerar deslizamiento de las varillas.

3.3 Condiciones de borde y protocolo de carga

La carga axial se aplicó de forma constante a través de un elemento elástico, conectado a la parte superior de la columna mediante un elemento de contacto “ZeroLengthContactASDimplex” [31]. El empotramiento en la base se consideró perfecto. El protocolo de carga lateral sigue el ATC-24 [32] hasta una deriva máxima del 7%.

4. Resultados y discusión

La validación se realizó con seis especímenes provenientes de dos campañas experimentales independientes, resumidos en la Tabla 2. La selección cubre un rango de relación de carga axial normalizada $\frac{P}{A_g \cdot f'_c}$ de 0.00 a 0.22, secciones transversales cuadradas de 350 mm y 400 mm, y resistencias a la compresión entre 24.9 y 43.6 MPa.

Tabla 2. Características geométricas y mecánicas de los especímenes experimentales utilizados.

Espécimen	Sección [mm]	f'_c [MPa]	f_y [MPa]	$P/A_g \cdot f'_c$	ρ	ρ_{sh}
Mo & Wang C1-1	400×400	24.9	497	0.11	0.0213	0.011
Mo & Wang C1-2	400×400	26.7	497	0.16	0.0213	0.011
Mo & Wang C1-3	400×400	26.1	497	0.22	0.0213	0.011
SAATU 1	350×350	43.6	430	0	0.0321	0.004
SAATU 4	350×350	32	430	0.15	0.0321	0.012
SAATU 6	350×350	37.3	430	0.13	0.0321	0.014



En la serie Mo & Wang [33] (Figura 1), el modelo reproduce la forma y amplitud de los lazos histeréticos en los tres especímenes. A medida que aumenta la relación de carga axial, los lazos experimentales se vuelven progresivamente más angostos en los ciclos finales, tendencia que el modelo captura correctamente y que refleja la reducción de la capacidad de disipación post-pico del concreto confinado bajo mayor compresión.

