

Desarrollo de una aplicación libre para el aprendizaje del diseño de muros de concreto reforzado sometidos a flexocompresión en el plano

Free application for learning of the reinforced concrete walls design subject to in-plane bending and axial load

—

Sulpicio Sánchez Tizapa¹ • sstizapa@uagro.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6777-6984>

Víctor Manuel Godínez Baltazar² • VGodinezB@iingen.unam.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1908-350X>

Gerardo Altamirano de la Cruz³ • gerardo.altamiranodlcz@uanl.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1180-5210>

René Vázquez Jiménez¹ • rvazquez@uagro.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1693-8303>

Alfredo Cuevas Sandoval⁴ • acuevass@uagrovirtual.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5829-7546>

1 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO, GUERRERO. MÉXICO

2 INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

3 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL – INSTITUTO DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, NUEVO LEÓN, MÉXICO

4 FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO. GUERRERO, MÉXICO

Para citar este artículo:

Sánchez Tizapa, S., Godínez Baltazar, V. M., Altamirano de la Cruz, G., Vázquez Jiménez, R., & Cuevas Sandoval, A. (2021). Desarrollo de una aplicación libre para el aprendizaje del diseño de muros de concreto reforzado sometidos a flexocompresión en el plano. *Espacio I+D: Innovación más Desarrollo*, 10(28). <https://doi.org/10.31644/IMASD.28.2021.a06>

RESUMEN

Este documento presenta una herramienta de libre acceso para apoyar en el proceso aprendizaje-enseñanza del diseño de muros de concreto reforzado sometidos a flexocompresión en su plano. Estos elementos son usados en México en la construcción de viviendas y edificios escolares entre otros. Por esta razón, su diseño estructural es un tópico importante en el aprendizaje de los estudiantes del área de Ingeniería Civil. El algoritmo fue implementado en una hoja de cálculo, que muestra las operaciones y toma de decisiones requeridas en la evaluación de la curva resistente momento-carga axial (M_R-P_R), además, para un par de elementos mecánicos de diseño (M_U, P_U) se calculó la relación acción/resistencia. En el desarrollo se utilizaron conocimientos básicos de aritmética, geometría analítica, álgebra matricial y programación, utilizando las especificaciones de las normas técnicas complementarias de concreto vigentes en la ciudad de México. El vector de datos puede modificarse de acuerdo con la preferencia del usuario. Las curvas nominales y resistentes fueron calculadas de forma simplificada con siete puntos M_R-P_R , en el mismo orden, la aproximación fue 98% y 87%, respecto a los resultados de una aplicación comercial. El valor más bajo de la aproximación es función de la cantidad de puntos utilizados en el cálculo. La herramienta es una introducción al pensamiento abstracto requerido en la automatización de procesos de cálculo y guía a los usuarios en el desarrollo de aplicaciones propias fortaleciendo el desarrollo de competencias específicas.

Palabras Clave:

Concreto reforzado; diseño; flexocompresión; aplicación libre; código abierto.

— Abstract—

The paper shows a support free tool for the learning-teaching process of reinforced concrete wall design in the Civil Engineering field. These structural elements are used in Mexico for buildings and dwelling houses construction. Then, their structural design is an important topic for the students. The algorithm was implemented in a spreadsheet, which shows the operations and decision making required to compute the bending-axial load strength curve (M_R-P_R). In addition, for a pair of mechanical design elements (M_U, P_U), it calculates the action/resistance ratio. Basic knowledge of arithmetic, analytical geometry, matrix algebra, and the Mexican standard were applied in the development. According to the user's preference, the data vector can be modified. Although a simplified envelope strength curve formed by seven points (M_R-P_R) was obtained, its accuracy is adequate compared to a commercial application result, 98% and 87%, for the nominal and strength curve, respectively. The application shows to the students an introduction to the abstract thinking required in the automation of calculation processes and it can guide them in the implementation of their own applications for strengthening of specific competences.

Keywords:

Reinforcing concrete; design; bending and axial load; free software; open source.

Los procesos formativos en las Instituciones de Educación Superior están centrados en el aprendizaje del conocimiento interdisciplinario y orientados hacia su aplicación para garantizar la formación profesional del estudiante. En este orden, la situación actual requiere la construcción de nuevos ambientes de aprendizaje con métodos y técnicas didáctico-pedagógicas, que permitan el desarrollo de competencias genéricas y específicas del egresado, destacando: capacidad de abstracción, análisis y síntesis; aplicación de conocimientos de las ciencias básicas y de la ingeniería. También se requiere la identificación, evaluación e implementación de tecnologías apropiadas al contexto; concepción, análisis y diseño de obras de Ingeniería Civil. En el caso específico del estado de Guerrero, el egresado debe contribuir en la solución de la problemática regional generada por la alta sismicidad mediante la concepción, análisis, diseño, construcción y supervisión de estructuras confiables (UAGRO, 2011).

