

## MODELADO Y ANÁLISIS DE UN MARCO DE CONCRETO REFORZADO BAJO CARGAS DE SERVICIO

MODELING AND ANALYSIS OF A REINFORCED CONCRETE FRAME UNDER SERVICE LOADS.

*Gelacio Juárez Luna,  
Docente-investigador, Departamento de Materiales- Universidad Autónoma Metropolitana.*

*Email: gjl@azc.uam.mx*

*Eber Alberto Godínez Domínguez*

*Docente-investigador, Facultad de Ingeniería- Universidad Autónoma de Chiapas.*

*Email: eber.godinez@unach.mx*

*Dayann Emilio Silva Lechuga*

*Graduado de Maestría, Maestría en Ingeniería Estructural,  
Departamento de Materiales- Universidad Autónoma Metropolitana.*

*Email: dayann.emilio@gmail.com*

### RESUMEN

*Se estudia un marco de concreto reforzado bajo cargas de servicio en el Intervalo no-lineal. El concreto se malló con elementos finitos hexaedros de ocho nodos. Por otra parte, el acero de refuerzo se malló con elementos unidimensionales con dos nodos, considerando acoplamiento perfecto entre el acero de refuerzo y el concreto. Se concluye que el modelado numérico es una herramienta útil para el diseño y reforzamiento de elementos y sistemas estructurales.*

**Palabras clave:** Elementos finitos, concreto reforzado, modelado numérico, daño.

### ABSTRACT

A reinforced concrete frame under service loads is studied in the non-linear range. The concrete is meshing using hexahedra finite elements with eight nodes. Whereas, steel reinforcement is meshing using unidimensional elements with two nodes, in which perfect bond between concrete and steel was assumed. It is concluded that numerical modeling is a suitable tool for the design and strengthening of structural elements and systems.

**Keywords:** Finite elements, reinforced concrete, numerical modeling, damage.

### INTRODUCCIÓN

La mecánica computacional es de utilidad para modelar estructuras desde su comportamiento lineal hasta el intervalo no-lineal, y en su caso el colapso. El modelado numérico proporciona las zonas donde iniciará el agrietamiento o plastificación de los materiales. Además, permite conocer la evolución del daño, el cual puede ocurrir como agrietamiento, líneas de deslizamiento o fracturas, dependiendo del tipo de material.

En este artículo se utiliza el programa de elementos finitos Midas Fea (MidaSoft), licencia académica para la Universidad Autónoma Metropolitana, para la solución numérica de un marco de concreto reforzado de dos niveles, que resulta de interés dentro del campo de la ingeniería civil. En todos los casos se utilizan elementos finitos sólidos hexaédricos de ocho nodos para mallar el concreto y elementos tipo barras para mallar el acero de refuerzo. Los elementos tipo barra se colocaron a lo largo de los bordes de los elementos sólidos, conectándose en sus nodos extremos. Se utilizó una superficie de daño con diferentes umbrales en tensión y en compresión para representar el comportamiento constitutivo del concreto, mientras que el endurecimiento del acero de refuerzo se idealiza con un modelo de plasticidad unidimensional de Von Mises.

### METODOLOGÍA

#### Mallado

Primeramente, la geometría del concreto y del acero de

refuerzo del marco se realizó en el programa AutoCAD. Posteriormente, el modelo se importó en el programa de elementos finitos MidasFEA (MidaSoft, 2019). El concreto se malló con elementos finitos sólidos tipo hexaedro de ocho nodos, como se muestra en la Figura 1a. Este elemento modela de manera distribuida el agrietamiento en tensión y aplastamiento en compresión. Por otra parte, el acero de refuerzo longitudinal y transversal se malló con elementos finitos tipo barra, el cual es unidimensional, como se muestra en la Figura 1b. A este elemento unidimensional se le asignó el modelo de plasticidad de Von Mises. Ambos elementos finitos tienen tres grados de libertad traslacional por nodo, así como la capacidad de representar deformaciones grandes.

