

Maestría en Ingeniería Civil

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

Fabio Andrés Morales Ortiz

Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2021



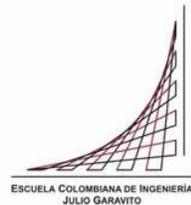
Desarrollo de una Herramienta Computacional para la Evaluación del Comportamiento No Lineal de Muros de Concreto Reforzado

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en estructuras

Sandra Rocío Jerez Barbosa

Director

Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2021



La tesis de maestría titulada “Desarrollo de una herramienta computacional para la evaluación del comportamiento no lineal de muros de concreto reforzado”, presentada por Fabio Andrés Morales Ortiz, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras.

Director de la tesis

Sandra Rocío Jerez Barbosa

Jurado

Nancy Torres Castellanos

Jurado

Luis Daniel Benavides Navarro

Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2021

Dedicatoria

A mi hermano Oscar quien puso la primera piedra en este proyecto de vida y a quien su lucha constante me anima a no desfallecer. A mi esposa e hija mi apoyo y motivación de vida.

Resumen

Dentro de los sistemas estructurales para edificaciones más utilizados en Colombia se encuentran los muros de concreto reforzado. En el último trimestre de 2018 el 33.5% de la vivienda nueva es construida en este sistema estructural (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2018).

En el diseño de edificaciones sismo resistentes la ductilidad de los diferentes sistemas estructurales es de gran importancia; ya que, se espera que las estructuras se deformen disipando la energía liberada durante un evento sísmico, razón por la cual es importante comprender muy bien el comportamiento inelástico de las estructuras.

La consideración del comportamiento inelástico de las estructuras parte de la modelación de este comportamiento. Esta modelación puede tomar diversas formas, siendo la más común la utilización de modelos de plasticidad concentrada en los que el comportamiento inelástico se representa mediante diagramas de momento – curvatura (o de fuerza cortante – deriva y otros, dependiendo del tipo de elemento). Esta modelación requiere, además de información de buena calidad, una buena comprensión del comportamiento representado.

Por otra parte, las herramientas computacionales existentes de diseño estructural, aunque permitan la obtención de diagramas momento curvatura, no poseen las características necesarias para afianzar el conocimiento sobre la construcción de los diagramas. Lo anterior, debido a que la mayoría no son desarrolladas para uso académico; algunas requieren licencia de alto costo y, finalmente, las que son de software libre no cuentan con una interfaz gráfica, por lo que es necesario que el usuario cuente con conocimientos básicos de programación.

La metodología aplicada en el desarrollo del proyecto consistió inicialmente en la conceptualización del tema, la definición de los modelos constitutivos a emplear y el método para la elaboración de diagramas momento - curvatura. Posteriormente, se llevó a cabo el desarrollo de la aplicación en el software libre Python, para calcular y construir diagramas de cuatro puntos a través del método paso a paso en el módulo de conceptualización. Finalmente, con el objeto de brindar al usuario la posibilidad de generar gráficos momento curvatura por medio de un modelo de fibras de mayor precisión, rapidez y número de

puntos, se programó el módulo de ejecución, por medio de la interacción de Python con la librería Openseespy del programa Opensees.

Como parte del proceso de validación de resultados obtenidos por el desarrollo de la herramienta, se realizó la comparación los diagramas de diferentes secciones de muros, obtenidos por medio de la herramienta, para la posterior comprobación de resultados arrojados por el software XTRACT.

Índice general

Resumen	5
Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1. Objetivo General.....	14
1.2. Objetivos Específicos	14
2. Justificación	15
3. Alcance.....	16
4. Marco Teórico.....	17
4.1. Antecedentes.....	17
4.1.1. Programas comerciales	17
4.1.2. Programas académicos	17
4.2. Modelos constitutivos de los materiales.....	18
4.2.1. Concreto reforzado.....	18
4.2.1.1. Resistencia del concreto confinado para secciones rectangulares	19
4.2.2. Acero.....	22
4.2.2.1. Varilla corrugada de refuerzo.....	22
4.2.2.2. Malla de acero electrosoldada	24
4.3. Método paso a paso diagrama momento curvatura	25
4.3.1.1. Punto 1: Agrietamiento	25
4.3.1.2. Punto 2: Fluencia.....	27
4.3.1.3. Punto 3: Descascaramiento.....	30
4.3.1.4. Punto 4: Último estado de servicio.....	32
4.4. Modelos de fibras	34
5. Metodología.....	35
5.1. Desarrollo del programa momento curvatura	35
5.1.1. Muro no confinado refuerzo sencillo con malla electrosoldada	35
5.1.2. Muro no confinado reforzado con doble malla electrosoldada	36
5.1.3. Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla	37
5.1.4. Muro no confinado refuerzo doble con varilla.....	37
5.1.5. Muro confinado con varilla	38

5.1.6.	Muro no confinado con refuerzo sencillo con malla electrosoldada y con elementos de borde	38
5.1.7.	Muro no confinado refuerzo doble con malla electrosoldada y con elementos de borde	39
5.1.8.	Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla y con elementos de borde .	40
5.1.9.	Muro no confinado refuerzo doble con varilla y con elementos de borde	41
5.1.10.	Muro confinado con varilla y con elementos de borde	42
5.2.	Propiedades geométricas del acero y las mallas	43
5.2.1.	Acero	43
5.2.2.	Malla.....	45
5.3.	Módulo de conceptualización.....	46
5.3.1.	Pantalla principal del módulo de conceptualización	47
5.3.2.	Definición de los materiales	48
5.3.3.	Construyendo el diagrama momento curvatura	50
5.3.3.1.	Punto 1 de 4	50
5.3.3.2.	Punto 2 de 4	51
5.3.3.3.	Punto 3 de 4	53
5.3.3.4.	Punto 4 de 4	54
5.4.	Módulo de ejecución.....	56
5.4.1.	Pantalla principal módulo de ejecución	56
5.4.1.1.	Definición de los materiales	58
5.4.1.2.	Construyendo el diagrama momento curvatura	58
5.4.2.	Validación.....	60
5.4.2.1.	Sección de validación 1	60
5.4.2.2.	Sección de validación 2	61
5.4.2.3.	Propiedades sección de validación 3	62
6.	Conclusiones y Recomendaciones	64
7.	Bibliografía.....	65
8.	Anexos	67
8.1.	Reportes de las secciones de validación	68
8.1.1.	Módulo de Ejecución	69
8.1.2.	Módulo de Conceptualización.....	81

8.1.3. Xtract (Ver archivo externo)	85
8.2. Manual del usuario	86
8.3. Recomendaciones para futuros desarrollos	107

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades Acero.....	44
Tabla 2. Propiedades Malla	45
Tabla 3. Relación curvatura entre resultados obtenidos del módulo de ejecución y Xtract64	

Índice de figuras

Figura 1 Modelo de esfuerzo-deformación propuesto para la carga monótona de concreto confinados e inconfinado (Mander et al., 1988).....	18
Figura 2 Núcleo efectivamente confinado para refuerzo de sección rectangular (Mander et al., 1988).....	19
Figura 3 Determinación de resistencia confinada a partir de tensiones de confinamiento laterales para Secciones rectangulares (Mander et al., 1988).....	21
Figura 4 Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Yun & Gardner, 2017).....	22
Figura 5 Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Carrillo et al., 2019)	24
Figura 6 Estados limites momento curvatura definidos para el proyecto	25
Figura 7 Esfuerzos y deformaciones para secciones lineales agrietadas.....	27
Figura 8 Sección transformada fisurada para el caso de carga axial nula. Adaptado de (Jack Moehle, 2015)	29
Figura 9 parámetros del bloque compresión adaptado de (Jack Moehle, 2015).....	30
Figura 10 parámetros α_1 y β_1 del bloque compresión. (Jack Moehle, 2015)	31
Figura 11 Acciones internas después del descascarado del recubrimiento adaptado de (Jack Moehle, 2015)	32
Figura 12 Modelo de fibras de una sección de muro de concreto reforzado adaptado de (Jack Moehle, 2015)	34
Figura 13 Muro no confinado refuerzo sencillo con malla electrosoldada.....	36
Figura 14 Muro no confinado reforzado con doble malla electrosoldada.....	36
Figura 15 Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla.....	37
Figura 16 Muro no confinado refuerzo doble con varilla	37
Figura 17 Muro confinado con varilla	38
Figura 18 Muro no confinado refuerzo sencillo con malla electrosoldada y con elementos de borde	39
Figura 19 Muro no confinado refuerzo doble con malla electrosoldada y con elementos de borde	40
Figura 20 Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla y con elementos de borde	41
Figura 21 Muro no confinado refuerzo doble con varilla y con elementos de borde	42
Figura 22 Muro confinado con varilla y con elementos de borde.....	43
Figura 23 Definición parámetros de entrada módulo de conceptualización.....	47
Figura 24 Definición modelos constitutivo concreto confinado e inconfinado	48

Figura 25 Definición modelos constitutivo acero	49
Figura 26 Resultado calculo punto 1 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.	50
Figura 27 Reporte detallado de esfuerzos calculado para el punto 1 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.	51
Figura 28 Resultado calculo punto 2 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.	52
Figura 29 Resultado calculo punto 3 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.	53
Figura 30 Resultado calculo punto 4 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.	55
Figura 31 Pantalla principal módulo de ejecución	57
Figura 32 Definición modelos constitutivos módulo de ejecución.....	58
Figura 33 Resultado calculo por medio Openseespy diagrama momento curvatura módulo de ejecución.	59
Figura 34 Comparación diagramas momento -curvatura sección de validación 1.	61
Figura 35 Comparación diagramas momento -curvatura sección de validación 2.	62
Figura 36 Comparación diagramas momento -curvatura sección de validación 3.	63

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 $\mu\phi$, 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 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 las 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.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Desarrollar para la comunidad académica una herramienta informática que, por medio de la construcción de diagramas momento curvatura, brinde al usuario un medio para conceptualizar y comprender el comportamiento no lineal de las estructuras de muros portantes.

1.2. Objetivos Específicos

- Contribuir a mejorar la comprensión del comportamiento no lineal de muros portantes de concreto reforzado.
- Complementar el programa Momento Curvatura 1.0 con un módulo aplicado a muros portantes de concreto reforzado.
- Proporcionar una herramienta de uso libre, de fácil manejo y aplicación para la modelación de diferentes configuraciones geométricas y de refuerzo empleados en muros portantes de concreto reforzado.

2. Justificación

Dado que las construcciones sismoresistentes son diseñadas para que durante un evento sísmico se deformen inelásticamente y de este modo disipen energía, existe la necesidad de estudiar y comprender el comportamiento no lineal de las estructuras. Por medio del presente proyecto se pretende desarrollar una herramienta informática que permita abordar este tema empleando uno de los métodos ampliamente utilizados para representar la ductilidad de los elementos estructurales como lo son los diagramas momento curvatura.

El aporte principal al conocimiento, del comportamiento inelástico, que se logra con el software momento curvatura 2.0, es que el usuario logre identificar y verificar con facilidad lo que ocurre con la relación de esfuerzos y deformaciones de los materiales que componen una sección de concreto reforzado. Para ello, se presenta el módulo de conceptualización que permite analizar y validar los resultados específicos para un diagrama momento curvatura construido con cuatro puntos calculados a partir de la programación del método paso a paso.

El método paso a paso para la obtención del diagrama consiste en definir estados límite para calcular un determinado número de puntos de la curva, este es el proceso que se realiza a partir de la sumatoria de fuerzas y obtención de momentos para determinado estado límite, empleando diagramas de cuerpo libre y cálculos completamente manuales.

Finalmente, al ser el cálculo manual se encuentran los diagramas asistidos por computadora empleando elementos finitos, para ello se busca realizar un aporte al diseño e investigación del análisis no lineal por medio del módulo de ejecución, el cual por un modelo de fibras permite al ingeniero o estudiante de ingeniería generar diagramas momento curvatura con la rapidez y precisión que proporcionan dichos modelos.

3. Alcance

El alcance de este proyecto corresponde al desarrollo de una aplicación que permita la construcción del diagrama momento - curvatura para muros de concreto reforzado, en su propio plano, con y sin carga axial. La herramienta momento curvatura 2.0 está diseñada para muros no acoplados, de sección rectangular, con o sin elementos de borde; reforzados con malla o varilla corrugada y permite obtener los diagramas ya sea por método manual o a partir de modelos de fibras.

Se aclara que el uso adecuado de la herramienta es la que proporciona al usuario resultados aceptables y que en ningún momento el autor se hace responsable del uso inapropiado del software o de los resultados que deseen ser presentados, ante alguna autoridad, como aplicación de una norma específica de diseño de estructuras.

Los resultados generados por los módulos de la aplicación momento curvatura 2.0 son solamente de manera orientativa, aplicados al desarrollo académico, con la finalidad de brindar al usuario un orden de magnitud apropiado en lo referente a la relación momento curvatura la sección analizada.

4. Marco Teórico

4.1. Antecedentes

Es importante identificar claramente las aplicaciones que permiten obtener diagramas momento curvatura; las que existen actualmente pueden dividirse en comerciales y académicas:

4.1.1. Programas comerciales

Dentro de estos programas se encuentran los desarrollados por la compañía Computer & Structures, Inc. CSI, como SAP2000 y ETABS, que, aunque su propósito principal es el análisis y diseño de estructuras, contienen una herramienta denominada Section Designer la cual permite obtener los diagramas momento curvatura.

Por otro lado, se encuentra XTRACT, software comercial desarrollado por TCR específicamente para análisis de secciones en concreto reforzado, el cual permite graficar diversas curvas entre ellas la relación momento curvatura de la sección que defina el usuario.

Sin embargo, las herramientas mencionadas anteriormente requieren una licencia que por lo general es de alto costo. Además, la generación de los diagramas es automática y no proporciona información que aporte a la comprensión del fenómeno, debido a que no son programas con enfoque académico.

4.1.2. Programas académicos

En el ámbito del desarrollo académico de herramientas se identificó que existe el software Cumbia (Montejo & Kowalsky, 2007) el cual permite generar diagramas momento curvatura de secciones rectangulares y circulares por medio de código de Matlab, y no cuenta con una interfaz gráfica.

Otro desarrollo identificado es el realizado por (Fabián et al., 2015) el cual por medio de macros de Excel permite generar diagramas momento curvatura para muros de concreto reforzado, con la limitación de que solo permite obtener las curvas para secciones de 20cm x 120cm con diferentes tipos de refuerzo.

Finalmente, se encuentra el software momento curvatura 1.0 (Sánchez & Jerez, 2018), la cual permite generar diagramas momento curvatura solamente para vigas y columnas.

4.2. Modelos constitutivos de los materiales

Cuando se requiere construir el diagrama momento curvatura se deben definir inicialmente los modelos constitutivos de los materiales, ya que con ellos se logra determinar el comportamiento, en cuanto a esfuerzos y deformaciones, del concreto y el acero que componen la sección del muro.

Los materiales que se tendrán en cuenta para el desarrollo de la herramienta corresponden a concreto confinado, concreto confinado, acero de refuerzo o malla de refuerzo.

4.2.1. Concreto reforzado

Para el modelo constitutivo del concreto se empleó el modelo de (Mander et al., 1988) para concreto confinado e inconfinado:

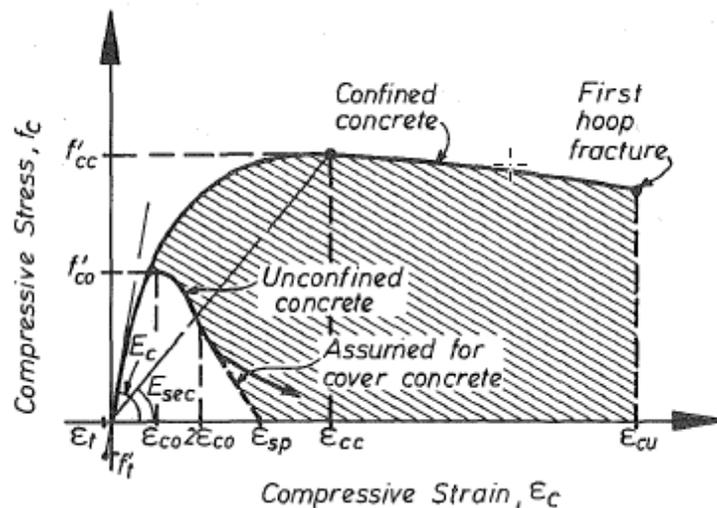


Figura 1 Modelo de esfuerzo-deformación propuesto para la carga monótona de concreto confinados e inconfinado (Mander et al., 1988)

Donde:

- 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

4.2.1.1. Resistencia del concreto confinado para secciones rectangulares

Para el cálculo de la resistencia del concreto confinado de los muros es empleó lo descrito por (Mander et al., 1988) para secciones rectangulares.

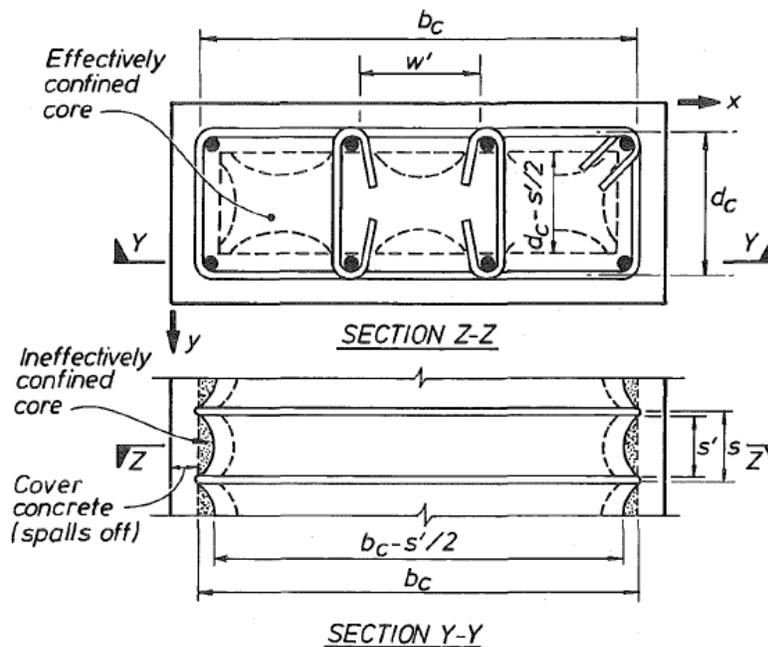


Figura 2 Núcleo efectivamente confinado para refuerzo de sección rectangular (Mander et al., 1988)

Donde:

- S: Separación del refuerzo transversal
- S': Separación libre del refuerzo transversal
- w': Separación libre de ramas
- b_c: Largo entre ejes del estribo de la sección
- d_c: Ancho entre ejes del estribo de la sección

Empleando las siguientes ecuaciones se obtiene el valor de f'_{co} para la sección a evaluar:

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6}$$

$$A_e = (b_c * d_c - A_i) * \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) * \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6b_c d_c}\right) * \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) * \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}}$$

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{S d_c}$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{S b_c}$$

$$f_{lx} = \rho_x * f_y$$

$$f_{ly} = \rho_y * f_y$$

$$f'_{lx} = k_e * \rho_x * f_y$$

$$f'_{ly} = k_e * \rho_y * f_y$$

Una vez establecidos los valores correspondientes a f'_{lx} y f'_{ly} se obtiene la respectiva relación con f'_{co} para entrar al nomograma presentado en la Figura 3 y obtener el factor K de la relación entre f'_{co} y f'_{cc} .

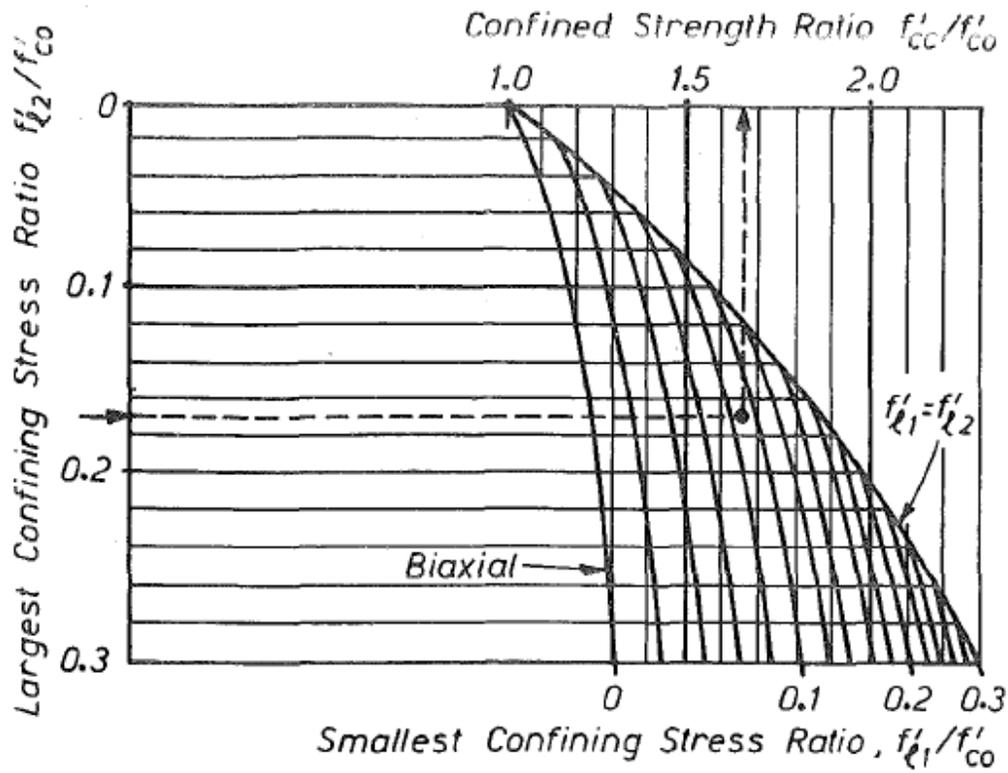


Figura 3 Determinación de resistencia confinada a partir de tensiones de confinamiento laterales para Secciones rectangulares (Mander et al., 1988)

$$f'_{cc} = K * f'_{co}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} * [1 + 5 * (K - 1)]$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + 0.075 * \rho * \frac{f_y}{f'_{co}}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}$$

$$f_c = \frac{f'_{cc} * x * r}{r - 1 + x^r}$$

Donde:

A_i : Área no confinada de la sección transversal del muro

A_e : Área efectivamente confinada de la sección del muro

k_e : coeficiente de efectividad del confinamiento

ρ_i : Relación entre el volumen y el acero de confinamiento transversal y el volumen del núcleo de concreto del lado i

f_{li} : Tensión de confinamiento lateral sobre concreto por refuerzo transversal del lado i

f'_{li} Tensión eficaz de confinamiento lateral del lado i

4.2.2. Acero

4.2.2.1. Varilla corrugada de refuerzo

Para el modelo constitutivo del acero corrugado se emplea el modelo desarrollado por (Yun & Gardner, 2017):

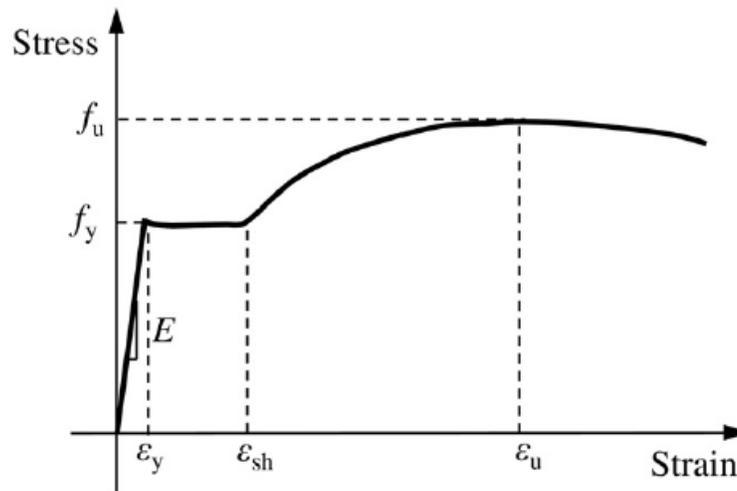


Figura 4 Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Yun & Gardner, 2017)

$$\epsilon_u = 0.6 * \left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right), \text{ donde } \epsilon_u \geq 0.06$$

$$\varepsilon_{sh} = 0.1 * \frac{f_y}{f_u} - 0.055, \text{ donde } 0.015 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0.03$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.4 * (\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}$$

Para $\varepsilon \leq \varepsilon_y$:

$$f = E * \varepsilon$$

Para $\varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh}$

$$f = f_y$$

Para $\varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u$

$$f = f_y + (f_u - f_y) * \left\{ 0.4 * \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) + 2 * \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) / \left[1 + 400 * \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^5 \right]^{1/5} \right\}$$

Donde:

- 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

4.2.2.2. Malla de acero electrosoldada

Debido a que una práctica común es reforzar los muros con malla electrosoldada se considera el modelo constitutivo de la empleada en Colombia de acuerdo con lo presentado por (Carrillo et al., 2019).