Una vía para lograr lo anterior es utilizar aplicaciones informáticas de código abierto y sin costo en el proceso aprendizaje-enseñanza. Entre las ventajas están (Culebro, *et al.*, 2006; Díaz, *et al.*, 2005; Free Software Foundation, 2020):

1. No son cajas negras porque muestran el código
2. Desarrollan los cálculos de forma rápida y repetitiva
3. Sirven como guía para que los estudiantes desarrollen sus propias herramientas
4. Ayudan en el desarrollo de competencias
5. Utilizan la normatividad local
6. Evitan la violación de derechos de autor
7. Fomentan al desarrollo tecnológico del país

En el área de la Ingeniería Civil, el procedimiento análisis-diseño tiene diferentes niveles de complejidad, donde la herramienta cambia en función del objetivo. Dicha actividad incluye realizar operaciones aritméticas y tomar decisiones que pueden ser repetitivas. La tabla 1 muestra una clasificación de las aplicaciones informáticas utilizadas y sus principales características, la complejidad aumenta de izquierda a derecha. En este trabajo, se utilizó una hoja de cálculo en Excel (Microsoft 2020) cuyo desarrollo no requiere conocimientos avanzados de programación.

Tabla 1*Clasificación de aplicaciones para diseño o revisión de estructuras*

Nivel 1. Baja complejidad	Nivel 2. Mediana complejidad (ESI Group, 2020; MatWorks, 2020; PTC, 2020)	Nivel 3. Alta complejidad (Corona, 2020; Computer and Structures, 2018)
<p>Cálculo manual Herramienta: calculadora.</p> <p>Ventajas: Se aplican los procesos de cálculo definidos por las normas técnicas.</p> <p>Desventajas: Se estudian estructuras simples por la cantidad de cálculos.</p>	<p>Cálculo semi manual o automatizado Herramienta: hoja electrónica de cálculo, Scilab, Matlab, Mathcad. Ventajas: Visualización de cálculos, aplicaciones expofeso, uso de normas nacionales, código abierto. Desventajas: En el caso de Scilab, Octave, Matlab y Mathcad es necesario conocimientos básicos de programación. Las dos últimas son software propietario, es decir tienen costo.</p>	<p>Cálculo automatizado Herramientas de uso comercial.</p> <p>Ventajas: Especialización y rapidez.</p> <p>Desventajas: Cajas negras, pago de derechos de autor, uso de normas internacionales, código cerrado.</p>

Fuente: Elaboración propia

II. OBJETIVO

El uso de muros de concreto reforzado en la construcción de edificios y viviendas combinado con el alto riesgo sísmico en amplias zonas del territorio nacional (Alcocer, *et al*, 2020; Carrillo & Alcocer, 2011) exige especial cuidado en el diseño de estos elementos estructurales cuando son sometidos a flexocompresión en su plano. Por tal razón se desarrolló una herramienta de código abierto que ayude en el proceso aprendizaje-enseñanza en las escuelas de Ingeniería Civil. Debido a sus características se muestran los cálculos, toma de decisiones y repetición de procesos, además puede ser mejorada por los usuarios (docentes, estudiantes o profesionistas).

III. METODOLOGÍA

Antecedentes

El concreto reforzado es el material más utilizado a nivel mundial en la industria de la construcción (McCormac & Brown, 2014). En el caso de los muros de concreto reforzado están sometidos a tres tipos de solicitaciones mecánicas: cortante (V_u), momento flexionante en su plano (M_u) y fuerza axial (P_u), la combinación de los dos últimos se denomina flexocompresión, Figura 1. Dichos elementos se originan por la combinación de fuerzas laterales y gravitacionales.

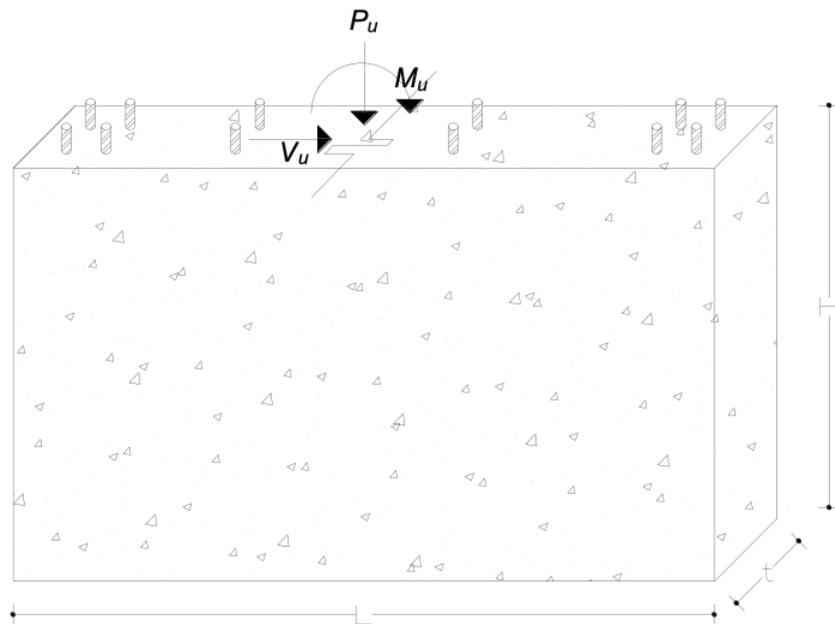


Figura 1. Elementos mecánicos actuantes en un muro de concreto reforzado. Fuente: Elaboración propia

