

Desarrollo de una Herramienta Computacional para la Evaluación del Comportamiento no Lineal de Muros de Concreto Reforzado

Fabio Andrés Morales Ortiz, Sandra Rocio Jerez Barbosa

RESUMEN

Dado el aumento en la construcción de sistemas estructurales de muros portantes de concreto reforzado o sistema industrializado en Colombia, el crecimiento de la población de las ciudades donde es un sistema estructural predominante y considerando que Colombia se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica alta, es necesario generar herramientas de uso libre que permitan fomentar el interés en estudiantes de ingeniería y faciliten la comprensión, análisis e investigación sobre el comportamiento no lineal de los elementos que componen estos sistemas estructurales. Considerando lo anterior, se desarrolla una herramienta computacional, en la versión 2.0, del software Momento - curvatura, donde se programaron dos módulos: uno para la conceptualización de los diagramas momento curvatura de muros de concreto reforzado, orientado a consolidar el conocimiento; y el módulo de ejecución que permite generar, a través de la librería de Opensees para Python, diagramas por medio de modelos de fibras. Se realizó la validación de los módulos comparándolos con los resultados obtenidos en el software Xtract, como programa de referencia.

ABSTRACT

Given the increase in the construction of structural systems of concrete load-bearing walls in Colombia, the growth of the population of the cities where it is a predominant structural system and considering that the country is located in an area of high seismic hazard, it is necessary to generate free-use tools that foster interest in engineering students and facilitate understanding, analysis, and research on the non-linear behavior of the elements that make up these structural systems. Considering the above, a computational tool is developed to build moment- curvature curves, with two modules: one for the conceptualization of the diagrams of reinforced concrete walls, aimed at consolidating knowledge; and the execution module that allows to generate, through the Opensees library for Python, diagrams by means of fiber models. The validation of the modules was carried out by comparing them with the results obtained in the Xtract software, as a reference program.

PALABRAS CLAVE

Muros de concreto reforzado, análisis no lineal, Opensees, Diagramas momento curvatura

INTRODUCCIÓN

Los sistemas estructurales aporricados han sido sustituidos a nivel mundial por sistemas más rígidos lateralmente, construidos con base en muros estructurales. En Colombia, actualmente el sistema industrializado de muros portantes es de gran importancia en especial en proyectos de vivienda multifamiliar. Al tercer trimestre de 2018, del área de construcciones iniciadas para vivienda en las principales ciudades de Colombia un 36% corresponde al sistema estructural de muros de concreto reforzado.

Debido a que Colombia está localizada en el cinturón de fuego del pacífico, zona de amenaza sísmica considerable, de acuerdo con los estudios de amenaza sísmica realizados a nivel nacional por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), cerca del 40% de los colombianos se encuentra en zonas de amenaza sísmica alta y 47% de la población del país está ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia, es decir, el 87% de la población colombiana se encuentra bajo un nivel de riesgo sísmico considerable (Correal, 2016). Por ende, todas las edificaciones deben ser construidas y diseñadas para que desarrollen un comportamiento sísmico resistente.

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) considera la ductilidad de cada uno de los diferentes sistemas estructurales que allí contempla y define los parámetros de diseño mínimos requeridos de acuerdo con la zona de amenaza sísmica donde se encuentren cada uno de ellos.

Una estructura dúctil, es aquella que, es capaz de disipar energía a través de la deformación inelástica de los elementos estructurales que la componen; esto

quiere decir que una vez sea sometida a un sismo de magnitud considerable, posiblemente presente fisuras y daños en sus elementos estructurales. En el caso de muros portantes de concreto reforzado, experiencias reportadas en informes de terremotos ocurridos en países con zonas de alta amenaza sísmica, como Chile y Nueva Zelanda, han identificado fallas frágiles concentradas en los elementos de borde e inestabilidad lateral fuera del plano (Daza Rodríguez & Civil, 2018).

Si esperamos que las estructuras sufran algún tipo de daño en un evento sísmico, es de gran importancia comprender y analizar el comportamiento no lineal de los elementos que componen este sistema estructural y de este modo garantizar que se cumpla el fin primordial de salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte (AIS, 2010).