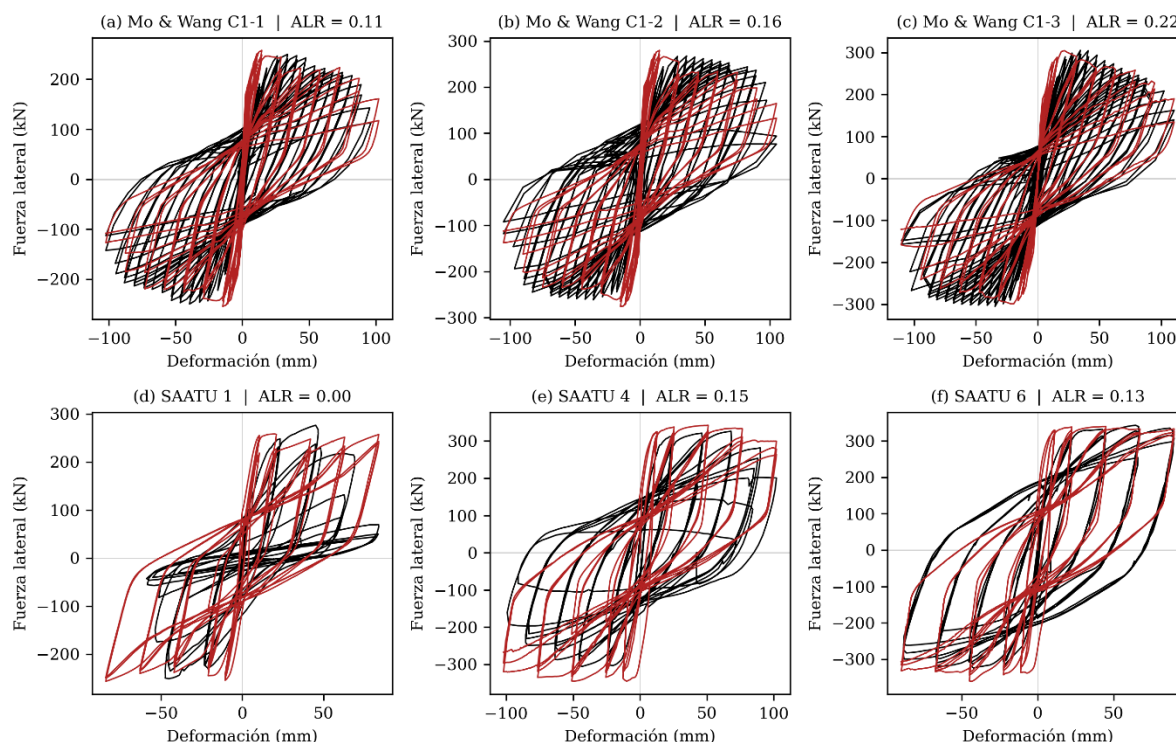


Figura 1. Respuesta histerética numérica y experimental de los especímenes estudiados.

En los especímenes SAATU 4 y SAATU 6 [34], el ajuste general es satisfactorio en términos de envolvente y amplitud de los ciclos. No obstante, en SAATU 6 el modelo tiende a sobreestimar el efecto de estrangulamiento, tal como se ve en la figura 1: los lazos numéricos presentan ramas de descarga más pronunciadas hacia el origen que las observadas experimentalmente, lo que sugiere que el modelo no captura adecuadamente el cierre de fisuras durante la inversión de carga para este espécimen.

El espécimen SAATU 1 constituye el caso de mayor discrepancia. Los lazos numéricos son notablemente más anchos que los experimentales, indicando que el modelo sobreestima la energía disipada por ciclo. Este comportamiento es consistente con la ausencia de un modelo explícito de deslizamiento acero-concreto (bond-slip): sin carga axial, la penetración de deformaciones en la cimentación reduce la disipación real de la columna, mecanismo que el modelo no captura al asumir adherencia perfecta.

La eficiencia del modelo se cuantifica mediante la comparación del ajuste de parámetros evaluados como: desplazamiento de fluencia (δ_y); desplazamiento último (δ_u); fuerza de fluencia (V_y); fuerza máxima (V_{max}); energía histerética disipada (E_{hist}); energía histerética normalizada ($\tilde{E}$); y ductilidad (μ) (Figura



2). La fuerza de fluencia y la fuerza máxima presentan un ajuste del 95.9%, lo que evidencia una transición reproducible en el rango inelástico. El desplazamiento último alcanza un ajuste del 93.4%, replicando la degradación del material luego de su resistencia máxima. La energía histerética disipada presenta una concordancia del 90.7%, lo que indica que la disipación de energía en el modelo numérico es equivalente a la del espécimen físico. El desplazamiento de fluencia, la ductilidad y la energía histerética normalizada presentan ajustes de 86.1%, 85.7% y 84.6%, respectivamente, diferencia vinculada a la mayor sensibilidad de estos parámetros a la rigidez inicial estimada.

Tabla 3. Error porcentual medio (μ) y desviación estándar (σ) del modelo numérico para los seis especímenes.

	V_{max}	V_y	δ_y	δ_u	μ	E_{hist}	$\tilde{E}$
Error (μ)	4.1%	4.1%	13.9%	6.6%	14.3%	9.3%	15.4%
Desviación Estándar (σ)	3.5%	2.8%	12.5%	7.8%	13.2%	6.9%	11.4%

La validación a nivel macroscópico se complementa con un análisis de la evolución del daño local (Figura 3). En el espécimen C1-1, la distribución de la variable de daño por compresión en el modelo numérico identifica correctamente la formación de una rótula plástica en la base de la columna. La extensión vertical de la zona de máximo daño coincide con la región de desprendimiento del recubrimiento y el inicio de la trituration del núcleo de concreto observada experimentalmente al final del ensayo. Esta correspondencia espacial entre los contornos de daño numérico y el agrietamiento físico confirman la capacidad del modelo de reproducir la evolución del daño.

5. Conclusiones

El presente trabajo validó una estrategia de micromodelado para columnas de concreto reforzado sometida a cargas cíclicas, empleando una parametrización simplificada basada exclusivamente en las resistencias nominales de los materiales f'_c y f_y .

La estrategia utilizada demostró la capacidad para predecir la respuesta no lineal de elementos de concreto reforzado sin recurrir a procedimientos de calibración específicos para cada espécimen. La derivación de parámetros constitutivos mediante formulaciones simplificadas resultó suficiente para capturar los mecanismos de daño. Este enfoque se presenta como una alternativa a los modelos tradicionales de fibras o plasticidad concentrada, permitiendo que el efecto del confinamiento se desarrolle como resultado del modelo sin necesidad de hipótesis predefinidas.