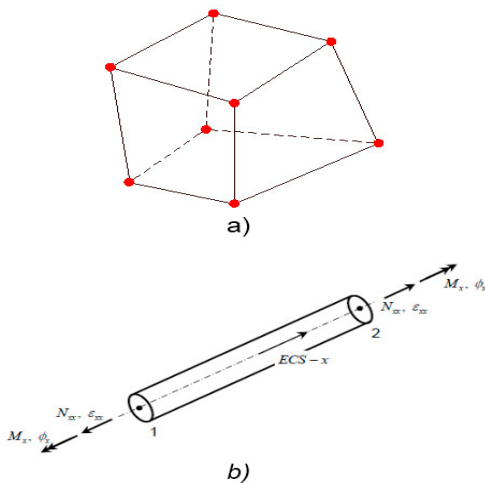


Figura 1. Elementos finitos: a) hexaedro y b) unidimensional (adaptado de MidasFEA, 2021)

### Modelos constitutivos

Para modelar el comportamiento del concreto se utilizó un modelo de agrietamiento distribuido, el cual fue introducido por Rashid (1968), en el que el daño se distribuye en el dominio de los elementos finitos. En el comportamiento del concreto se considera el ablandamiento por deformación después de alcanzar el esfuerzo último; el cual se idealizó con una función lineal, como se muestra en la Figura 2. Para modelar el acero de refuerzo se utilizó un modelo de plasticidad con superficie de fluencia de Von Mises, en el cual se asume el mismo umbral en tensión y compresión. El endurecimiento se idealizó como una función bilineal, como se muestra en la Figura 3.

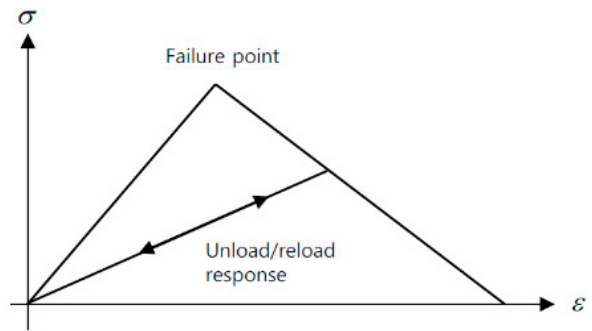


Figura 2. Modelo constitutivo del concreto con ablandamiento por deformación (tomado de MidasFEA, 2021)

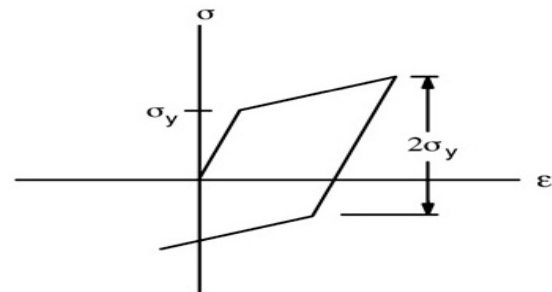


Figura 3. Modelo constitutivo del acero con endurecimiento (tomado de MidasFEA, 2021)

### MODELADO DE MARCO DE CONCRETO

Se modeló un marco de concreto reforzado, ensayado experimentalmente por Chan et al. (2000), el cual fue sometido a ensayos de carga lateral incremental. El marco tiene una altura de 364.2 cm, incluida la altura del pasador de acero que forma parte de la base rígida, y una longitud de 338 cm de claro (Figura 4a), el marco es sometido a carga axial de 200 kN en cada columna y a una carga lateral de 200 kN (Figura 4b). Las columnas del marco tienen una sección transversal de 25x37.5 cm, reforzadas con tres barras longitudinales del número 6 ( $\phi=3/4''=19\text{mm}$ ) en el lecho superior e inferior, así como dos barras longitudinales del número 6 colocadas en el centro de la columna y estribos del número 3 ( $\phi=3/8''=9.5\text{mm}$ ) espaciado a cada 15 cm. Las vigas tienen una sección transversal de 25x35 cm, reforzadas con tres barras longitudinales del número 6 ( $\phi=3/4''=19\text{mm}$ ) en lecho superior e inferior, con una distribución de estribos igual al empleado en las columnas, como se muestra en la Figura 4c.

