

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Plan de Trabajo de Integración Curricular

Tema: Generación de un modelo matemático computacional para la obtención del diagrama de flexocompresión biaxial y de momento curvatura mediante el método de fibras

AUTOR:

MARCO ALEXANNDER CEVALLOS ROSALES

QUITO DM, *MAYO* DEL 2023

Dedicatoria

Con gran emoción, dedico este trabajo a las personas más importantes en mi vida, que, con su amor y apoyo me han dado la fuerza que necesite para perseguir mis sueños y metas. Mis padres Marco Polo y Sarita, quienes son modelos por seguir, que me inculcan la importancia de la dedicación y el esfuerzo en todo lo que se hace, por consiguiente, esta tesis es un tributo a su confianza.

A Pame quién, ha sido mi compañera, mi apoyo incondicional y fuente constante de inspiración en mi vida, que, con su paciencia, amor, me ha ocasionado ser perseverante en el camino de mi carrera. Este logro no solo es mío sino nuestro, esta tesis es una demostración de lo que hemos logrado juntos. A su familia, por brindarme cariño y abrirme las puertas de su hogar, donde me demostraron que la unión familiar y el amor son la clave para alcanzar cualquier objetivo, un agradecimiento profundo y admiración hacia ustedes.

Finalmente, dedicar este logro a mí mismo, por ser constante y firme en la búsqueda del conocimiento profesional y crecimiento personal.

Agradecimiento

Quiero expresar mi sensible agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible la culminación de esta tesis. En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fuerza, la fe, por guiarme y protegerme en este gran camino lleno de desafíos, obstáculos que se presentaron durante todo este proceso, me siento bendecido.

Asimismo, quiero agradecer a mis padres, por sus sacrificios, esfuerzos, amor incondicional, comprensión y paciencia, por estar en cada paso de este proceso, Gracias por darme una educación de calidad, cualidades fundamentales para que yo haya llegado hasta aquí.

Especial agradecimiento a Pame y su familia, cuatro mujeres valientes, amorosas que vinieron a mi vida para manifestarme su apoyo y acompañamiento. Gracias por no dejarme solo, por alentarme con sus palabras, consejos, son parte de mi éxito como profesional, persona, son gran parte de mi vida, estoy profundamente agradecido, las llevo siempre en mi corazón,

Además, agradezco al Magister Nicolas Bowen y familia, por enseñarme lecciones valiosas, como la ética como persona y profesional, por permitir realizar experiencia en su empresa, paso esencial para formarme, donde, aprendí que el trabajo en equipo son la clave para el éxito de un proyecto. Gracias por haberme brindado su orientación durante ese tiempo.

Agradecerle al magister Cisneros por su guía y apoyo en mi tesis. Sus conocimientos y experiencia fueron invaluable para el éxito de mi proyecto.

Y, por último, agradecer a Lionel Messi, quien con su constancia, dedicación y trabajo duro en el campo de fútbol me han enseñado que todo se puede lograr si se tiene perseverancia y constancia sin importar las críticas que se reciban durante el camino.

Con el apoyo, la motivación de todas estas personas no hubiera sido posible llegar a este punto en mi carrera académica. Gracias por creer en mí y por ser parte de este logro tan importante, el impacto positivo de ustedes en mi vida ha sabido enseñarme valiosas lecciones que las llevo conmigo a lo largo de mi carrera y vida.

Sinceramente, Marco Cevallos

RESUMEN:

Este estudio se centra en el desarrollo de diagramas de flexocompresión biaxial y momento-curvatura para secciones de concreto armado regulares e irregulares utilizando el método de la fibra y un modelo matemático computacional. El diseño de columnas y muros estructurales sometidos a cargas axiales y momentos de flexión es laborioso y propenso a errores. Para superar estas limitaciones, se han implementado métodos numéricos programables en lenguajes de programación comerciales. La hipótesis propuesta sostiene que los resultados obtenidos mediante el modelo matemático computacional describen mejor el comportamiento real de las secciones de concreto armado que los métodos de diseño tradicionales.

PALABRAS CLAVE: flexocompresión, momento – curvatura, concreto armado, modelo matemático computacional, métodos numéricos.

ABSTRACT:

This study focuses on the development of biaxial flexural compression and moment-curvature diagrams for normal and irregular reinforced concrete sections using the fiber method and a computational mathematical model. The design of structural columns and walls subjected to axial loads and bending moments is laborious and error prone. To overcome these limitations, programmable numerical methods have been implemented in commercial programming languages. The proposed hypothesis holds that the results obtained by computational mathematical modeling better describe the true behavior of reinforced concrete sections than traditional design methods.

KEY WORDS: flexural compression, moment – curvature, computational mathematical model, numerical methods.

Contenidos

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Justificación.....	9
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.3 Objetivos.....	9
1.3.1 Objetivo General.....	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
1.4 Alcance.....	10
1.5 Hipótesis.....	10
1.6 Operacionalización de la investigación.....	10
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Modelo Constitutivo de Materiales.....	12
2.1.1 Modelo teórico esfuerzo-deformación para hormigón confinado.....	12
2.1.2 Modelo teórico que considera el endurecimiento por deformación del acero.....	13
2.2 Modelo matemático computacional.....	14
2.2.1 Método de Fibras.....	15
2.3 Diagrama de Interacción.....	15
2.4 Diagrama de Momento Curvatura.....	16

3.2	Suposiciones para la obtención del diagrama de flexocompresión biaxial y del diagrama de momento curvatura.	17
3.3	Interfaz Gráfico	18
3.4	Flujogramas del modelo computacional	19
3.4.1	Concreto	19
3.4.2	Acero	20
3.4.3	Diagrama de Interacción	21
3.4.4	Diagrama de Momento Curvatura.....	22
3.5	Aplicación del Algoritmo para la obtención del diagrama de flexocompresión biaxial.	23
3.5	Aplicación del Algoritmo para la obtención del diagrama de Momento Curvatura..	41
4	CAPITULO IV: RESULTADOS.....	43
4.2	Sección Regular	43
4.2.1	Diagrama de Interacción.....	43
4.2.1.1	Diferente número de divisiones de la sección.	43
4.2.1.2	Diferentes deformaciones unitarias máximas del concreto	48
4.2.2.1	Diferente división de Fibras	48
4.2.2.2	Diferente confinamiento	51
4.2.2.3	Diferente cuantía de acero	52
4.3	Sección Irregular.....	52
4.3.1	Diagrama de Interacción.....	52
4.3.1.1	Diferente número de divisiones de la sección.	53

4.3.1.2 Diferente deformación unitaria máxima del concreto	56
4.3.2.1 Diferente división de Fibras	56
4.3.2.2 Diferente confinamiento	59
5. CAPITULO V: CONCLUSIONES	61
6. Bibliografía.....	63

Contenido de Figuras

Figura 1.....	13
Figura 2.....	14
Figura 3.....	16
Figura 4.....	17
Figura 5	19
Figura 6.....	20
Figura 7.....	21
Figura 8.....	22
Figura 9.....	24
Figura 10.....	25
Figura 11.....	30
Figura 12.....	33
Figura 13.....	34
Figura 14.....	43
Figura 15.....	45
Figura 16.....	45
Figura 17.....	45
Figura 18.....	46
Figura 19.....	46
Figura 20.....	46

Figura 21	48
Figura 22	50
Figura 23	51
Figura 24	51
Figura 25	52
Figura 26	52
Figura 27	53
Figura 28	55
Figura 29	56
Figura 30	58
Figura 31	59
Figura 32	60

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.

Generalmente los cálculos más laboriosos para los que diseñan estructuras de concreto son los que concierne al diseño de columnas y muros estructurales, por la acción simultánea de cargas axiales y momentos de flexión sobre los elementos (flexo-compresión), ya que el análisis y diseño de los elementos se efectúa a través de la elaboración de diagramas de manera tradicional. La elaboración de estos diagramas de forma manual requiere de una importante cantidad de tiempo y cuidado, sumado a que los cálculos son más lentos y sensibles de cometer errores (Zuñiga, 2005).

Por lo tanto, bajo las circunstancias de diseñar secciones de concreto armado a flexocompresión biaxial de manera más eficiente, en los últimos años, se utiliza la implementación de métodos numéricos capaces de ser programados en lenguajes de programación comerciales para así optimizar tiempos de trabajo.

1.1 Justificación

La dificultad presentada por el diseño de secciones complejas de concreto armado ha requerido el desarrollo de métodos numéricos como el método de fibras capaces de resolver los problemas presentados por el diseño tradicional con mayor eficiencia de tiempo y con mayor facilidad de ser implementados en un algoritmo computacional.

1.2 Planteamiento del problema.

El diseño de secciones irregulares de concreto armado a flexocompresión tradicional presenta dificultades de excesivo tiempo, así como simplificaciones de las características de materiales que se utilizan para obtener resultados con mayor facilidad y rapidez, lo que ocasiona ineficiencia en el diseño de secciones de concreto armado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar el diagrama de flexocompresión biaxial y de momento curvatura para secciones regulares e irregulares de concreto armado mediante el método de fibras utilizando un modelo matemático computacional.

1.3.2 Objetivos específicos

- Aplicar el método de fibras para la obtención el diagrama de flexocompresión biaxial para secciones regulares e irregulares de concreto armado
- Aplicar el método de fibras para la obtención el diagrama de momento curvatura para secciones regulares e irregulares de concreto armado.
- Analizar los resultados obtenidos mediante el método numérico propuesto y métodos tradicional de diseño.

1.4 Alcance

El presente estudio presenta un algoritmo computacional capaz de resolver el diagrama de interacción biaxial y el diagrama de momento curvatura de secciones de concreto armado utilizando el modelo constitutivo propuesto por Mander et al. (1988) que, describe el comportamiento del concreto confinado y no confinado, a fin de realizar un análisis comparativo entre los métodos propuestos para determinar diferencias relacionadas con la incertidumbre de comportamiento real de la columna.

1.5 Hipótesis

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de un modelo matemático computacional en el diseño de concreto armado representan de mejor manera el comportamiento real de una sección de concreto armado, que los resultados obtenidos por los métodos tradicionales de diseño.

1.6 Operacionalización de la investigación

VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA
Carga Axial	Acciones que se presentan en un elemento estructural.	Toneladas Fuerza (unidades de fuerza)

Momento Flector	Acciones que se presentan en un elemento estructural.	Toneladas-metro (Unidades de momento)
Angulo de rotación	Rotación aplicada cuando se interacciona los 2 ejes de una columna.	Grados o radianes

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Modelo Constitutivo de Materiales

El modelo constitutivo es un modelo matemático-mecánico que describe la idea de un estado de tensión-deformación de un material, por lo que la ley de definición matemática modela el comportamiento físico idealizado. Así, la validez del modelo constitutivo depende del nivel de comprensión del modelo físico y de la aproximación mecánica numérica para la cual se presenta su simulación. No es fácil formular una ley definida que pueda usarse para reproducir el comportamiento de cualquier material ni una ley rectora que cubra todos los rangos y modos posibles de excitación y comportamiento de un material en particular, pero si existen principios (Luccioni, 1993).

Esto se corrobora con lo que señala Romero (2005), al mencionar que, aunque el modelo constitutivo de materiales no logre solventar completamente, actúan principios básicos que deben cumplirse en cualquier relación constitutiva; uno de estos principios refiere al determinismo que, orienta a que la tensión en un punto del cuerpo depende de la deformación actual y pasada, pero no de las distorsiones futuras; otro principio es el de acción local, y este refiere a que la tensión en un punto de un medio continuo depende solo de la deformación en un entorno cercano de ese punto y no de la historia de deformación en puntos alejados; el principio de memoria limitada señala que, solo es necesario tener en cuenta la historia reciente de la deformación para determinar la tensión actual, y que los valores de deformación en momentos muy remotos tienen menos influencia que los valores cercanos en el tiempo.