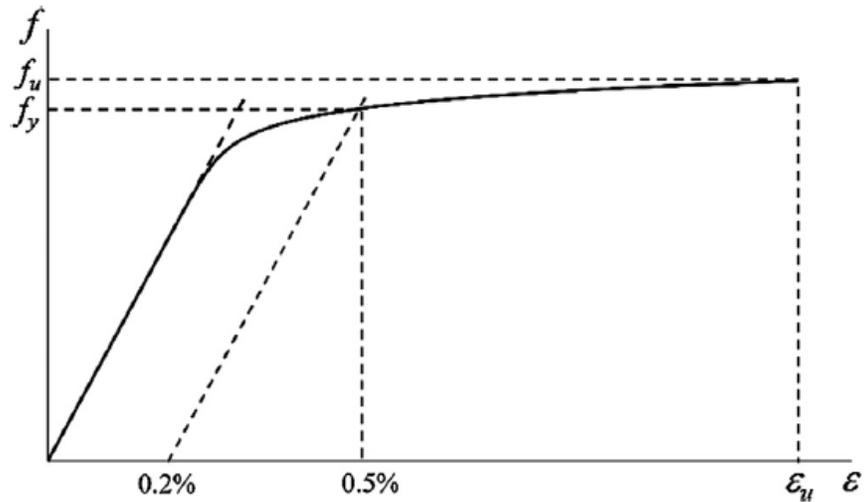


Figura 5 Curva típica de esfuerzo-deformación para acero al carbono laminado en caliente (Carrillo et al., 2019)

$$\varepsilon = \frac{f}{E_s} + \left(\varepsilon_u - \frac{f}{E_s} \right) * \left(\frac{f}{f_u} \right)^{20}$$

Donde:

- 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

4.3. Método paso a paso diagrama momento curvatura

Para la construcción del método paso a paso de los diagramas momento curvatura se deben establecer los estados límites con los cuales se construirá la curva. En el desarrollo del proyecto el diagrama momento curvatura por el método manual se consideraron de 4 puntos de acuerdo con lo ilustrados en la Figura 6.

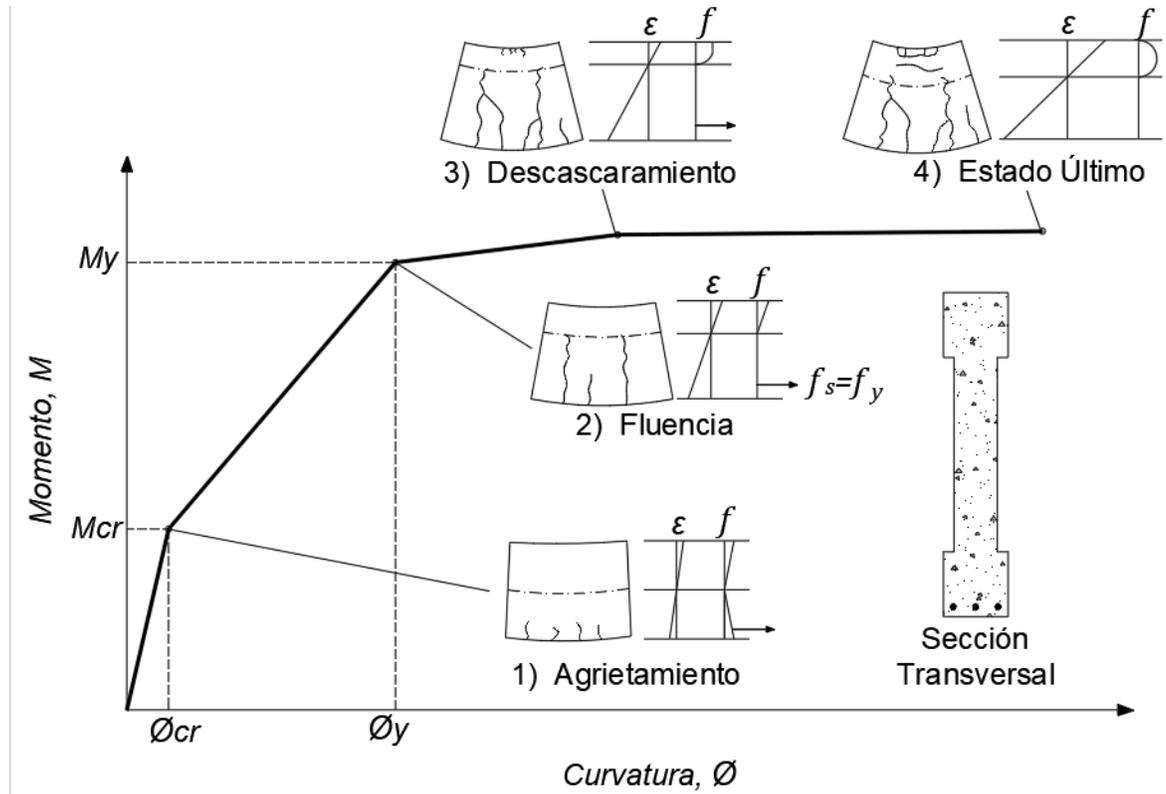


Figura 6 Estados límites momento curvatura definidos para el proyecto

4.3.1.1. Punto 1: Agrietamiento

Consiste en calcular el punto en el que la fibra más alejada en tensión sufre agrietamiento debido a que se alcanza la capacidad de tensión del concreto dada por el módulo de ruptura del concreto.

Para el cálculo de este punto se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las secciones planas permanecen planas.

- Las relaciones esfuerzo deformación de los materiales son obtenidos de los modelos constitutivos presentados anteriormente.
- Se emplean ecuaciones de equilibrio para calcular la fuerza axial y momento en la sección transversal con las fuerzas internas de la sección.

Para la obtención del primer punto se emplean las siguientes ecuaciones

- Inercia secciones de muros rectangulares:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

- La Inercia para secciones con elementos de borde cuyo tamaño sea mayor que el espesor del muro está dado por el teorema de Steiner:

$$Ix = I_0x + A * dy^2$$

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

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

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

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

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

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

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

4.3.1.2. Punto 2: Fluencia

El segundo punto del diagrama estará dado cuando el acero de refuerzo más alejado a tensión alcanza el esfuerzo de fluencia.

Para el cálculo de este punto se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las secciones planas permanecen planas.
- Las relaciones esfuerzo deformación de los materiales son obtenidos de los modelos constitutivos presentados anteriormente.
- Se emplean ecuaciones de equilibrio para calcular la fuerza axial y momento en la sección transversal con las fuerzas internas de la sección.

Para secciones con carga axial se realiza el siguiente procedimiento:

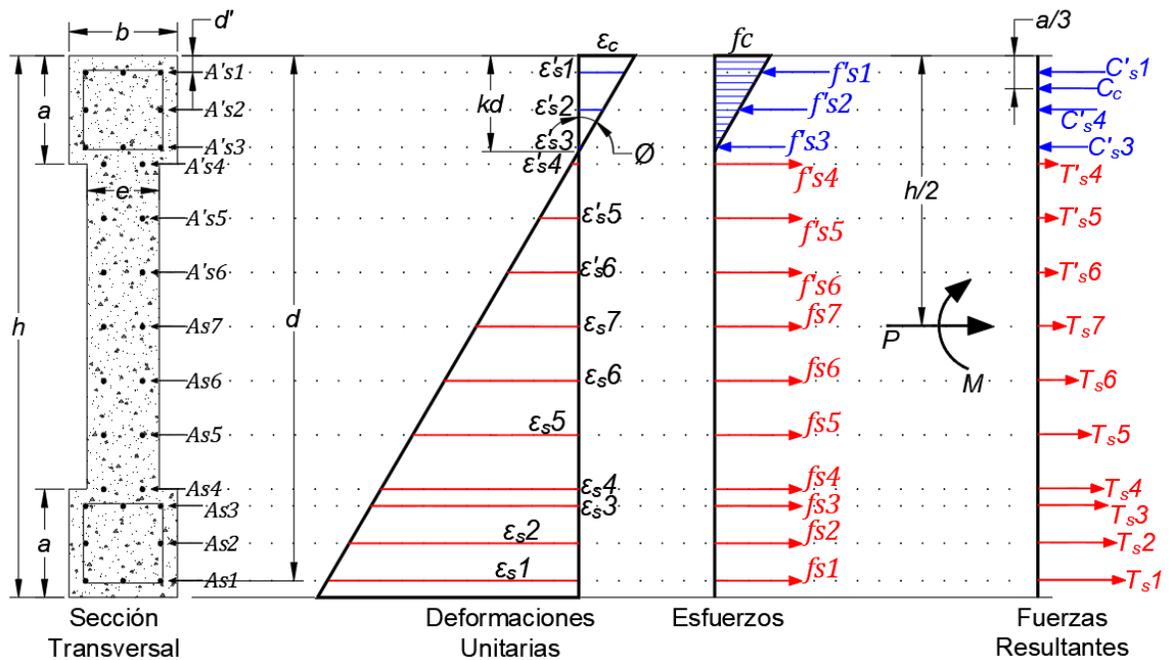


Figura 7 Esfuerzos y deformaciones para secciones lineales agrietadas

Sumatoria de fuerzas en este caso se empleará como ejemplo la Figura 7

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

Es decir:

$$P = C_c + C'_s - T_s$$

$$C_c = \frac{f_c * kd}{2} * b$$

$$T_s = A_s * f_s$$

$$C'_s = A'_s * f'_s$$

$$\sum M_{top} = 0: M - P * \frac{h}{2} + C'_s * d' + C_c * \frac{kd}{3} - T_s * d = 0$$

Es decir:

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

Donde:

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.

Para obtener la curvatura correspondiente se emplea:

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

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

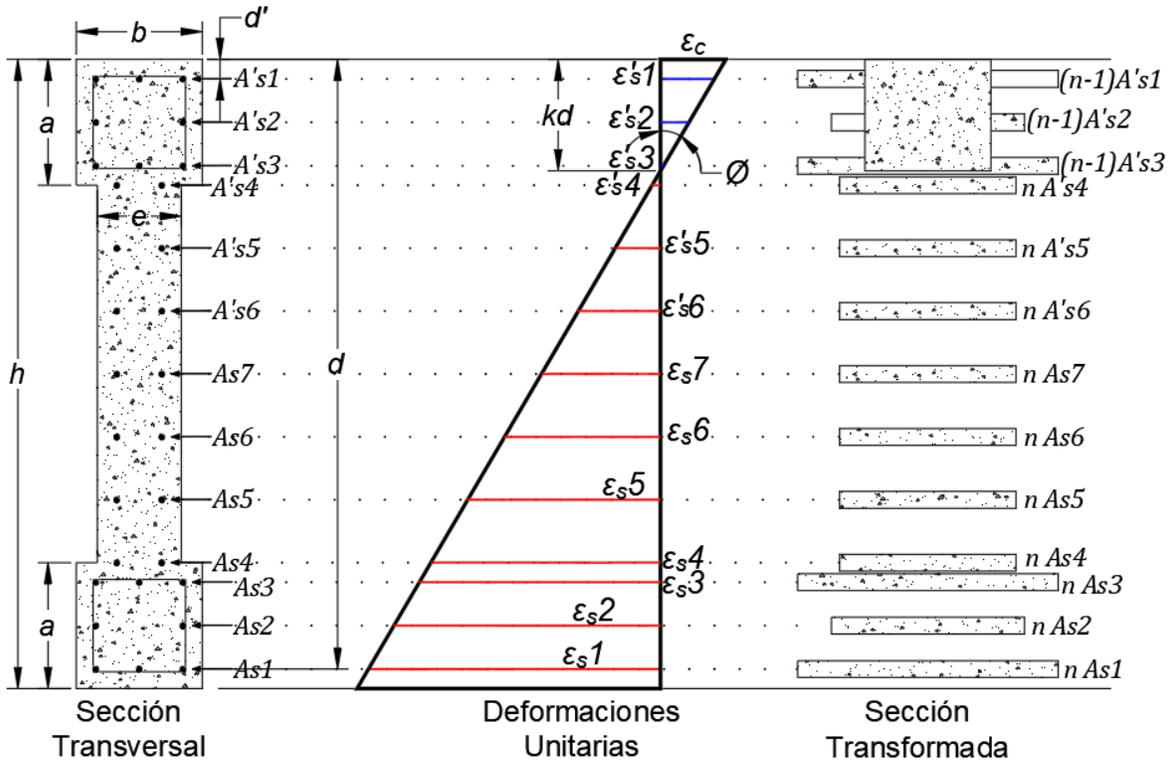


Figura 8 Sección transformada fisurada para el caso de carga axial nula. Adaptado de (Jack Moehle, 2015)

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

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

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

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

4.3.1.3. Punto 3: Descascaramiento

El tercer punto del diagrama estará dado cuando el recubrimiento en la zona de compresión se fractura debido a que la compresión de la fibra más alejada es igual a la capacidad del concreto confinado.

Para el cálculo de este punto se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las relaciones esfuerzo deformación de los materiales son obtenidos de los modelos constitutivos presentados anteriormente.
- Se emplean ecuaciones de equilibrio para calcular la fuerza axial y momento en la sección transversal con las fuerzas internas de la sección.

Para obtener la relación de momento curvatura se realiza el cálculo como en el paso 2 pero aproximando el esfuerzo del concreto a una sección rectangular en vez de triangular

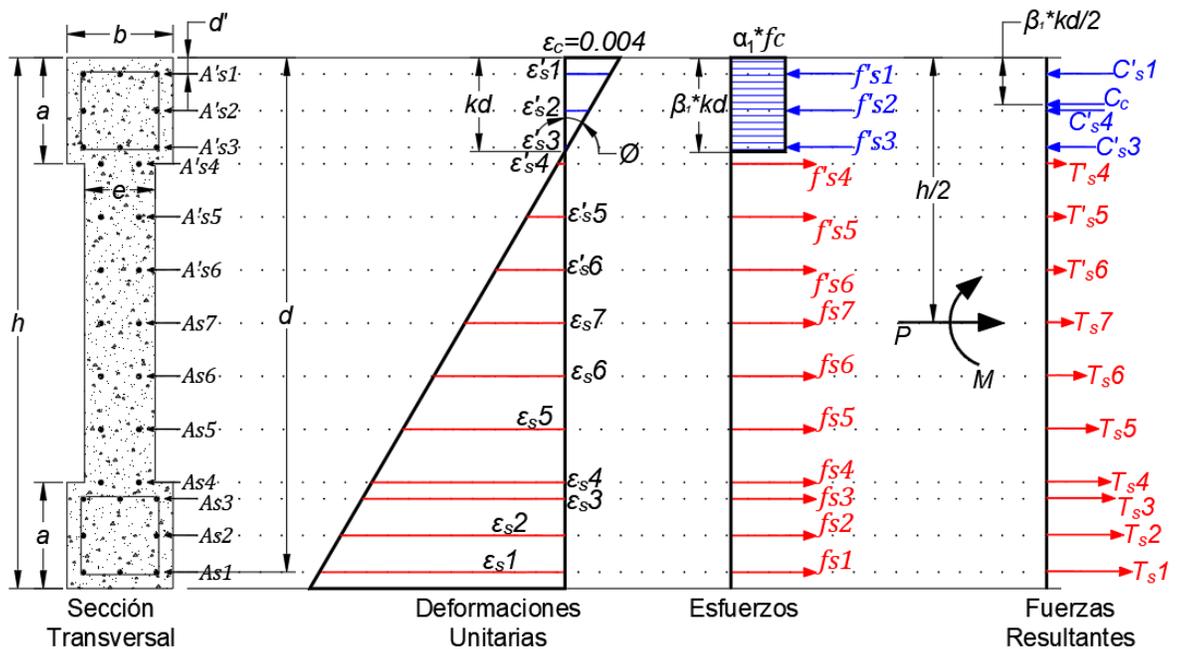


Figura 9 parámetros del bloque compresión adaptado de (Jack Moehle, 2015).

Los valores correspondientes a α_1 y β_1 se obtienen de los siguientes gráficos:

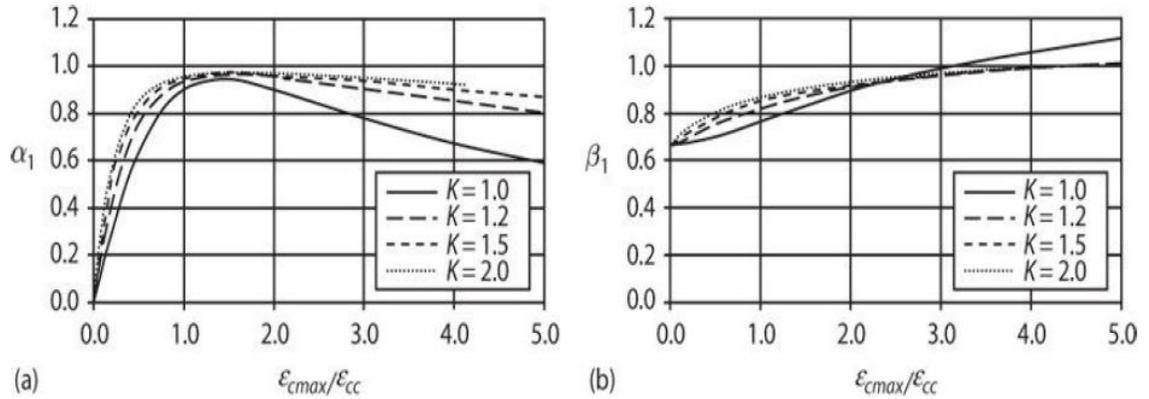


Figura 10 parámetros α_1 y β_1 del bloque compresión. (Jack Moehle, 2015)

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

Es decir:

$$P = C_c + C'_s - T_s$$

$$C_c = \alpha_1 * f'_c * kd * \beta_1 * d$$

$$T_s = A_s * f_s$$

$$C'_s = A'_s * f'_s$$

$$\sum M_{top} = 0: M - P * \frac{h}{2} + C'_s * d' + C_c * \frac{kd}{2} - T_s * d = 0$$

Es decir:

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

Para obtener la curvatura correspondiente se emplea:

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

4.3.1.4. Punto 4: Último 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.

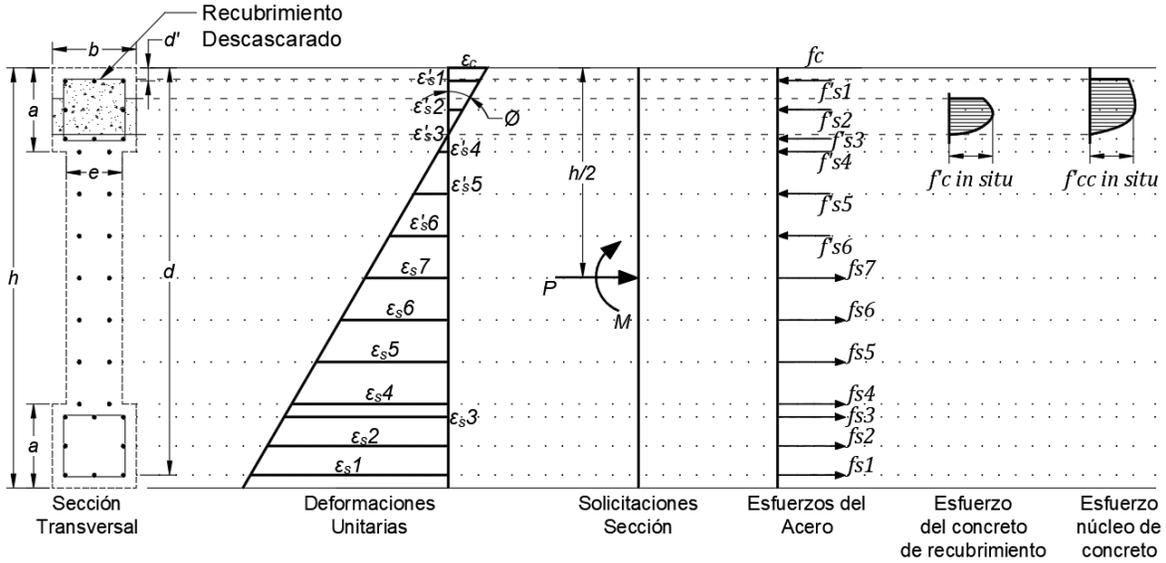


Figura 11 Acciones internas después del descascarado del recubrimiento adaptado de (Jack Moehle, 2015)

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

Es decir:

$$P = C_c + C_{cc} + C'_s - T_s$$

$$C_{cc} = \alpha_1 * f'_{cc} * kd * \beta_1 * (d - \text{recubrimiento} * 2)$$

$$C_c = \alpha_1 * f'_c * kd_{sp} * \beta_1 * \text{recubrimiento} * 2$$

$$T_s = A_s * f_s$$

$$C'_s = A'_s * f'_s$$

$$\sum M_{top} = 0: M - P * \frac{h}{2} + C'_s * d' + C_{cc} * \left(d' - \frac{kd}{2}\right) - T_s * d = 0$$

Es decir:

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

Para obtener la curvatura correspondiente se emplea:

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

4.4. Modelos de fibras

Los modelos de fibras permiten obtener diagramas momento curvatura de mayor precisión debido a que trabajan con base en un modelo de elementos finitos. En la Figura 12 se presenta cómo la sección transversal se subdivide en fibras, lo que permite obtener, en función de las propiedades de los materiales asignados, la deformación y el fuerza en el centroide de cada fibra con relación al eje neutro.

Una vez calculadas dichas fuerzas, el esfuerzo resultante que actúa en el centroide de la fibra se define por el producto de la fuerza y el área de la fibra. La suma de todas las fuerzas resultantes de las fibras determina la carga axial P correspondiente, y se obtienen momentos respecto centroide de la sección bruta (Jack Moehle, 2015).

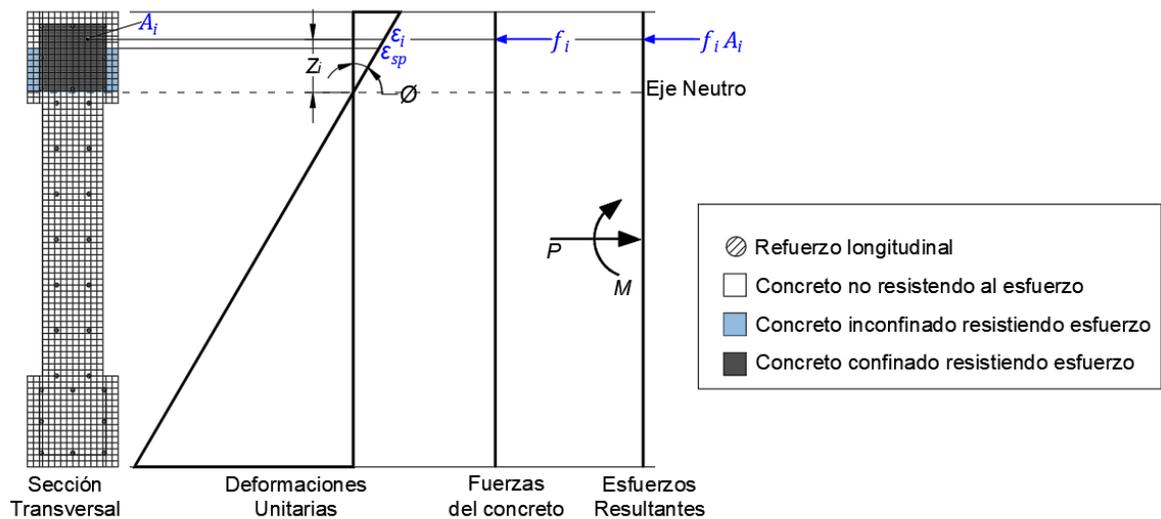


Figura 12 Modelo de fibras de una sección de muro de concreto reforzado adaptado de (Jack Moehle, 2015)

5. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se dividió la programación del software momento curvatura 2.0 en dos módulos: el primero, se denomina módulo de conceptualización el cual consiste en construir el diagrama momento curvatura por el método paso a paso y el segundo llamado módulo de ejecución, que permite generar los diagramas momento curvatura por medio de modelos de fibras.

5.1. Desarrollo del programa momento curvatura

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.

El programa requiere de 3 archivos para su funcionamiento, el primero nombrado "Momento_curvatura_2.py" contiene la programación de la ventana principal y dos grandes funciones; una para el módulo de conceptualización y otra para el módulo de ejecución.