El diseño de estructuras de concreto aquí presentado se basa en las NTCC-2017. La Figura 2 muestra el diagrama de flujo usado, dividido en cuatro pasos, utilizado en el desarrollo de la hoja de cálculo. En el primero, se introduce el vector de entrada: geometría del muro, características mecánicas del concreto, ubicación, distribución y área del acero. En el segundo paso se obtiene la curva resistente de interacción, momento resistente (M_R) contra carga resistente (P_R). En el tercer paso se calcula el momento y carga resistente para la excentricidad de diseño (M_U/P_U). Finalmente, se evalúa si el elemento de concreto reforzado resiste la combinación de carga última (P_U) y momento último (M_U).

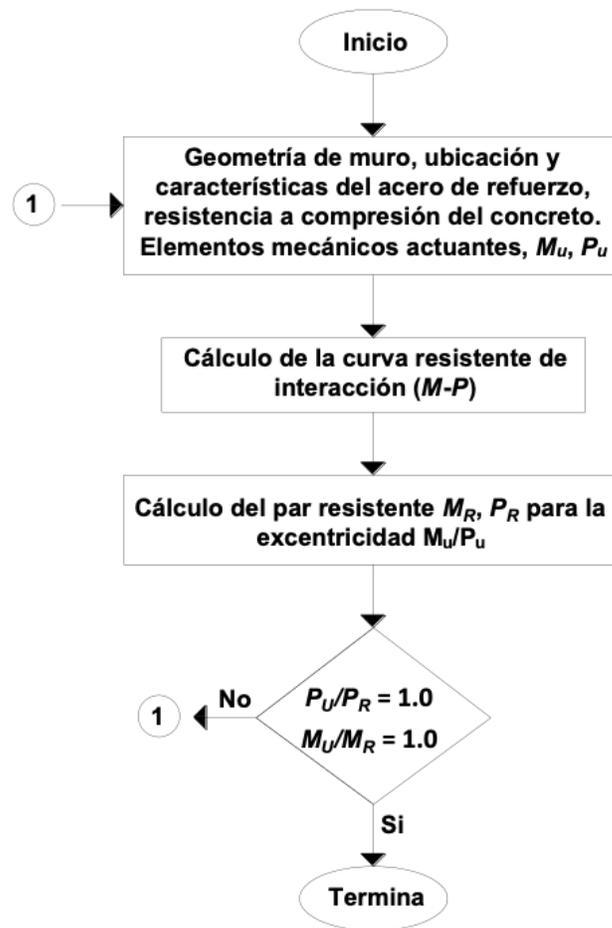


Figura 2. Diagrama de flujo utilizado en el desarrollo de la aplicación. Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la curva resistente de interacción

Con fines didácticos, se supone que el elemento de concreto tiene solo cuatro capas de acero, dos en cada extremo, las cuales están sometidas a tensión o compresión. La sección experimenta las deformaciones y esfuerzos mostrados en la Figura 3, incisos b y c. Para calcular la carga y el momento se necesitan los valores extremos de las deformaciones del concreto y del acero. La deformación máxima del concreto (ϵ_c) es 0.003 y en el caso del acero se proponen valores desde 0.003 en compresión hasta 0.010 en tensión, (ϵ_{s4}). El momento flexionante provoca tensión en la parte inferior y compresión en la superior. Las variables de la Figura 3 se definen en la Tabla 2.

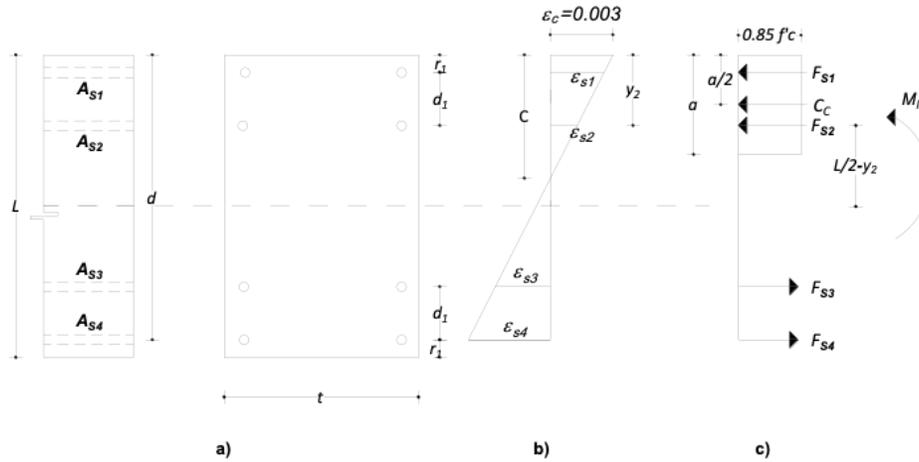


Figura 3. a) Geometría de la sección, b) Diagrama de deformaciones, c) Diagrama de esfuerzos