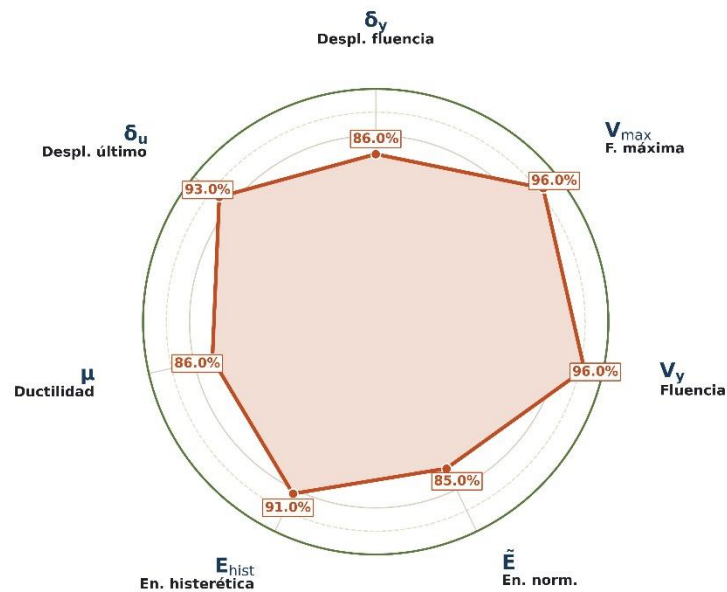


Figura 2. Índices de ajuste por parámetro de respuesta para los seis especímenes.

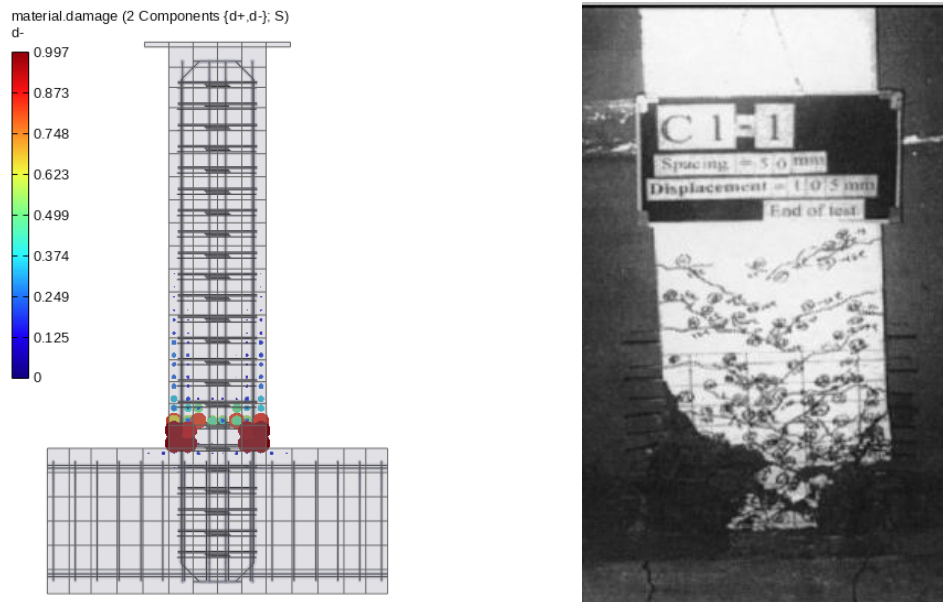


Figura 3. Distribución del daño por compresión numérico y falla experimental en el espécimen C1-1

La validación frente a seis especímenes experimentales, bajo distintos niveles de carga axial, arrojó índices de ajuste promedio de 90% en variables críticas. Este resultado respalda la capacidad del modelo, integrado con la regularización por energía de fractura, para reproducir el comportamiento cíclico de las columnas de concreto reforzado estudiadas. Su generalización a un rango más amplio requiere validación frente a un mayor número de casos.