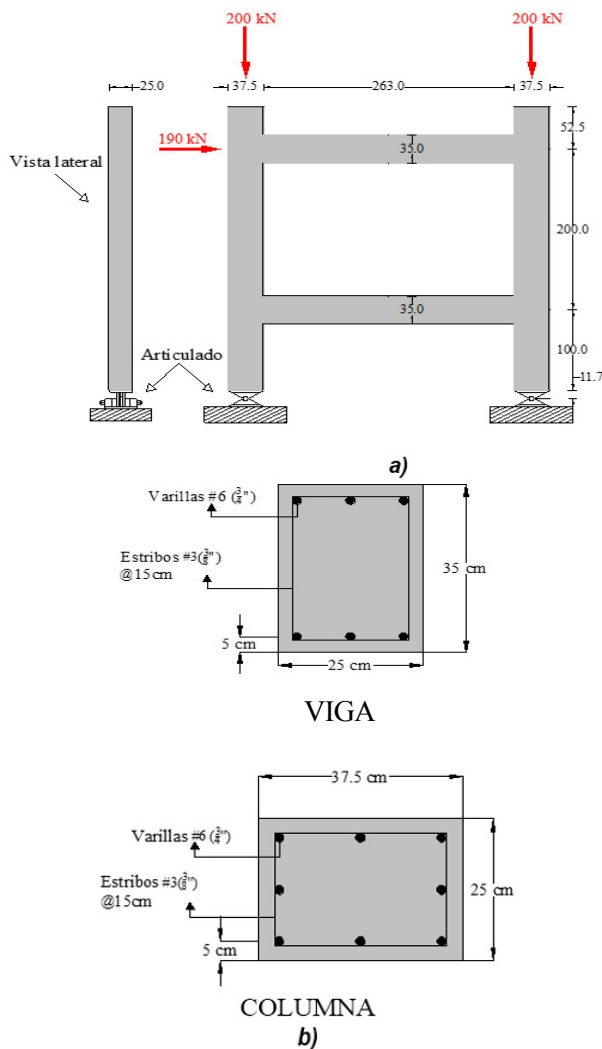
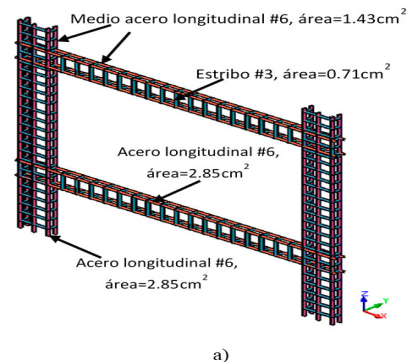


Figura 4. Marco: a) geometría, condición de apoyos y cargas y b) armados de las secciones transversales.

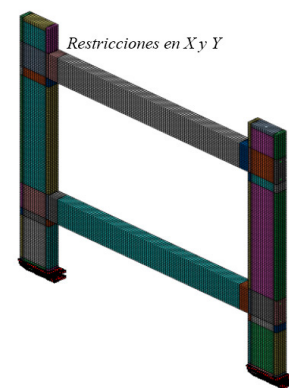
Las propiedades mecánicas del concreto consideradas en el marco son: módulo de elasticidad  $E_c=160,095.45$  kgf/cm<sup>2</sup>, relación de Poisson  $\nu=0.2$ , esfuerzo máximo a tensión  $\sigma_{ut}=27.45$  kgf/cm<sup>2</sup>, esfuerzo máximo a compresión  $\sigma_{uc}=274.55$  kgf/cm<sup>2</sup>. Asimismo, para el acero de refuerzo:  $E_a=2,039,432.40$  kgf/cm<sup>2</sup>, esfuerzo de fluencia  $f_y=3,263.09$  kgf/cm<sup>2</sup>, relación de Poisson  $\nu_a=0.3$ , esfuerzo máximo a compresión  $\sigma_{uc}=5,302.50$  kgf/cm<sup>2</sup>, módulo de endurecimiento por deformación  $H=29,277.00$  kgf/cm<sup>2</sup> y la deformación a la que inicia el endurecimiento por deformación es de 2.20%.