Para realizar un análisis no lineal es importante tener conocimiento de la relación Momento – Curvatura de las secciones que componen los elementos estructurales, con el fin de conocer la ductilidad por curvatura μ_{ϕ} , la capacidad máxima a flexión M_u . (Jaramillo & Cortés, 2016). Con el desarrollo de un software para la conceptualización del comportamiento no lineal por medio de la obtención de diagramas de momento curvatura se busca contribuir a la comunidad académica en el estudio del comportamiento inelástico de estructuras, ya que no todos los programas cuentan con un amplio desarrollo de herramientas que permitan identificar en su totalidad los diversos esfuerzos que podrían presentarse en un elemento estructural (Jaramillo & Cortés, 2016).

En lo referente a programas de análisis estructural que permitan obtener los

diagramas momento curvatura se identificaron algunos como: SAP, ETABS, CSICOL, Robot Estructural, Exacad, DDCgcW3, CUMBIA y Xtract; la mayoría con la limitación de ser software de tipo comercial, con licencias de alto costo; por otro lado, dentro del desarrollo académico específico de este sistema estructural, solamente se presenta un proyecto enfocado en muros estructurales de 20 cm x 120 cm con diferentes áreas de refuerzo denominado: “obtención de diagramas momento – curvatura por medio de macros en Excel” (Fabián et al., 2015), aplicando las teorías de diseño por capacidad de Park, Paulay & Priestley para muros de concreto reforzado.

Algunos programas de cálculo estructural tienen implementadas herramientas que permiten obtener graficas del comportamiento no lineal de los muros de concreto reforzado, pero, la mayoría no son libres lo que limita su uso por parte de la comunidad de estudiantes. También se identificó que ninguno de estos programas tiene fines educativos, lo que significa que sirven para desarrollar las gráficas de comportamiento, pero sin aporte a la comprensión de los fenómenos que están detrás de esas gráficas.

Este proyecto comprende el desarrollo de una herramienta didáctica y amigable con el usuario que facilite al usuario la comprensión del comportamiento inelástico de muros de concreto reforzado. Adicionalmente, por medio de esta herramienta se pretende contribuir al estudio y el diseño por medio del análisis no lineal de este sistema estructural, al igual que hacer más atractivo este tema para la comunidad académica en general.

MARCO TEÓRICO

Modelos constitutivos de los materiales.

Se requiere definir las curvas esfuerzo deformación que permitan describir el comportamiento de los materiales.

Concreto reforzado

Se empleó el modelo de (Mander et al., 1988) para concreto confinado e inconfinado.

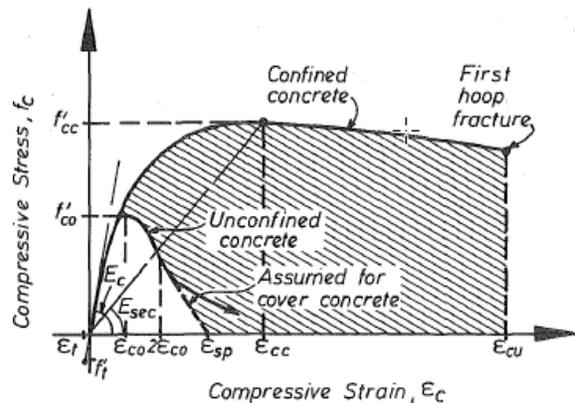


Figura 1 Modelo de esfuerzo-deformación propuesto para la carga monótona de concreto confinado e inconfinado (Mander et al., 1988)

f'_{co} : Resistencia a la compresión del concreto inconfinado

f'_{cc} : Resistencia a la compresión del concreto confinado

ϵ_{co} : Deformación unitaria de la máxima resistencia a compresión del concreto confinado

ϵ_{sp} : Deformación unitaria en la que el concreto inconfinado se astilla y no soporta más carga

ϵ_{cc} : Deformación unitaria de la máxima resistencia a la compresión del concreto confinado

- ϵ_{cu} Deformación unitaria máxima del concreto confinado
- E_c Módulo de elasticidad del concreto de acuerdo con lo indicado en la NSR-10 sección C.8.5.1 (AIS, 2010)
- E_{sec} Módulo de elasticidad secante del concreto
- ϵ_t Deformación unitaria de rotura por tracción del concreto
- f'_t Resistencia a la tensión del concreto inconfinado

Acero

Varilla corrugada de refuerzo

Se emplea el modelo desarrollado por (Yun & Gardner, 2017).