El segundo archivo denominado "funciones.py" contiene gran cantidad de funciones que realizan procesos repetitivos en los módulos de conceptualización y de ejecución, algunas de esas funciones calculan los coeficientes α y el β del bloque de compresión del modelo de Mander para los puntos 3 y 4 del diagrama y variables necesarias para el cálculo de coeficiente de relación entre la resistencia del concreto confinado y la del concreto inconfinado, K , del modelo constitutivo del concreto confinado. Además de otras que permiten hacer una serie de operaciones con listas, empleadas en el módulo de conceptualización para las sumatorias de fuerzas y cálculos de momentos.

En lo referente al módulo de ejecución, "funciones.py" contiene funciones útiles para crear el esquema de la sección y ocho funciones que permiten crear los modelos de fibras por Openseespy para 10 tipos de secciones de muros que se pueden calcular con la herramienta.

Por último, el archivo denominado "Valores_materiales.py" contiene las propiedades de las secciones de las varillas y mallas electrosoldadas aplicables como reforzamiento en los muros. A continuación, se describen los diferentes muros programados:

5.1.1. Muro no confinado refuerzo sencillo con malla electrosoldada

Como se presenta en la Figura 13, la sección corresponde a un muro rectangular con un solo refuerzo en malla electrosoldada, el modelo se

construye con los modelos constitutivos de concreto confinado y de la malla presentados en las secciones 4.2.1 y 4.2.2.2 respectivamente.

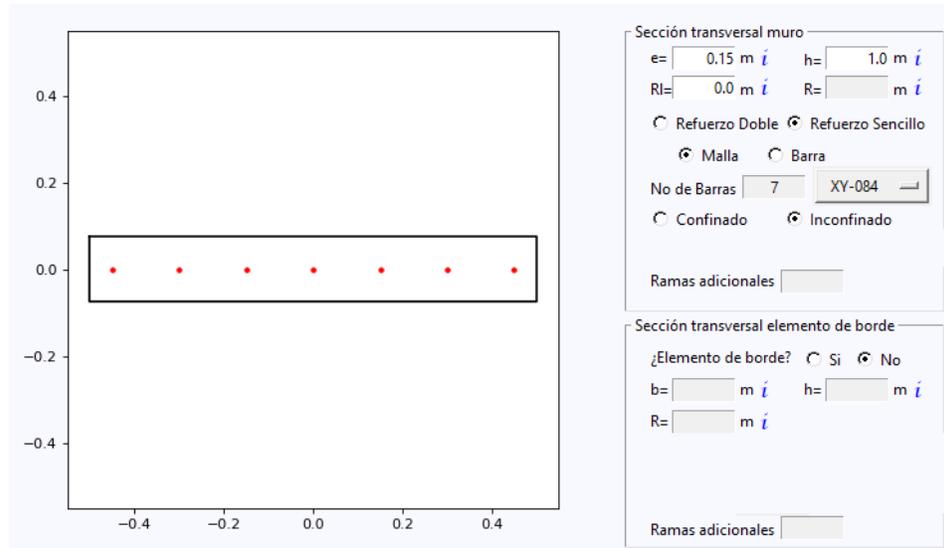


Figura 13 Muro no confinado refuerzo sencillo con malla electrosoldada

5.1.2. Muro no confinado reforzado con doble malla electrosoldada

Como se presenta en la Figura 14, la sección corresponde a un muro rectangular con doble refuerzo en malla electrosoldada; el modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto confinado y de la malla presentados en las secciones 4.2.1 y 4.2.2.2 respectivamente.

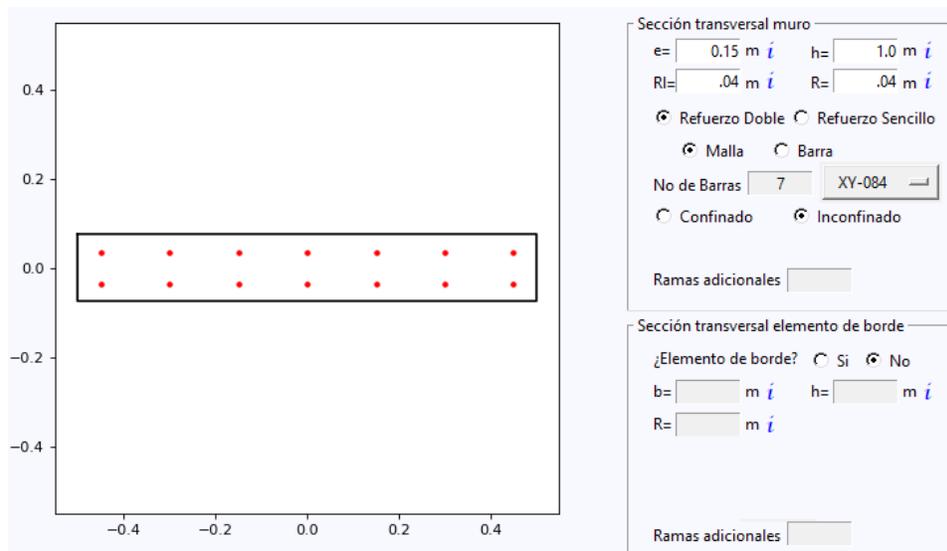


Figura 14 Muro no confinado reforzado con doble malla electrosoldada

5.1.3. Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla

Como se presenta en la Figura 15, la sección corresponde a un muro rectangular con un solo refuerzo en varilla, el modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto inconfinado y de la varilla presentados en las secciones 4.2.1 y 4.2.2.1 respectivamente.

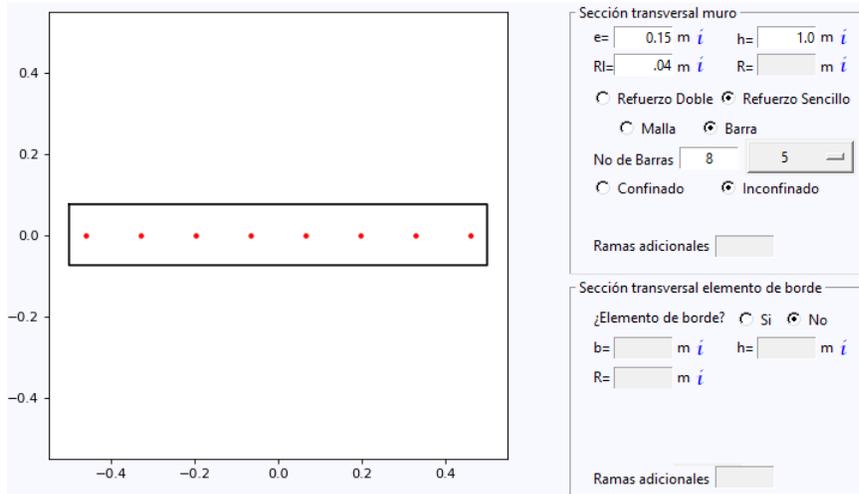


Figura 15 Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla

5.1.4. Muro no confinado refuerzo doble con varilla

Como se presenta en la Figura 16, la sección corresponde a un muro rectangular con doble refuerzo en varilla, el modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto inconfinado y de la varilla presentados en las secciones 4.2.1 y 4.2.2.1 respectivamente.

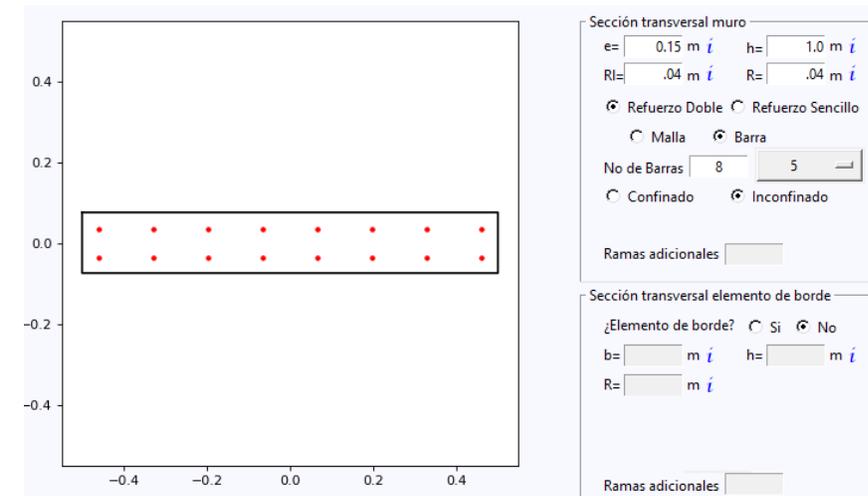


Figura 16 Muro no confinado refuerzo doble con varilla

5.1.5. Muro confinado con varilla

Como se presenta en la Figura 17, la sección corresponde a un muro rectangular con doble refuerzo en varilla y concreto confinado por medio de estribos, el modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto confinado dentro de los estribos, concreto inconfinado para el recubrimiento y de la varilla presentados en las secciones 4.2.1 y 4.2.2.1 respectivamente.

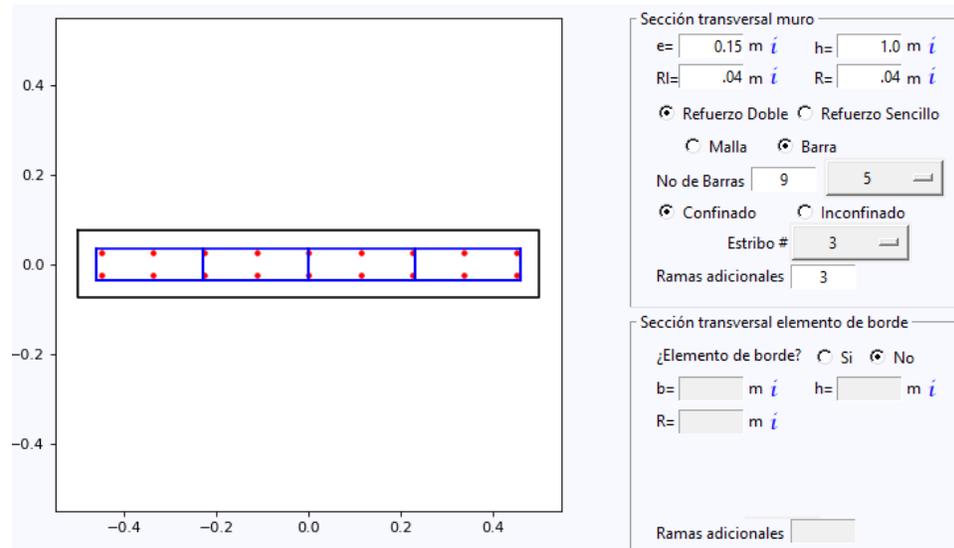


Figura 17 Muro confinado con varilla

5.1.6. Muro no confinado con refuerzo sencillo con malla electrosoldada y con elementos de borde

Como se presenta en la Figura 18, la sección corresponde a un muro rectangular con un solo refuerzo en malla electrosoldada y elemento de borde en sus extremos. El modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto confinado dentro de los estribos de los elementos de borde, concreto inconfinado para el recubrimiento de los elementos de borde y muro, de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.1. En cuanto a los modelos constitutivos del refuerzo longitudinal se define varilla en el elemento de borde y malla para el muro de acuerdo con lo presentado en las secciones 4.2.2.1 y 4.2.2.2 respectivamente.

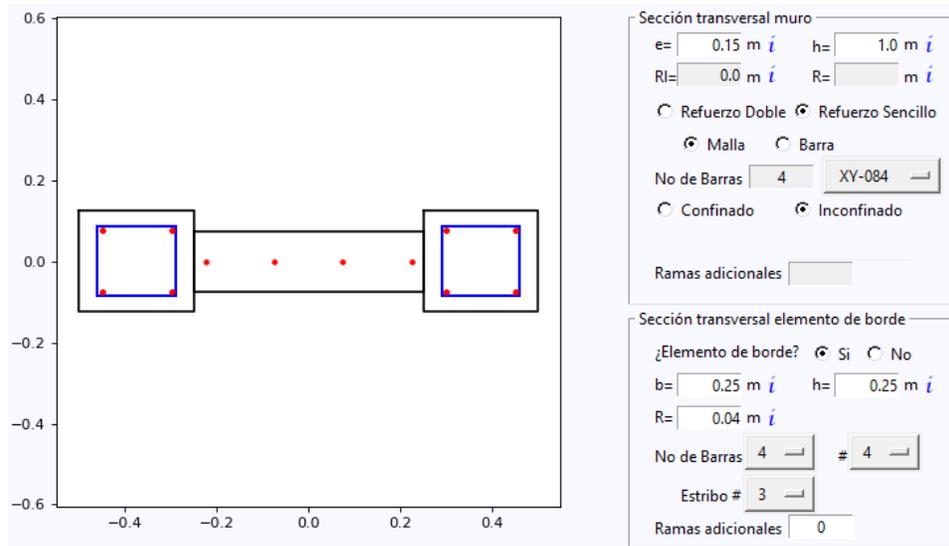


Figura 18 Muro no confinado refuerzo sencillo con malla electrosoldada y con elementos de borde

5.1.7. Muro no confinado refuerzo doble con malla electrosoldada y con elementos de borde

En la Figura 19 se observa la sección correspondiente a un muro rectangular con doble refuerzo en malla electrosoldada y elemento de borde en sus extremos. El modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto confinado dentro de los estribos de los elementos de borde, concreto inconfinado para el recubrimiento de los elementos de borde y muro de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.1. En cuanto a los modelos constitutivos del refuerzo longitudinal se define varilla en elemento de borde y malla para el muro de acuerdo con lo presentado en las secciones 4.2.2.1 y 4.2.2.2 respectivamente.

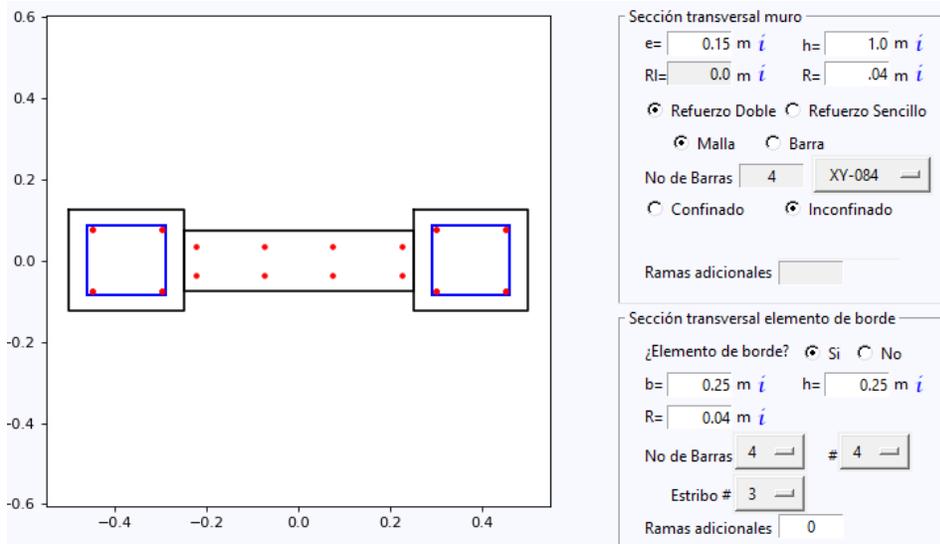


Figura 19 Muro no confinado refuerzo doble con malla electrosoldada y con elementos de borde

5.1.8. Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla y con elementos de borde

Como se presenta en la Figura 20, la sección corresponde a un muro rectangular con un solo refuerzo en varilla corrugada y elemento de borde en sus extremos. El modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto confinado dentro de los estribos de los elementos de borde, concreto inconfinado para el recubrimiento de los elementos de borde y muro de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.1. En cuanto a los modelos constitutivos del refuerzo longitudinal se define varilla de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.2.1

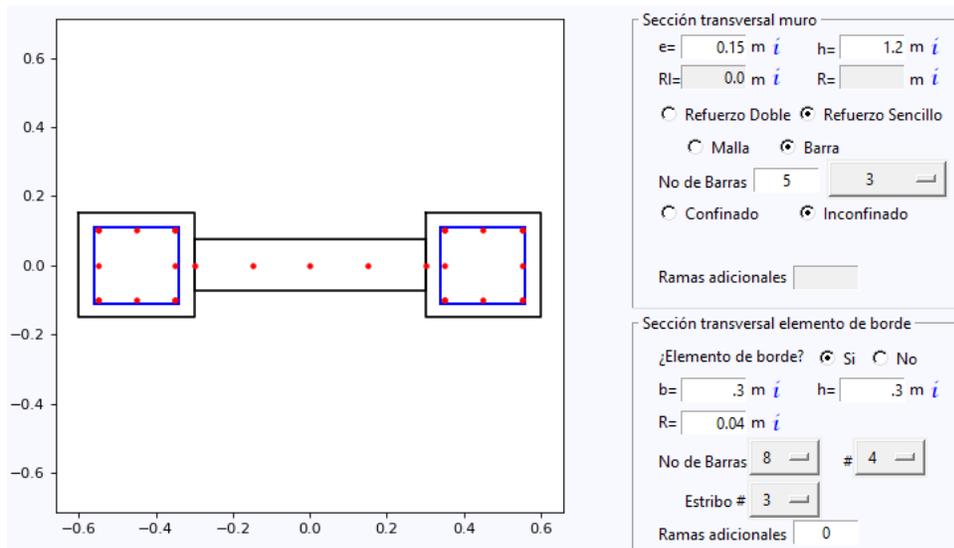


Figura 20 Muro no confinado refuerzo sencillo con varilla y con elementos de borde

5.1.9. Muro no confinado refuerzo doble con varilla y con elementos de borde

Como se presenta en la Figura 21, la sección corresponde a un muro rectangular con doble refuerzo en varilla corrugada y elemento de borde en sus extremos. El modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto confinado dentro de los estribos de los elementos de borde, concreto inconfinado para el recubrimiento de los elementos de borde y muro de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.1. En cuanto a los modelos constitutivos del refuerzo longitudinal se define varilla de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.2.1

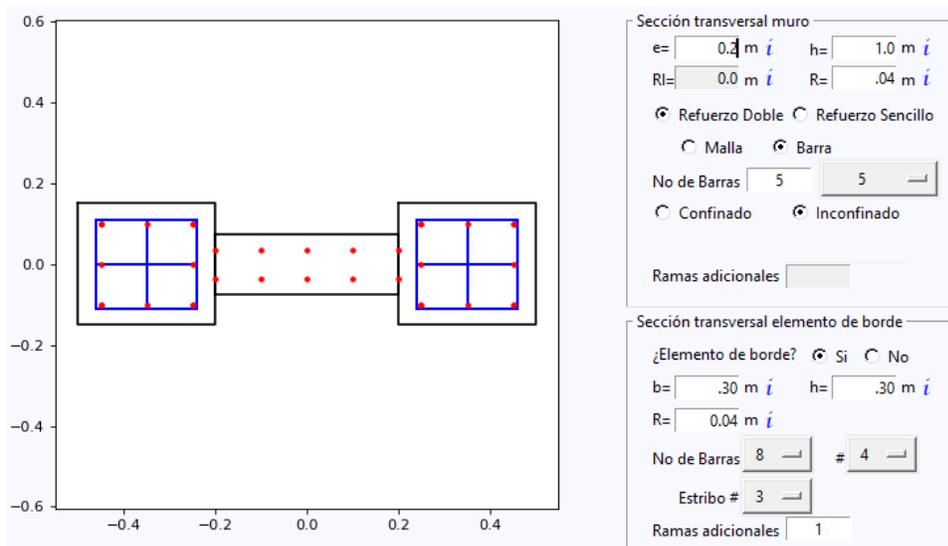


Figura 21 Muro no confinado refuerzo doble con varilla y con elementos de borde

5.1.10. Muro confinado con varilla y con elementos de borde

La sección de la Figura 22 corresponde a un muro rectangular con doble refuerzo en varilla corrugada y elemento de borde en sus extremos. El modelo se construye con los modelos constitutivos de concreto confinado dentro de los estribos de los elementos de borde, concreto inconfinado para el recubrimiento de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.1. En cuanto a los modelos constitutivos del refuerzo longitudinal se define varilla de acuerdo con lo presentado en la sección 4.2.2.1.

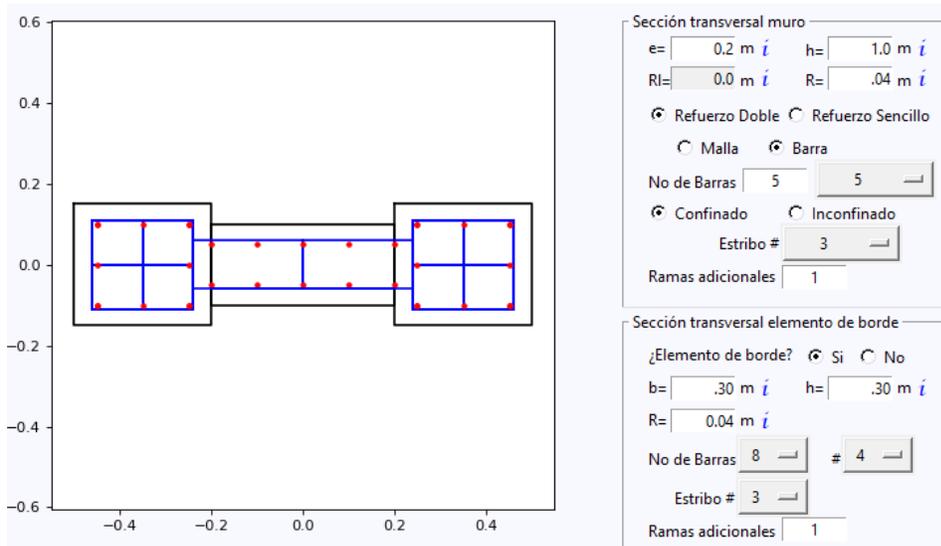


Figura 22 Muro confinado con varilla y con elementos de borde

5.2. Propiedades geométricas del acero y las mallas

Para las diferentes secciones que se pueden modelar en el programa se definieron las siguientes propiedades geométricas

5.2.1. Acero

El acero disponible en el programa momento curvatura 2.0 para aplicar a los muros, elementos de borde y estribos para los diferentes tipos de secciones está de acuerdo con la tabla C.3.5.3-2 de la NSR-10 (AIS, 2010) en la Tabla 1

Tabla 1. Propiedades Acero

Designación de la Barra	Diámetro de referencia en pulgadas	Dimensiones nominales			Masa [kg]
		Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Perímetro [mm]	
No. 2	1/4"	6.4	32	20	0.25
No. 3	3/8"	9.5	71	30	0.56
No. 4	1/2"	12.7	129	40	0.994
No. 5	5/8"	15.9	199	50	1.552
No. 6	3/4"	19.1	284	60	2.235
No. 7	7/8"	22.2	387	70	3.042
No. 8	1"	25.4	510	80	3.973
No. 9	1-1/8"	28.7	645	90	5.06
No. 10	1-1/4"	32.3	819	101.3	6.404
No. 11	1-3/8"	35.8	1006	112.5	7.907
No. 14	1-3/4"	43	1452	135.1	11.38
No. 18	2-1/4"	57.3	2581	180.1	20.24

5.2.2. Malla

Las mallas disponibles en el programa momento curvatura 2.0 para aplicar a las secciones de los muros se presenta en la Tabla 2 y está acorde con las mallas comerciales que se encuentran actualmente en el mercado colombiano.

Tabla 2. Propiedades Malla

Referencia	N° de barras por malla		Diámetro		Separación		Peso [kg]	Cuantía principal Nominal cm ² /m
	Long	Trans	Long [mm]	Trans [mm]	Long [mm]	Trans [mm]		
XY-084	16	24	4.0	4.0	150	250	15.1	0.84
XY-106	16	24	4.5	4.0	150	250	17.6	1.06
XY-131	16	24	5.0	4.0	150	250	20.4	1.31
XY-158	16	24	5.5	4.0	150	250	23.5	1.58
XY-221	16	24	6.5	4.0	150	250	30.6	2.21
XY-257	16	24	7.0	5.0	150	250	37.7	2.57
XY-335	16	24	8.0	5.0	150	250	46.6	3.35
XY-378	16	24	8.5	5.0	150	250	51.5	3.78
XX-050	10	24	4.0	4.0	250	250	11.5	0.50
XX-067	12	30	4.0	4.0	200	200	14.1	0.63
XX-084	16	40	4.0	4.0	150	150	18.8	0.84
XX-106	16	40	4.5	4.5	150	150	23.8	1.06
XX-131	16	40	5.0	5.0	150	150	29.3	1.32
XX-159	16	40	5.5	5.5	150	150	35.5	1.59
XX-188	16	40	6.0	6.0	150	150	42.2	1.88
XX-221	16	40	6.5	6.5	150	150	49.6	2.21
XX-257	16	40	7.0	7.0	150	150	57.4	2.57
XX-295	16	40	7.5	7.5	150	150	65.9	2.95
XX-335	16	40	8.0	8.0	150	150	75.1	3.35
XX-378	16	40	8.5	8.5	150	150	84.1	3.78
POP-50	8	12	4.0	4.0	250	250	4.8	0.50
POP-063	10	15	4.0	4.0	200	200	5.9	0.63
POP-084	14	20	4.0	4.0	150	150	8.1	0.84

5.3. Módulo de conceptualización

Para el desarrollo del módulo de conceptualización se realizó la programación del método manual aplicado a las configuraciones de muros presentadas anteriormente para las cuales se obtienen 4 puntos.