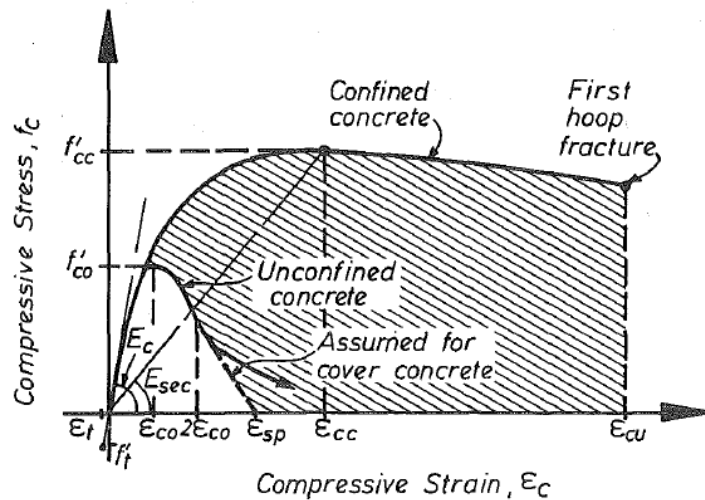
2.1.1 Modelo teórico esfuerzo-deformación para hormigón confinado

Este modelo propuesto por Mander et al. (1988), es un modelo no lineal de confinamiento constante y se basa en una ecuación simple que relaciona la tensión y la deformación, y se aplica a la carga de compresión uniaxial en el hormigón, así como al confinamiento proporcionado por cualquier tipo de refuerzo transversal, cuya influencia de este confinamiento se tiene en cuenta por medio de una tensión de confinamiento lateral efectiva, que depende de la configuración del refuerzo transversal y longitudinal. Por otro

lado, Weht et al. (2012) mencionan que, es importante considerar la rigidez, ya que esto puede ocasionar problemas de convergencia cuando se producen grandes desplazamientos.

Figura 1

Modelo Constitutivo para Concreto confinado y no confinado.



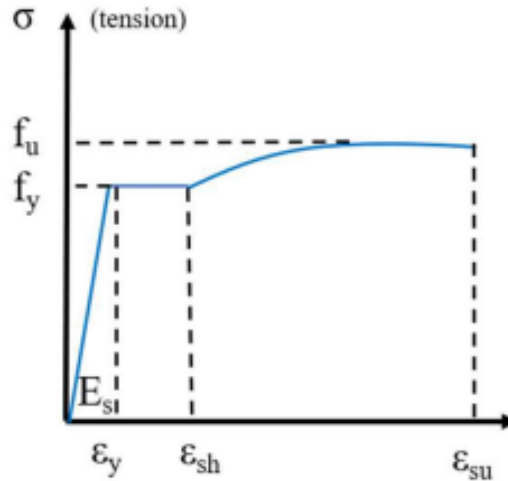
Nota. Adaptado de Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, por Mander et al., 1998.

2.1.2 Modelo teórico que considera el endurecimiento por deformación del acero.

El modelo constitutivo de Park se utiliza ampliamente en el análisis y diseño de estructuras de hormigón armado debido a su capacidad para dar cuenta de la resistencia a la deformación del acero. Este modelo tiene en cuenta la respuesta no lineal del acero, teniendo en cuenta su rigidez inicial, su deformabilidad y su trazabilidad. Al incluir estos factores, el modelo de Park permite predecir con mayor exactitud el comportamiento de secciones armadas específicas sometidas a cargas climáticas o de larga duración. Además, el modelo tiene en cuenta las fisuras del hormigón y su impacto en la capacidad de carga y la rigidez de la sección. En conclusión, el modelo constitutivo de Park proporciona una representación más realista y precisa del comportamiento de determinadas secciones de armamento, teniendo en cuenta la resistencia a la abrasión y otros factores pertinentes.

Figura 2

Modelo Constitutivo que considera el endurecimiento del acero por deformación propuesto por Park.



Nota. Adaptado de Seismic Assessment of Six Typologies of Existing RC Bridges, por Crespi et al., 2020.

2.2 Modelo matemático computacional

El modelado computacional es el uso de ordenadores para simular sistemas complejos utilizando las matemáticas, la física y la informática. La representación matemática computacional se define como un conjunto de símbolos que pueden ser interpretados por una computadora para obtener un significado (Toro, 2010). Según este autor, las representaciones tienen cuatro particularidades esenciales. La primera es que el portador de la representación ya sea un ser humano o una computadora, debe comprender la representación. La segunda es que la representación debe tener un contenido, es decir, debe representar uno o más objetos y se les llama referentes. La tercera es que la representación debe estar conectada con el referente de alguna manera. Por último, la representación debe ser interpretable por algún intérprete, ya sea el portador de la representación o alguien más.

Además, un modelo computacional contiene numerosas variables que caracterizan el sistema para obtener simulaciones en diversos escenarios. La simulación se realiza utilizando diversas variables, solas o combinadas, que arrojan resultados, lo que permite a los investigadores realizar numerosos experimentos simulados por computadora (Kofman, 2000).

2.2.1 Método de Fibras

Marín (2009) señala que, el método de fibras es aplicado para analizar la sección transversal de un objeto, en la cual se divide la sección en pequeñas fibras de igual tamaño, con sus propias propiedades mecánicas. En esa misma línea de pensamiento, Baji et al. (2011) plantean que, para determinar las curvas de curvatura de momento asociadas con cada nivel de fuerza axial, la sección se divide en una serie de láminas o fibras discretas, cada barra de refuerzo en el RC representa una fibra de acero además de otras fibras de hormigón lo que permite conocer el comportamiento mecánico de la sección completa.

2.3 Diagrama de Interacción

Casi todos los miembros de compresión en estructuras de concreto están sometidos a momentos y a cargas axiales en ambas direcciones. Según James (2021) esta situación, en algunos casos pueden deberse a la desalineación de la carga en la columna o puede resultar de la columna que resiste momentos desequilibrados en los extremos de las vigas soportadas por las columnas.

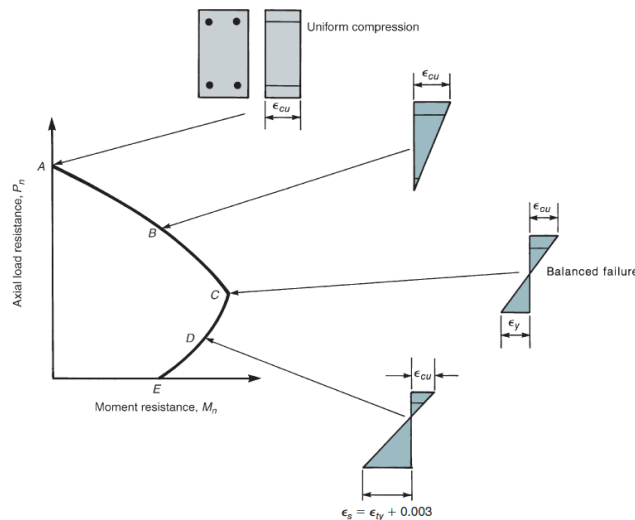
Muñoz (2020) señala que, los diagramas de interacción proporcionan información detallada sobre las diferentes combinaciones de carga axial, P , y momento flexionante, M , que actúan en una sección transversal determinada. En esencia, un diagrama de interacción representa las cargas y momentos que una columna puede soportar antes de fallar en un rango completo de excentricidades, desde cero hasta infinito; cada excentricidad tiene un par de valores de carga axial, P_n , y momento flexionante, M_n , que llevarían a una falla inminente.

Si se desea juntar estas dos interacciones los diagramas forman dos bordes de una superficie de interacción tridimensional para carga axial y momento sobre los 2 ejes (James, 2021). En

síntesis, un diagrama de interacción proporciona información crítica sobre la capacidad de carga de una columna en una variedad de escenarios y condiciones (Muñoz, 2020)

Figura 3

Diagrama de Interacción.



Nota. Adaptado de Reinforced Concrete Mechanics and Design (p. 479), por James K Wight, 2021.

2.4 Diagrama de Momento Curvatura

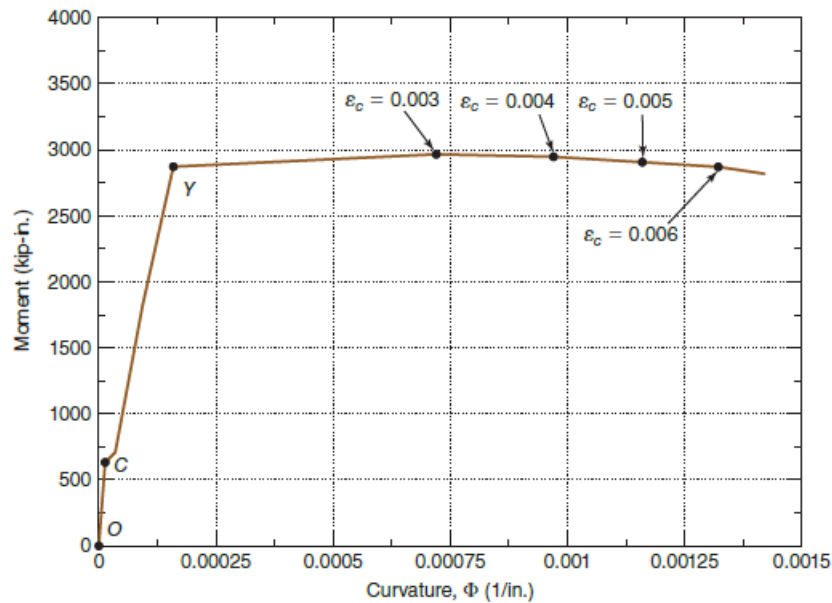
García (2017) plantea que, el diagrama de momento curvatura para momentos flectores menores al momento de agrietamiento, es la relación entre el momento-curvatura en una sección de concreto reforzado es lineal. Desde otra perspectiva, Mora & Aguiar (2015) indica que, el gráfico de curvatura de momento le permite conocer la ductilidad de la sección, que es la capacidad de caer en el rango no lineal antes de que ocurra la falla. Esto se logra conociendo el comportamiento del módulo elástico (E) y la inercia (I) ($\Phi(\text{curvatura}) = M(\text{momento})/EI$), asumiendo que la falla se debe a la flexión y no a otros tipos de esfuerzos como cortante. El código sísmico identifica el tipo de falla por flexión.

Esto proporciona información sobre la capacidad nominal de la sección, la curvatura de la primera fluencia, la curvatura última, la ductilidad de la sección y las curvaturas correspondientes a los límites de desempeño de los materiales. Si una sección tiene poca ductilidad por curvatura, puede sufrir una falla frágil cuando la estructura entre en el rango

no lineal. Es crucial obtener una buena ductilidad para disipar la mayor cantidad de energía y permitir la distribución de momentos (García, 2017).

Figura 4

Diagrama de Momento Curvatura.



Nota. Adaptado de Reinforced Concrete Mechanics and Design (p. 479), por James K Wight, 2021.

3 CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL ALGORITMO

3.2 Suposiciones para la obtención del diagrama de flexocompresión biaxial y del diagrama de momento curvatura.

Se busca implementar modelos matemáticos computacionales que generen tanto el diagrama de interacción biaxial y el diagrama de momento curvatura mediante el método de fibras, para distintas secciones que un ingeniero estructural debe tratar a diario.

Para la obtención de los diferentes puntos del diagrama de interacción biaxial y de momento curvatura, se considera el teorema de Navier el cual establece que las secciones planas permanecen planas antes y después de la deformación, además que para la obtención de las cargas axiales y momentos correspondientes se realiza un equilibrio seccional.

Por otro lado, se considera que, una fibra de concreto es un elemento bidimensional de forma rectangular y una fibra de acero es un elemento bidireccional de forma circular, las cuales contiene información del centroide en ambas direcciones de las mismas.

3.3 Interfaz Gráfico

Para desarrollar esta implementación computacional para secciones regulares e irregulares, se busca la utilización de un mecanismo gráfico que permita al usuario ejemplificar de mejor manera la sección que se está analizando.