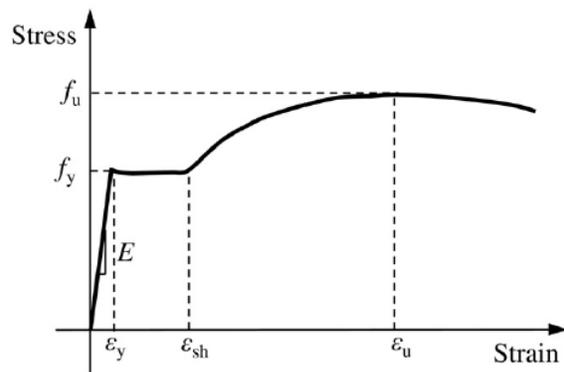


Figura 2 Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Yun & Gardner, 2017)

- ϵ_u : Deformación unitaria máxima del acero
- ϵ_{sh} : Deformación unitaria del acero justo antes de iniciar el endurecimiento por deformación.
- ϵ_y : Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo de fluencia del acero

- f_y : Esfuerzo de fluencia del acero
- f_u : Resistencia última del acero
- E : Módulo de elasticidad del acero

Malla de acero electrosoldada

Se consideró malla como opción de refuerzo de los muros, empleando el modelo constitutivo definido por (Carrillo et al., 2019).

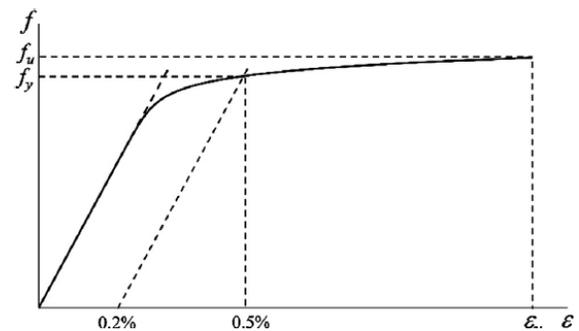


Figura 3 Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Carrillo et al., 2019)

- ϵ_u : Deformación unitaria máxima del acero
- f : Esfuerzo de tensión correspondiente a ϵ
- f_u : Resistencia última del acero
- E_s : Módulo de elasticidad del acero

METODOLOGÍA

La metodología empleada para el cálculo del diagrama momento curvatura es la siguiente:

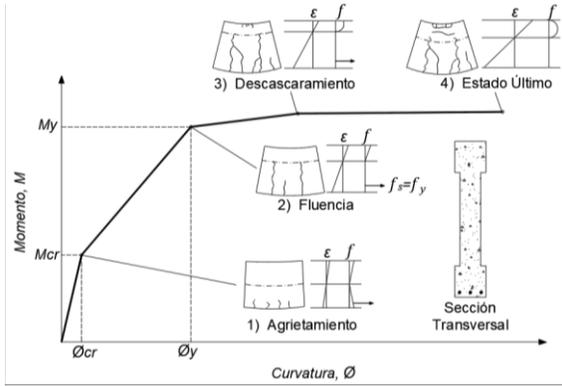


Figura 4 Curva momento deformación típica

Punto 1: Agrietamiento

Corresponde al inicio de la fisuración de la fibra mas alejada y es determinado por la resistencia máxima a tensión del concreto del recubrimiento

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c}, \text{ Según C.8.5 NSR 10 (AIS, 2010)}$$

$$f_r = 0.62 * \sqrt{f'_c}, \text{ Ecuación C.9-10 NSR - 10 (AIS, 2010)}$$

$$\epsilon_c = \frac{f_r}{E_c}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r * I}{y_t}, \text{ Ecuación C.9-9 NSR-10 (AIS, 2010).}$$

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{y_t}$$

$$\phi = \frac{M_{cr}}{E_c * I}$$

Donde:

f_r : Módulo de ruptura del concreto.