En la Figura 5 se muestra el acero de refuerzo del marco realizado en el programa AutoCAD, condiciones de apoyo, acoplamiento entre el concreto y el acero y el mallado tridimensional (3D) formado de elementos

hexaedros de ocho nodos con ocho puntos de integración de Gauss con el programa midas FEA. Como se comentó, el acero de refuerzo se modeló con elementos tipo barra (elementos unidimensionales con comportamiento del material bilineal) y se supone adherencia perfecta entre el concreto y el acero. Las vigas se mallaron con 14 divisiones en su peralte y las columnas con 16 divisiones; el tamaño aproximado de los elementos es de 2.5 cm, tratando de mantener la relación de aspecto de 1. Con estas divisiones de los peraltes, respectivamente, se garantiza una solución suficiente aproximada, pues Godínez-Domínguez et al. (2015) utilizaron 14 divisiones para mallar el peralte de vigas, obteniendo resultados suficientemente aproximados con los experimentales. Por simetría del marco en geometría, cargas y en condiciones de apoyo, se modeló únicamente la mitad del marco para reducir el tiempo computacional. En el plano medio cortado por el eje de simetría se restringieron los grados de libertad perpendiculares al plano, pues el desplazamiento en esta dirección se asume que es cero. Los otros dos grados de libertad se asignaron libres.



a)



b)

Figura 5. Modelado de  $\frac{1}{2}$  del marco: a) acero de refuerzo, b) mallado con acoplamiento entre el concreto y acero en midas FEA.

Para la obtención de la respuesta estructural, se inducen fuerzas aplicadas gradualmente (Figura 4a) en las columnas y lateralmente en el marco. En la Figura 6 se muestran las curvas de la carga contra el desplazamiento lateral en el primer y segundo nivel del marco, obtenidos con el programa midas FEA y los reportados por Chan et al. (2000). En general, los resultados numéricos son congruentes con los resultados experimentales; las pequeñas diferencias en la respuesta se deben a que no se modeló la pérdida de adherencia entre el concreto y el acero cuando la carga lateral excede la fluencia; sin embargo, se logra reproducir con buena precisión el comportamiento del marco. Es importante mencionar que la convergencia de los análisis numéricos de elementos de concreto reforzado es compleja debido al comportamiento constitutivo de los materiales, pues el concreto presenta una pendiente negativa y el acero una pendiente positiva en el intervalo no-lineal.

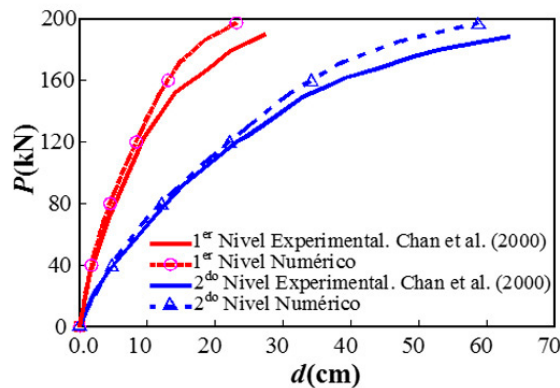


Figura 6. Curvas de la carga contra el desplazamiento.

En la Figura 7a se muestran los desplazamientos horizontales en el eje longitudinal del marco, donde se observa que el desplazamiento mayor ocurre en la parte superior, como se esperaba, debido a las cargas laterales impuestas en la parte superior. En la Figura 7b se observa la ocurrencia del agrietamiento; en color azul intenso se tienen las zonas donde inició el agrietamiento, donde se desarrollan por completo las grietas, tal que ya no transmiten carga; en color rojo intenso se observan las grietas que ocurren al final y en el resto de los colores se muestran las grietas parcialmente abiertas. En la Figura 7c se muestran los esfuerzos desarrollados en el acero de refuerzo, cuyas zonas más esforzadas ocurren en las esquinas, donde alcanzan el esfuerzo de fluencia, en color azul intenso la fluencia se alcanza en compresión y en color rojo la fluencia ocurre en tensión.