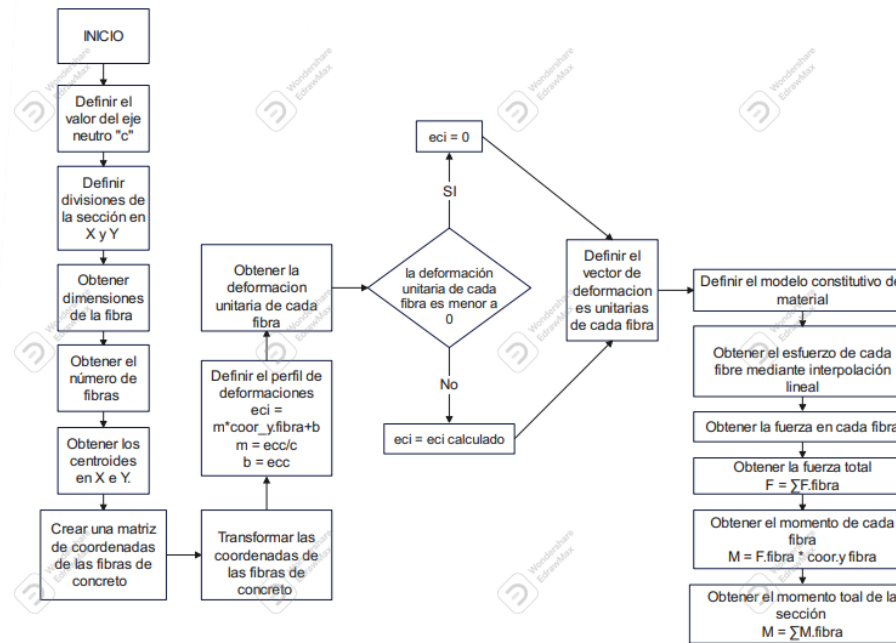
Para la presente investigación se utilizó AutoCAD como implementación grafica del modelo, puesto que AutoCAD es un software especializado de dibujo en el cual se pueden replicar de mejor manera las secciones deseadas por el usuario, además mediante la implementación de bloques dinámicos y uso de funciones del propio software, obtener la información pertinente.

3.4 Flujogramas del modelo computacional

3.4.1 Concreto

Figura 5

Flujograma Concreto

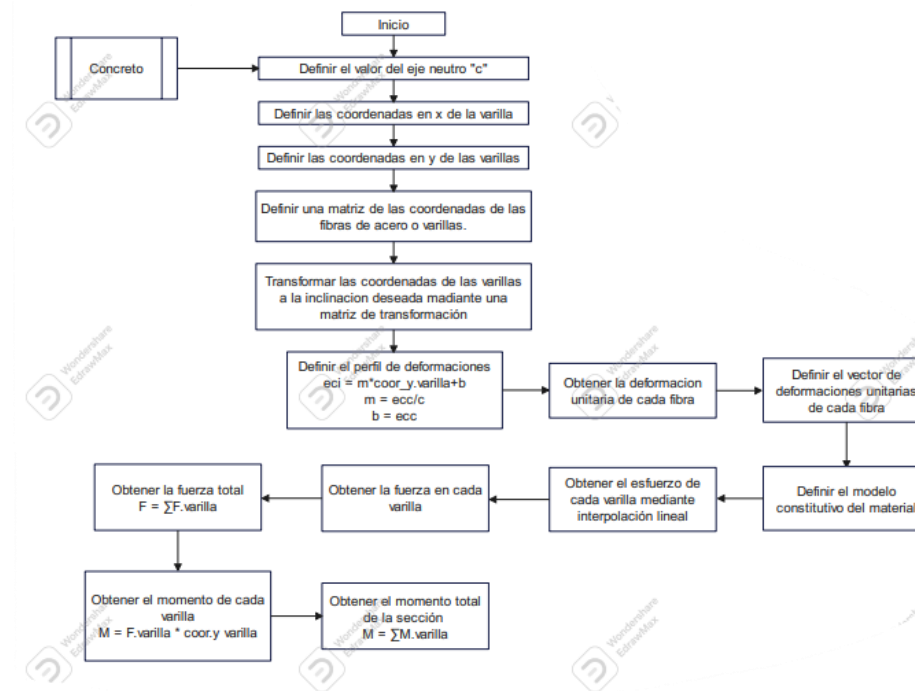


Nota. Elaboración Propia

3.4.2 Acero

Figura 6

Flujograma Acero.

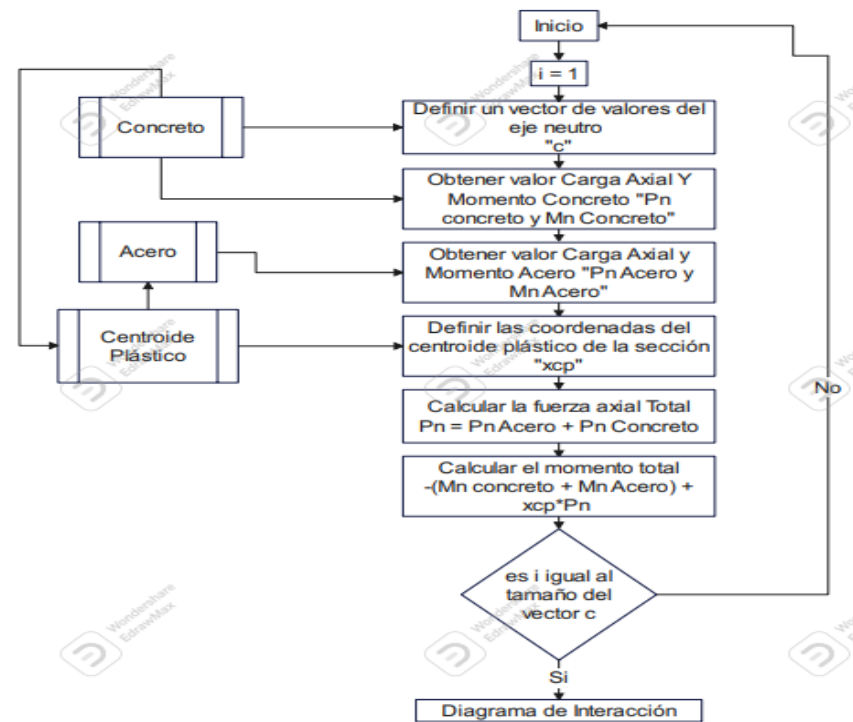


Nota. Elaboración Propia

3.4.3 Diagrama de Interacción

Figura 7

Flujograma Interacción.

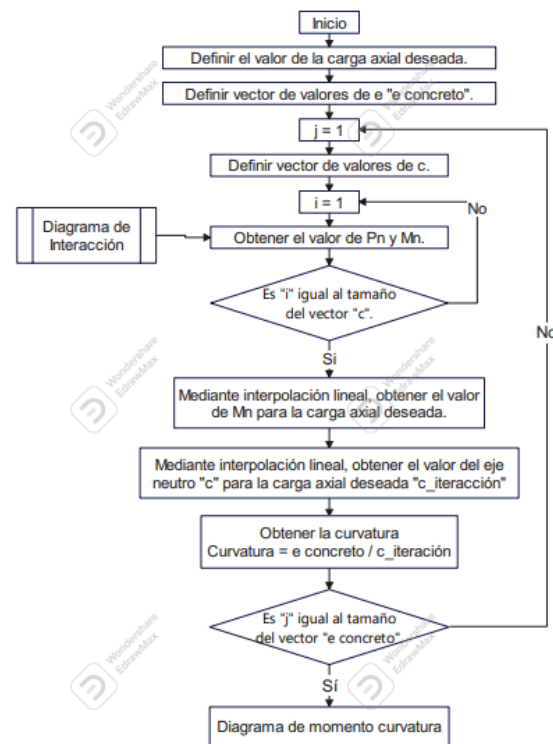


Nota. Elaboración Propia

3.4.4 Diagrama de Momento Curvatura

Figura 8

Flujograma Momento Curvatura.



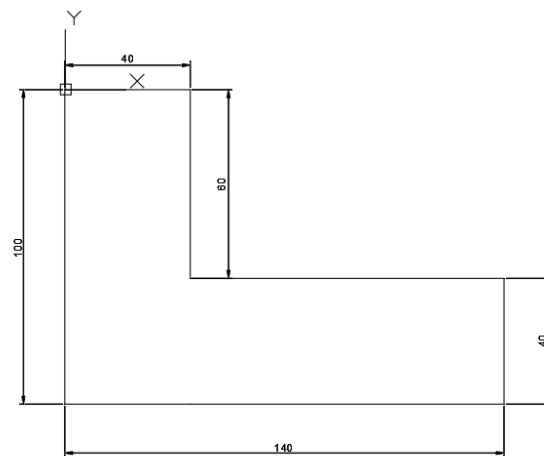
Nota. Elaboración Propia.

3.5 Aplicación del Algoritmo para la obtención del diagrama de flexocompresión biaxial.

Para replicar el algoritmo anteriormente explicado, se recurrió a Matlab como lenguaje de programación, esto puesto que Matlab es un lenguaje de fácil implementación, que, además, contiene funciones de gran utilidad para la aplicación de algoritmos ingenieriles.

A continuación, se presenta una aplicación práctica de cómo obtener un punto del diagrama de interacción biaxial.

1. Se dibuja la sección que se desea analizar en un punto de referencia, con el fin de referenciar la sección desde un punto con coordenadas conocidas, este punto en el punto de origen (0,0).

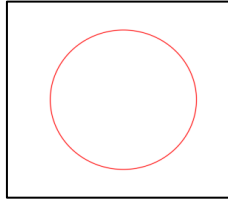


2. Para dibujar las varillas de acero, se usa el siguiente bloque dinámico que tiene como datos de entrada el diámetro de la varilla y arroja la siguiente información:

- Diámetro de la varilla
- Coordenadas del centroide de la varilla.

Figura 9

Fibra de Acero.



PROPERTIES

Block Reference

General

Color	ByLayer
Layer	0
Linetype	ByLayer
Linetype scale	1
Plot style	ByColor
Lineweight	ByLayer
Transparency	ByLayer
Hyperlink	

3D Visualization

Material	ByLayer
----------	---------

Geometry

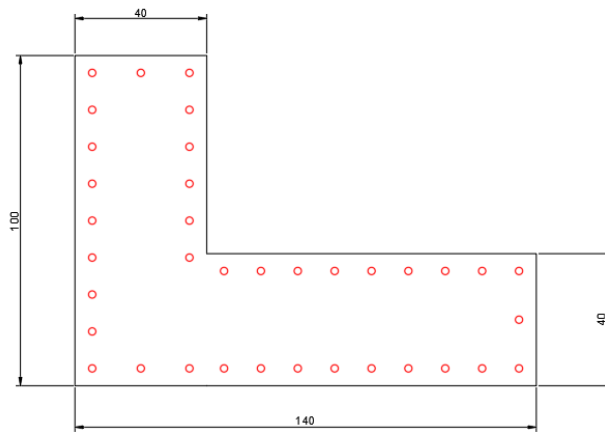
Position X	2326.263
Position Y	1583.7038
Position Z	0
Scale X	1
Scale Y	1
Scale Z	1

Misc

Name	Fibra de Acero
Rotation	0
Annotative	No
Block Unit	Millimeters
Unit factor	1

Custom

Diametro	22
----------	----

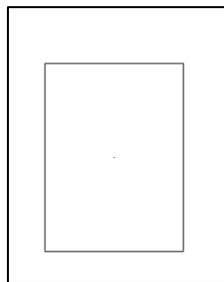


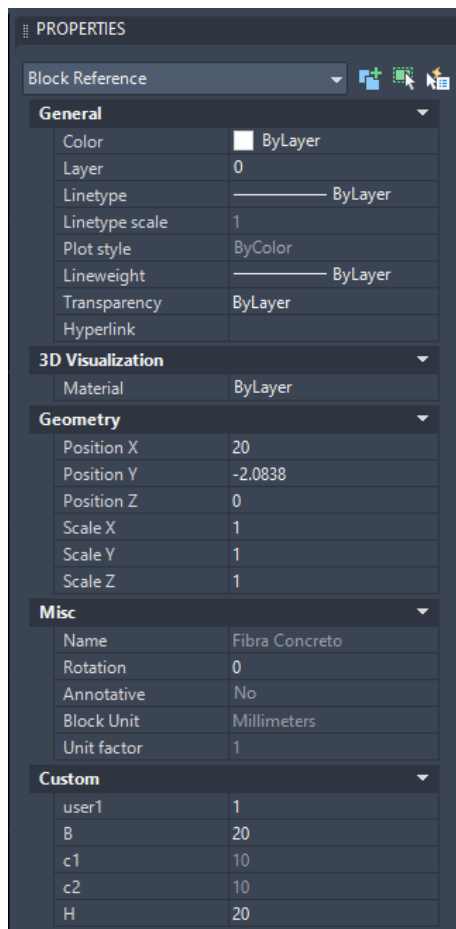
3. Se divide la sección correspondiente en las fibras deseadas, para realizar este proceso se utiliza el siguiente bloque dinámico que tiene como datos de entrada las dimensiones de la fibra y arroja la siguiente información.