A continuación, se presenta un ejemplo de un muro, calculado con el módulo de conceptualización, de acuerdo con la siguiente configuración:

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.2	Refuerzo	doble	
h[m]	1.2	Tipo	Barra	
RI[m]	0	#		3
		No de		
R[m]	0.04	Barras		5
d[m]	1.144	Confinado	No	
d'[m]	0.056	Estribo #	NA	
		Ramas adic	NA	

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿elemento de borde?	Si			
b[m]	0.3	Barra #		4
		No de		
h[m]	0.3	Barras		8
R[m]	0.04	Estribo #		3
		Ramas adic		0

5.3.1. Pantalla principal del módulo de conceptualización

Se define la geometría del muro en la pantalla principal del módulo tal como se muestra en la Figura 23. Al lado izquierdo de la ventana se presenta el esquema de la sección definida. El lado derecho se divide en 4 secciones la primera nombrada “Sección transversal del muro” donde se definen todas las propiedades geométricas y refuerzo del muro; la segunda corresponde a la “Sección transversal elemento de borde” donde es posible definir las propiedades geométricas y el refuerzo del elemento de borde.

Posteriormente, debido a que por ser un elemento que está en capacidad de resistir carga axial, se considera la opción de agregar una carga P, la cual el programa la aplicará para el desarrollo de las ecuaciones de equilibrio como una carga de compresión aplicada en el centroide de la sección bruta.

Finalmente, en la parte inferior se permite al usuario definir los modelos constitutivos del concreto y del acero para pasar a la construcción del diagrama momento curvatura correspondiente.

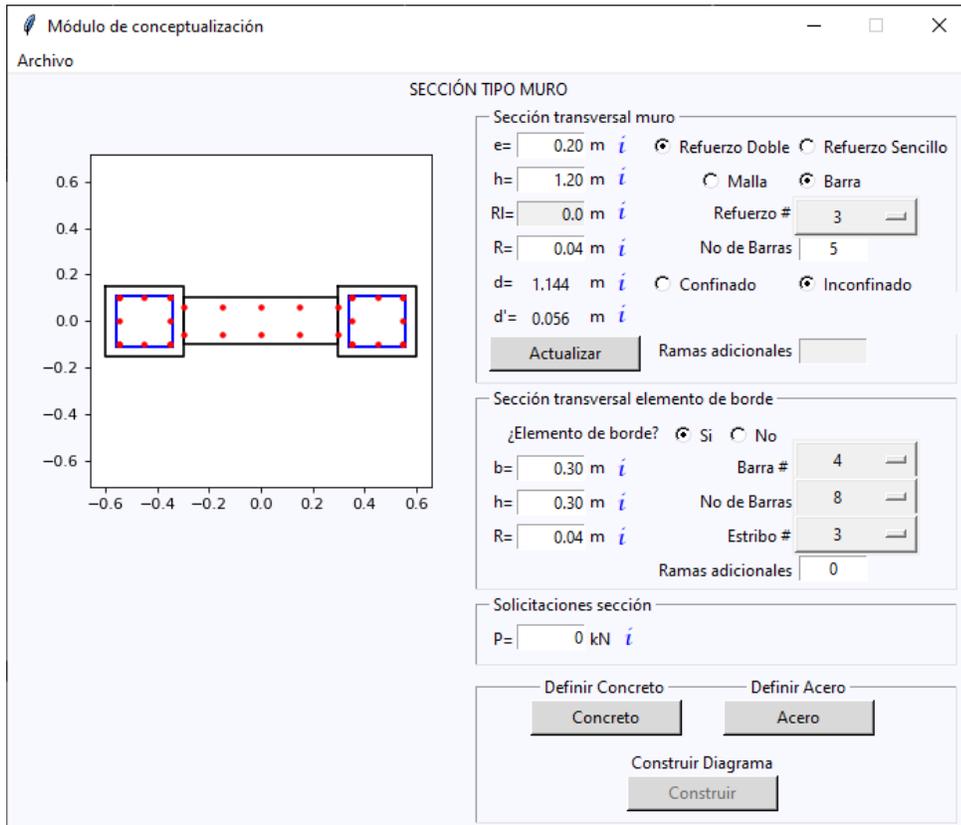


Figura 23 Definición parámetros de entrada módulo de conceptualización

En la pantalla principal a través de la opción archivo de la barra de herramientas, el usuario puede acceder a funciones como guardar la sección creada o abrir una sección guardada previamente.

5.3.2. Definición de los materiales

Para poder realizar los cálculos de los estados limites definidos para el diagrama, se deben definir los modelos constitutivos de los materiales de la sección. En la Figura 24 se presenta la ventana correspondiente a la definición del concreto, en la cual el usuario puede definir la resistencia a la compresión del concreto, el esfuerzo de fluencia del acero y la separación de los estribos (si los hay), así como definir las deformaciones unitarias que considere pertinentes para representar el comportamiento del material.

Una vez definido lo anterior se debe proceder con el botón “Establecer valores para la sección definida” con el cual el programa calcula las variables necesarias para elaborar el diagrama esfuerzo deformación de acuerdo con las ecuaciones definidas por el modelo de (Mander et al., 1988).

Por último, con el botón “calcular”, el cual el programa realiza el cálculo que determina la relación de esfuerzo deformación y lo imprime en el gráfico localizado en parte superior izquierda de la ventana, al mismo tiempo, indica el esfuerzo del concreto confinado (f'_{cc}) en la parte inferior derecha.

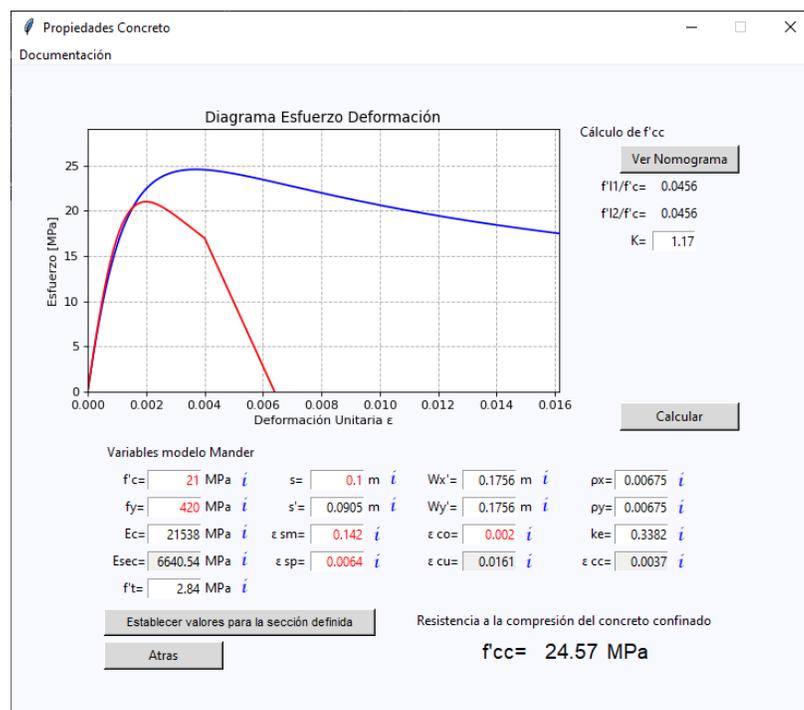


Figura 24 Definición modelos constitutivo concreto confinado e inconfinado

Para la definición del comportamiento del acero se accede a la ventana de la Figura 25, en la que se da la posibilidad al usuario, en primera instancia, de ajustar el valor del punto de fluencia. Sin embargo, también tiene la posibilidad de ajustar variables como lo son el módulo de elasticidad, la resistencia última, así como las deformaciones unitarias correspondientes.

Una vez establecidos estos valores se debe oprimir el botón calcular, el cual por medio del modelo constitutivo del acero de (Yun & Gardner, 2017) o el definido para la malla de (Carrillo et al., 2019), según corresponda, generará el diagrama esfuerzo deformación que se usará para el cálculo de fuerzas y momentos de cada uno de los puntos del diagrama.

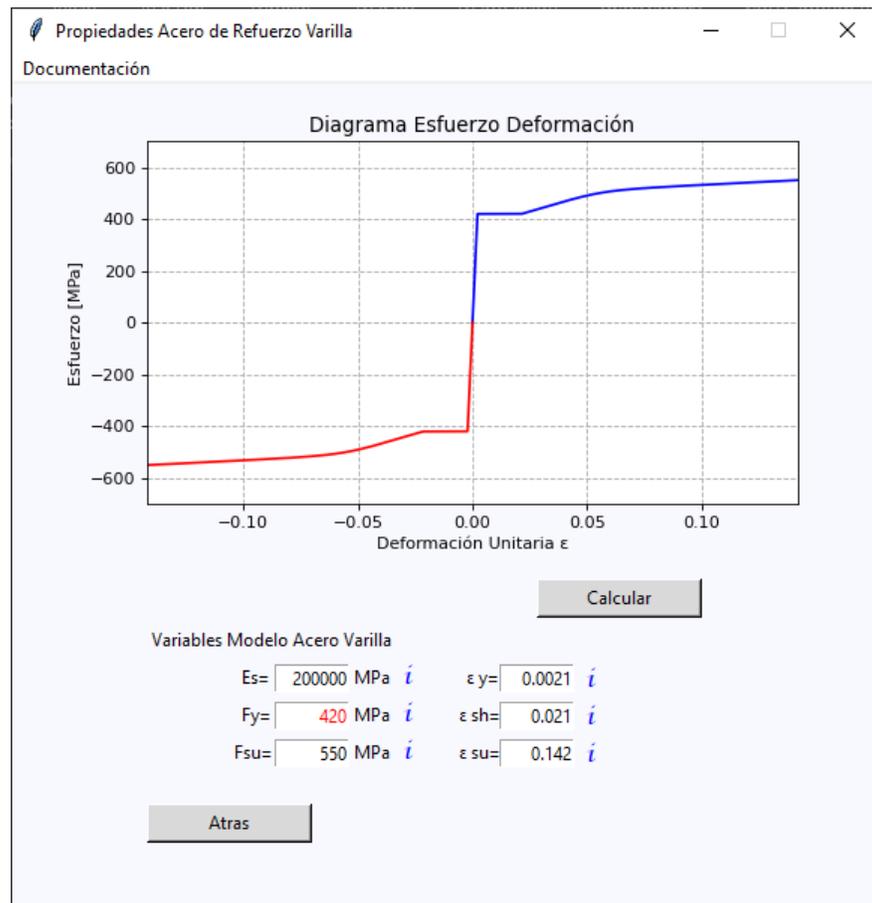


Figura 25 Definición modelos constitutivo acero

5.3.3. Construyendo el diagrama momento curvatura

Una vez establecidos los materiales es posible acceder a las ventanas donde se puede observar el resultado del cálculo para cada uno de los puntos del diagrama momento curvatura.

5.3.3.1. Punto 1 de 4

Este punto se calcula de acuerdo con lo expuesto en la sección 4.3.1.1. Una vez en la ventana que se presenta en la Figura 26, en la parte superior izquierda se observa el diagrama de deformaciones unitarias para las barras de los extremos de la sección, si el usuario quiere validar la información detallada debe acceder al botón "Reporte e-f", el cual abrirá una pequeña ventana que presenta de forma detallada y con convención de colores los esfuerzos de compresión (azul) y tensión (rojo) para cada una de las filas de refuerzo longitudinal que tenga la sección, tal como se muestra en la Figura 27.

Debajo de la gráfica de deformaciones unitarias se presenta el eje neutro para el punto 1, seguido del resumen de deformaciones unitarias y esfuerzos de los extremos de la sección.

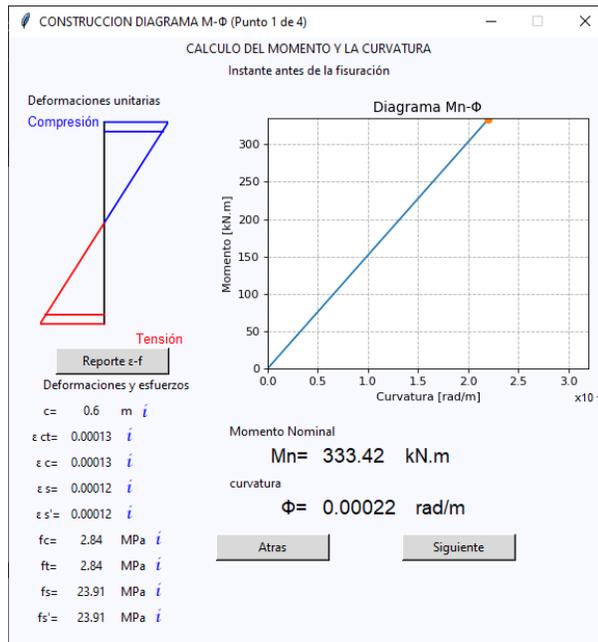


Figura 26 Resultado calculo punto 1 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.

ε	f [MPa]
0.00013	2.84
0.00012	23.91
0.0001	19.78
8e-5	15.65
7e-5	13.19
3e-5	6.59
0.0	0.0
3e-5	6.59
7e-5	13.19
8e-5	15.65
0.0001	19.78
0.00012	23.91
0.00013	2.84

Figura 27 Reporte detallado de esfuerzos calculado para el punto 1 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.

Para la obtención del punto 1 la programación realizada considera el centroide de la sección como el eje neutro, calcular el momento crítico definido como el estado limite que resiste el concreto en tensión y a partir de una distribución lineal y simétrica de esfuerzos tanto en el concreto como en el acero se obtienen los esfuerzos de toda la sección.

5.3.3.2. Punto 2 de 4

Este punto se calcula de acuerdo con lo expuesto en la sección 4.3.1.2. Una vez en la ventana que se presenta en la Figura 28, aparece la información en igual calidad de detalle que para el punto anterior. Además de presentar el diagrama, en la parte superior derecha, con los dos puntos ya calculados.

Programación del punto 2

En cuanto a la programación para el cálculo del punto 2, se define el esfuerzo de la barra más alejada en tensión como un valor constante correspondiente al valor del esfuerzo de fluencia definido por el usuario en el modelo constitutivo del refuerzo. Posteriormente, por medio de un ciclo se hacen las iteraciones necesarias, variando el eje neutro, hasta encontrar equilibrio (sumatoria de fuerzas igual a 0). Lo

anterior aplica cuando se haya definido un valor diferente a 0 para la sollicitación por carga axial de la sección.

Cuando el valor de la carga axial es 0 el programa simplemente realiza una serie de ecuaciones acorde al método de la sección transformada, la cual permite hallar el eje neutro.

Conociendo el eje neutro se plantea una distribución lineal de esfuerzos y de ahí se pueden calcular los valores que se presentan en el reporte de esfuerzo deformación correspondiente.

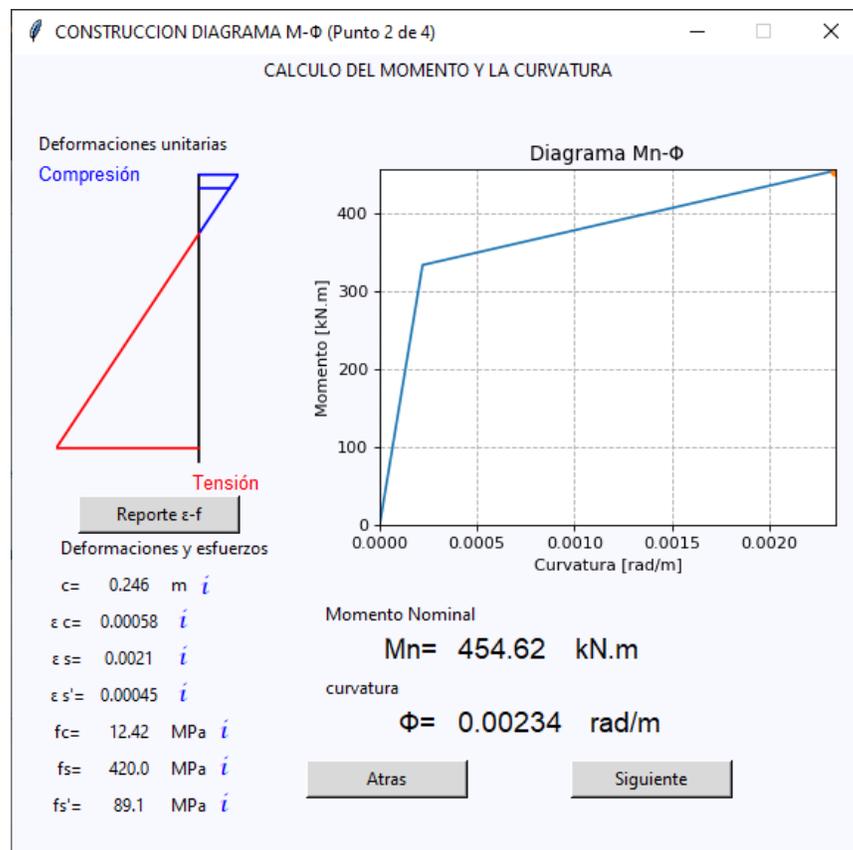


Figura 28 Resultado calculo punto 2 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.

5.3.3.3. Punto 3 de 4

Este punto se calcula de acuerdo con lo expuesto en la sección 4.3.1.3 Una vez en la ventana que se presenta en la Figura 29, aparece la información en igual calidad de detalle que para los puntos anteriores. Además de presentar el diagrama, en la parte superior derecha, con los tres puntos ya calculados.

Programación del punto 3

En cuanto a la programación para el cálculo del punto 3, se define el esfuerzo de la fibra más alejada en compresión como un valor constante correspondiente al valor de la deformación unitaria de la máxima resistencia a compresión del concreto confinado, definida por el usuario en el modelo constitutivo del concreto. Posteriormente, por medio de un ciclo se hacen las iteraciones necesarias, variando el eje neutro, hasta encontrar equilibrio (sumatoria de fuerzas igual a 0).

Conociendo el eje neutro se plantea una distribución lineal de esfuerzos en el acero de refuerzo y más la fuerza del bloque de compresión del concreto, es posible calcular los valores que se presentan en el reporte de esfuerzo deformación correspondiente.

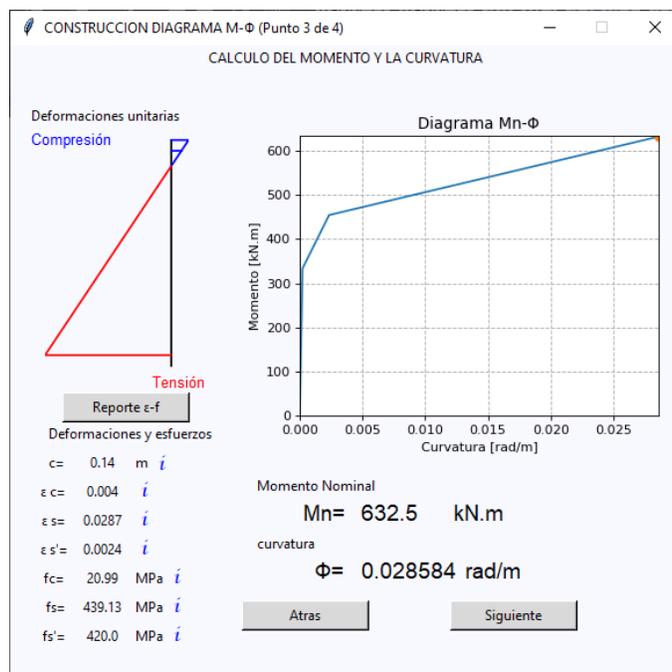


Figura 29 Resultado calculo punto 3 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.

5.3.3.4. Punto 4 de 4

El último punto se calcula de acuerdo con lo expuesto en la sección 4.3.1.4. Una vez en la ventana que se presenta en la Figura 30, aparece la información en igual calidad de detalle que para los puntos anteriores. Además de presentar el diagrama, en la parte superior derecha, con los tres puntos ya calculados. Como opción adicional aparece el botón “Exportar datos”, que permite al usuario generar un reporte editable que se puede abrir en Excel.

Programación del punto 4

En cuanto a la programación para el cálculo del punto 4 se tienen dos variaciones, que dependen si el usuario está verificando una sección que contenga concreto confinado.

- **Para secciones con concreto confinado**

Se define el esfuerzo del límite de la zona confinada en compresión como un valor constante correspondiente al valor de la deformación unitaria de la máxima resistencia a compresión del concreto confinado, definida por el usuario en el modelo constitutivo del concreto. Posteriormente, por medio de un ciclo se hacen las iteraciones necesarias, variando el eje neutro, sin exceder el valor de la resistencia a la rotura del acero en tensión, hasta encontrar equilibrio (sumatoria de fuerzas igual a 0).

Si durante el ciclo anterior es superada la tensión de rotura de la varilla más alejada en tensión, se detiene el ciclo, se define el esfuerzo de la varilla más alejada en tensión como un valor constante correspondiente al valor de la resistencia última, definida por el usuario en el modelo constitutivo del acero. Posteriormente, por medio de un ciclo se hacen las iteraciones necesarias, variando el eje neutro, hasta encontrar equilibrio (sumatoria de fuerzas igual a 0).

Conociendo el eje neutro se plantea una distribución lineal de esfuerzos en el acero de refuerzo y más la fuerza del bloque de compresión del concreto, es posible calcular los valores que se presentan en el reporte de esfuerzo deformación correspondiente.

- **Para secciones no tienen concreto confinado**

Se define el esfuerzo del límite del borde más alejado en compresión como un valor constante correspondiente al valor de la deformación unitaria en la que el concreto confinado se descascara y no soporta más carga, definida por el usuario en el modelo constitutivo del concreto. Posteriormente, por medio de un ciclo se hacen las iteraciones necesarias, variando el eje neutro, sin exceder el valor de la resistencia a la rotura del acero en tensión, hasta encontrar equilibrio (sumatoria de fuerzas igual a 0).

Si durante el ciclo anterior es superada la tensión de rotura de la varilla más alejada en tensión, se detiene el ciclo, se define el esfuerzo de la varilla más alejada en tensión como un valor constante correspondiente al valor de la resistencia última, definida por el usuario en el modelo constitutivo del acero. Posteriormente, por medio de un ciclo se hacen las iteraciones necesarias, variando el eje neutro, hasta encontrar equilibrio (sumatoria de fuerzas igual a 0).

Conociendo el eje neutro se plantea una distribución lineal de esfuerzos en el acero de refuerzo y más la fuerza del bloque de compresión del concreto, es posible calcular los valores que se presentan en el reporte de esfuerzo deformación correspondiente.

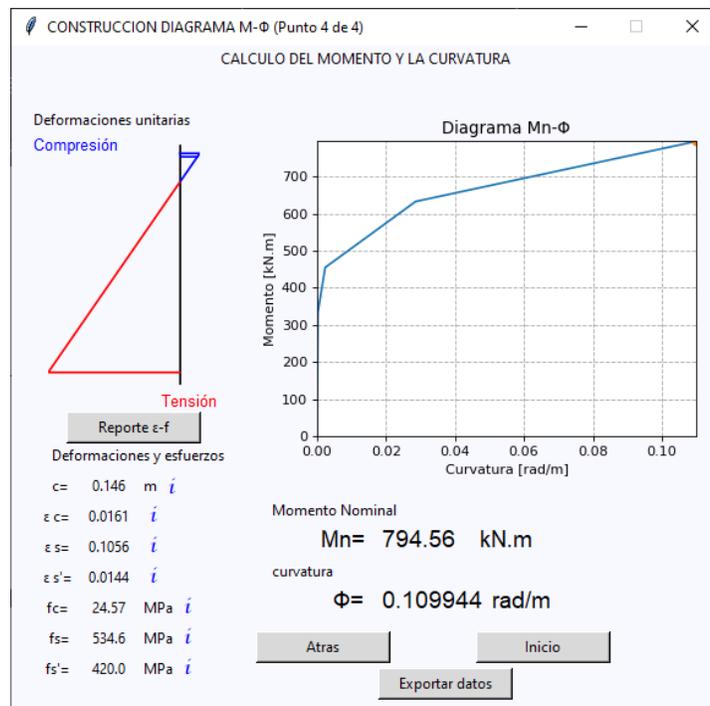


Figura 30 Resultado calculo punto 4 diagrama momento curvatura módulo de conceptualización.