M_{cr} : Momento de fisuración.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto.

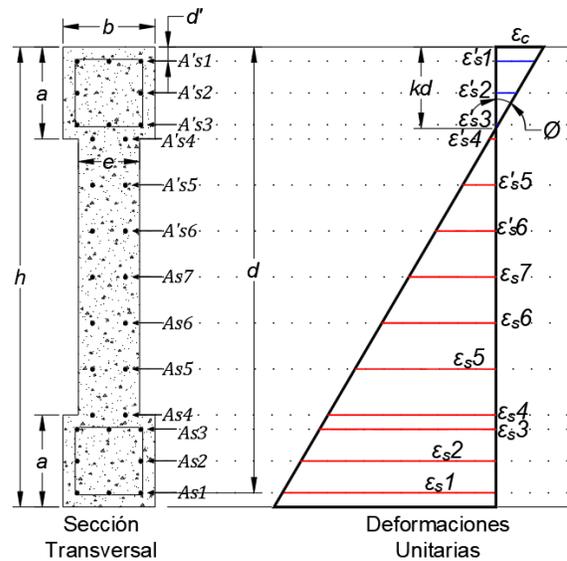
ϵ_c : Deformación unitaria

ϕ : Curvatura

y_t : Fibra en tensión

Punto 2: Fluencia

Determinado por el límite de fluencia alcanzado por el refuerzo en tensión.



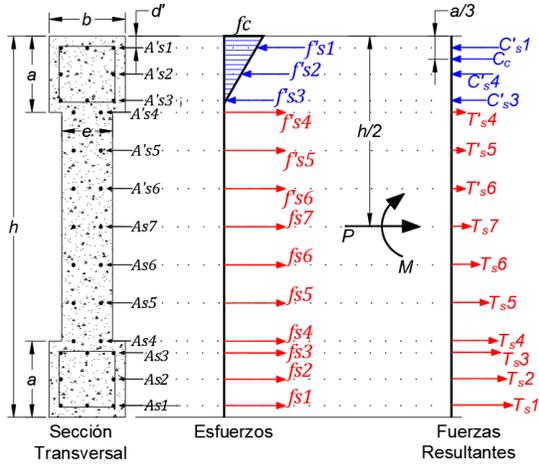


Figura 5 Esfuerzos y deformaciones para secciones lineales agrietadas

$$\sum \vec{F} = 0: P + T_s1 \dots T_s n - C'_s1 \dots C'_s n - q = 0$$

$$M = P * \frac{h}{2} - C'_s * d' - C_c * \frac{kd}{3} + T_s * d$$

C_c : Fuerza del concreto a compresión.

C'_s : Fuerza del acero de refuerzo en compresión.

T_s : Fuerza del acero de refuerzo en tensión.

A_s : Área de acero de refuerzo en tensión.

A'_s Área de acero de refuerzo en compresión.

d' Distancia del borde de la sección al centroide del acero de refuerzo a compresión.

d Distancia del borde de la sección al centroide del acero de refuerzo a tensión.

kd Distancia del borde de la sección al eje neutro de la sección.

Finalmente se obtiene la curvatura.

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd}$$

Para secciones sin solicitaciones de carga axial se emplea el método de la sección transformada:

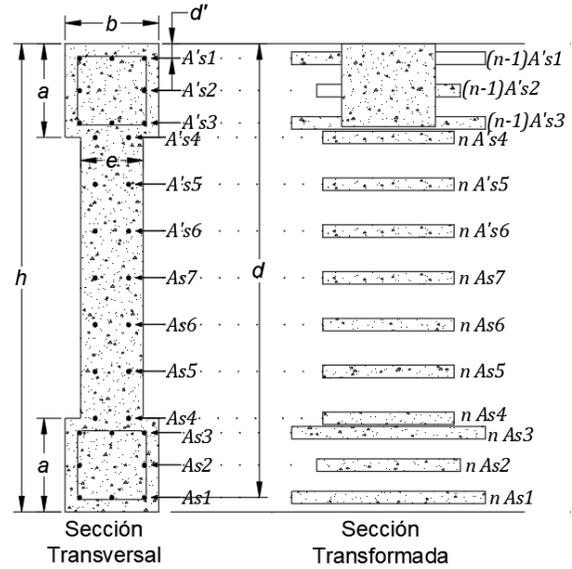


Figura 6 Sección transformada fisurada para el caso de carga axial nula. Adaptado de (Jack Moehle, 2015)