La profundidad del eje neutro (c) y la deformación de la capa de acero i (ϵ_{si}) son función de las deformaciones extremas del concreto y acero y se obtienen con las ecuaciones 1 y 2. De acuerdo con la ley de Hooke, el esfuerzo actuante es proporcional a la deformación sin exceder el esfuerzo de fluencia, f_y , ecuación 3. La fuerza actuante de la capa i se obtiene al multiplicar el área de la barra por el esfuerzo actuante, ecuación 4. Finalmente, el momento generado por la capa de acero i es la multiplicación de la fuerza por el brazo de palanca respecto al eje plástico de la sección, ecuación 5.

Tabla 2
Definición de variables de la Figura 3

Variable	Descripción	Variable	Descripción
L	Longitud del muro	ϵ_{si}	Deformación del acero en la capa i
t	Espesor del muro	y_i	Distancia de la capa de acero i a partir del paño superior
A_{si}	Área de acero de la capa i	d	Peralte efectivo del muro
r_1	Distancia vertical extrema del paño al centroide de la barra de acero	c	Profundidad del eje neutro
d_1	Distancia vertical entre las capas de acero 1-2 y 3-4	a	Altura del bloque idealizado de esfuerzos a compresión
f'_c	Resistencia a compresión del concreto menor o igual que 28 MPa	F_{si}	Fuerza en la capa de acero i
C_c	Fuerza de compresión en el bloque a compresión del concreto	M_N	Momento nominal de la sección
ϵ_c	Deformación del concreto igual a 0.003		

Fuente: Elaboración propia

$$c = d \varepsilon_c / (\varepsilon_c + \varepsilon_{s4}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_c (c - y_i) / c \quad (2)$$

$$f_{si} = \varepsilon_{si} f_y / 0.002 \quad (3)$$

$$F_{si} = A_{si} f_{si} \quad (4)$$

$$M_{si} = F_{si} (L/2 - y_i) \quad (5)$$

Debido a su posición, el acero ubicado en los extremos del muro aporta la mayor cantidad de momento resistente, por tal razón no se considera el acero de capas intermedias, el cual se calcula para absorber los efectos de temperatura.

Como se observa en la Figura 3c, el máximo esfuerzo del concreto es $0.85 f'_c$, entonces es posible evaluar el volumen del bloque de esfuerzos con la ecuación 6, donde $a = 0.85 c$ cuando la resistencia a compresión es menor o igual que 28 MPa, el momento se obtiene mediante la ecuación 7. La carga (P_N) y momento nominal (M_N) asociados a $\varepsilon_c = 0.003$ y un valor específico de ε_{s4} son la suma de las fuerzas y momentos del acero y concreto, respectivamente, ecuaciones 8 y 9.

$$C_c = 0.85 f'_c a t \quad (6)$$

$$M_c = C_c (L - a/2) \quad (7)$$

$$P_N = \sum_{i=1}^{i=4} F_{si} + C_c \quad (8)$$

$$M_N = \sum_{i=1}^{i=4} M_{si} + M_c \quad (9)$$

El par M_N y P_N define un punto de la curva de interacción nominal momento-carga, Figura 4. En este caso, para fines didácticos, se calcularon solo cinco puntos intermedios (puntos P_2 , P_3 , P_4 , P_5 y P_6) asociados a diferentes valores de la deformación de la capa extrema (ε_{s4}). Los puntos P_1 y P_7 con momento igual a cero son la resistencia nominal a tensión y compresión, el primero representa el segundo término de la ecuación 10 y ambos términos determinan la resistencia a compresión, donde A_g es el área bruta de la sección transversal. En el punto P_7 se considera nula la aportación del concreto.