A nivel local, el modelo identificó correctamente la evolución del daño y la ubicación de la falla. La correspondencia espacial entre los contornos de daño por compresión y la formación de la rótula plástica en la base de las columnas coincide con la trituración del núcleo y el desprendimiento del recubrimiento observados en los ensayos físicos.

Finalmente, si bien la hipótesis de adherencia perfecta proporcionó resultados satisfactorios para las relaciones de aspecto evaluadas, se reconoce que la incorporación de leyes de contacto acero-concreto (bond-slip) podría refinar las trayectorias de descarga en especímenes con altas densidades de refuerzo o degradación severa por adherencia [35]. Futuras líneas de investigación deberían orientarse hacia la extensión de esta parametrización mínima en componentes estructurales complejos, como nudos viga-columna.

6. Agradecimientos

El presente trabajo se desarrolló gracias al apoyo brindado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) durante el transcurso de los estudios de posgrado del primer autor. Asimismo, los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Universidad del Azuay por el apoyo institucional brindado en el marco del proyecto de investigación UDA 2026-0037.

7. Reconocimiento de Autoría

Esteban Mateo Narváez Vásquez: Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Borrador original. *Edén Bojórquez Mora*: Conceptualización; Ideas; Metodología; Revisión; Edición; Administración de proyecto; Supervisión. *Pablo David Quinde Martínez*: Conceptualización; Ideas; Metodología; Revisión; Supervisión.

Referencias

- [1] T. B. Panagiotakos y M. N. Fardis, “A displacement-based seismic design procedure for RC buildings and comparison with EC8”, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 30, núm. 10, pp. 1439–1462, 2001, doi: 10.1002/eqe.71.
- [2] J. Coleman y E. Spacone, “Localization Issues in Force-Based Frame Elements”, *J. Struct. Eng.*, vol. 127, núm. 11, p. 1257, 2001, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:11(1257).
- [3] L. Pelà, M. Cervera, y P. Roca, “Continuum damage model for orthotropic materials: Application to masonry”, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 200, núm. 9–12, pp. 917–930, feb. 2011, doi: 10.1016/j.cma.2010.11.010.
- [4] F. Di Trapani, M. Di Benedetto, M. Petracca, y G. Camata, “Infill-frame interaction: Refined modelling for the analysis and the estimation of the internal forces in seismic assesment of RC building structures”, en *COMPDYN Proceedings*, National Technical University of Athens, 2023. doi: 10.7712/120123.10607.21394.



- [5] H. García, J. Jiménez-Pacheco, y J. Ulloa, “Effective properties of masonry structures and macro-model analysis with experimental verification”, *Results in Engineering*, vol. 23, sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102546.
- [6] S. Villar, M. Di Benedetto, A. P. Sberna, M. Petracca, G. Camata, y F. Di Trapani, “Seismic Response of Masonry Aggregate Buildings by Explicit Modelling Different Interconnection Degrees”, en *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2025, pp. 183–192. doi: 10.1007/978-3-031-90690-9_16.
- [7] B. Alfarah, F. López-Almansa, y S. Oller, “New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures”, *Eng. Struct.*, vol. 132, pp. 70–86, feb. 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.11.022.
- [8] G. Fawaz y J. Murcia-Delso, “Three-dimensional finite element modeling of RC columns subjected to cyclic lateral loading”, *Eng. Struct.*, vol. 239, jul. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112291.
- [9] L. Jason, M. Choinska, G. Pijaudier-Cabot, S. Ghavamian, y A. Huerta, “Validation of a Damage Plasticity Model for Concrete in Tension and in Compression”, en *VIII International Conference on Computational Plasticity*, 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.cea.fr>
- [10] L. Benedetti, M. Cervera, y M. Chiumenti, “3D numerical modelling of twisting cracks under bending and torsion of skew notched beams”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 176, pp. 235–256, may 2017, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.03.025.
- [11] F. McKenna, G. Fenves, y M. Scott, “Open System for Earthquake Engineering Simulation”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 2000.
- [12] M. Berry, M. Parrish, y M. Eberhard, “PEER Structural Performance Database User’s Manual (Version 1.0)”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 2004.
- [13] J. Ruiz Carmona, “Study of cracking processes in reinforced concrete elements”, Tesis doctoral, 2006.
- [14] H. D. Kang, K. Willam, B. Shing, y E. Spacone, “Failure analysis of R/C columns using a triaxial concrete model”, *Comput. Struct.*, vol. 77, núm. 5, pp. 423–440, 2000, doi: 10.1016/S0045-7949(00)00006-7.
- [15] G. Markou y M. Papadrakakis, “Computationally efficient 3D finite element modeling of RC structures”, *Computers and Concrete*, vol. 12, núm. 4, pp. 443–498, oct. 2013, doi: 10.12989/cac.2013.12.4.443.
- [16] M. Moharrami y I. Koutromanos, “Finite element analysis of damage and failure of reinforced concrete members under earthquake loading”, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 46, núm. 15, pp. 2811–2829, dic. 2017, doi: 10.1002/eqe.2932.
- [17] T. Shamsi y Y. Sümer, “A Finite Element Modeling Approach for Analyzing the Cyclic Behavior of RC Frames”, *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 49, núm. 10, pp. 13749–13768, oct. 2024, doi: 10.1007/s13369-024-08788-y.
- [18] M. Petracca, G. Camata, E. Spacone, y L. Pelà, “Efficient Constitutive Model for Continuous Micro-Modeling of Masonry Structures”, *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 17, núm. 1, pp. 134–146, 2022, doi: 10.1080/15583058.2022.2124133.
- [19] R. K. Abu Al-Rub y S. M. Kim, “Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 77, núm. 10, pp. 1577–1603, jul. 2010, doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.04.007.