- Dimensión en X de la fibra “B”.
- Dimensión en Y de la fibra “H”
- Coordenadas en del centroide de la fibra

Figura 10

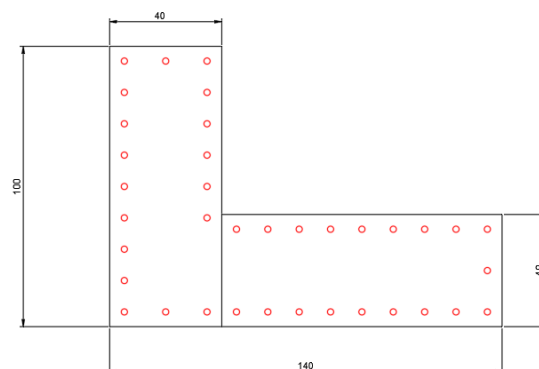
Fibra de Concreto



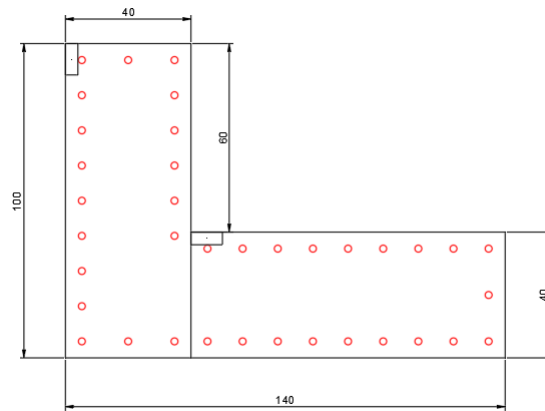


Para este ejemplo se considera fibras de 5cm por lado.

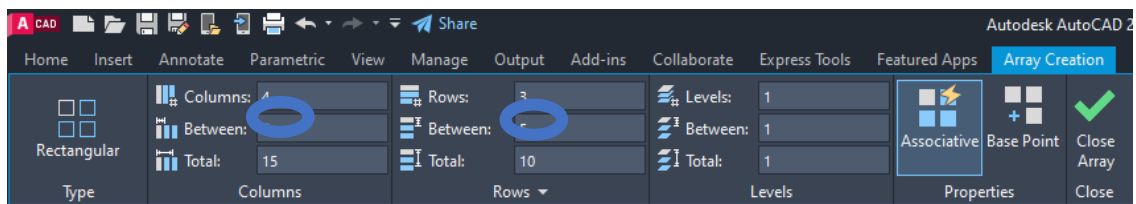
4. Para realizar la división de fibras, primeramente, se divide la sección en secciones rectangulares.



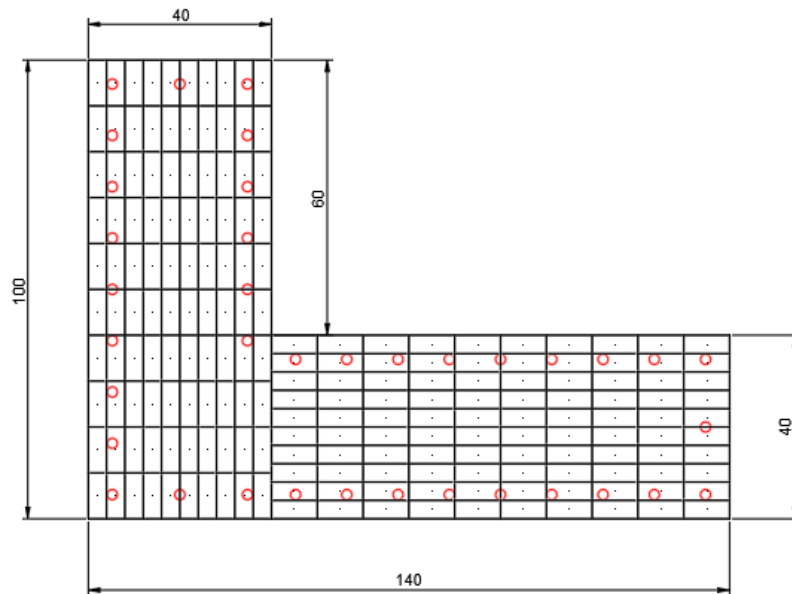
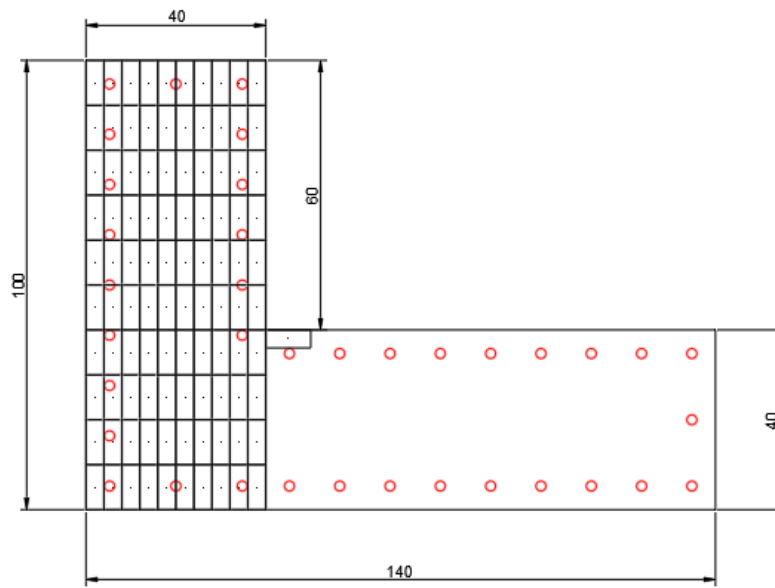
5. A continuación, se coloca la fibra correspondiente en alguna esquina de referencia de cada rectángulo obtenido.



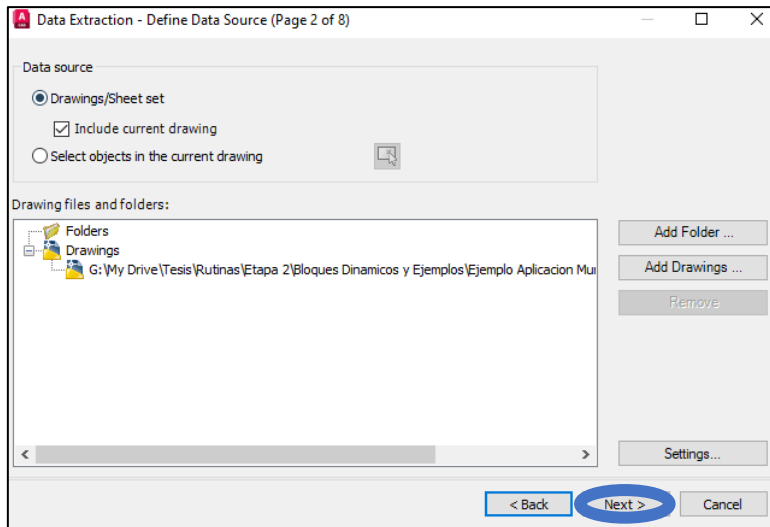
6. Se digita el comando “Array”, en el menú superior se coloca el espaciamiento en x e y que se desea separar las fibras, como se desea que sea una malla continua se coloca un espaciamiento igual a la dimensión de la fibra, en este caso 5cm en cada dirección.



7. Con las flechas proporcionadas del comando “Array”, se tira la malla hasta donde se desee.



8. Finalmente, se desea obtener los datos de salida del modelo grafico presentado, para realizar esto se digita el comando “dataextraction”. Se guarda el formato correspondiente.



9. Se selecciona solo los objetos que se desea obtener la información.

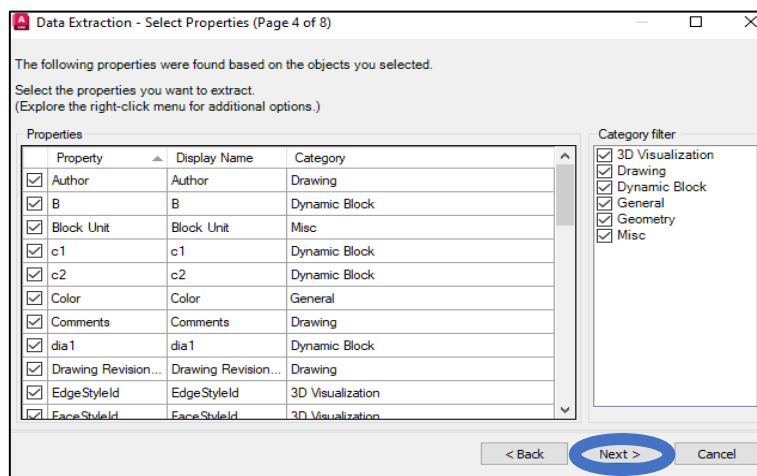
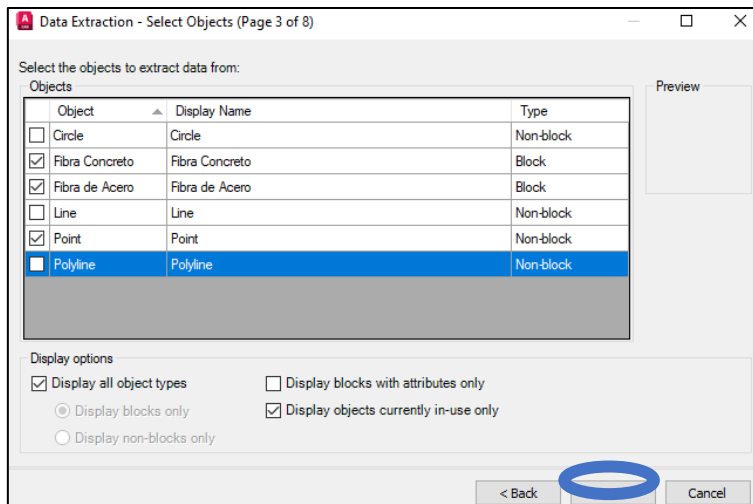
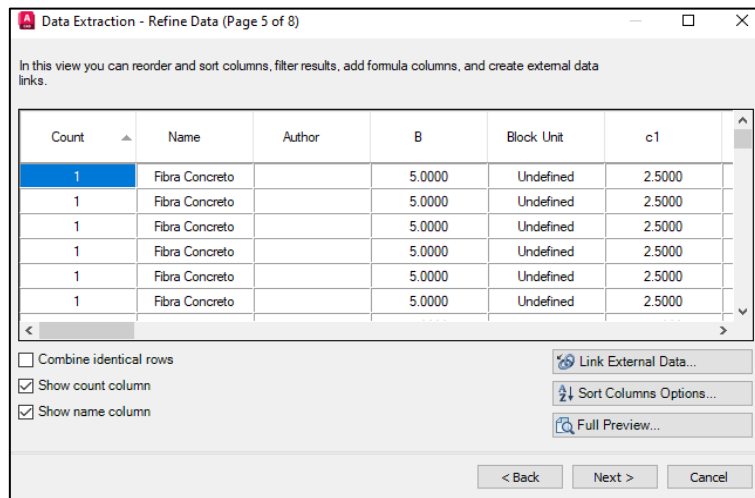
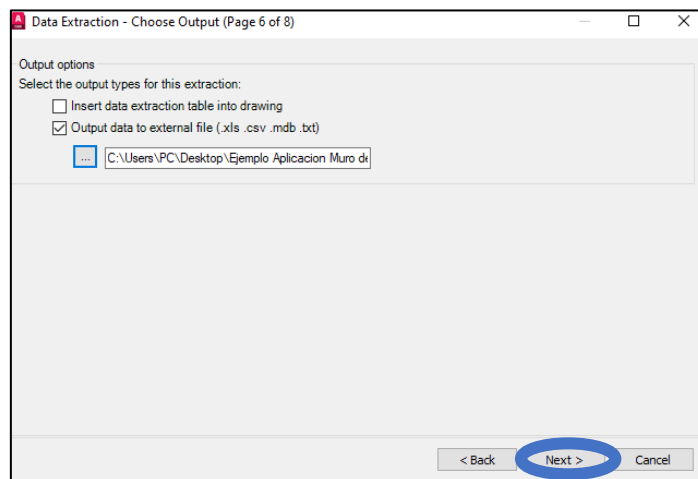


Figura 11

Función "Dataextraction" AutoCAD



10. Se guarda la información en formato .xls en la ubicación deseada.



11. A continuación, es necesario realizar una función que permita extraer únicamente la información deseada de los datos proporcionados por AutoCAD. Se desea la siguiente información:

- Posición centroide fibras de concreto.
- Posición centroide fibras de acero (varillas).
- Área fibras de concreto
- Área fibras de Acero.

```

function
[Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area
_fibras_Acero] = Lectura_Archivo(Filename)

[ndata,text,alldata] = xlsread(Filename);

Titulos = alldata(2:end,2);
x = alldata(2:end,29);
y = alldata(2:end,30);
Fibras = [Titulos,x,y];

% Definimos las posiciones de las fibras de Concreto

for i = 1: length(Fibras)
    if strcmp(Fibras(i,1),'Point') == 1
        Posicion_Fibras_ConcretoT(i,1) = str2double(x(i,1));
        Posicion_Fibras_ConcretoT(i,2) = str2double(y(i,1)).*-1;
    else
        Posicion_Fibras_ConcretoT(i,1) = 0;
        Posicion_Fibras_ConcretoT(i,2) = 0;
    end
end
Posicion_Fibras_Concreto1 = nonzeros(Posicion_Fibras_ConcretoT(:,1));
Posicion_Fibras_Concreto2 = nonzeros(Posicion_Fibras_ConcretoT(:,2));
Posicion_Fibras_Concreto = [Posicion_Fibras_Concreto1
Posicion_Fibras_Concreto2];

% Definimos las posiciones de las fibras de Acero

for i = 1: length(Fibras)
    if strcmp(Fibras(i,1),'Fibra de Acero') == 1
        Posicion_Fibras_AceroT(i,1) = str2double(x(i,1));
        Posicion_Fibras_AceroT(i,2) = str2double(y(i,1)).*-1;
    else
        Posicion_Fibras_AceroT(i,1) = 0;
        Posicion_Fibras_AceroT(i,2) = 0;
    end
end
Posicion_Fibras_Acero1 = nonzeros(Posicion_Fibras_AceroT(:,1));
Posicion_Fibras_Acero2 = nonzeros(Posicion_Fibras_AceroT(:,2));
Posicion_Fibras_Acero = [Posicion_Fibras_Acero1 Posicion_Fibras_Acero2];

%Definimos el area de la seccion y de las fibras de concreto

DimensionX = str2double(alldata(2:end,4));
DimensionY = str2double(alldata(2:end,20));

```

```

Area_fibras_ConcretoT = DimensionX.*DimensionY;
Area_fibras_ConcretoT(isnan(Area_fibras_ConcretoT)) = 0;
Area_fibras_Concreto = nonzeros(Area_fibras_ConcretoT);

%Definimos el área de las fibras de acero

Diametros_Varillas = str2double(alldata(2:end,42));
Area_fibras_AceroT = (pi/4).*Diametros_Varillas.^2;
Area_fibras_AceroT(isnan(Area_fibras_AceroT)) = 0;
Area_fibras_Acero = nonzeros(Area_fibras_AceroT);
end

```

Concreto

12. Posteriormente, se transforma las coordenadas del centroide de cada una de las fibras a la inclinación deseada mediante una matriz de transformación, utilizando la siguiente función.

```

function T = transformacion(theta)
T = [cosd(theta) -sind(theta);sind(theta) cosd(theta)];
end

```

```

function [coor_Fibras_G] = Fibras (Filename,theta)

%Esta función arroja las coordenadas de las fibras de concreto en
coordenadas globales
% necesita como datos de entrada el nombre del archivo que arrojó los
datos
% pertinentes de Autocad y el ángulo de inclinación de la sección.

[Posicion_Fibras_Concreto,~,~,~] = Lectura_Archivo(Filename);

T = transformacion(theta);

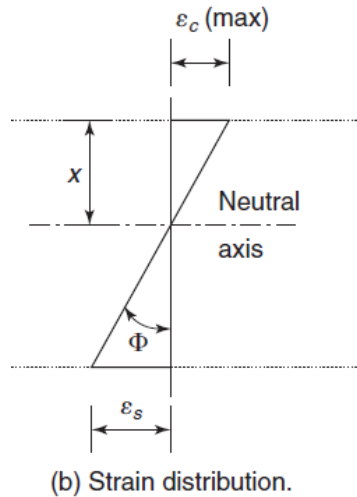
for i = 1:length(Posicion_Fibras_Concreto)
    coor_Fibras_G(i,:) = Posicion_Fibras_Concreto(i,:)*T';
end
end

```

13. Utilizando la ecuación de la recta, se determina los desplazamientos unitarios de las varillas bajo la suposición propuesta por Navier.

Figura 12

Perfil de Deformaciones Unitarias de la sección de Concreto Armado.



Nota. Adaptado de Reinforced Concrete Mechanics and Design (p. 479), por James K Wight, 2021.

El perfil de deformaciones unitarias sigue la siguiente ecuación.

$$m = \frac{ecc}{c}$$

$$b = ecc$$

$$x = -my + b$$

Donde

x es la deformación unitaria de cada fibra

y son las coordenadas del centroide a la inclinación deseada de cada fibra.

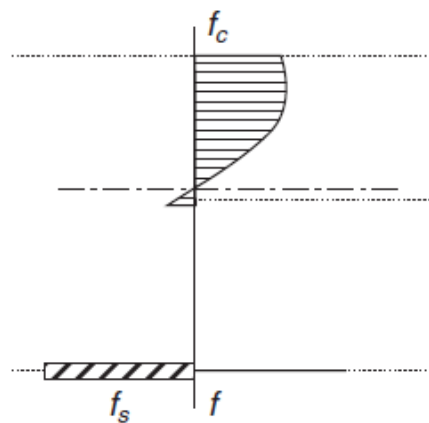
- Si la deformación unitaria de la fibra es menor a 0, significa que la fibra está trabajando a tensión, en este caso se desprecia.
14. Se define el vector de deformaciones unitarias de cada fibra.

15. Se define el modelo constitutivo del material (Modelo Constitutivo de Mander o Modelo Tradicional de Whitney).

16. Se define el vector de esfuerzos de cada fibra realizando una interpolación lineal de las deformaciones unitarias de cada fibra con el modelo constitutivo del material.

Figura 13

Perfil de Esfuerzos de la sección de Concreto Armado.



(c) Stress distribution.

Nota. Adaptado de Reinforced Concrete Mechanics and Design (p. 479), por James K Wight, 2021.

17. Se obtiene la fuerza de cada fibra siguiendo la siguiente ecuación.

$$F \text{ fibra} = \sigma \text{ fibra} * \text{Area. fibra}$$

18. Se obtiene la fuerza total.

$$P_n \text{ concreto} = \sum F \text{ fibra}$$

19. Se obtiene el momento de cada fibra siguiendo la siguiente ecuación.

$$M \text{ fibra} = F \text{ fibra} * \text{coor.y.transf fibra}$$

20. Se obtiene el momento total

$$Mn \text{ concreto} = \sum M \text{ fibra}$$

```
function [fc,ec] = Concreto_NoConfinado(Hormigon)
fco = Hormigon.fco/10;
eco = Hormigon.eco;
ec_sprall = 0.0064; %Maxima deformacion del concreto no confinado
ec = [0:0.0001:ec_sprall];

%Calculos
Esec = fco/eco;
Ec = 5000*(fco)^0.5;
r = Ec/(Ec-Esec);
x = ec./eco;
for i =1:length(ec)
    if ec(i) <= 2*eco
        fc(i) = fco*x(i)*((r)/(r-1+x(i)^r));
    else
        fc(i) = fco * ((2*r)/(r-1+2^r)) * (1-((ec(i)-2*eco))/(ec_sprall-
2*eco));
    end
end

fc = fc.*10;
end
```

```
function [Pn_Concreto,Mn_Concreto] =
Concreto(coor_Fibras_G,c,Hormigon,Filename)

%Definimos el perfil de deformaciones unitarias de las fibras

m=-Hormigon.eco./c;
b=Hormigon.eco;
eci=m.*coor_Fibras_G(:,2)+b;

for i = 1: length(eci)
    if eci(i,1) < 0
        eci(i,1) = 0;
    else
        eci(i,1) = eci(i,1);
    end
end
```

```

end
end

%Definimos el modelo constitutivo del material, este puede ser el modelo
%constitutivo propuesto por mander para el concreto no confinado o el
%modelo tradicional de Whitney.
[fc,ec] = Concreto_NoConfinado(Hormigon);

for i=1:length(eci)
    fci(i,1) = interp1(ec,fc,eci(i,1),'linear','extrap');
end

[~,~,Area_fibras_Concreto,~] = Lectura_Archivo(Filename);

%Obtenemos el area de una fibra de concreto (Todas las areas son
iguales)
%Puesto que las fibras son iguales

for i = 1: length(Area_fibras_Concreto)
    if Area_fibras_Concreto(i) ~= 0
        Area_fibra_concreto = Area_fibras_Concreto(i);
    end
end
%Obtenemos la fuerza conociendo que esfuerzo = fuerza * area fibra

fci(isnan(fci)) = 0;
F = fci.*Area_fibra_concreto;
Pn_Concreto = sum(F)*10^-3; %Ton
M = F.*coor_Fibras_G(:,2);
M(isnan(M)) = 0;
Mn_Concreto = sum(M)*10^-5; %Ton*m

end

```

Acero

21. Transformar las coordenadas de las varillas a la inclinación deseada, mediante una matriz de transformación.
22. Utilizando la ecuación de la recta, determinamos los desplazamientos unitarios de las varillas bajo la suposición propuesta por Navier.
23. Se define el vector de esfuerzos de cada fibra de acero realizando una interpolación lineal de las deformaciones unitarias de cada fibra con el modelo constitutivo del material.

24. Se define el modelo constitutivo del material.
25. Se define el vector de esfuerzos de cada fibra mediante interpolación lineal.
26. Se obtiene la fuerza de cada varilla siguiendo la siguiente ecuación.

$$F \text{ varilla} = \sigma_{\text{varilla}} * \text{Area. varilla}$$

27. Se obtiene la fuerza total.

$$P_n \text{ acero} = \sum F \text{ varilla}$$

28. Se obtiene el momento de cada fibra siguiendo la siguiente ecuación.

$$M \text{ varilla} = F \text{ varilla} * \text{coord. y. transf varilla}$$

29. Se obtiene el momento total

$$M_n \text{ varilla} = \sum M \text{ varilla}$$

```
function [ei] = deformacion_unitaria_varillas(d,c,econcreto)

% Buscamos los valores de deformacion unitaria de los elementos para un
% valor de d
% Utilizando la ecuacion de la recta, determinamos los
desplazamientos
% unitarios de las varillas bajo la suposicion que secciones planas
% permanecen plana
% d es en vector con las coordenadas de las capas de acero en
relacion
% al extremo en compresion
% c - es la distancia del eje neutro
% e concreto es una variable que representa la deformacion unitaria
% %maxima en
% compresion
m=-econcreto/c;
b=econcreto;
ei=m.*d+b;
e = abs(min(ei));

end
```

```

function [es,fs] = RebarSteel(Varilla)
% Esta función devuelvo el modelo constitutivo del acero propuesto por
...
% utiliza como datos de entrada una estructura llamada refuerzo que debe
% contener datos como fy, Es y ey

esh = 0.008;
esu = 0.12;
Esh = 7000;
fy = Varilla.fy/10;
Es = Varilla.E/10 ;
fsu = 630;

%Calculos

P = Esh*((esu-esh)/(fsu-fy));
es1 = [0 Varilla.ey esh esh];
fs1 = [0 fy+0.000001 fy+0.00001 fy+0.00001];
es2 = [es1(end,end):0.0005:esu];
fs2 = fsu + (fy-fsu).*((esu-es2)./(esu-esh)).^P+0.01;

%Definimos las deformaciones y esfuerzos negativos

es3 = [-esh -esh -Varilla.ey];
fs3 = [-fy-0.000001 -fy-0.00001 -fy-0.00001];
es4 = [es3(1,1):-0.0005:-esu];
es4 = flip(es4);
fs4 = -fs2;
fs4 = flip(fs4);

es = [es4 es3 es1 es2];
fs = [fs4 fs3 fs1 fs2].*10;

end

```

```

function [Pn_Acero,Mn_Acero] =
Acero_fibras(theta,c,Varilla,Hormigon,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_A
cero)

%Esta función tiene como datos de entrada el angulo de inclinacion, el
%valor del eje neutro, una estructura llamada varilla que debe tener como
%datos fy, Es, ey del acero, una estructura llamda hormigon que debe
tener
%de dato la deformacion unitaria del concreto y la posición y area de
las fibras de acero correspondientes.