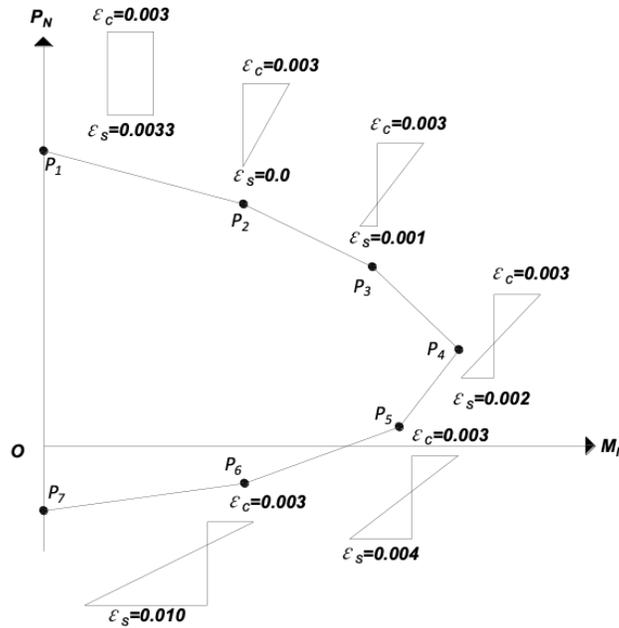


Figura 4. Puntos analizados en la curva nominal de interacción y deformaciones asociadas.
Fuente: Elaboración propia

$$P_{O,T} = 0.85 f'_c A_g + A_s f_y \quad (10)$$

Al multiplicar los valores de la curva nominal (Figura 4) por el factor de reducción de resistencia (F_R) se obtiene la curva nominal resistente, ecuación 11 y Figura 5a. Los valores de F_R están definidos en el apartado 3.7 de las NTCC-2017, ecuación 12.

$$\begin{bmatrix} M_R \\ F_R \end{bmatrix} = F_R \begin{bmatrix} M_N \\ P_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F_R = \begin{cases} 0.65 & \text{falla en compresión} \\ 0.75 & \text{falla en tensión} \end{cases} \quad (12)$$

Cálculo del momento y carga resistente para los elementos de diseño (M_U, P_U)

El tercer paso del proceso mostrado en la Figura 2 es calcular el momento (M_R) y carga resistente (P_R) correspondiente al par de valores momento último (M_U) y carga última (P_U). De acuerdo con la Figura 5a, la curva OA inicia en el origen y termina en las coordenadas (M_U, P_U) formando un ángulo θ medido en el sentido horario respecto de la recta OP_U , la intersección de la recta OA con la curva resistente define las coordenadas del punto B (M_R, P_R), en este caso se supone está entre los puntos P_2 y P_3 , su ubicación

se obtiene al comparar el ángulo θ con los ángulos θ_2 y θ_3 formados entre el origen y los puntos P_2 y P_3 , Figura 5b. A continuación, se calculan las pendientes de las rectas P_2P_3 y OA , m_1 y m_2 , respectivamente. En el segmento P_2P_3 se establece la ecuación 13 que pasa por el punto de coordenadas conocidas (M_{R3}, P_{R3}) mientras que la definición de la pendiente m_2 de la recta OA permite establecer la ecuación 14 (Lehman, 2006).

$$P_R - m_1 M_R = P_{R3} - m_1 M_{R3} \quad (13)$$

$$P_R - m_2 M_R = 0 \quad (14)$$

La solución del sistema de ambas ecuaciones representa las coordenadas del punto B (Griffiths & Smith, 2006), que son el momento resistente (M_R) y carga resistente (P_R) asociados a los elementos mecánicos de diseño (M_U, P_U).

Finalmente se compara la relación M_U/M_R y P_U/P_R , si el cociente es menor que uno, el muro resiste los elementos mecánicos actuantes, en caso contrario el usuario deberá modificar los datos de entrada y repetir el cálculo.

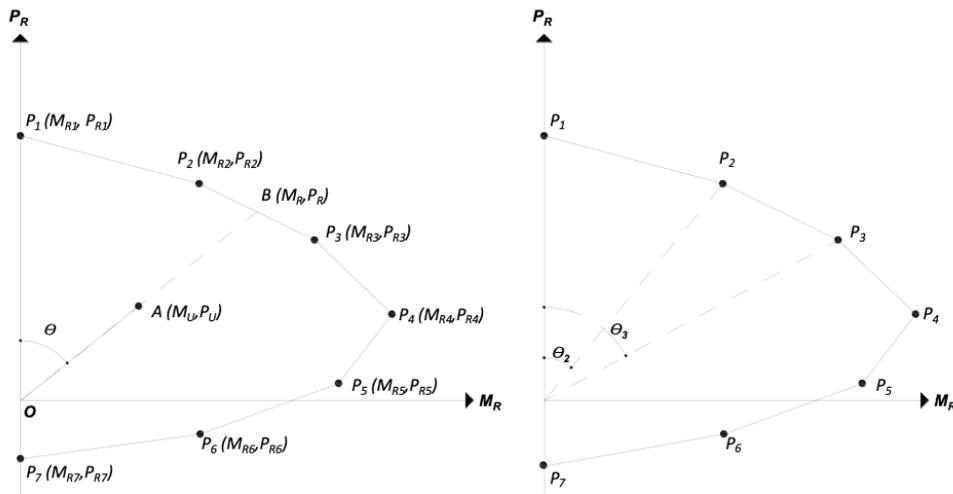


Figura 5. Curva resistente de interacción ($M_R - P_R$): a) ángulo de excentricidad (θ) y punto de intersección en la curva resistente, b) definición de ángulos θ_2 y θ_3 . Fuente: Elaboración propia