5.4. 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 los muros indicados en la sección 5.1 del presente documento.

A continuación, se presenta un ejemplo de un muro, calculado con el módulo de conceptualización, de acuerdo con la siguiente configuración:

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.2	Refuerzo	doble	
h[m]	1.2	Tipo	Barra	
RI[m]	0	#		3
		No de		
R[m]	0.04	Barras		5
d[m]	1.144	Confinado	No	
d'[m]	0.056	Estribo #	NA	
		Ramas adic	NA	

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿elemento de borde?	Si			
b[m]	0.3	Barra #		4
		No de		
h[m]	0.3	Barras		8
R[m]	0.04	Estribo #		3
		Ramas adic		0

5.4.1. Pantalla principal módulo de ejecución

Se definen la geometría del muro en la pantalla principal del módulo tal como se muestra en la Figura 31. Al lado izquierdo de la ventana se presenta el esquema de la sección definida. El lado derecho se divide en 4 secciones la primera nombrada “Sección transversal del muro” donde se definen todas las propiedades geométricas y refuerzo del muro; la segunda corresponde “Sección transversal elemento de borde” donde es posible definir las propiedades geométricas y el refuerzo del elemento de borde.

Posteriormente, debido a que por ser un elemento que está en capacidad de resistir carga axial, se considera la opción de agregar una carga P, la cual el

programa la aplicará para el desarrollo de las ecuaciones de equilibrio como una carga de compresión aplicada en el centroide de la sección bruta.

Finalmente, en la parte inferior se permite al usuario definir los modelos constitutivos del concreto y del acero para de este modelo proceder con la construcción del diagrama momento curvatura correspondiente.

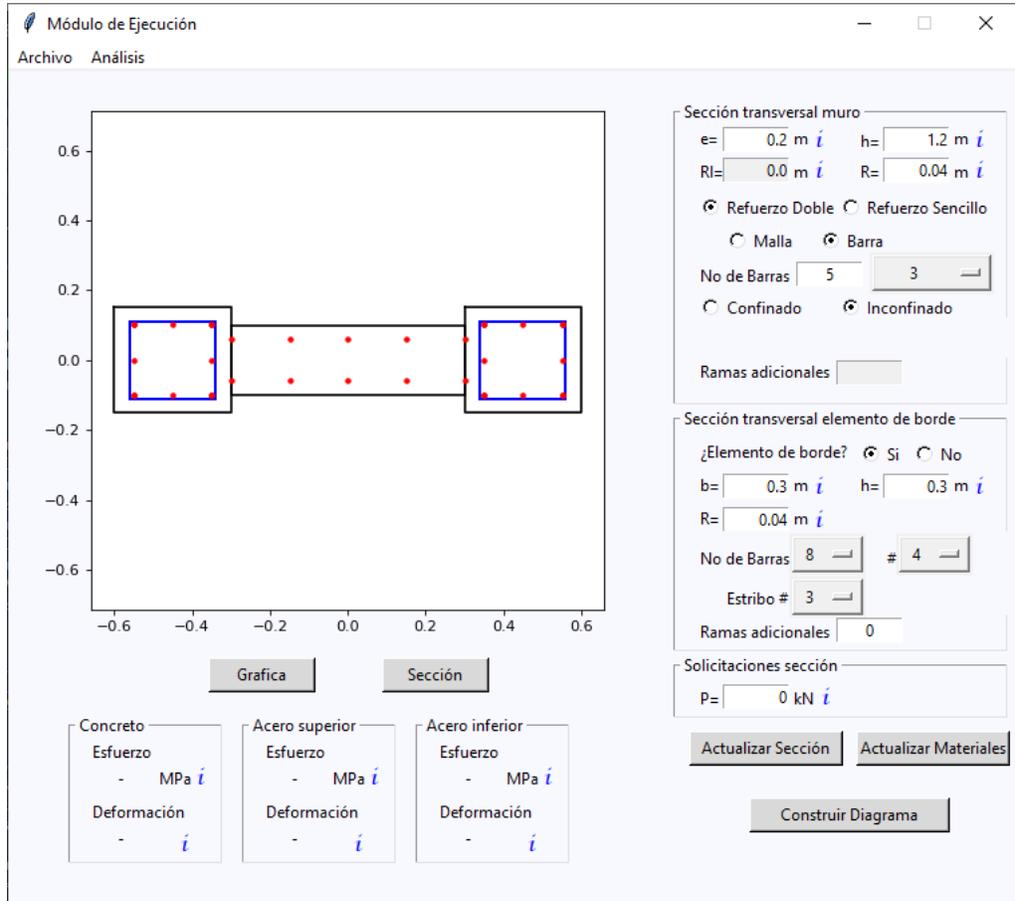


Figura 31 Pantalla principal módulo de ejecución

En la pantalla principal a través de la opción archivo de la barra de herramientas, el usuario puede acceder a funciones como guardar la sección creada o abrir una sección guardada previamente. Adicionalmente, una vez ya haya generado el diagrama en la opción “Análisis” se le permite visualizar el mecanismo de falla o exportar los datos en un reporte que puede ser abierto en Excel.

5.4.1.1. Definición de los materiales

Se debe continuar con la definición de los materiales, los cuales son calculados con los modelos constitutivos presentados en la sección 4 y que serán requeridos para definir los materiales en la rutina de Openseespy (Zhu et al., 2018).

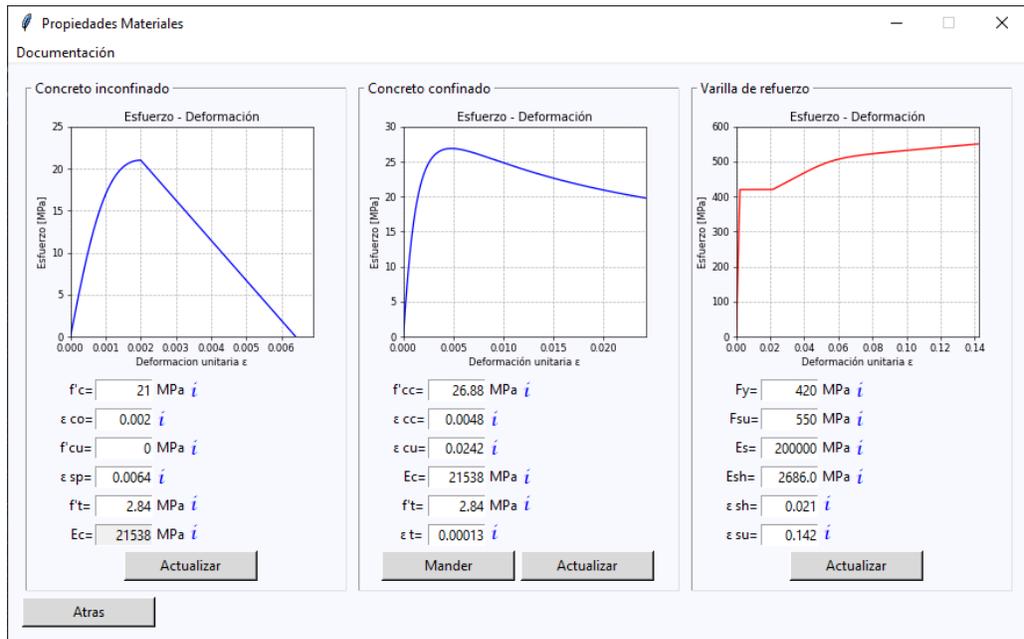


Figura 32 Definición modelos constitutivos módulo de ejecución

Programación de los materiales:

Cuando el usuario define y calcula los materiales, estos se vuelven constantes que alimentan los argumentos de las funciones de los modelos constitutivos que ofrece Opensees.

5.4.1.2. Construyendo el diagrama momento curvatura

Una vez establecidos los materiales se procede a calcular el diagrama momento curvatura por medio Openseespy (Zhu et al., 2018).

En cuanto a la programación que permite elaborar el diagrama momento curvatura, se generaron 8 funciones, en las cuales por medio de argumentos se indica la geometría y materiales, que permiten construir el modelo de

fibras para cada tipo de muro contemplado en esta herramienta, Todas las secciones se subdividen en fibras de 1 cm x 1cm.

Opensees calcula una curvatura para un momento dado, por ende, para poder graficar el diagrama se requiere un ciclo condicionado a terminar cuando alguno de los elementos que componen la sección llegue al estado último de servicio definido por el usuario en los modelos constitutivos del material; cada vez que se ejecuta el ciclo, los valores de momento y curvatura son almacenados para poder construir la curva que se presenta en la parte derecha de la ventana principal del módulo de ejecución.

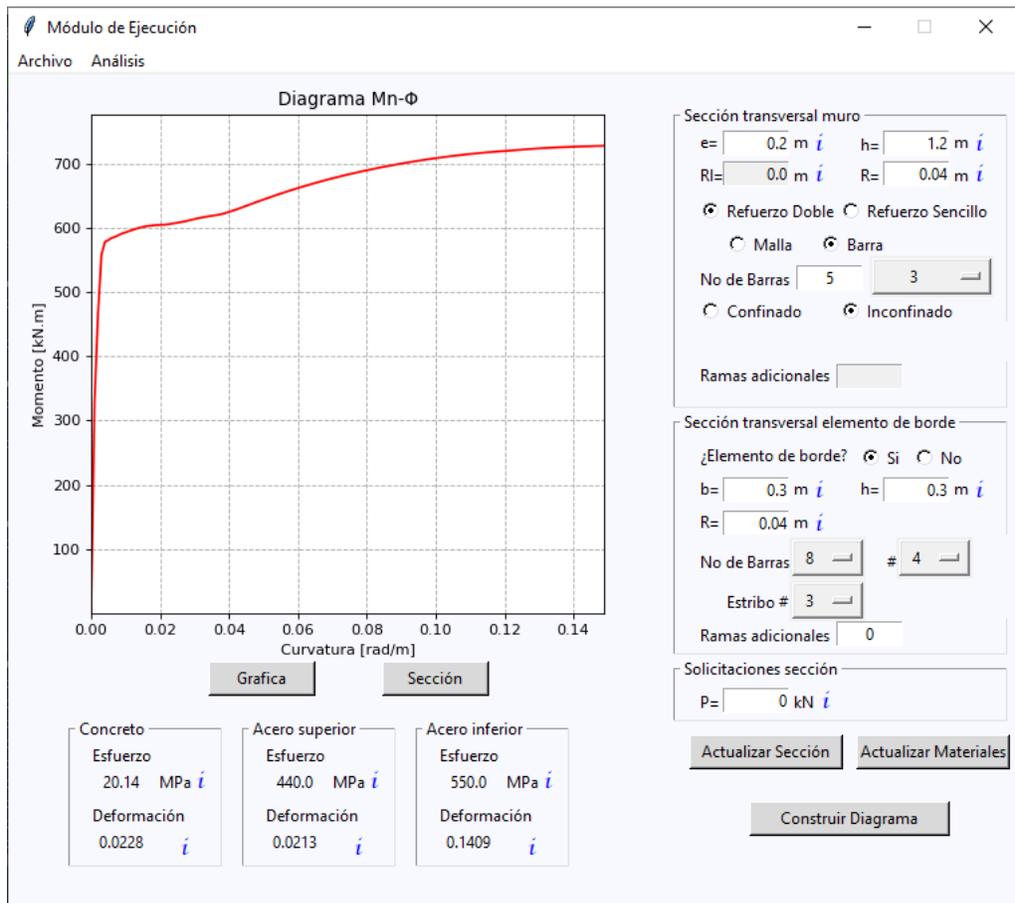


Figura 33 Resultado calculo por medio Openseespy diagrama momento curvatura módulo de ejecución.

5.4.2. Validación

Para realizar la validación de los módulos del programa, se analizarán 3 diferentes secciones y se lleva a cabo la respectiva comparación con los resultados de modelos realizados por medio del software Xtract.

A continuación, se presentan las 3 secciones empleadas para el proceso de validación:

5.4.2.1. Sección de validación 1

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.25	Refuerzo	doble	
h[m]	1.5	Tipo	Barra	
RI[m]	0	#		3
		No de		
R[m]	0.04	Barras		8
d[m]	1.444	Confinado	No	
d'[m]	0.056	Estribo #	NA	
		Ramas adic		

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?		Si		
b[m]	0.25	Barra #		4
		No de		
h[m]	0.25	Barras		4
R[m]	0.04	Estribo #		3
		Ramas adic		0

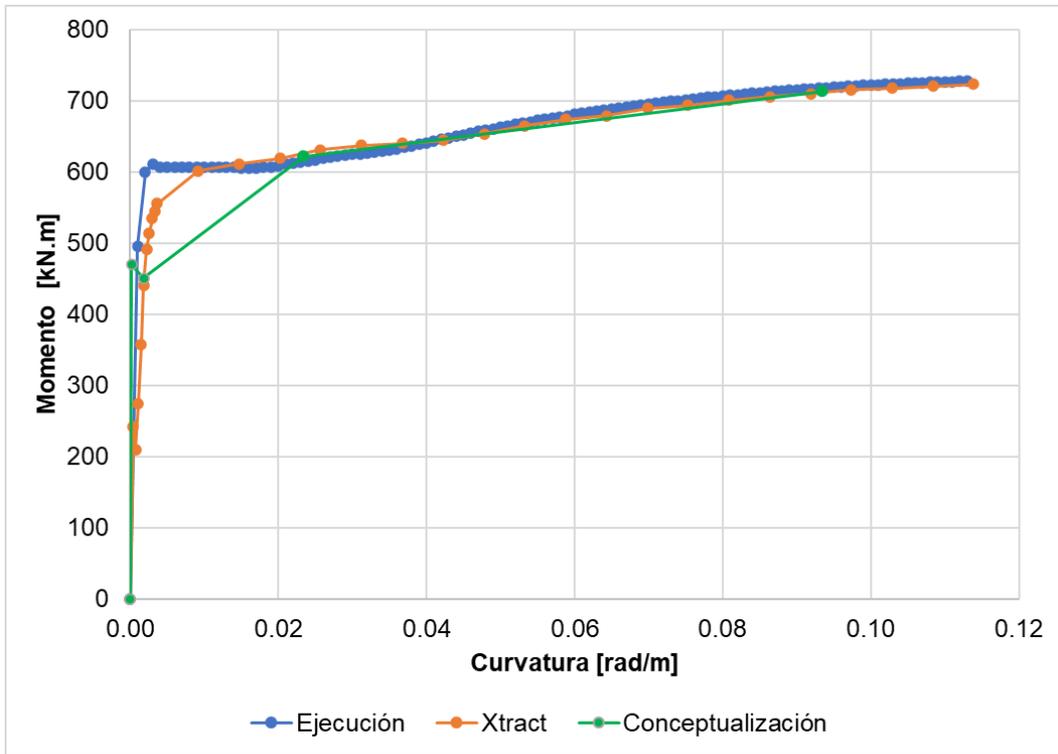


Figura 34 Comparación diagramas momento -curvatura sección de validación 1.

5.4.2.2. Sección de validación 2

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.15	Refuerzo	sencillo
h[m]	1.5	Tipo	Malla
RI[m]	0	#	XY-084
		No de	
R[m]		Barras	7
d[m]	1.444	Confinado	No
d'[m]	0.056	Estribo #	NA
		Ramas adic	NA

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?	Si		
b[m]	0.25	Barra #	4
		No de	
h[m]	0.25	Barras	4
R[m]	0.04	Estribo #	3
		Ramas adic	0

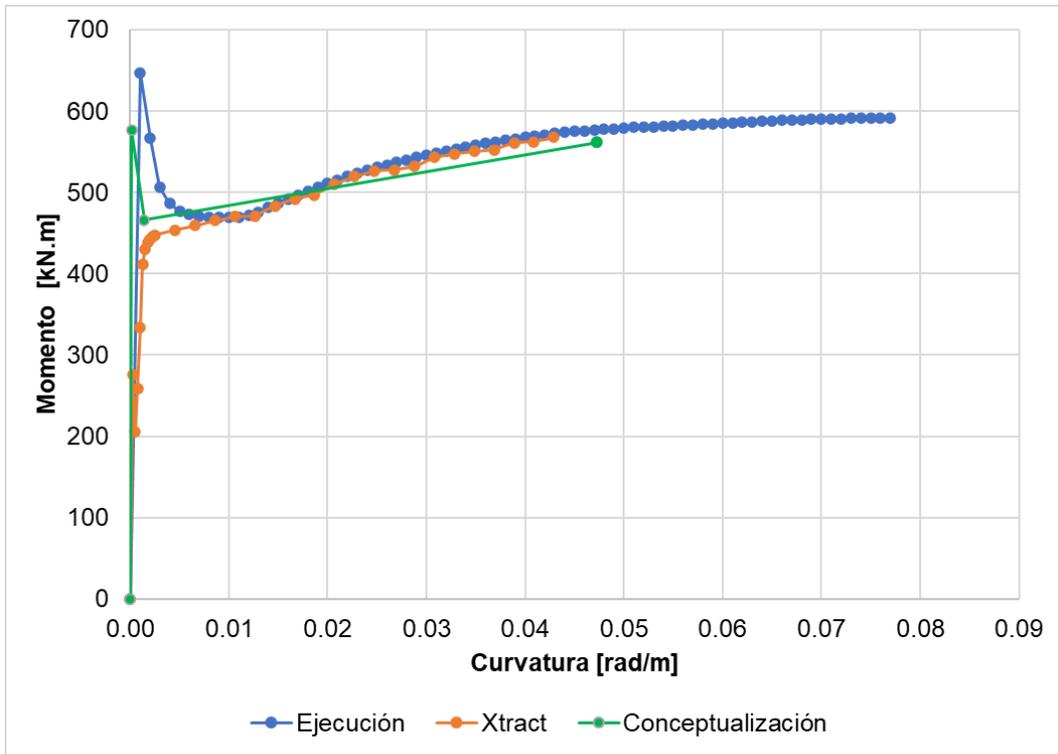


Figura 35 Comparación diagramas momento -curvatura sección de validación 2.

5.4.2.3. Propiedades sección de validación 3

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.25	Refuerzo	doble	
h[m]	1.5	Tipo	Barra	
RI[m]	0.04	#		5
		No de		
R[m]	0.04	Barras		7
d[m]	1.443	Confinado	Si	
d'[m]	0.057	Estribo #		3
		Ramas adic		5

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?	No		
b[m]	NA	Barra #	NA
		No de	
h[m]	NA	Barras	NA
R[m]	NA	Estribo #	NA
		Ramas adic	NA

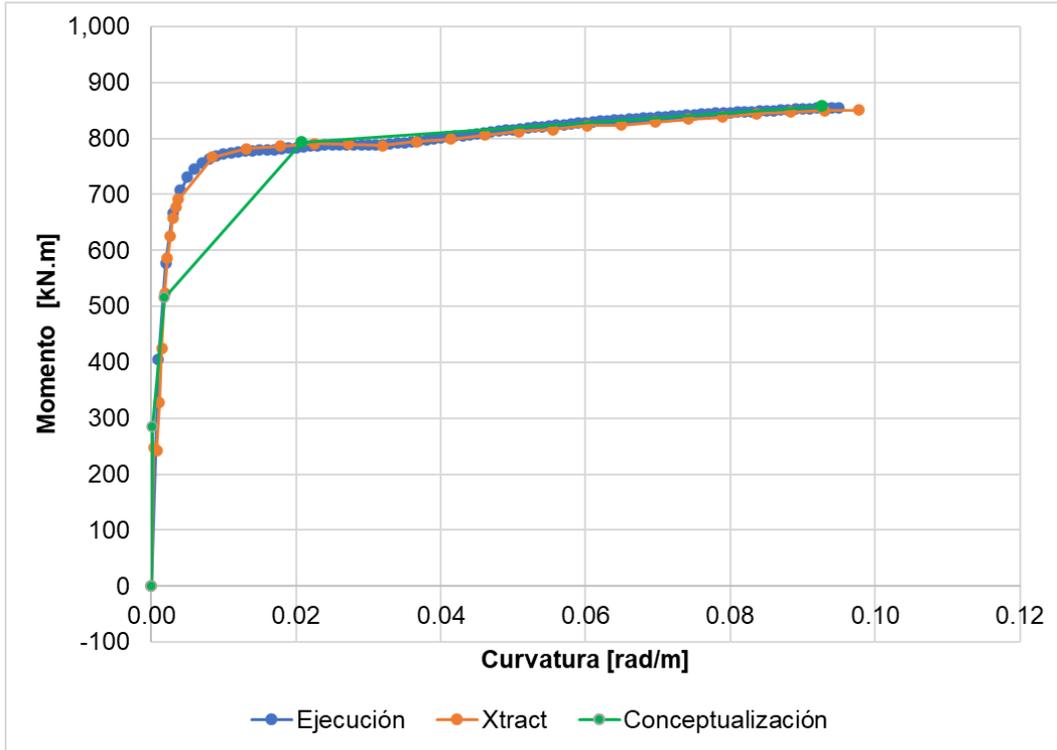


Figura 36 Comparación diagramas momento -curvatura sección de validación 3.

6. Conclusiones y Recomendaciones

- 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.
- De acuerdo con lo presentado en la Tabla 3 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.