- [20] U. Häussler-Combe y J. Hartig, “Formulation and numerical implementation of a constitutive law for concrete with strain-based damage and plasticity”, *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 43, núm. 5, pp. 399–415, jun. 2008, doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2008.01.005.
- [21] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, y R. Park, “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, *J. Struct. Eng.*, vol. 114, núm. 8, p. 1804, 1988, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [22] E. Hognestad, “A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members”, 1951.
- [23] American Concrete Institute (ACI), *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19)*. 2019.
- [24] CEB-FIB, *The fib Model Code for Concrete Structures*. International Federation for Structural Concrete, 2010.
- [25] P. Feenstra y R. De Borst, “A composite plasticity model for concrete”, *Int. J. Solids Struct.*, 1996, doi: 10.1016/0020-7683(95)00060-N.
- [26] A. Hillerborg, M. Modéer, y P.-E. Petersson, “Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 6, núm. 6, pp. 773–782, 1976, doi: 10.1016/0008-8846(76)90007-7.
- [27] J. Oliver, “A Consistent Characteristic Length for Smeared Cracking Models”, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 28, pp. 461–474, 1989, doi: 10.1002/nme.1620280214.
- [28] R. P. Dhakal y K. Maekawa, “Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement”, *J. Struct. Eng.*, vol. 128, núm. 9, pp. 1139–1147, sep. 2002, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:9(1139).
- [29] F. C. Filippou, E. P. Popov, y V. V. Bertero, “Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints”, Report EERC 83-19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
- [30] M. M. Kashani, L. N. Lowes, A. J. Crewe, y N. A. Alexander, “Nonlinear fibre element modelling of RC bridge piers considering inelastic buckling of reinforcement”, *Eng. Struct.*, vol. 116, pp. 163–177, jun. 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.02.051.
- [31] M. Petracca, L. Pelà, R. Rossi, S. Zaghi, G. Camata, y E. Spacone, “Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 296–314, sep. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.130.
- [32] Applied Technology Council, *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*, ATC-24. Redwood City, CA, 1992.
- [33] Y. L. Mo y S. J. Wang, “Seismic behavior of RC columns with various tie configurations”, *J. Struct. Eng.*, vol. 126, núm. 10, p. 1122, 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1122).
- [34] M. Saatcioglu y G. Ozcebe, “Response of Reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading”, *ACI Struct. J.*, vol. 86, núm. 1, pp. 3–12, 1989, doi: 10.14359/2607.
- [35] J. Zhao y S. Sritharan, “Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures”, *ACI Struct. J.*, vol. 104, núm. 2, pp. 133–141, 2007, doi: 10.14359/18525.



Derechos de Autor (c) 2026 Esteban Mateo Narváez Vásquez, Edén Bojórquez Mora, Pablo David Quinde Martínez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)