Aplicación a un caso específico

La aplicación consta de dos hojas de cálculo, en la primera se introducen los datos y se calcula la curva nominal ($M_N - P_N$), en la segunda se calcula la curva resistente y el par de valores ($M_R - P_R$) asociado a los elementos mecánicos de diseño ($M_U - P_U$). La Tabla 3 muestra el vector de datos y la Tabla 4 presenta el cálculo del momento nominal (M_N) y carga nominal (P_N) del punto P_4 . La aplicación tiene la opción de cuatro diferentes diámetros de acero ($3/8''$, $1/2''$, $5/8''$ y $3/4''$), los cuales pueden modificarse con una ma-

nipulación simple del usuario. Por otro lado, la relación máxima longitud/ espesor del muro no debe exceder 40 o 70, en función de la carga axial y el espesor no será menor que 100 mm, inciso 7.4.2.1 de las NTCC-2017.

Tabla 3
Vector de datos

Geometría, características del acero y concreto (m, MPa)				Elementos mecánicos de diseño (KN, m)	
$t =$	0.15	$f'_c =$	19.62	M_U	P_U
$r_1 =$	0.04	$f_y =$	412.02	150.0	1000.0
$r_2 =$	0.04	ϕ_1	3/8	Nota: 1) Si $M_U=0$ introducir un valor cercano a cero. 2) Si $P_U=0$ introducir un valor cercano a cero. En ambos casos se recomienda 0.001.	
$d_1 =$	0.12	# barras	8		
$L =$	1.00				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4
Cálculo de momento nominal (M_N) y carga nominal (P_N) en el punto 4, falla balanceada. Unidades: KN, m

$\epsilon_c = 0.003$	$c = 0.58$	$D = 0.26$					
$\epsilon_{s4} = 0.002$	$\alpha = 0.49$	$M_c = 313$					
	$C_c = 1225$						
# As	As (cm ²)	y_i	ϵ_s	f_s	Fs	Dist	Ms
1	1.42	0.04	0.0028	412	59	0.46	27
2	1.42	0.16	0.0022	412	59	0.34	20
3	1.42	0.84	-0.0014	-283	-40	-0.34	14
4	1.42	0.96	-0.0020	-412	-59	-0.46	27
					18		87
$\Sigma F = 1243$				$\Sigma M = 400$			

Fuente: Elaboración propia

El sistema de ecuaciones está formado por las dos rectas intersecantes (OA y P_2P_3), la solución y las relaciones M_U/M_R y P_U/P_R se muestran en la Figura 6. Una representación gráfica de la aplicación es la Figura 7, donde se presentan las dos curvas calculadas, la recta OA y la intersección con la curva resistente cuyas coordenadas son el momento resistente (M_R) y la carga resistente (P_R).

Sistema de ecuaciones			Solución del sistema (KN m)		Relación	
$[A]$	$[x]$	$= [b]$	$[x] = [A]^{-1} [b]$		M_U/M_R	0.80
1	4.30	2056	$P_R =$	1249.37	$P_U/P_R =$	0.80
1	-6.67	0	$M_R =$	187.41	El muro resiste	

Figura 6. Sistemas de ecuaciones, solución y resultado final. Fuente: Elaboración propia

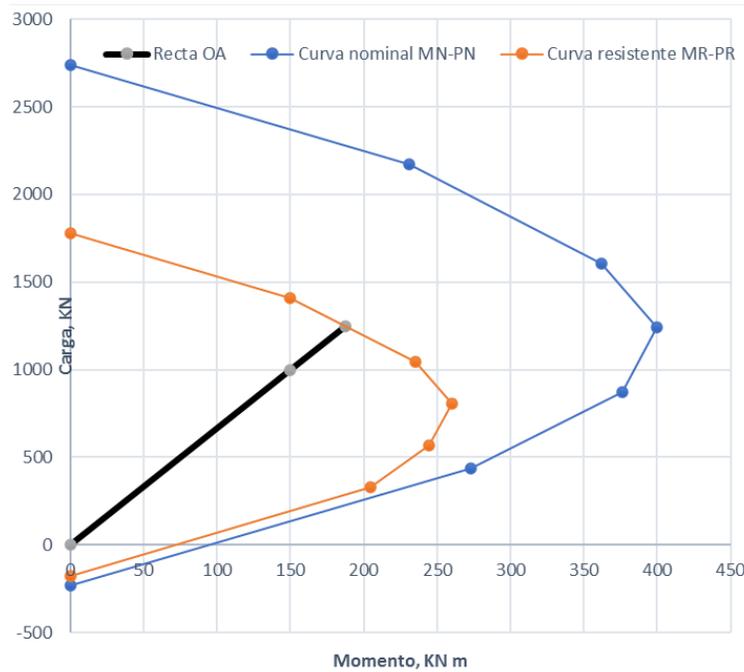


Figura 7. Curvas calculadas e intersección de la recta OA con la curva resistente. Fuente: Elaboración propia

Acceso a la aplicación

La aplicación se puede descargar del sitio <https://github.com/SULPICIO67/Muros-de-concreto/blob/main/Flexocompresion.xlsx> por cualquier persona interesada: estudiante, docente, profesionalista, etc., para utilizarla, modificarla, aumentarla o implementarla en otra aplicación más compleja.