```

```

T = transformacion(theta);

for i = 1:length(Posicion_Fibras_Acero)
    coor_Varillas_G(i,:) = Posicion_Fibras_Acero(i,:)*T';
end

coor_Varillas_G(coor_Varillas_G==0) = NaN;
[ei] =
deformacion_unitaria_varillas(coor_Varillas_G(:,2),c,Hormigon.eco);

%Definimos el modelo constitutivo del material, este puede ser el modelo
%constitutivo propuesto por Park para el acero endurecido por deformación
o el %modelo tradicional bilineal del acero.

[es, facero] = MConst_Acero(Hormigon,Varilla);
 %[es, facero] = MConst_Acero(Hormigon,Varilla);

es_unique = unique(es);
facero_unique = zeros(size(es_unique));
for i = 1:length(es_unique)
    facero_unique(i) = mean(facero(es==es_unique(i)));
end

for i = 1 : length(coor_Varillas_G)
    fs(i,1) = interp1(es_unique,facero_unique,ei(i),'linear','extrap');
end

Pn_As = fs .* Area_fibras_Acero;
Pn_As(isnan(Pn_As)) = 0;
Pn_Acero = sum (Pn_As).*10^-3;
Mn_As = Pn_As .*coor_Varillas_G(:,2);
Mn_As(isnan(Mn_As)) = 0;
Mn_Acero = sum (Mn_As).*10^-5;

```

Interacción

30. Definir las coordenadas del centroide de la sección para la inclinación deseada.
31. Transformar las coordenadas del centroide plástico a la inclinación deseada, mediante una matriz de transformación.

```

function [centroide_G] =
centroideG(theta, Posicion_Fibras_Concreto, Posicion_Fibras_Acero, Area_fibras_Concreto, Area_fibras_Acero)

%Esta funcion devuelve la coordenada del centroide en Y en la
%inclinacion deseada, necesita como datos de entrada el angulo de
%inclinación, una estructura llamada hormigon que tiene como dato la
%deformacion uniaxial del concreto además de las posiciones y areas de
las fibras de acero y concreto.

T = transformacion(theta);
xi = Posicion_Fibras_Acero(:,2);

Momento_As = Area_fibras_Acero.*xi.*4200;
Momento_Acero= sum(Momento_As);

F_As = Area_fibras_Acero.*4200;
Fuerza_acero = sum(F_As);

Area_Total = sum(Area_fibras_Concreto);
for i = 1: length(Area_fibras_Concreto)
    if Area_fibras_Concreto(i) ~= 0
        Area_fibra_concreto = Area_fibras_Concreto(i);
    end
end
centroideX =
(sum(Area_fibra_concreto.*Posicion_Fibras_Concreto(:,1))/Area_Total);
centroideY =
(sum(Area_fibra_concreto.*Posicion_Fibras_Concreto(:,2))/Area_Total);

centroide = [centroideX,centroideY];
centroide_G = centroide*T';
centroide_G = centroide_G(1,2);

```

32. Calcular la fuerza axial total

$$P_n = P_n \text{ concreto} + P_n \text{ acero}$$

- Calcular el momento total, se realiza el equilibrio de la sección desde la fibra superior de la misma.

$$M_n = -(M_n \text{ concreto} + P_n \text{ concreto}) + P_n * x_{cp}$$

33. Se repite el mismo proceso para distintos valores del eje neutro.

3.5 Aplicación del Algoritmo para la obtención del diagrama de Momento Curvatura

1. Se realiza el proceso explicado en el apartado interior, para la obtención de las coordenadas del centroide y áreas de las fibras correspondientes.
2. Se define un vector de deformaciones unitarias máximas del concreto
3. Se asigna un valor de carga axial, para la cual, se desea realizar el diagrama de momento curvatura.
4. Se emplea el algoritmo del diagrama de Interacción para la obtención de distintos valores de carga axial y momento, con la diferencia de que se utiliza el modelo constitutivo de Mander confinado, ya que este ejemplifica el diagrama de momento curvatura considerando confinamiento en la sección.

```
function [Pn_Concreto,Mn_Concreto] =  
Concreto(coor_Fibras_G,c,Hormigon,Filename,Estribo,Seccion,Varilla,econcr  
eto)  
  
%Definimos el perfil de deformaciones unitarias de las fibras  
  
m=-econcreto./c;  
b=econcreto;  
eci=m.*coor_Fibras_G(:,2)+b;  
  
for i = 1: length(eci)  
    if eci(i,1) < 0  
        eci(i,1) = 0;  
    else  
        eci(i,1) = eci(i,1);  
    end  
end  
  
[fc,ec] = Mander(Estribo, Hormigon, Varilla, Seccion,econcreto);  
  
for i=1:length(eci)
```

```

    fci(i,1) = interp1(ec,fc,eci(i,1));
end

[~,~,Area_fibras_Concreto,~] = Lectura_Archivo(Filename);

%Obtenemos el area de una fibra de concreto (Todas las areas son
iguales)
%Puesto que las fibras son iguales

for i = 1: length(Area_fibras_Concreto)
    if Area_fibras_Concreto(i) ~= 0
        Area_fibra_concreto = Area_fibras_Concreto(i);
    end
end
%Obtenemos la fuerza conociendo que esfuerzo = fuerza * area fibra

fci(isnan(fci)) = 0;
F = fci.*Area_fibra_concreto;
Pn_Concreto = sum(F)*10^-3; %Ton
M = F.*coor_Fibras_G(:,2);
M(isnan(M)) = 0;
Mn_Concreto = sum(M)*10^-5; %Ton*m

end

```

5. Se realiza una interpolación lineal para obtener el momento correspondiente a la carga axial especificada anteriormente.
6. Se realiza una interpolación lineal para obtener el valor del eje neutro “c” correspondiente a la carga axial especificada anteriormente.
7. Se obtiene el valor de curvatura correspondiente a la deformación unitaria máxima que se utiliza.

$$\mathbf{curvatura} = \frac{c}{ec}$$

Donde

c es el valor del eje neutro correspondiente a la carga axial especificada.

ec es la deformación unitaria máxima del concreto.

8. Se repite el mismo proceso para los distintos valores de la deformación máxima del concreto especificada en el ítem 1.

4 CAPITULO IV: RESULTADOS

4.2 Sección Regular

4.2.1 Diagrama de Interacción

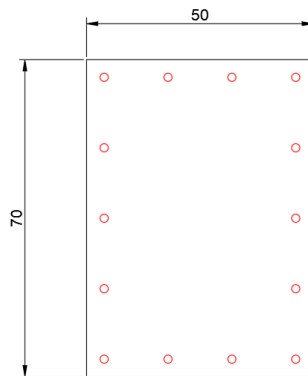
Se presenta la siguiente sección rectangular de una columna de hormigón armado de sección 50x70cm con varilla de diámetro 18.

Para este ejemplo se consideran los siguientes parámetros.

- Inclinación de 45°.
- $f_c = 240 \text{ kg/cm}^2$.
- $ecc = 0.003$.
- $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.
- $E_s = 2040000 \text{ kg/cm}^2$.

Figura 14

Sección Regular de 50x70 cm.



4.2.1.1 Diferente número de divisiones de la sección.

Se busca obtener el diagrama de interacción para distintas divisiones de la sección, se presenta como ejemplo la rutina de Matlab utilizada.

```
clc  
clear
```

```

theta = 45; %grados

Hormigon.fco = 240;
Hormigon.eco = 0.003;
Hormigon.es_max = 0.1;

Varilla.fy = 4200;
Varilla.E = 2.04*10^6;
Varilla.ey = Varilla.fy/Varilla.E;

Seccion.B = 50;
Seccion.H =70;

% Se definen los valores de co, cbalanceado y cmáximo.
co = 0.00001;
cb = Hormigon.eco/(Hormigon.eco+Varilla.ey)*Seccion.H;
cmax = Seccion.H/0.5;

% Se definen los puntos del diagrama de interaccion
c1 = [co:(co+cb)/5:cb];
c2 = [cb+0.0001:(cb+cmax)/40:cmax];
c = [c1 c2];

%Se selecciona el nombre del archivo correspondiente que se obtuvo de la
%funcion dataextraction proporcionada por el AutoCAD.
Filename = 'Columna 50x70 10 divisiones';
%Se obtiene las posciones del centroide y area de las fibras de concreto
y
%acero.
[Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_fibras_Acero] = Lectura_Archivo(Filename);
[coor_Fibras_G] = Fibras (Filename,theta);
coor_Fibras_G(coor_Fibras_G==0) = NaN;
%Se define el valor del centroide de la sección considerando la
inclinación
%deseada
[centroide_G] =
centroideG(theta,Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_fibras_Acero);
%Se obtiene el valor de carga axial y momento tanto del acero como del
%concreto
for i = 1: length(c)
    [AxialC,MomentoC] = Concreto(coor_Fibras_G,c(i),Hormigon,Filename);
    [AxialA,MomentoA] =
Acero_fibras(theta,c(i),Varilla,Hormigon,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Acero);
    Mn_Concreto(i,1) = MomentoC;
    Pn_Concreto(i,1) = AxialC;
    Mn_Acero(i,1) = MomentoA;
    Pn_Acero(i,1) = AxialA;

```

```

end
%Se obtiene el valor de carga axial "Pn" y momento "Mn" para el valor
del eje neutro asignado.
Pn = Pn_Concreto+Pn_Acero;
for i = 1:length(Mn_Concreto)
    Mn(i,1) = -
(Mn_Concreto(i,1)+Mn_Acero(i,1))+(Pn(i,1).*centroide_G/100);
end

plot(Mn,Pn)

```

Figura 15

Sección Regular con 2 divisiones por lado.

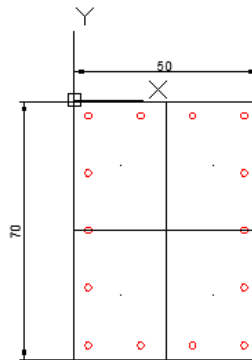


Figura 16

Sección Regular con 3 divisiones por lado.

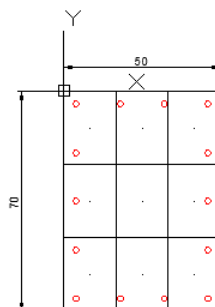


Figura 17

Sección Regular con 5 divisiones por lado.

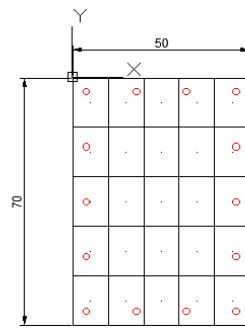


Figura 18

Sección Regular con 10 divisiones por lado.

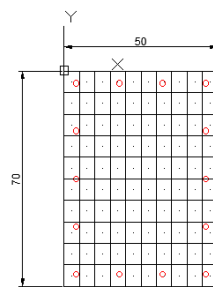


Figura 19

Sección Regular con 20 divisiones por lado.