Tabla 3. Relación curvatura entre resultados obtenidos del módulo de ejecución y Xtract

Sección	Ejecución		Xtract		Relación curvatura
	Momento [kN-m]	Curvatura [rad/m]	Momento [kN-m]	Curvatura [rad/m]	
1	723.03	0.101	723.5	0.1139	89%
2	567.9	0.04	567.9	0.0429	93%
3	850.45	0.086	850.6	0.0978	88%

- 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

7. Bibliografía

- AIS, 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>

8. Anexos

8.1. Reportes de las secciones de validación

8.1.1. Módulo de Ejecución

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 MOMENTO CURVATURA V2.0
 CALCULO DIAGRAMA
 MÓDULO DE EJECUCION

PROPIEDADES DE LA SECCION

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.25	Refuerzo	dobles
h[m]	1.5	Tipo	Barra
Rl[m]	0	#	3
R[m]	0.04	No de Barras	8
Confinado	No		
Estribo #	NA		
		Ramas adic	

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?	Si		
b[m]	0.25	Barra #	4
h[m]	0.25	No de Barras	4
R[m]	0.04	Estribo #	3
		Ramas adic	0

SOLICITACIONES SECCION

P[kN] 0

Punto	M[kN.m]	Curvatura[rad/m]
0	2.13E-07	-9.99E-10
1	495.190927	0.001
2	599.907913	0.002
3	611.266711	0.003
4	607.38656	0.004
5	607.090397	0.005
6	607.463527	0.006
7	607.724619	0.007
8	607.356817	0.008
9	606.838827	0.009
10	606.990963	0.01
11	607.180831	0.011
12	607.041425	0.012
13	606.817026	0.013

14	606.563127	0.014
15	606.017634	0.015
16	605.770576	0.016
17	605.777769	0.017
18	606.555147	0.018
19	607.439241	0.019
20	608.972833	0.02
21	610.734792	0.021
22	612.42674	0.022
23	614.058081	0.023
24	615.840122	0.024
25	617.534048	0.025
26	619.104164	0.026
27	620.55997	0.027
28	622.063932	0.028
29	623.501691	0.029
30	624.83109	0.03
31	626.016626	0.031
32	627.06862	0.032
33	628.020148	0.033
34	629.328248	0.034
35	630.866673	0.035
36	632.796708	0.036
37	634.719588	0.037
38	636.915006	0.038
39	639.050318	0.039
40	641.451142	0.04
41	643.797354	0.041
42	646.089588	0.042
43	648.32974	0.043
44	650.547976	0.044
45	652.776143	0.045
46	654.95792	0.046
47	657.093085	0.047
48	659.182856	0.048
49	661.228311	0.049
50	663.230477	0.05
51	665.190251	0.051
52	667.108478	0.052
53	668.986001	0.053
54	670.823506	0.054

55	672.621685	0.055
56	674.381296	0.056
57	676.10293	0.057
58	677.787257	0.058
59	679.434842	0.059
60	681.046273	0.06
61	682.622102	0.061
62	684.171727	0.062
63	685.711302	0.063
64	687.225804	0.064
65	688.706467	0.065
66	690.153845	0.066
67	691.568483	0.067
68	692.950772	0.068
69	694.301198	0.069
70	695.620275	0.07
71	696.908386	0.071
72	698.165968	0.072
73	699.39345	0.073
74	700.591322	0.074
75	701.759927	0.075
76	702.899647	0.076
77	704.010917	0.077
78	705.094134	0.078
79	706.149588	0.079
80	707.177731	0.08
81	708.177071	0.081
82	709.149578	0.082
83	710.095783	0.083
84	711.016047	0.084
85	711.910729	0.085
86	712.780182	0.086
87	713.624754	0.087
88	714.444792	0.088
89	715.240641	0.089
90	716.012639	0.09
91	716.761127	0.091
92	717.486439	0.092
93	718.188911	0.093
94	718.868875	0.094
95	719.526663	0.095

96	720.162606	0.096
97	720.777037	0.097
98	721.370285	0.098
99	721.942682	0.099
100	722.494562	0.1
101	723.02626	0.101
102	723.538112	0.102
103	724.030461	0.103
104	724.503651	0.104
105	724.958034	0.105
106	725.393967	0.106
107	725.811819	0.107
108	726.213716	0.108
109	726.602065	0.109
110	726.978395	0.11
111	727.341084	0.111
112	727.687784	0.112
113	728.019048	0.113
114	728.335561	0.114

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 MOMENTO CURVATURA V2.0
 CALCULO DIAGRAMA
 MÓDULO DE EJECUCION

PROPIEDADES DE LA SECCION

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.15	Refuerzo	sencillo
h[m]	2	Tipo	Malla
Rl[m]	0	#	XY-084
R[m]		No de Barras	11
Confinado	No		
Estribo #	NA		
		Ramas adic	NA

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?	Si		
b[m]	0.25	Barra #	4
h[m]	0.25	No de Barras	4
R[m]	0.04	Estribo #	3
		Ramas adic	0

SOLICITACIONES SECCION

P[kN]	0
-------	---

Punto	M[kN.m]	Curvatura[rad/m]
0	2.99E-07	-4.56E-10
1	647.032774	0.001
2	566.463858	0.002
3	507.067806	0.003
4	486.364597	0.004
5	477.423169	0.005
6	473.074707	0.006
7	470.419948	0.007
8	469.491355	0.008
9	469.221476	0.009
10	469.375724	0.01
11	469.862979	0.011
12	471.88308	0.012
13	476.092667	0.013

14	481.495364	0.014
15	486.801963	0.015
16	492.010054	0.016
17	497.080439	0.017
18	501.845315	0.018
19	506.589864	0.019
20	511.080909	0.02
21	515.410038	0.021
22	519.503935	0.022
23	523.398791	0.023
24	527.124712	0.024
25	530.611137	0.025
26	533.94926	0.026
27	537.144133	0.027
28	540.158667	0.028
29	543.036294	0.029
30	545.804972	0.03
31	548.466659	0.031
32	551.025995	0.032
33	553.485384	0.033
34	555.846366	0.034
35	558.109644	0.035
36	560.2748	0.036
37	562.33768	0.037
38	564.296734	0.038
39	566.147582	0.039
40	567.897174	0.04
41	569.549126	0.041
42	571.08196	0.042
43	572.504636	0.043
44	573.816876	0.044
45	575.018423	0.045
46	576.108042	0.046
47	577.08298	0.047
48	577.937745	0.048
49	578.609903	0.049
50	579.294689	0.05
51	579.908975	0.051
52	580.411577	0.052
53	580.836799	0.053
54	581.542657	0.054

55	582.159943	0.055
56	582.830317	0.056
57	583.386205	0.057
58	584.05266	0.058
59	584.654513	0.059
60	585.218369	0.06
61	585.883995	0.061
62	586.518491	0.062
63	587.103624	0.063
64	587.640524	0.064
65	588.130323	0.065
66	588.574168	0.066
67	589.063461	0.067
68	589.524267	0.068
69	589.94303	0.069
70	590.320999	0.07
71	590.659531	0.071
72	590.938221	0.072
73	591.216461	0.073
74	591.439606	0.074
75	591.628989	0.075
76	591.786275	0.076
77	591.913463	0.077

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
MOMENTO CURVATURA V2.0
CALCULO DIAGRAMA
MÓDULO DE EJECUCION

PROPIEDADES DE LA SECCION

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.25	Refuerzo	doble
h[m]	1.5	Tipo	Barra
Rl[m]	0.04	#	5
R[m]	0.04	No de Barras	7
Confinado	Si		
Estribo #		3	
		Ramas adic	5

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?	No		
b[m]	NA	Barra #	NA
h[m]	NA	No de Barras	NA
R[m]	NA	Estribo #	NA
		Ramas adic	NA

SOLICITACIONES SECCION

P[kN]	0
-------	---

Punto	M[kN.m]	Curvatura[rad/m]
0	-8.89E-18	1.97E-23
1	405.066193	0.001
2	576.678839	0.002
3	666.938476	0.003
4	707.646375	0.004
5	730.981393	0.005
6	745.151324	0.006
7	756.494774	0.007
8	764.398043	0.008
9	768.901949	0.009
10	771.768234	0.01
11	773.803636	0.011

12	775.619224	0.012
13	777.111055	0.013
14	778.106212	0.014
15	779.024671	0.015
16	779.62159	0.016
17	780.067426	0.017
18	781.642617	0.018
19	782.923194	0.019
20	783.880796	0.02
21	784.78372	0.021
22	786.25078	0.022
23	787.410883	0.023
24	788.245794	0.024
25	788.81183	0.025
26	789.069918	0.026
27	788.934202	0.027
28	788.716215	0.028
29	788.443484	0.029
30	787.99827	0.03
31	788.08701	0.031
32	788.700818	0.032
33	789.894798	0.033
34	791.461632	0.034
35	793.081396	0.035
36	794.671568	0.036
37	796.240949	0.037
38	797.720527	0.038
39	799.265051	0.039
40	800.792377	0.04
41	802.34412	0.041
42	804.006097	0.042
43	805.693532	0.043
44	807.266589	0.044
45	808.81214	0.045
46	810.244508	0.046
47	811.79555	0.047
48	813.316447	0.048
49	814.800905	0.049
50	816.257108	0.05
51	817.619119	0.051
52	818.997372	0.052

53	820.304344	0.053
54	821.488872	0.054
55	822.699524	0.055
56	823.936315	0.056
57	825.172367	0.057
58	826.42004	0.058
59	827.640698	0.059
60	828.783246	0.06
61	829.850137	0.061
62	830.953095	0.062
63	832.002488	0.063
64	832.99454	0.064
65	833.927568	0.065
66	834.893889	0.066
67	835.814988	0.067
68	836.792554	0.068
69	837.733405	0.069
70	838.659209	0.07
71	839.594994	0.071
72	840.490971	0.072
73	841.350189	0.073
74	842.172338	0.074
75	842.957018	0.075
76	843.759117	0.076
77	844.531153	0.077
78	845.253774	0.078
79	845.941943	0.079
80	846.595495	0.08
81	847.213968	0.081
82	847.855888	0.082
83	848.475695	0.083
84	849.156385	0.084
85	849.812994	0.085
86	850.452099	0.086
87	851.082509	0.087
88	851.703651	0.088
89	852.325632	0.089
90	852.935184	0.09
91	853.521488	0.091
92	854.08635	0.092
93	854.652718	0.093

94	855.235403	0.094
95	855.80975	0.095

8.1.2. Módulo de Conceptualización

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 MOMENTO CURVATURA V2.0
 CALCULO DIAGRAMA
 MÓDULO DE CONCEPTUALIZACION

PROPIEDADES DE LA SECCION

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.25	Refuerzo	doble
h[m]	1.5	Tipo	Barra
Rl[m]	0	#	3
R[m]	0.04	No de Barras	8
d[m]	1.444	Confinado	No
d'[m]	0.056	Estribo #	NA
		Ramas adic	

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?	Si		
b[m]	0.25	Barra #	4
h[m]	0.25	No de Barras	4
R[m]	0.04	Estribo #	3
		Ramas adic	0

SOLICITACIONES SECCION

P[kN] 0

Punto	M[kN.m]	Curvatura[rad/m]
0	0	0
1	470.23	0.000176
2	451.13	0.001798
3	621.37	0.023464
4	713.35	0.093521

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 MOMENTO CURVATURA V2.0
 CALCULO DIAGRAMA
 MÓDULO DE CONCEPTUALIZACION

PROPIEDADES DE LA SECCION

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.15	Refuerzo	sencillo
h[m]	2	Tipo	Malla
Rl[m]	0	#	XY-084
R[m]		No de Barras	11
d[m]	1.944	Confinado	No
d'[m]	0.056	Estribo #	NA
		Ramas adic	NA

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde?	Si		
b[m]	0.25	Barra #	4
h[m]	0.25	No de Barras	4
R[m]	0.04	Estribo #	3
		Ramas adic	0

SOLICITACIONES SECCION

P[kN] 0

Punto	M[kN.m]	Curvatura[rad/m]
0	0	0
1	577.05	0.000132
2	465.97	0.001435
3	572.08	0.040914
4	550.19	0.045107

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 MOMENTO CURVATURA V2.0
 CALCULO DIAGRAMA
 MÓDULO DE CONCEPTUALIZACION

PROPIEDADES DE LA SECCION

SECCION TRANSVERSAL MURO

e[m]	0.25	Refuerzo	doble
h[m]	1.5	Tipo	Barra
RI[m]	0.04	#	5
R[m]	0.04	No de Barras	7
d[m]	1.443	Confinado	Si
d'[m]	0.057	Estribo #	3
		Ramas adic	5

SECCION TRANSVERSAL ELEMENTO DE BORDE

¿Elemento de borde? No

b[m]	NA	Barra #	NA
h[m]	NA	No de Barras	NA
R[m]	NA	Estribo #	NA
		Ramas adic	NA

SOLICITACIONES SECCION

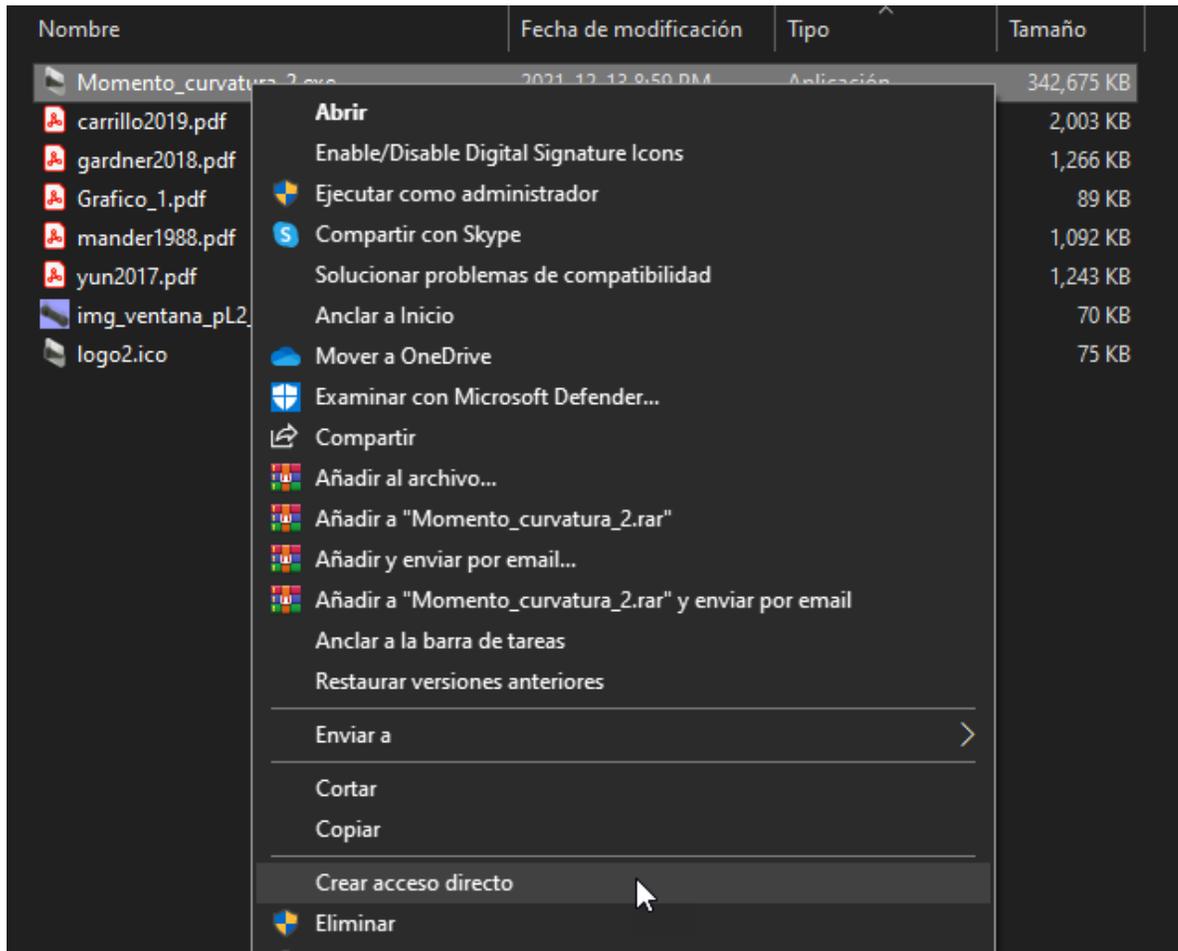
P[kN] 0

Punto	M[kN.m]	Curvatura[rad/m]
0	0	0
1	284.88	0.000176
2	516.25	0.001844
3	763.74	0.017938
4	858.17	0.092669

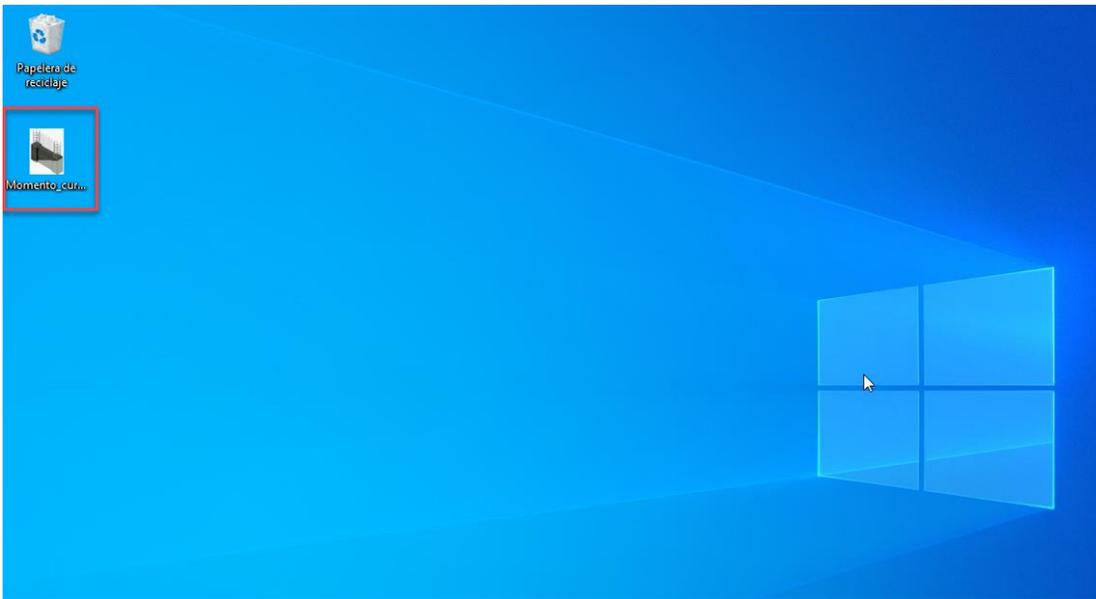
8.1.3. Xtract (Ver archivo externo)

8.2. Manual del usuario

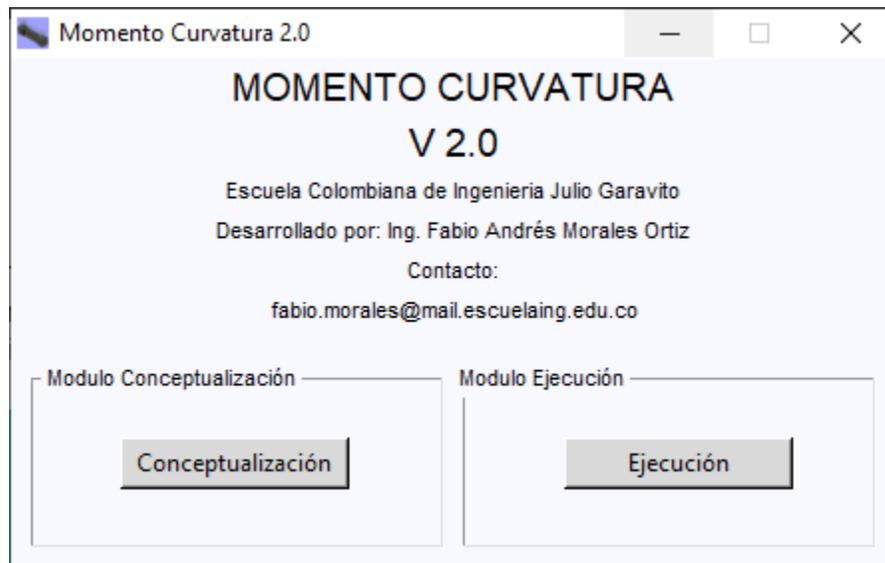
Para que el ejecutable funcione correctamente se debe descomprimir el contenido de rar "Momento curvatura" en la siguiente ruta **C:\Program Files** una vez descomprimido entrar a la siguiente ruta **C:\Program Files\Momento curvatura** y generar un acceso directo del archivo denominado "Momento_curvatura_2.exe" como se presenta en la imagen a continuación

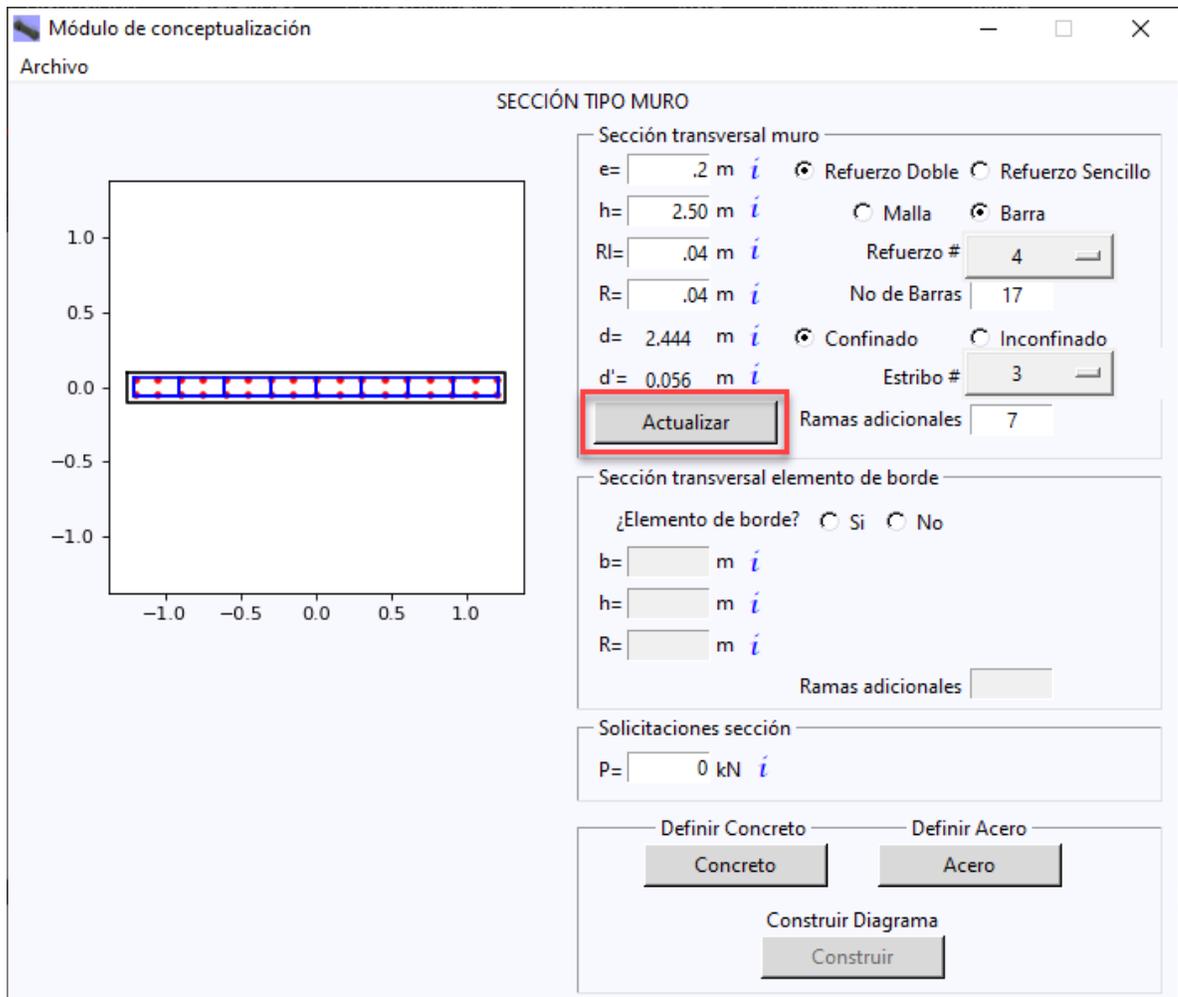


Realizado el paso anterior aparecerá el icono en el escritorio dar doble clic como se muestra en la imagen siguiente. Si es la primera vez que lo inicia podría tardar en iniciar aproximadamente en 4 minutos.



Una vez iniciado aparecerá la pantalla inicial del programa con dos opciones para el inicio de los dos módulos desarrollados (conceptualización y ejecución) para acceder a cada uno de ellos solo basta dar clic en el que se desee emplear.





Nota: Cada vez que se modifique algún valor se debe presionar el botón actualizar y recalculer los modelos constitutivos de los materiales (concreto y acero).

DEFINICIÓN MATERIALES MÓDULO DE CONCEPTUALIZACIÓN

MODELO CONSTITUTIVO DEL CONCRETO

Siempre se deberá acceder a la sección de materiales (concreto y acero) previo a la construcción del diagrama, una vez dentro de las ventanas de los materiales, se cuenta con algunos valores por defecto. Se podrán modificar todos aquellos cuyo texto sea de color rojo como se presenta en la siguiente imagen.