III. RESULTADOS

La curva nominal calculada con siete puntos mediante la aplicación fue comparada con las obtenidas usando dos softwares propietarios (Corona, 2020; CSI, 2018) para determinar su exactitud. La primera aplicación comercial (Corona: 2020) evalúa 38 puntos, como se observa en la Figura 8a, ambas curvas nominales son prácticamente iguales, solo existe un error despreciable cerca del punto de momento máximo. En este caso, la diferencia

entre ambas curvas para un valor fijo de la excentricidad (M_R/P_R) se evalúa mediante la ecuación 15, donde R_C es el módulo de la recta intersectante de la curva obtenida de la aplicación comercial y R_A es el respectivo asociado a la aplicación desarrollada, el error es $E = 1.8 \%$.

La Figura 8b muestra la curva de la aplicación y la obtenida en el programa Sap2000 (CSI, 2018), ésta última tiene diez puntos, el error fue $E = 1.7\%$. En este caso, debe comentarse que fue posible la comparación entre curvas nominales porque el programa Sap2000 utiliza la versión ACI 318-14, cuyas hipótesis de análisis son idénticas a las utilizadas en las NTCC-2017.

$$E = 100 (R_C - R_A)/R_C \quad (15)$$

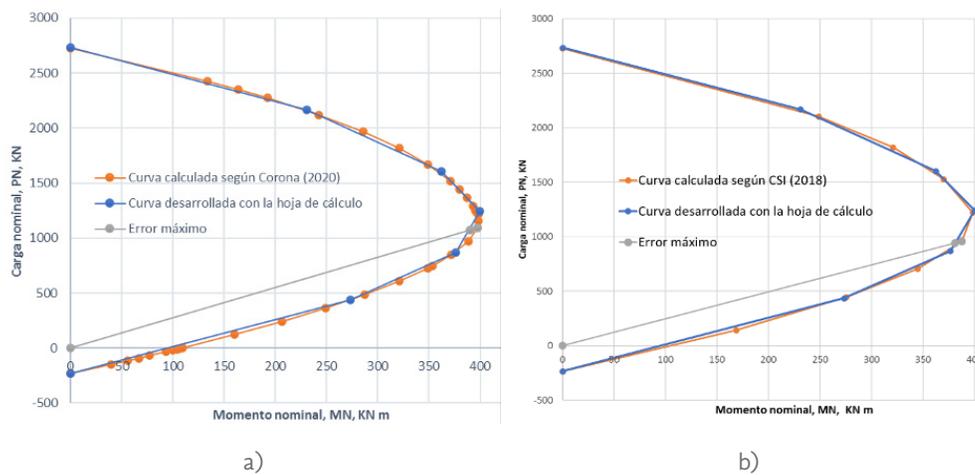


Figura 8. Comparación de curvas nominales. Fuente: Elaboración propia

El error entre curvas resistentes, la primera calculada con la aplicación y la segunda con una aplicación comercial (Corona, 2020) fue evaluado con la ecuación 15. Así, se propusieron dos rectas asociadas a dos pares de valores M_U-P_U . La recta $M_{R1}-P_{R1}$ con excentricidad igual a 0.40 tuvo un error, $E_1 = 4.6 \%$ mientras que la recta $M_{R2}-P_{R2}$ con excentricidad igual a 0.60 registró $E_2 = 13.0 \%$, Figura 9. Como se observa, el software profesional calcula 38 puntos de la curva, mientras que la aplicación desarrollada sólo siete puntos. Aun así, la aproximación es adecuada y está en el rango 87 % - 95.4%.