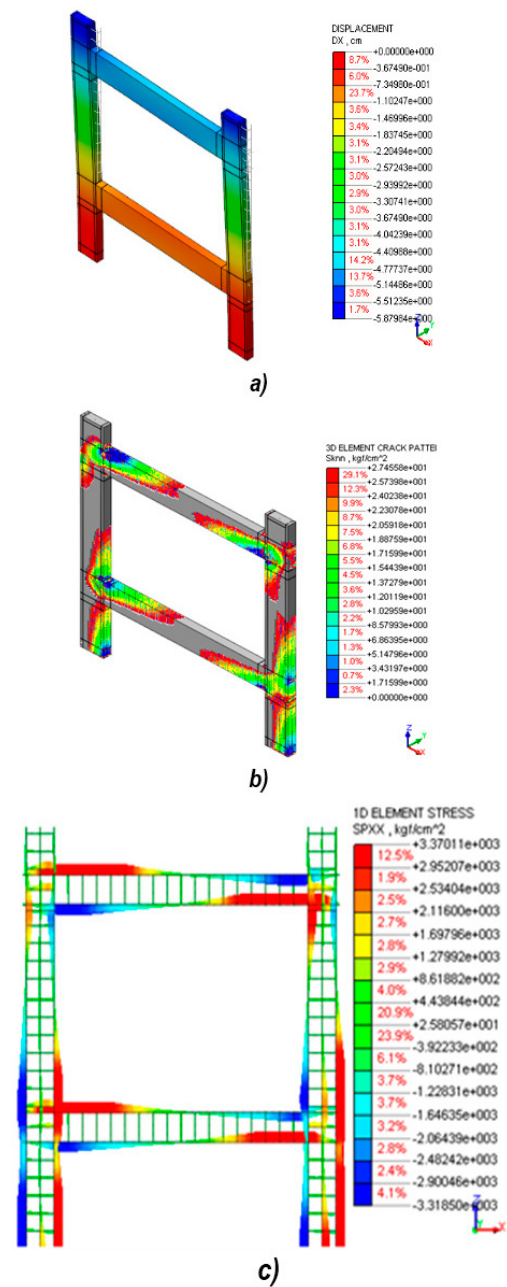


Figura 7. a) desplazamientos horizontales, b) trayectorias de agrietamiento y c) esfuerzos desarrollados en el acero de refuerzo.

## CONCLUSIONES

En este artículo, el concreto se modeló con elementos finitos tridimensionales de ocho nodos y el acero de refuerzo con elementos unidimensionales con dos nodos, considerando acoplamiento perfecto entre el acero de refuerzo y el concreto.

En el marco estudiado, las curvas carga-desplazamiento obtenidas numéricamente son congruentes con los resultados experimentales reportados por Chan et al. (2000), lo cual valida el uso de estos elementos finitos y modelos constitutivos para el estudio de elementos y estructuras de concreto reforzado. Se observó, además, que el considerar los ejes de simetría para modelar sólo una parte de la estructura reduce el tiempo de cómputo, el cual puede ser significativo en modelos que tiene un mayor número de ecuaciones por resolver.

Con el modelado numérico en el programa MidaSoft (2019) se obtuvieron las zonas más esforzadas de los elementos, donde inicia y se propagan los agrietamientos en el concreto y la plastificación en el acero de refuerzo. Esta información es útil para el diseño y reforzamiento de elementos estructurales. El modelado numérico en el intervalo no-lineal es una herramienta valiosa para predecir y complementar los resultados experimentales.

#### AGRADECIMIENTOS

El tercer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca para realizar los estudios de Maestría. El segundo autor agradece al CONACYT por el financiamiento para el desarrollo del proyecto de Ciencia Básica 258271. Se agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco y a la Universidad Autónoma de Chiapas por las facilidades para realizar este estudio. Además, se agradece a MidasSoft por la licencia académica del programa MidasFEA en la que se realizaron los análisis.

#### REFERENCIAS

- Chan, C.M.; Ning, F.; Mickleborough, N.C. (2000), "Lateral stiffness characteristics of tall reinforced concrete buildings under service loads", *The Structural Design of Tall Building*, Vol. 9, pp. 365-383.
- Godínez-Domínguez, E.A.; Tena-Colunga, A.; Juárez-Luna, G. (2015), "Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete haunched beams designed to develop a shear failure", *Engineering Structures*, Vol. 105, pp. 99-122.
- Rashid, Y.R. (1968), "Analysis of prestressed concrete pressure vessels", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 7(4), pp. 334-344.
- MidaSoft (2019). Midas FEA Advanced Nonlinear and Detail Analysis System. MidaSoft Inc, New York, N.Y.
- MidaSoft (2021). Analysis Reference. Advanced nonlinear and detail analysis system. M. MidaSoft Inc, New York, N.Y.