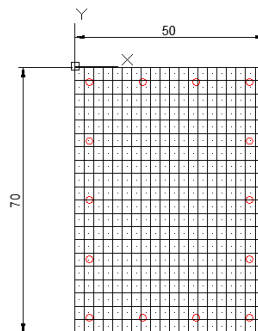
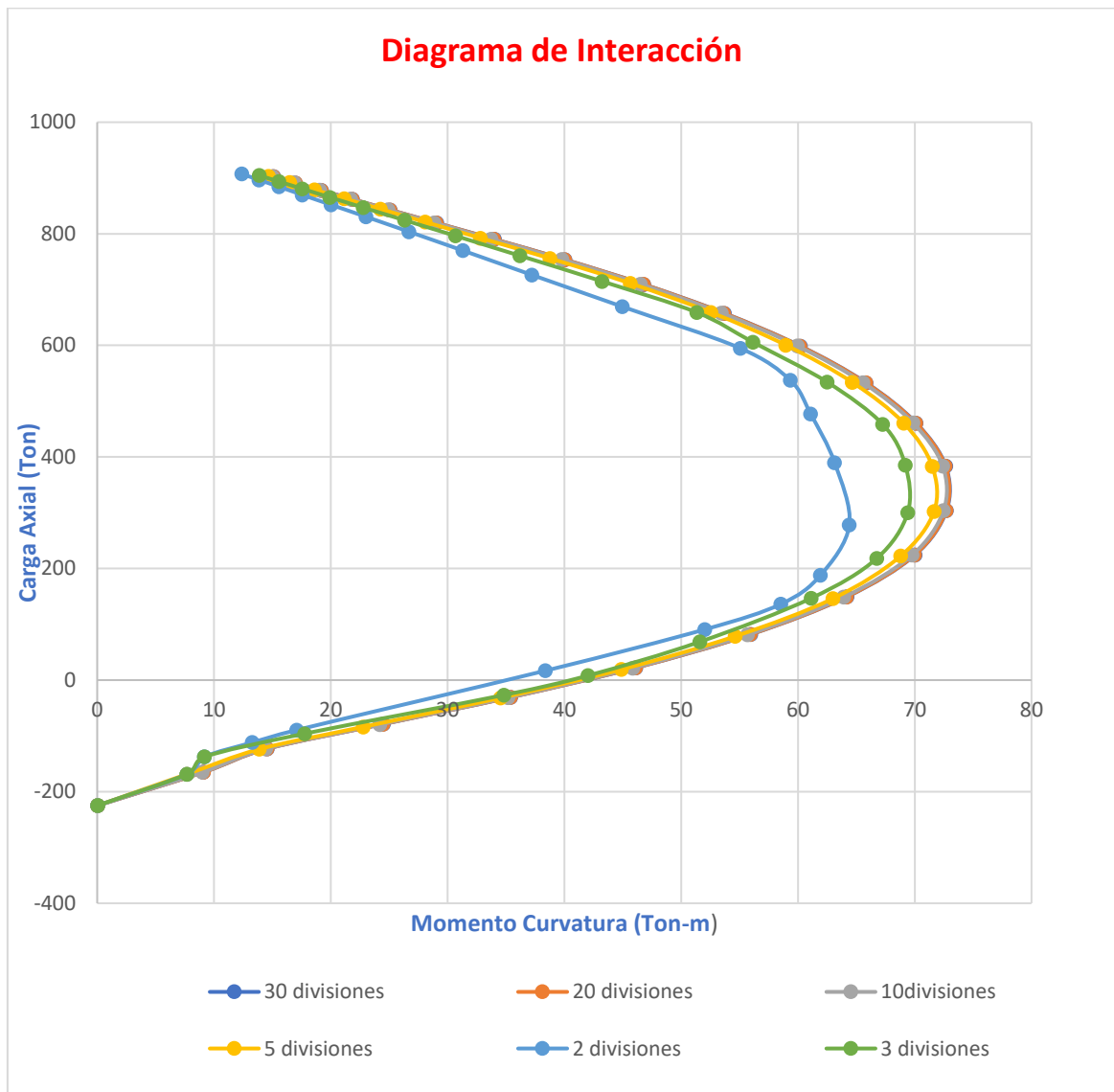


Figura 20

Diagrama de Interacción sección regular para distintas discretizaciones de la sección.

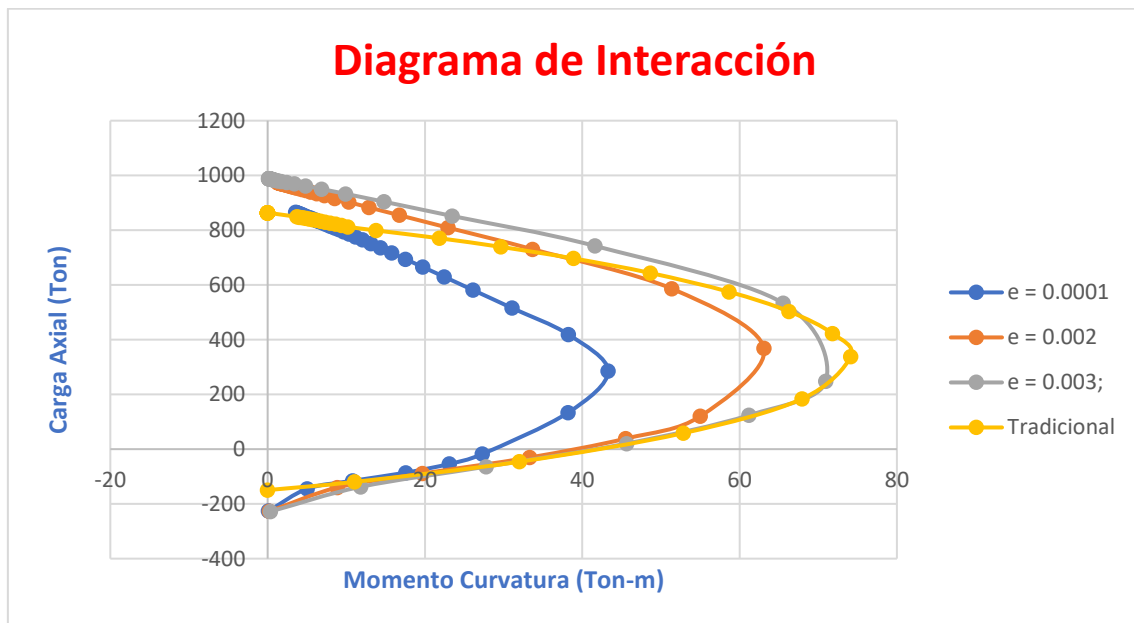


4.2.1.2 Diferentes deformaciones unitarias máximas del concreto

Se presenta el diagrama de interacción para distintas deformaciones máximas del concreto, además del diagrama de interacción considerando los modelos tradicionales de diseño (Whitney y Modelo Bilineal-Acero).

Figura 21

Diagrama de Interacción sección regular para distintas ecc máximas y para el modelo tradicional.



4.2.2 Diagrama de Momento Curvatura

4.2.2.1 Diferente división de Fibras

Se busca obtener el diagrama de momento curvatura para distintas divisiones de la sección, las cuales se presentaron anteriormente, se presenta como ejemplo la rutina de Matlab utilizada.

```
clc
clear

theta = 45; %grados

%c = 100;
```

```

Hormigon.fco = 240;
Hormigon.eco = 0.003;
Hormigon.es_max = 0.1;

Varilla.fy = 4200;
Varilla.E = 2.04*10^6;
Varilla.ey = Varilla.fy/Varilla.E;
Varilla.diametro = 22;
Varilla.NoB = 7;
Varilla.NoH = 3;

Seccion.b = 40;
Seccion.h = 100;
Seccion.rec = 3;

Estribo.diametro = 10;
Estribo.fy = 4200;
Estribo.NoB = 0;
Estribo.NoH = 0;
Estribo.espaciamiento = 10;

econcreto =[0.0001:0.005:0.1];

co = 0.00001;
cb = Hormigon.eco/(Hormigon.eco+Varilla.ey)*Seccion.h;
cmax = Seccion.h/0.5;

% Se definen los puntos del diagrama de interaccion
c1 = [co:(co+cb)/5:cb];
c2 = [cb+0.0001:(cb+cmax)/12:cmax];
c = [c1 c2];

for j = 1:length(econcreto)
    Filename = 'Muro de Corte 10 divisiones';

    [Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_fibras_Acero] = Lectura_Archivo(Filename);
    [coor_Fibras_G] = Fibras (Filename,theta);
    coor_Fibras_G(coor_Fibras_G==0) = NaN;
    [centroide_G] =
    centroideG(theta,Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_fibras_Acero);
    [cp_inclinado] =
    centroide_plastico(theta,Hormigon,Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_fibras_Acero);
    for i = 1: length(c)
        [AxialC,MomentoC] =
        Concreto(coor_Fibras_G,c(i),Hormigon,Filename,Estribo,Seccion,Varilla,ecoconcreto(j));
    end
end

```

```

    [AxialA,MomentoA] =
Acero_fibras(theta,c(i),Varilla,Hormigon,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Acero,econcreto(j));
    Mn_Concreto(i,1) = MomentoC;
    Pn_Concreto(i,1) = AxialC;
    Mn_Acero(i,1) = MomentoA;
    Pn_Acero(i,1) = AxialA;
end
format shortE
Pn = Pn_Concreto+Pn_Acero;
for i = 1:length(Mn_Concreto)
    Mn(i,1) = -
(Mn_Concreto(i,1)+Mn_Acero(i,1))+(Pn(i,1).*centroide_G/100);

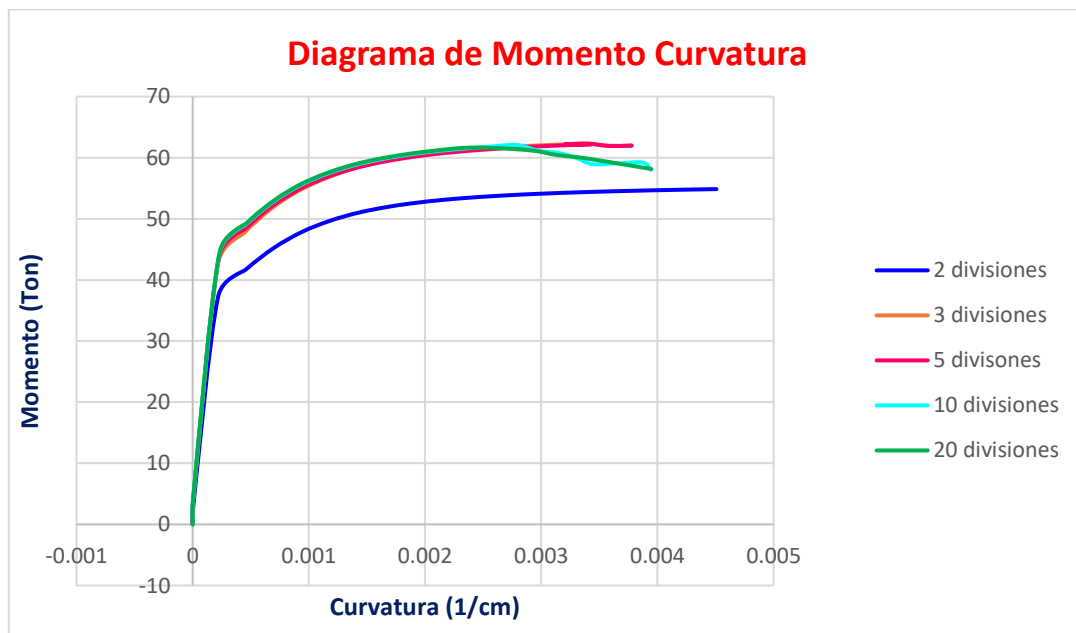
end

M(j,1) = interp1(Pn,Mn,0);
c_iteracion = interp1(Pn,c,0);
curvatura(j,1) = econcreto(j)./c_iteracion;
end
plot(curvatura,M)

```

Figura 22

Diagrama de Momento Curvatura sección regular para distintas discretizaciones de la sección.



4.2.2.2 Diferente confinamiento

Se presentan los siguientes casos de distintos confinamientos de la sección.

Figura 23

Diferentes Confinamientos de Sección Regular.