Propiedades Concreto

Documentación

Diagrama Esfuerzo Deformación

Cálculo de f'_{cc}

Ver Nomograma

$f'_{11}/f'_{c=}$

$f'_{12}/f'_{c=}$

K= 1.0

Calcular

Variables modelo Mander

$f'_{c=}$ 21 MPa $s=$ 0.1 m $Wx' =$ - m $px =$ -

$f_y =$ 420 MPa $s' =$ - m $Wy' =$ - m $py =$ -

$E_c =$ - MPa $\epsilon_{sm} =$ 0.142 $\epsilon_{co} =$ 0.002 $ke =$ -

$E_{sec} =$ - MPa $\epsilon_{sp} =$ 0.0064 $\epsilon_{cu} =$ - $\epsilon_{cc} =$ -

$f'_t =$ - MPa

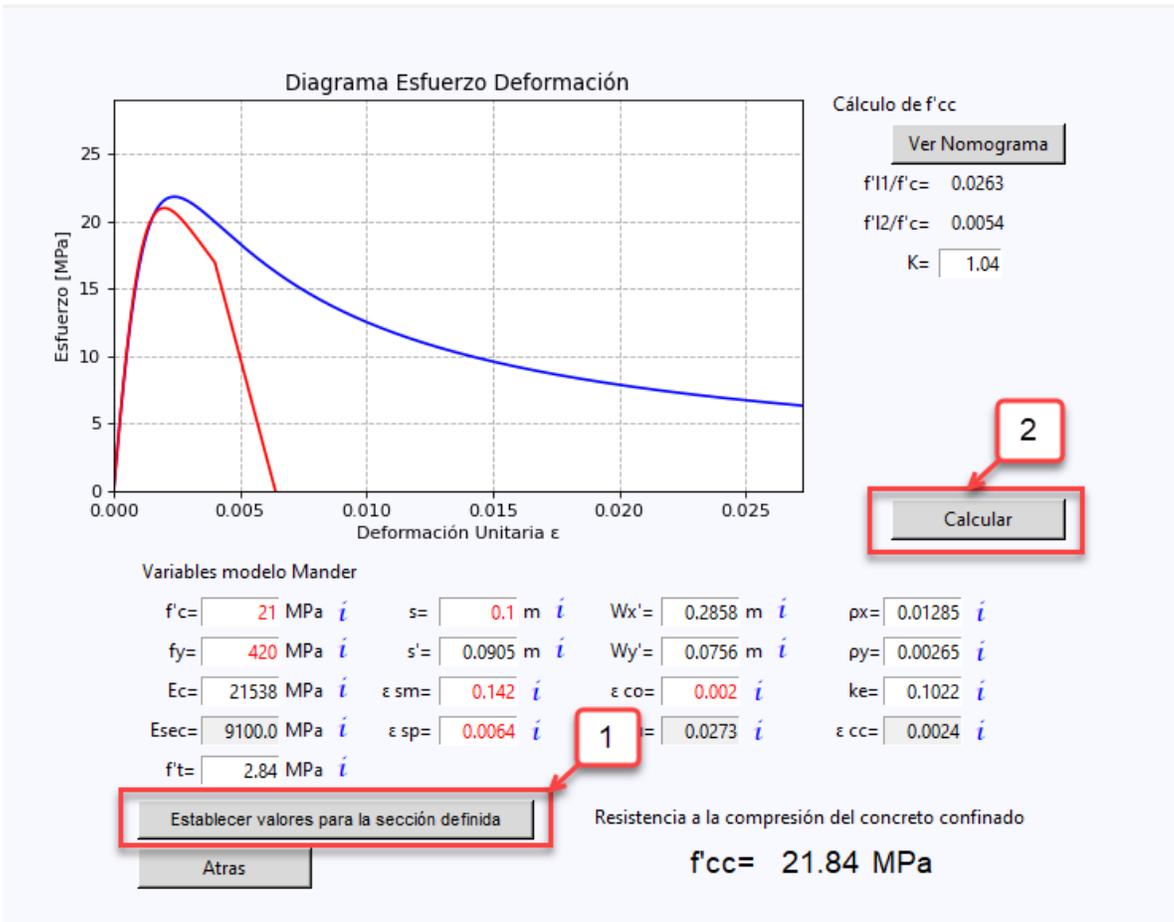
Establecer valores para la sección definida

Atras

Resistencia a la compresión del concreto confinado

$f'_{cc} =$ 00,00 MPa

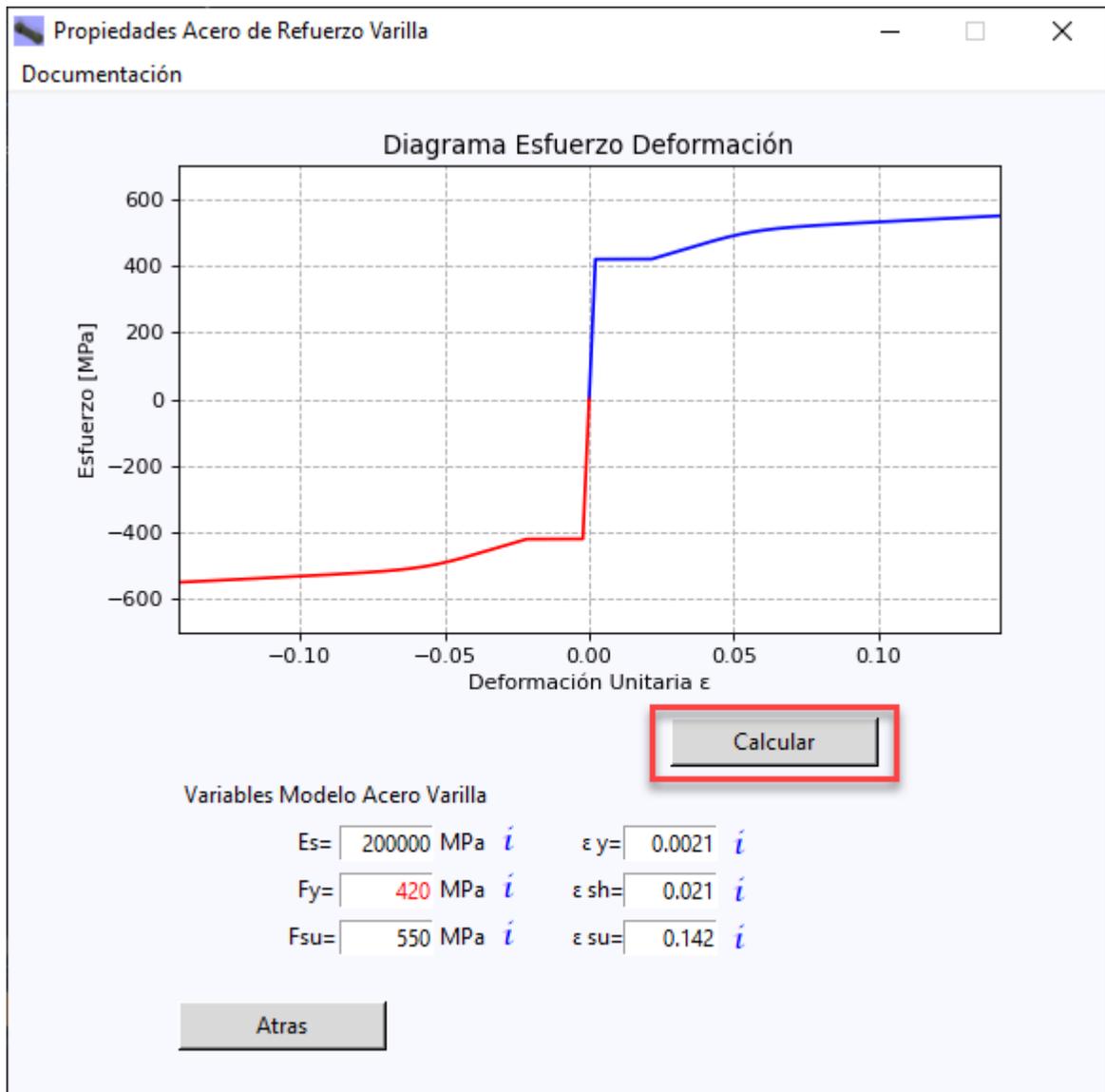
Una vez ajustados los parámetros deseados se debe oprimir el botón “*Establecer valores para la sección definida*”, con el cual se obtienen los valores de las variables correspondientes al cálculo del concreto confinado e inconfinado de la sección. Una vez establecidos los valores se procede a obtener los diagramas con el botón calcular.



MODELO CONSTITUTIVO DEL ACERO

Para definir el modelo constitutivo del acero, en la ventana principal se accede a el a través del botón acero una vez allí, se cuenta con algunos valores establecidos por defecto, los cuales el usuario podrá modificar.

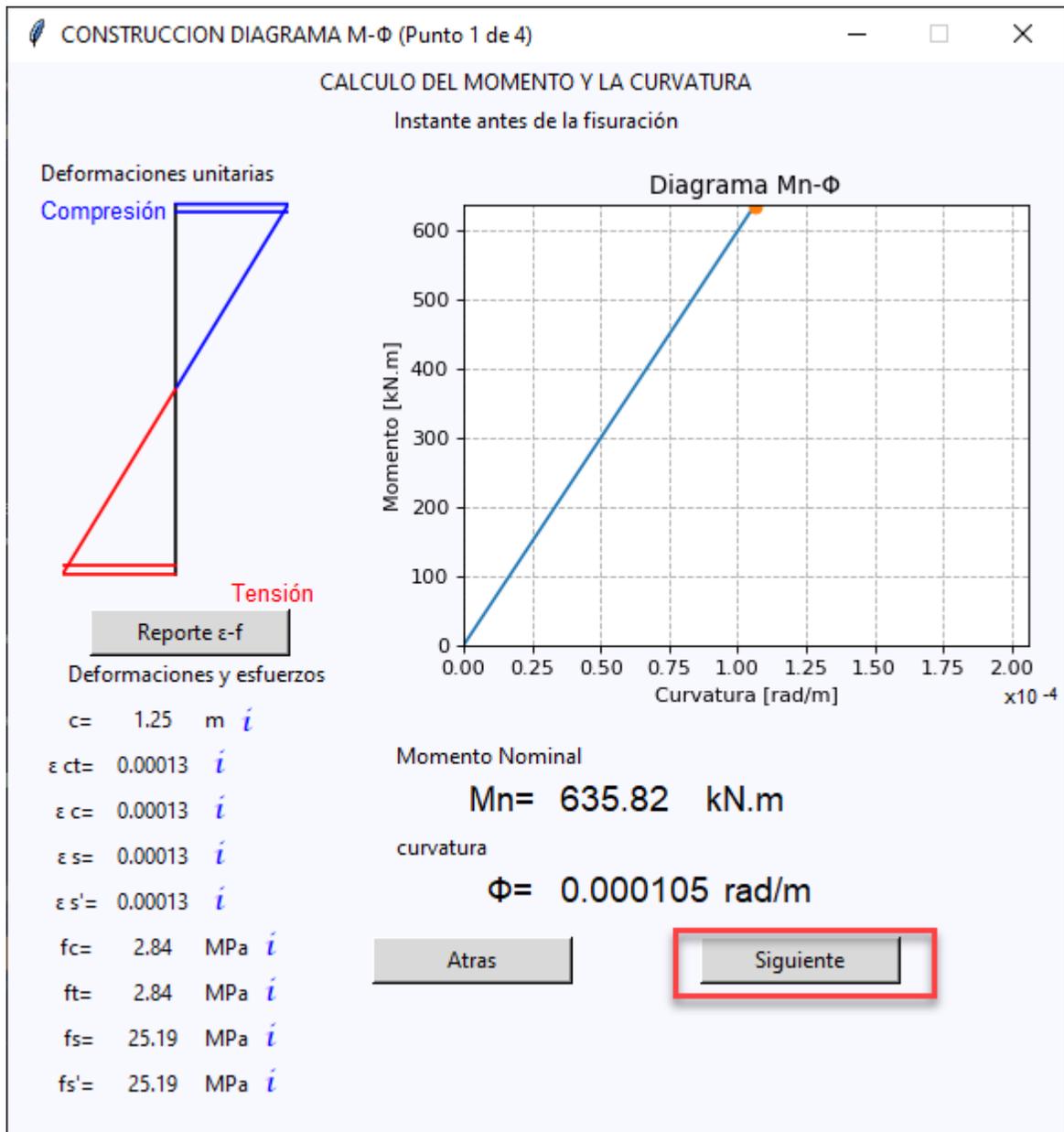
Presionando el botón calcular de la ventana se generará el diagrama esfuerzo deformación correspondiente



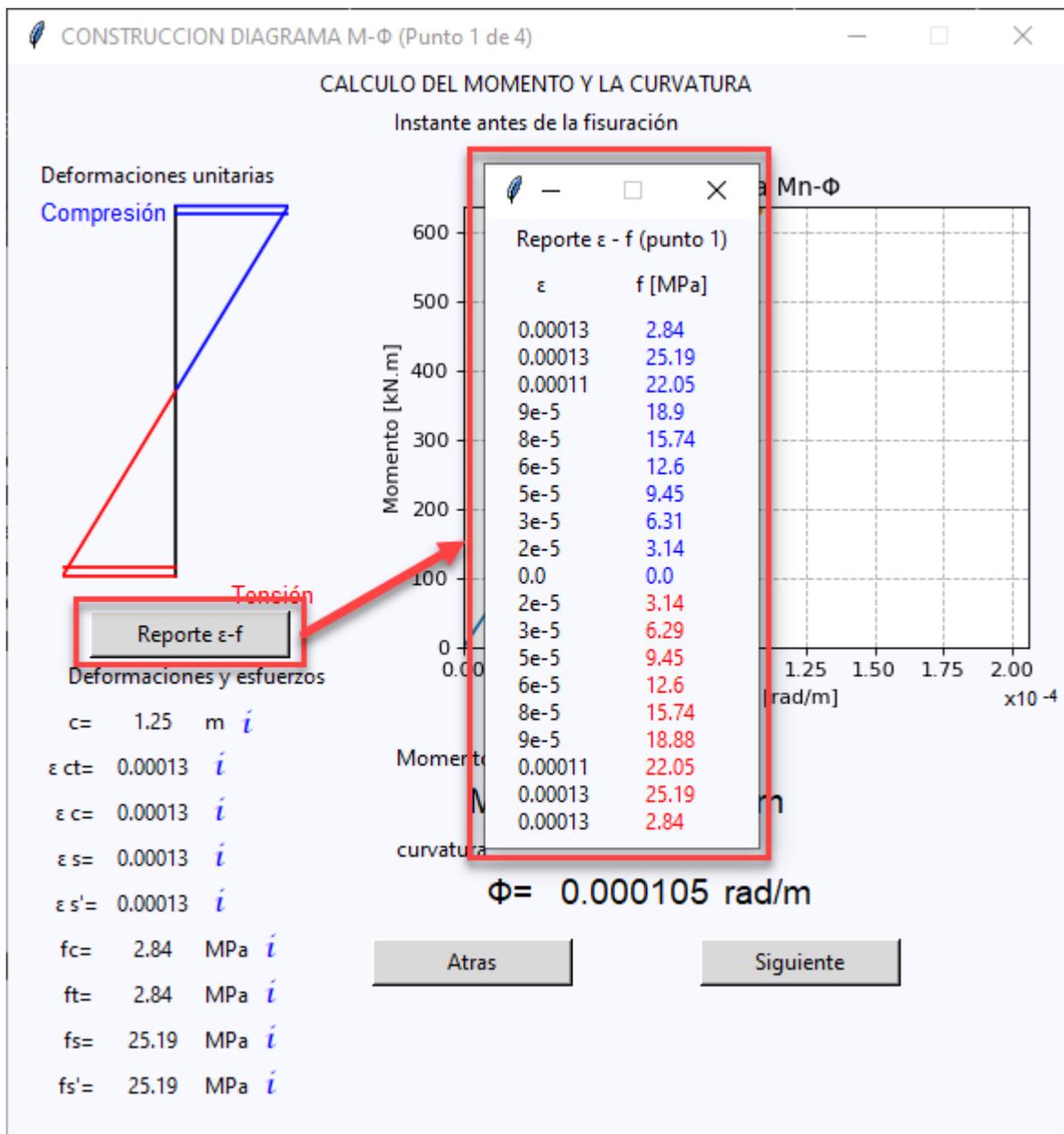
CONSTRUYENDO EL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA CON EL MÓDULO DE CONCEPTUALIZACIÓN

Habiendo definido la geometría y materiales de la sección se habilitará el botón "Construir", el cual da acceso al resultado de cada uno de los puntos del diagrama:

Para avanzar en cada uno de los puntos es necesario dar click en el botón "siguiente"



En la parte inferior izquierda de la ventana se observan las deformaciones y esfuerzos del concreto y de las barras de los extremos de la sección, si el usuario quiere apreciar el estado de esfuerzos y deformaciones de cada una de las barras que componen la sección deberá acceder al botón "Reporte $\epsilon - f$ " localizado en el costado izquierdo de la ventana bajo el diagrama de deformaciones unitarias. Una vez ahí se abrirá una pequeña ventana como se muestra a continuación, donde los esfuerzos de compresión aparecen en azul mientras que los de tensión en rojo.

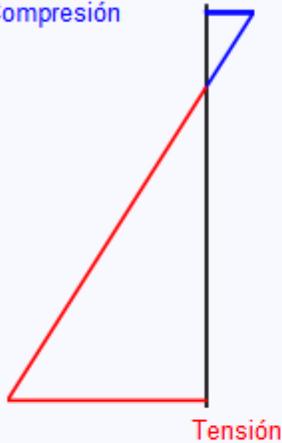


En el cálculo del último punto aparecerá la opción de “Exportar datos”, el cual permite generar un archivo con extensión “.csv” el cual podrá ser abierto desde Excel o bloc de notas.

CALCULO DEL MOMENTO Y LA CURVATURA

Deformaciones unitarias

Compresión



Reporte ϵ -f

Deformaciones y esfuerzos

$c = 0.471$ m *i*

$\epsilon_c = 0.0273$ *i*

$\epsilon_s = 0.1118$ *i*

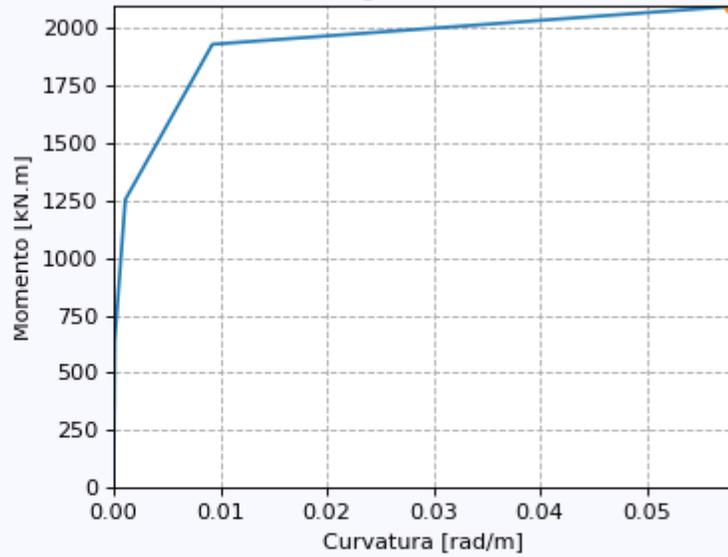
$\epsilon_{s'} = 0.0263$ *i*

$f_c = 21.84$ MPa *i*

$f_s = 537.34$ MPa *i*

$f_{s'} = 432.91$ MPa *i*

Diagrama Mn- Φ



Momento Nominal

Mn = 2094.87 kN.m

curvatura

$\Phi = 0.057927$ rad/m

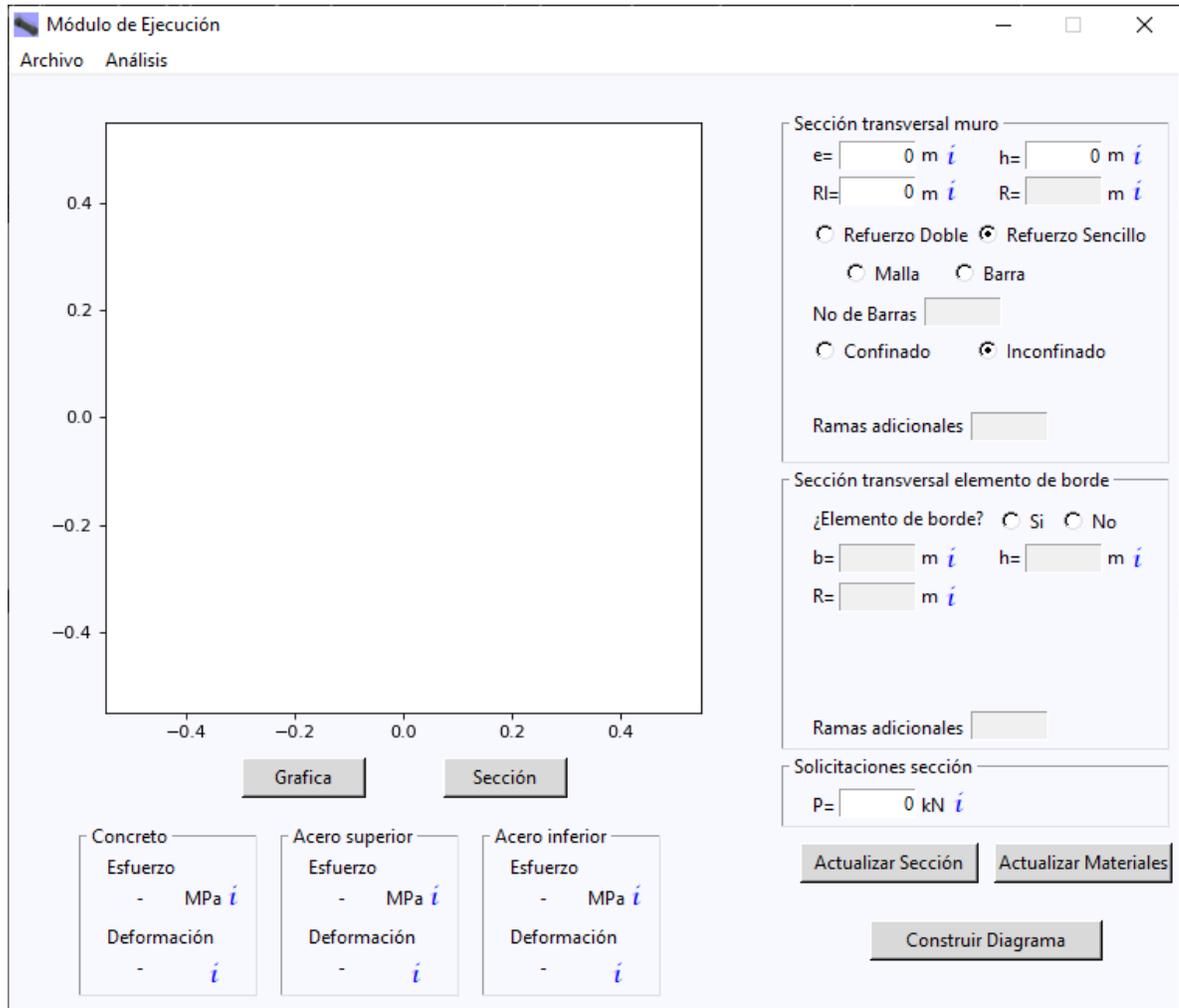
Atras

Inicio

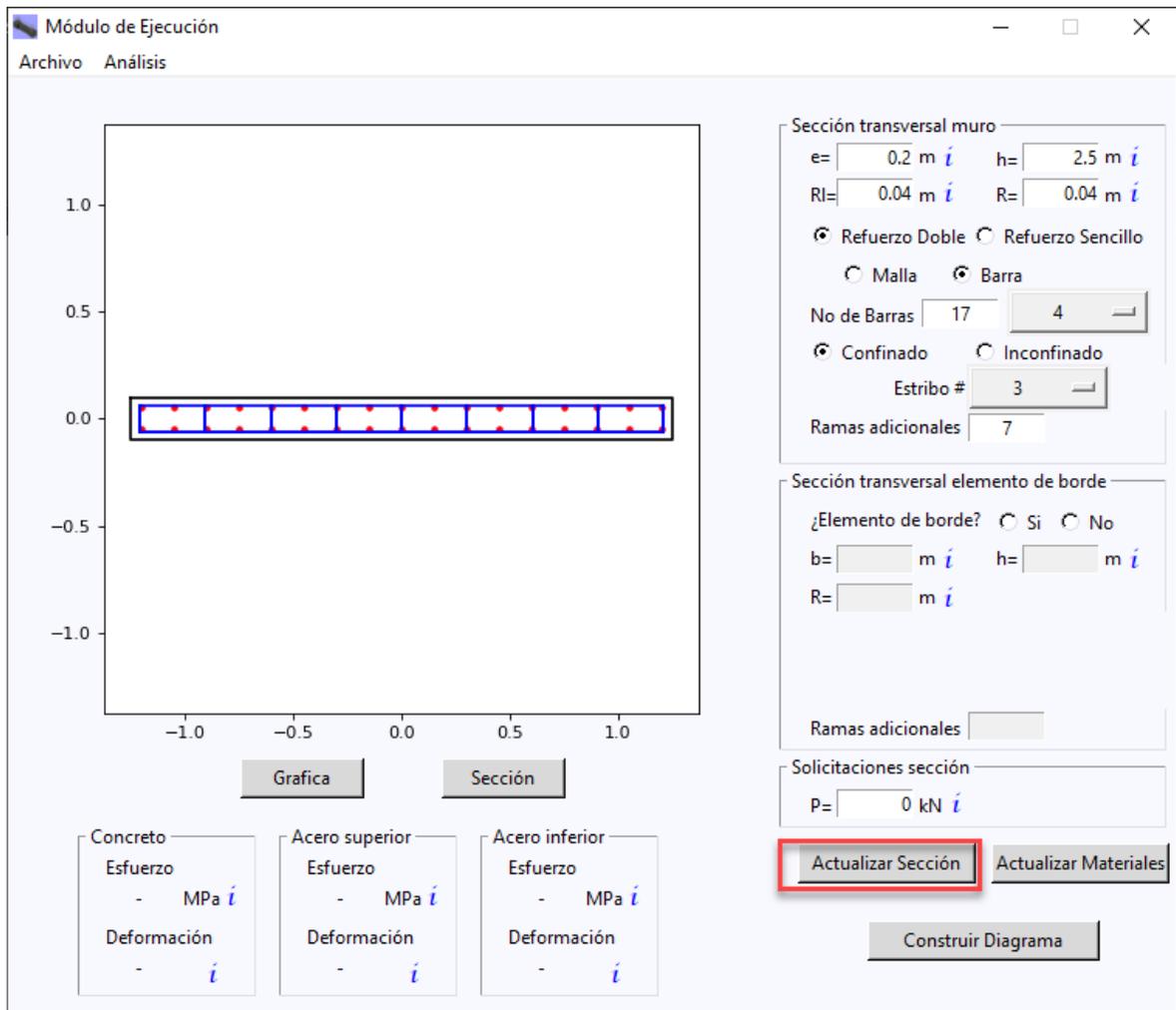
Exportar datos

CREANDO SECCIONES EN EL MÓDULO DE EJECUCIÓN

Se accede a la ventana del módulo de ejecución por medio del botón ejecución de la ventana principal



Se define la geometría y refuerzo de la sección, se oprime el botón “Actualizar sección”, el cual genera el esquema de la sección.