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + (n-1) * A'_s1 * (kd - d')^2 + \dots + (n-1) * A'_s6 * (kd - d'6)^2 + n * A_s1 * (d - kd)^2 + \dots + n * A_s7 * (d - kd7)^2$$

$$M = \frac{1}{n} * \frac{f_y * I_{cr}}{(d - kd)}$$

$$\phi = \frac{M}{E_c * I_{cr}}$$

Punto 3: Descascaramiento

Determinado por el momento en el cual el concreto a compresión del recubrimiento alcanza una deformación unitaria de 0.004 e inicia el descascaramiento.

Para calcular el momento se emplea lo descrito en el punto dos, empleando el bloque de compresión en vez de una distribución triangular de esfuerzos en el concreto.

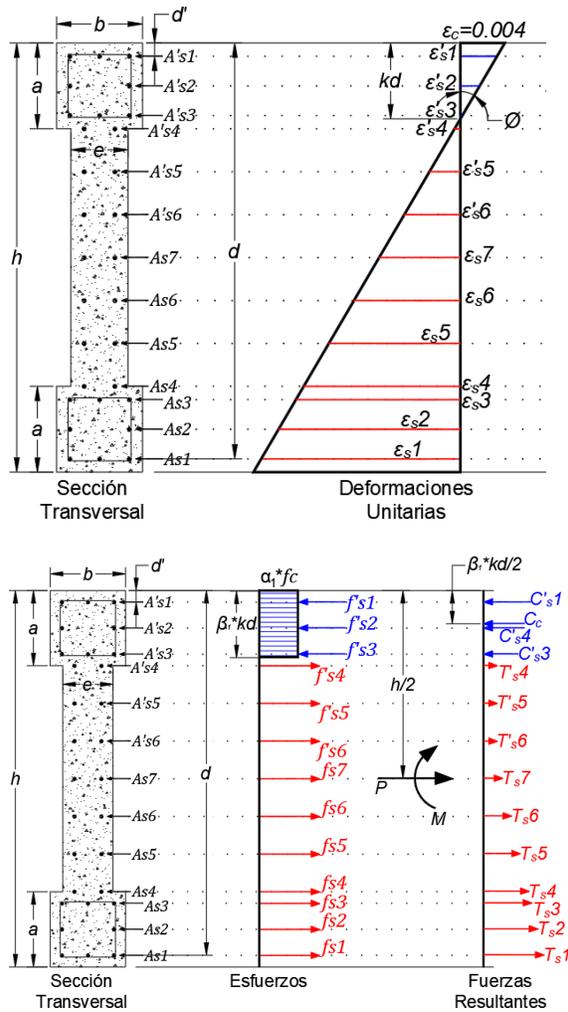


Figura 7 parámetros del bloque compresión adaptado de (Jack Moehle, 2015).

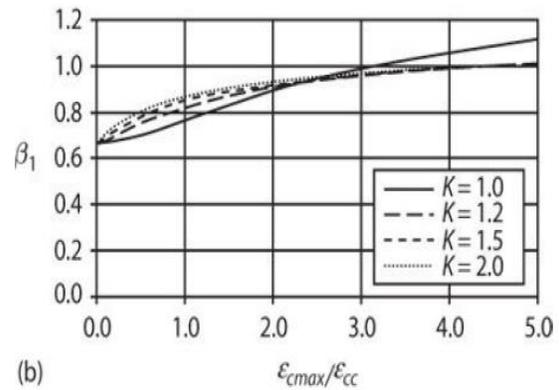
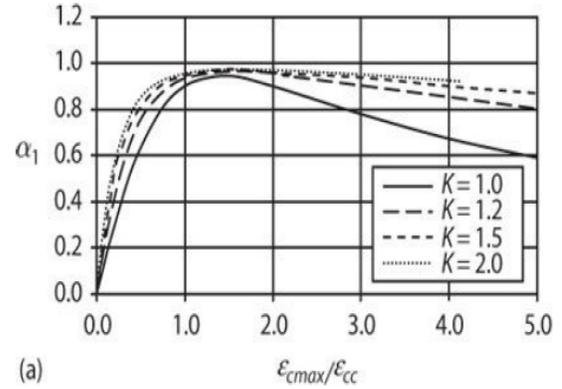