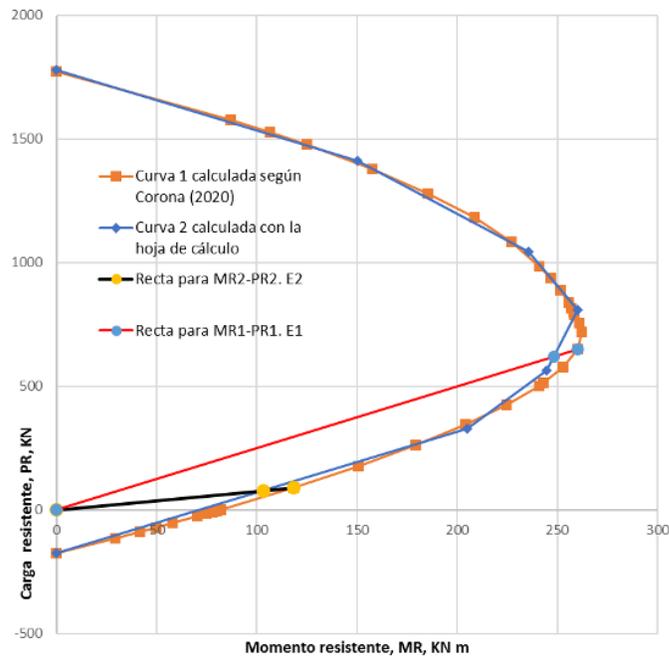


Figura 9. Comparación de curvas resistentes. Fuente: Elaboración propia

Considerando las características didácticas de la aplicación desarrollada, las limitantes son:

- Error máximo de 13% asociado a la cantidad de puntos utilizados en el cálculo de la curva
- Se subestima la capacidad de la sección al no considerar la aportación del acero vertical intermedio.

IV. CONCLUSIONES

La aplicación cumple con el objetivo definido de apoyo en la enseñanza de diseño y/o revisión de muros de concreto reforzado sometidos a flexocompresión, mediante la implementación de un algoritmo simple con reducido número de toma de decisiones. La curva resistente formada por siete puntos tiene una aproximación mayor o igual al 87% respecto a la obtenida con el software propietario referente, el cual evalúa 38 puntos de la gráfica. En el caso de las curvas nominales, el error es menor a 2%. Esta herramienta ya es utilizada por estudiantes de posgrado en la Facultad de Ingeniería (UAGro) en las unidades de aprendizaje: diseño de estructuras de concreto y diseño de estructuras de mampostería.

En otro orden, el algoritmo es una guía para estudiantes, docentes o Instituciones de Educación Superior que pretendan desarrollar aplicaciones propias. En este sentido, a diferencia de universidades internacionalmente

reconocidas, muchas universidades mexicanas no tienen software propio o libre de apoyo a la docencia, por lo que tienen que pagar el uso de licencias comerciales. Este desarrollo muestra una alternativa a dicha situación.

Los conocimientos básicos usados fueron geometría analítica, aritmética, y álgebra matricial, todos accesibles en la herramienta Excel. Además, es posible modificar los datos de entrada si el resultado no es satisfactorio.

Finalmente, se mostró una introducción al pensamiento abstracto requerido en la automatización de procesos de cálculo que podrían enfrentar los estudiantes en su futuro desarrollo profesional, fortaleciendo la adquisición de conocimientos, habilidades y competencias definidos en el perfil de egreso de los estudiantes.

REFERENCIAS

- Alcocer, S., Muriá-Vila, D., Fernández-Sola, L., Ordaz, M. & Arce, J.** (2020). Observed damage in public school buildings during the 2017 Mexico earthquakes. *Earthquake Spectra*, 36(S2), 110-119.
- Carrillo, J. & Alcocer, S.** (2011). Comportamiento a cortante de muros de concreto para vivienda. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 85, 103-126.
- Computers and Structures.** (2018). *Structural Analysis Program (SAP2000, version 2018)*.
- Corona, E.** (2020). *Programa DDCgcw3. Diseño de columnas de concreto*. México.
- Culebro, M., Gómez, W. G. & Torres, S.** (2006). *Software libre vs software propietario. Ventajas y desventajas*. <https://archive.org/details/SoftwareLibreVsSoftwareProprietario.VentajasYDesventajas>
- Díaz, F. J., Harari, V., Banchoff, C. M.** (2005). *Ventajas del software libre en las escuelas. Casos de estudio. JEITICS 2005*. Primeras Jornadas de educación en Informática y Tics en Argentina. <http://cs.uns.edu.ar/jeitics2005/Trabajos/pdf/11.pdf>
- ESi Group.** (2020). *Scilab. Open-source software for numerical computation*. <https://www.scilab.org/>
- Free software foundation.** (2020). *GNU operating system*. <https://www.gnu.org/licenses/licenses.html>.
- Griffiths, D. V. & Smith I. M.** (2006). *Numerical Methods for Engineers*. Edit Chapman & Hall/CRC.
- McCormac, J. C. & Brown, R. H.** (2014). *Design of Reinforced Concrete*. Editorial Wiley (9th ed.)
- MatWorks.** (2020). *Matlab. Math, graphics, programming*. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- Microsoft.** (2020). *Microsoft Excel (2019)*
- Lehman, C.** (2006). *Geometría analítica*. Editorial Limusa
- PTC** (2020). *Mathcad: Math software for your engineering calculations*. <https://www.mathcad.com/en>.
- Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro).** (2011). *Plan de estudio 2011. Ingeniero Civil. UAGro, Chilpancingo, Gro.* https://www.researchgate.net/publication/277305360_PE_DE_INGENIERO_CIVIL_PLAN_DE_ESTUDIO_2011

NORMAS CITADAS

- Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto (NTCC-2017).** <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>