Nota: Cada vez que se modifique algún valor se debe presionar el botón actualizar y recalculer los modelos constitutivos de los materiales.

DEFINICIÓN MATERIALES MÓDULO DE EJECUCIÓN

MODELO CONSTITUTIVO DEL CONCRETO

En la ventana de materiales se presentan dos pequeños módulos en los cuales se definirá el concreto confinado e inconfinado.

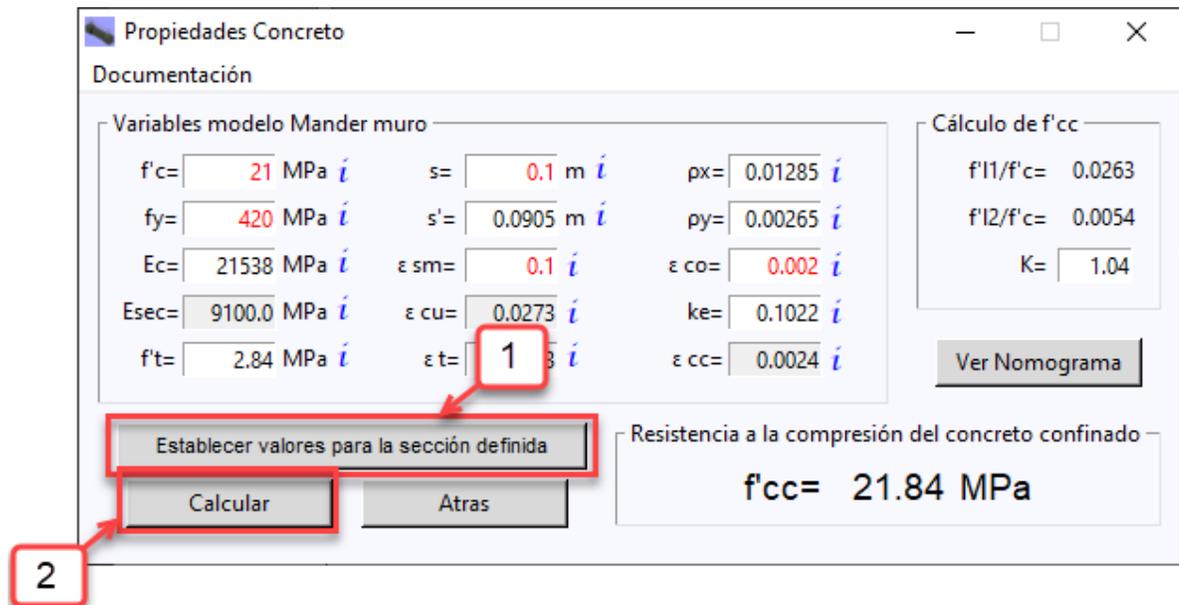
Para la definición del concreto inconfinado se debe asignar los valores deseados y dar clic en el botón actualizar.



Para la definición del concreto confinado iniciar directamente dando clic en el botón "Mander".



Una vez ahí aparecerá la siguiente ventana, ajustados los parámetros deseados se debe oprimir el botón “Establecer valores para la sección definida”, con el cual se obtienen los valores de las variables correspondientes al cálculo del concreto confinado de la sección. Se procede a obtener el valor de K con el botón calcular.



Realizado el paso anterior en la ventana de materiales en la sección de concreto confinado dar clic en el botón “Actualizar” el cual genera el diagrama esfuerzo deformación correspondiente.

Propiedades Materiales

Documentación

Concreto inconfinado

Esfuerzo [MPa]

Deformación unitaria ϵ

$f'_{c} =$ MPa *i*

$\epsilon_{co} =$ *i*

$f'_{cu} =$ MPa *i*

$\epsilon_{sp} =$ *i*

$f_t =$ MPa *i*

$E_c =$ MPa *i*

Concreto confinado

Esfuerzo [MPa]

Deformación unitaria ϵ

$f'_{cc} =$ MPa *i*

$\epsilon_{cc} =$ *i*

$\epsilon_{cu} =$ *i*

$E_c =$ MPa *i*

$f_t =$ MPa *i*

$\epsilon_t =$ *i*

Varilla de refuerzo

Esfuerzo [MPa]

Deformación unitaria ϵ

$F_y =$ MPa *i*

$F_{su} =$ MPa *i*

$E_s =$ MPa *i*

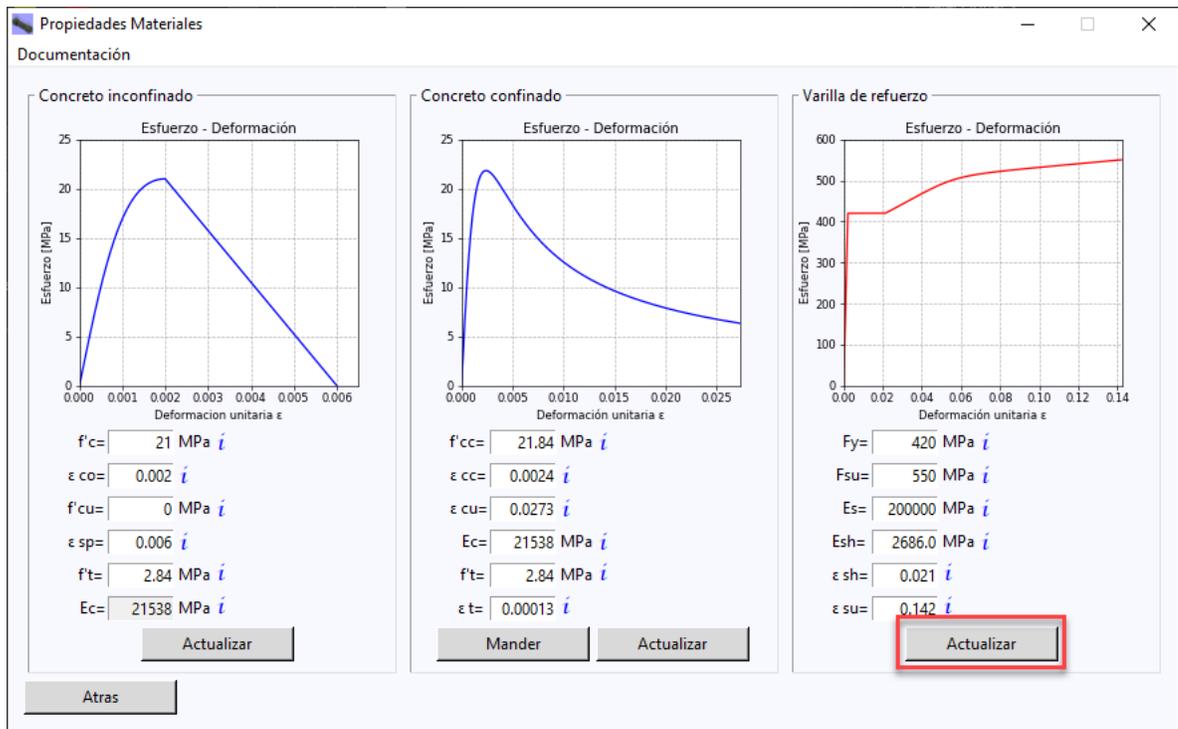
$E_{sh} =$ MPa *i*

$\epsilon_{sh} =$ *i*

$\epsilon_{su} =$ *i*

MODELO CONSTITUTIVO DEL ACERO

Para definir el modelo constitutivo del acero, presionando el botón calcular de la ventana de materiales se generará el diagrama esfuerzo deformación correspondiente.



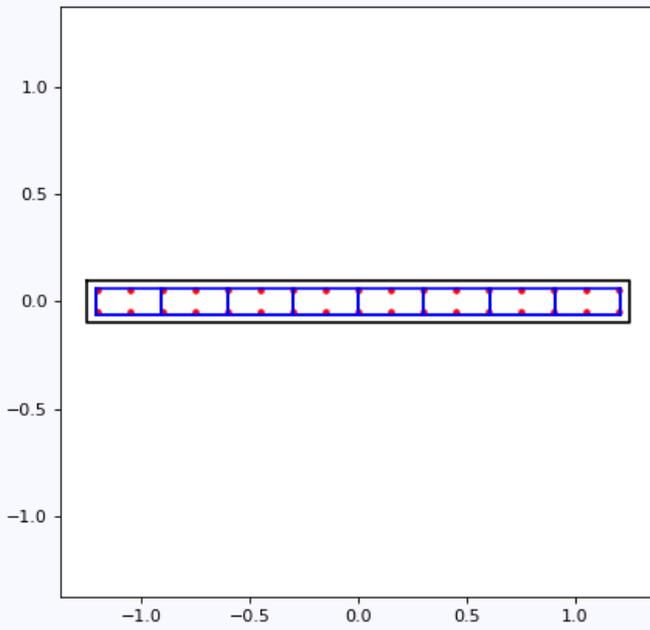
CONSTRUYENDO EL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA CON EL MÓDULO DE EJECUCIÓN

Para finalizar, contando previamente con la definición de la sección y con el cálculo de los materiales constitutivos se debe presionar el botón "Construir Diagrama" el cual da inicio al proceso del cálculo del diagrama momento curvatura por medio de la librería de Opensees denominada Openseespy.

Una vez terminado el proceso nos indicará el mecanismo de falla, para ver el diagrama dar clic en el botón aceptar de la ventana emergente

Módulo de Ejecución

Archivo Análisis



Sección transversal muro

e= 0.2 m *í* h= 2.5 m *í*
 RI= 0.04 m *í* R= 0.04 m *í*

Refuerzo Doble Refuerzo Sencillo
 Malla Barra

No de Barras 17 4 *í*

Confinado Inconfinado
 Estribo # 3 *í*

Ramas adicionales 7

Sección transversal elemento de borde

¿Elemento de borde? Si No

b= m *í* h= m *í*
 R= m *í*

Ramas adicionales

Solicitaciones sección

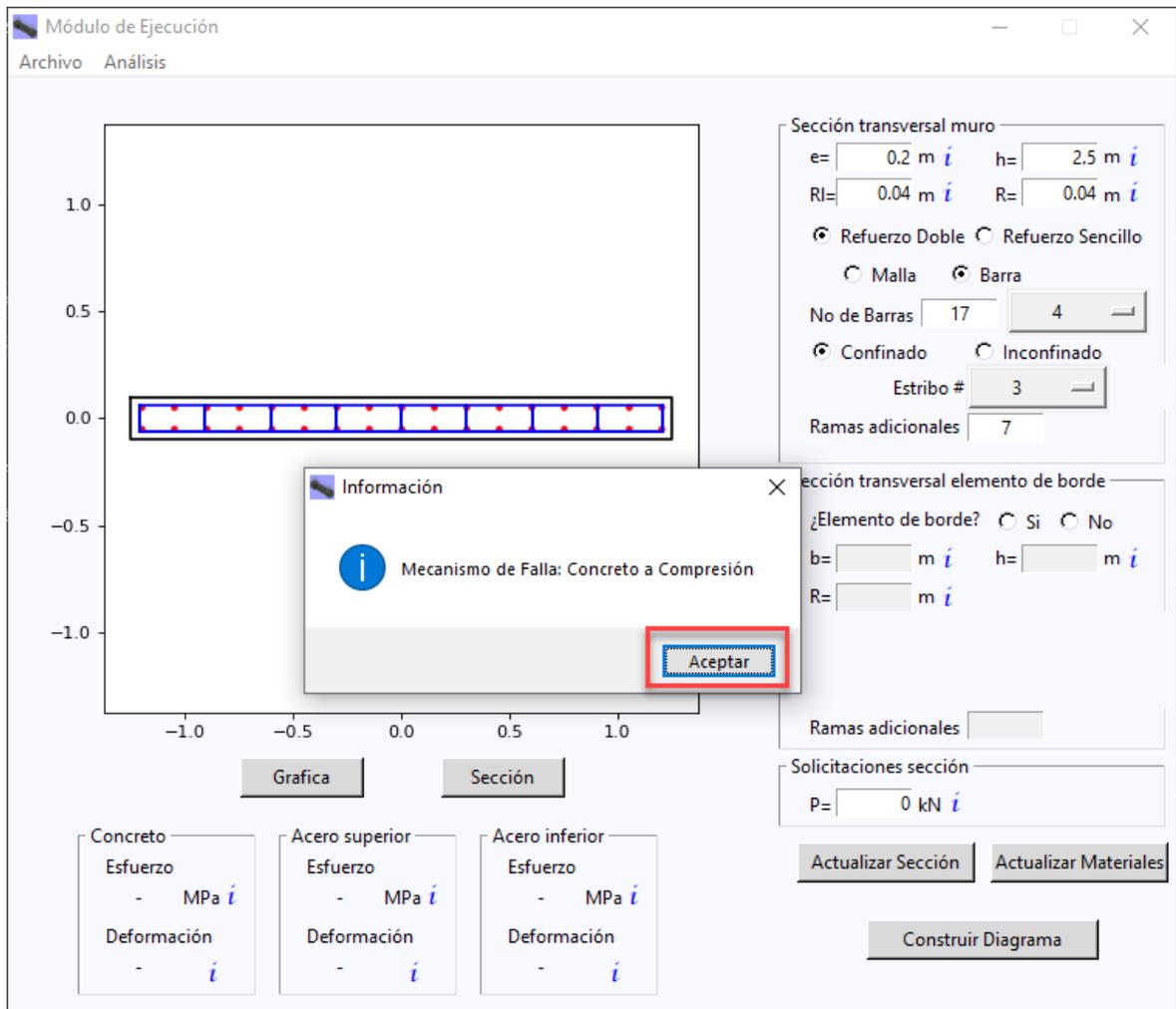
P= 0 kN *í*

Actualizar Sección Actualizar Materiales

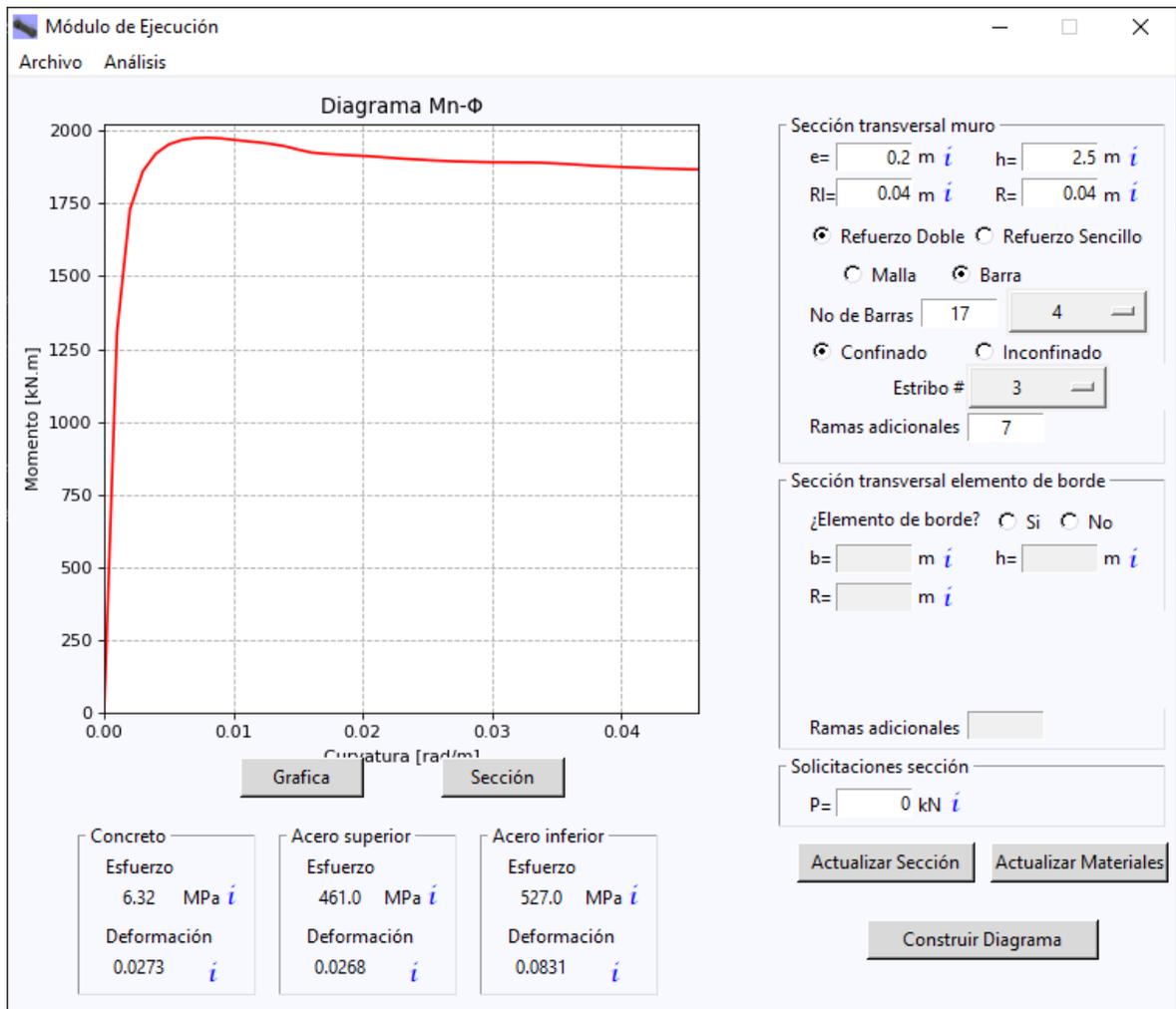
Construir Diagrama

Concreto Esfuerzo - MPa <i>í</i> Deformación - <i>í</i>	Acero superior Esfuerzo - MPa <i>í</i> Deformación - <i>í</i>	Acero inferior Esfuerzo - MPa <i>í</i> Deformación - <i>í</i>
---	---	---

Grafica Sección

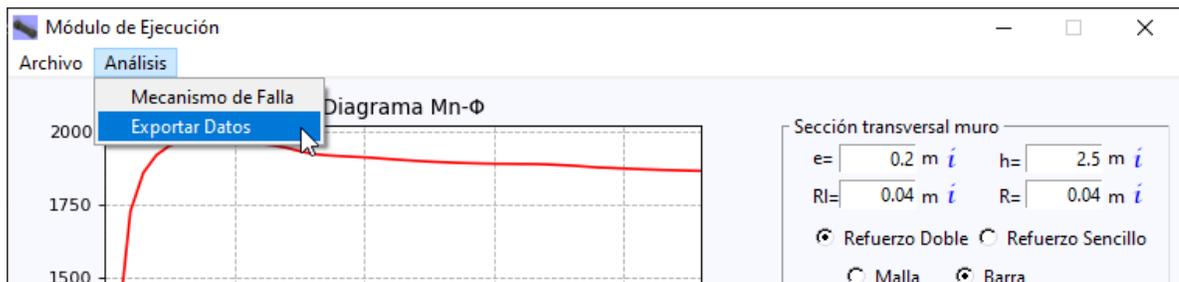


Aparecerá el diagrama correspondiente, así como la información de la fibra a compresión del concreto y los estados de esfuerzo y deformación de las barras de acero superior e inferior de la sección

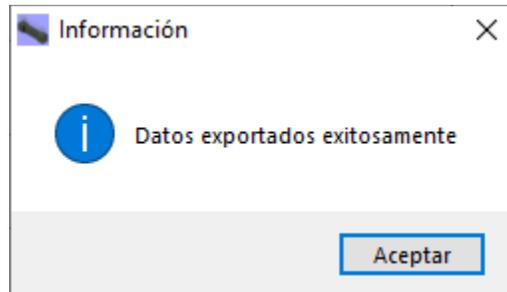


Para exportar los datos del diagrama momento curvatura nos dirigimos a la barra de herramientas > Análisis > Exportar Datos.

El archivo generado será de extensión “.csv” el cual puede ser abierto en Excel o en un bloc de notas



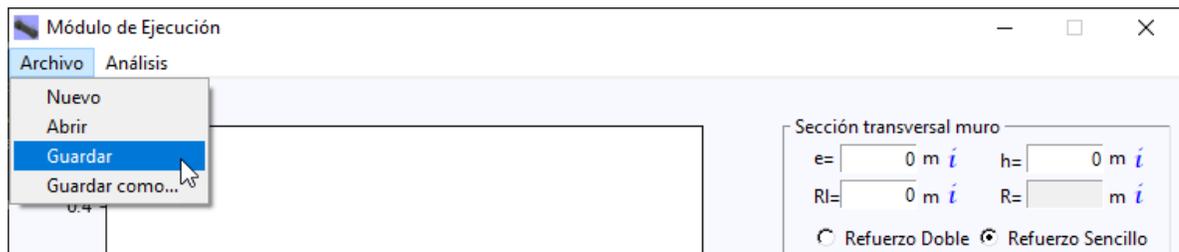
Si los datos fueron almacenados de manera exitosa aparecerá la siguiente ventana emergente:



GUARDANDO SECCIONES

En los módulos de incluye la opción “Guardar” la cual permite guardar las secciones que sean creadas y abrirlas con cualquiera de los dos módulos.

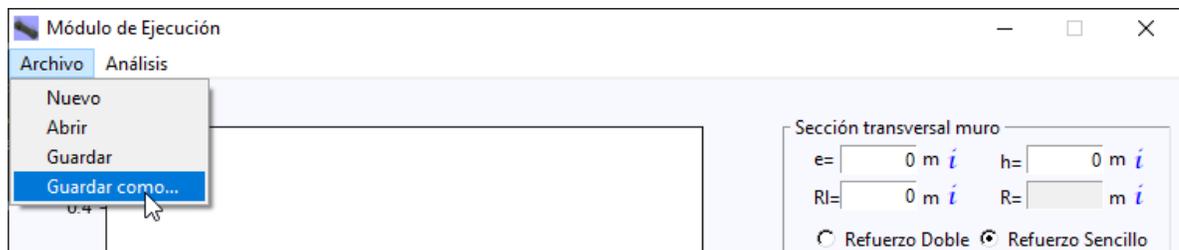
La opción se encuentra en la barra de herramientas Archivo > Guardar



Se generará un archivo con extensión “.mc”.

Adicionalmente se permite guardar secciones en extensión “.xpj” la cual permite exportar el modelo al programa Xtract esta función se encuentra habilitada en los dos módulos.

La opción se encuentra en la barra de herramientas Archivo > Guardar como...



8.3. Recomendaciones para futuros desarrollos

Con la finalidad de orientar a futuros desarrollos sobre el software Momento Curvatura 2.0 se presenta una descripción general de la forma en la que se llevó a cabo su programación.

El programa requiere de 3 archivos para su funcionamiento, el primero nombrado "Momento_curvatura_2.py" contiene la programación de la ventana principal y dos grandes funciones; una para el módulo de conceptualización y otra para el módulo de ejecución.

Dentro de la programación creada para el desarrollo de las ventanas se creó un objeto que permite ingresar variables de manera fácil, es decir que de requerirse agregar una variable o crear un nuevo módulo, se recomienda emplear el objeto "entrada dato" con el cual solamente debe definir el nombre de la variable, la unidad de medida y la información que arrojará al oprimir en "i". Es decir, este objeto le generará dentro de la ventana deseada lo presentado en la siguiente imagen.



Lo anterior es una sugerencia que ahorrará muchas líneas de código y tiempo.

El segundo archivo denominado "funciones.py" contiene gran cantidad de funciones que realizan procesos repetitivos en los módulos de conceptualización y de ejecución, algunas de esas funciones calculan el α y el β del bloque de compresión para los puntos 3 y 4 del diagrama y variables necesarias para el cálculo del K del modelo constitutivo del concreto confinado. Además de otras que permiten hacer una serie de operaciones con listas, empleadas en el módulo de conceptualización para las sumatorias de fuerzas y cálculos de momentos.

En lo referente al módulo de ejecución, "funciones.py", contiene funciones útiles para crear el esquema de la sección y 8 funciones que permiten crear los modelos de fibras por Openseespy para cada uno de los tipos de muros que se puede calcular con la herramienta. Si el usuario quiere agregar un módulo para muros acoplados sería pertinente que agregue allí las funciones necesarias que le permita modelar nuevas secciones.

Por último, el archivo denominado "Valores_materiales.py" contiene las propiedades de las secciones de las varillas y mallas electrosoldadas aplicables como reforzamiento en los muros.