Figura 8 parámetros α_1 y β_1 del bloque compresión. (Jack Moehle, 2015)

$$\sum \vec{F} = 0: P + T_s - C'_s - C_c = 0$$

$$M = P * \frac{h}{2} - C'_s * d' - C_c * \frac{kd}{2} + T_s * d$$

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd}$$

Punto 4: Ultimo estado de servicio

El cuarto punto del diagrama estará dado cuando se iguale el esfuerzo último de alguno de los materiales que componen la sección, ya sea el núcleo de concreto confinado o el acero por tensión.

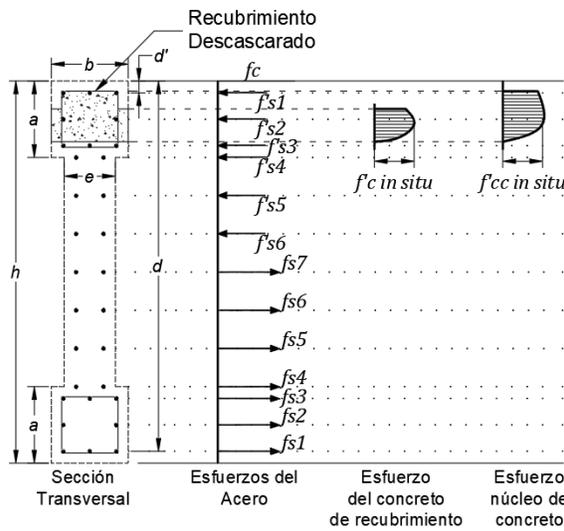
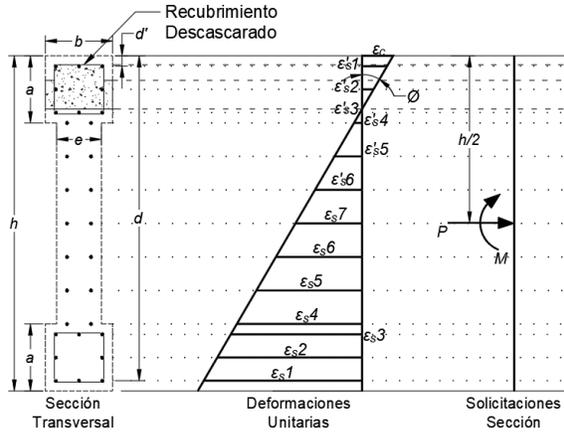


Figura 9 Acciones internas después del descascarado del recubrimiento adaptado de (Jack Moehle, 2015)

$$\sum \vec{F} = 0: P + T_s1 + \dots + T_s n - C'_s - C_c - C_{cc} = 0$$

$$M = P * \frac{h}{2} - C'_s * d' - C_{cc} * \left(d' - \frac{kd}{2} \right) - C_c * \left(\text{centroide} + \frac{kd_{sp}}{2} \right) + T_s * d$$

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd}$$

RESULTADOS

Para el desarrollo del programa momento curvatura se empleó el lenguaje de programación Python en el cual se realizaron el módulo de conceptualización y el módulo de ejecución aplicando la librería de Openseespy (Zhu et al., 2018) para Python

Se realizó la programación para el cálculo de las siguientes configuraciones de muros y tipos de refuerzo

- Muro no confinado con refuerzo sencillo con malla electrosoldada y también con varillas.
- Muro no confinado reforzado con doble malla electrosoldada o refuerzo doble con varilla.
- Muro confinado con varilla.
- Muro no confinado con refuerzo sencillo con malla electrosoldada y con elementos de borde.
- Muro no confinado con refuerzo doble con malla electrosoldada y con elementos de borde.
- Muro no confinado con refuerzo sencillo con varilla y con elementos de borde
- Muro no confinado con refuerzo doble con varilla y con elementos de borde
- Muro confinado con varilla y con elementos de borde.

Módulo de conceptualización: Para el desarrollo del módulo de conceptualización se realizó la programación del método manual construyendo el diagrama momento curvatura con 4 puntos.

Módulo de ejecución: Para el desarrollo del módulo de ejecución se realizó la programación correspondiente a cada

una de las rutinas requeridas para ejecutar la librería para Python de Opensees denominada Openseespy, la cual permite analizar por modelos de fibras.

Adicionalmente, se realizó la validación del módulo de ejecución comparando los diagramas con los obtenidos por medio del programa Xtract.

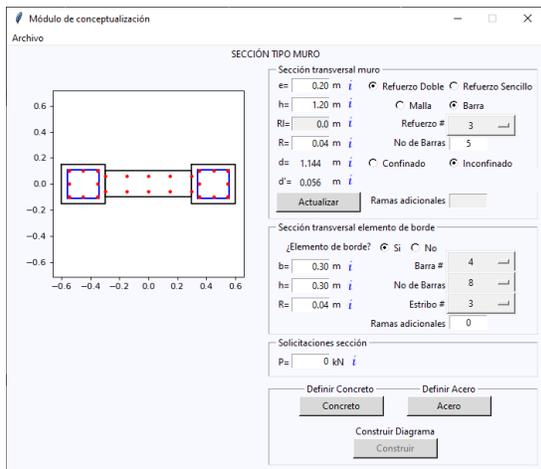


Figura 10 Ventana principal módulo de conceptualización

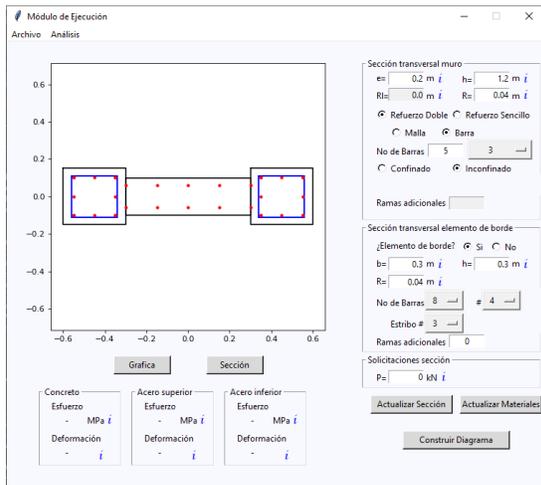


Figura 11 Ventana principal módulo de ejecución

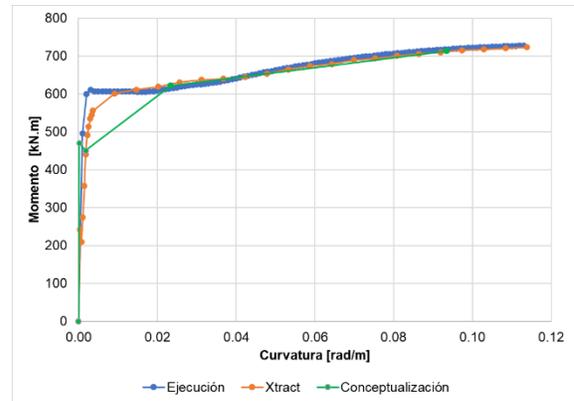


Figura 12 Comparación diagramas momento-curvatura sección de validación 1.

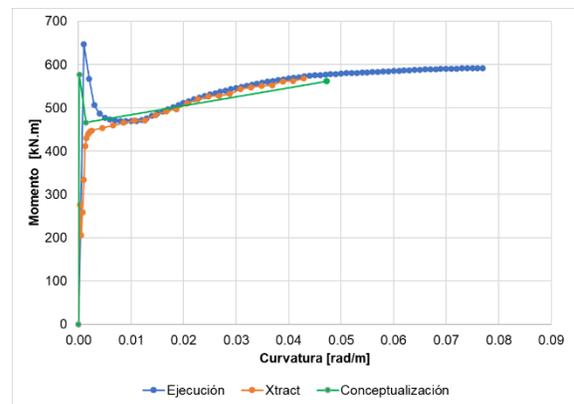


Figura 13 Comparación diagramas momento-curvatura sección de validación 2.

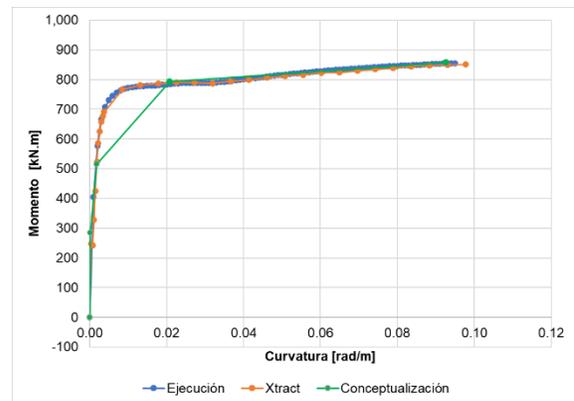


Figura 14 Comparación diagramas momento-curvatura sección de validación 3.

CONCLUSIONES RECOMENDACIONES

Y

- Con esta herramienta se contribuyó al aprendizaje del comportamiento inelástico de las estructuras a través del módulo de conceptualización que permite verificar los conocimientos por medio de la generación de diagramas por el método manual.
- Este programa proporciona una herramienta de fácil manejo y aplicación para la modelación de diferentes configuraciones geométricas y de refuerzo.
- Se identificó una coincidencia superior al 85% al comparar los resultados de momento y curvatura obtenidos con el módulo de conceptualización y los calculados por el software Xtract.
- Se recomienda continuar con el desarrollo de herramientas que permitan lograr una mejor comprensión del comportamiento no lineal de sistemas de muros portantes como lo son los muros de mampostería o muros de concreto reforzado acoplados

BIBLIOGRAFÍA

AI, A. C. de I. Sísmica. (2010). NSR10. *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente Nsr-10*.

Carrillo, J., Diaz, C., & Arteta, C. A. (2019). Tensile mechanical properties of the electro-welded wire meshes available in Bogotá Colombia. *Construction and Building Materials*, 195.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.096>

Correal, J. F. (2016). *Posibilidades de un sismo o terremoto en Colombia - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16571309>

Daza Rodríguez, R., & Civil, M. en I. (2018). *Implementación de modelos de elementos finitos inelásticos para la simulación del comportamiento de muros de concreto reforzado*. <http://manglar.uninorte.edu.co/jspui/handle/10584/8181?mode=simple>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV 2018. In *DANE*. <https://sitios.dane.gov.co/cnpv-presentacion/src/#donde00>

Fabián, H., Martínez, R., Andrés, O., & Becerra, Q. (2015). *Obtención del diagrama momento-curvatura en muros de concreto reforzado*. http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_30929.pdf

Jack Moehle, Ph. D. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings* (First edition.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071839440>

Jaramillo, Y. A., & Cortés, J. S. V. (2016). *Calibración de métodos simplificados existentes para el análisis de muros esbeltos de concreto reforzado*.

Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8).

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804))

Montejo, L., & Kowalsky, M. (2007). CUMBIA—Set of codes for the analysis of reinforced concrete members. *CFL Technical Rep. No. IS-07, 1*.

Sánchez, K. M., & Jerez, S. R. (2018). *Desarrollo de una herramienta computacional para conceptualización y elaboración de diagramas momento curvatura en secciones de concreto reforzado* Development of a computational tool to conceptualize and develop Moment- Curvature relationship curves of re.

Yun, X., & Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research, 133*. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>

Zhu, M., McKenna, F., & Scott, M. H. (2018). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX, 7*. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.10.009>