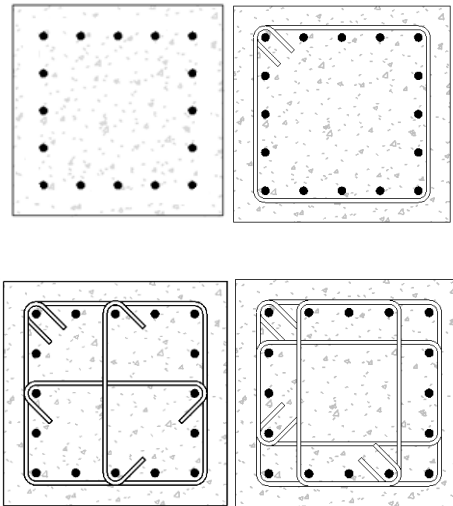
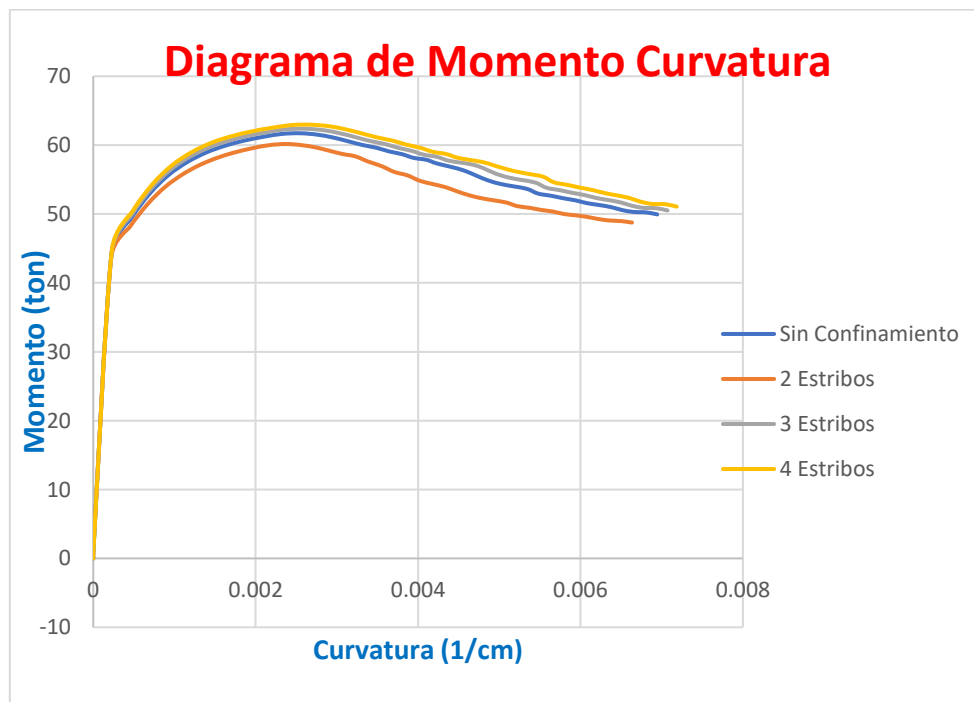


Figura 24

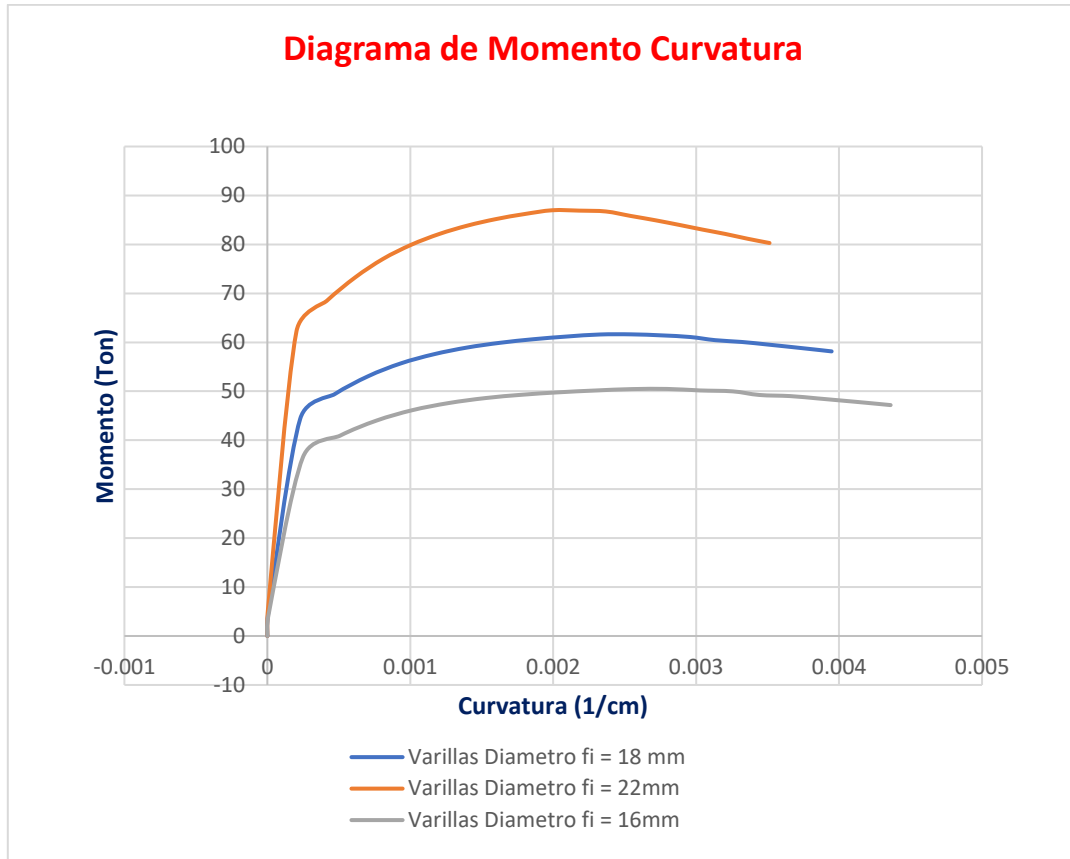
Diagrama de Momento Curvatura sección regular para distintos confinamientos.



4.2.2.3 Diferente cuantía de acero

Figura 25

Diagrama de Momento Curvatura sección regular para distintas cuantías de acero.



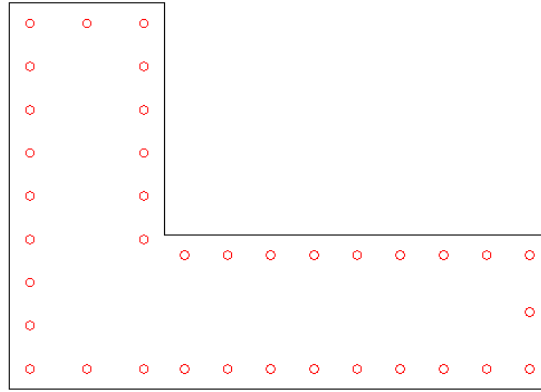
4.3 Sección Irregular

4.3.1 Diagrama de Interacción

Se presenta la siguiente sección irregular que representa un muro de corte de una estructura de concreto armado.

Figura 26

Sección irregular tipo L Muro de Corte.



Para este ejemplo se consideran los siguientes parámetros.

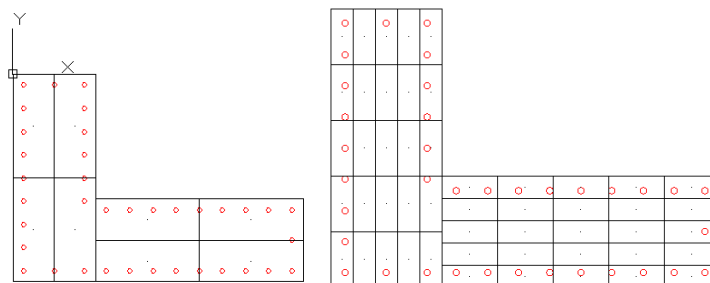
- Inclinación de 45° .
- $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$.
- $ecc = 0.003$.
- $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.
- $E_s = 2040000 \text{ kg/cm}^2$.

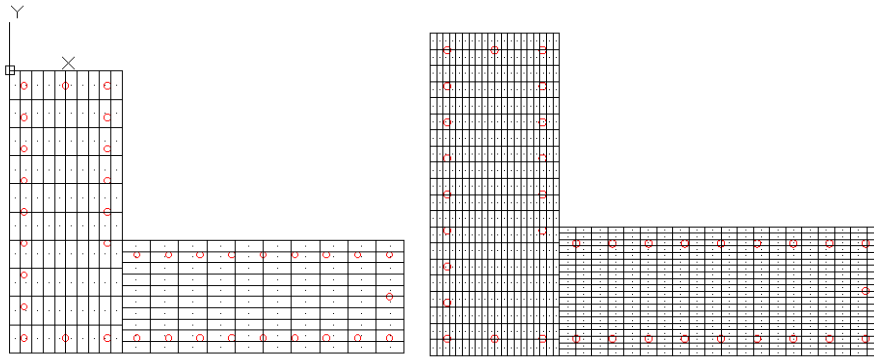
4.3.1.1 Diferente número de divisiones de la sección.

Se busca obtener el diagrama de interacción para distintas divisiones de la sección, se presenta como ejemplo la rutina de Matlab utilizada.

Figura 27

Sección irregular con 2, 5, 10, 20 divisiones por lado.





```

clc
clear

theta = 45; %grados

Hormigon.fco = 240;
Hormigon.eco = 0.003;
Hormigon.es_max = 0.1;

Varilla.fy = 4200;
Varilla.E = 2.04*10^6;
Varilla.ey = Varilla.fy/Varilla.E;

%Seccion.B = 50;
Seccion.H =130;

co = 0.00001;
cb = Hormigon.eco/(Hormigon.eco+Varilla.ey)*Seccion.H;
cmax = Seccion.H/0.2;

% Se definen los puntos del diagrama de interaccion
c1 = [co:(co+cb)/5:cb];
c2 = [cb+0.0001:(cb+cmax)/100:cmax];
c = [c1 c2];

%Se selecciona el nombre del archivo correspondiente que se obtuvo de la
%funcion dataextraction proporcionada por el AutoCAD.
Filename = 'Muro de Corte 10 divisiones';
%Se obtiene las posciones del centroide y area de las fibras de concreto
y
%acero.
[Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_fibras_Acero] = Lectura_Archivo(Filename);
[coor_Fibras_G] = Fibras (Filename,theta);
coor_Fibras_G(coor_Fibras_G==0) = NaN;

```

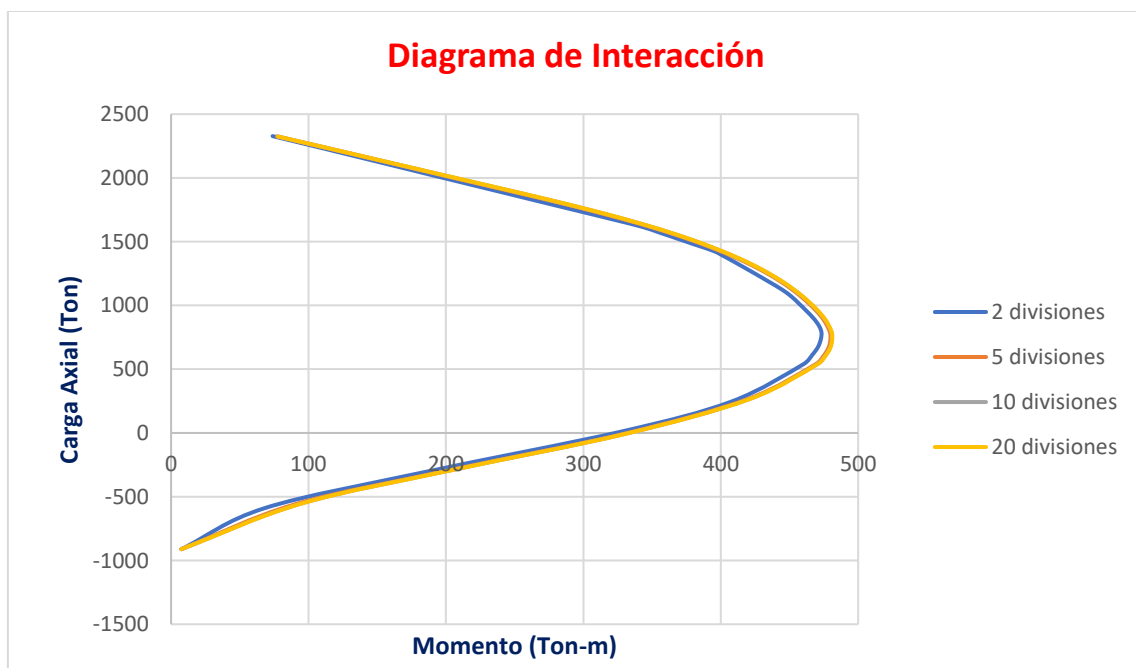
```

%Se define el valor del centroide de la sección considerando la
inclinación
%desada
[centroide_G] =
centroideG(theta,Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibr
as_Concreto,Area_fibras_Acero);
%Se obtiene el valor de carga axial y momento tanto del acero como del
%concreto
for i = 1: length(c)
    [AxialC,MomentoC] = Concreto(coor_Fibras_G,c(i),Hormigon,Filename);
    [AxialA,MomentoA] =
Acero_fibras(theta,c(i),Varilla,Hormigon,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibra
s_Acero);
    Mn_Concreto(i,1) = MomentoC;
    Pn_Concreto(i,1) = AxialC;
    Mn_Acero(i,1) = MomentoA;
    Pn_Acero(i,1) = AxialA;
end
%Se obtiene el valor de carga axial "Pn" y momento "Mn" para el valor
del eje neutro asignado.
Pn = Pn_Concreto+Pn_Acero;
for i = 1:length(Mn_Concreto)
    Mn(i,1) = -
(Mn_Concreto(i,1)+Mn_Acero(i,1))+(Pn(i,1).*centroide_G/100);
end

```

Figura 28

Diagrama de Interacción sección irregular para distintas discretizaciones de la sección.

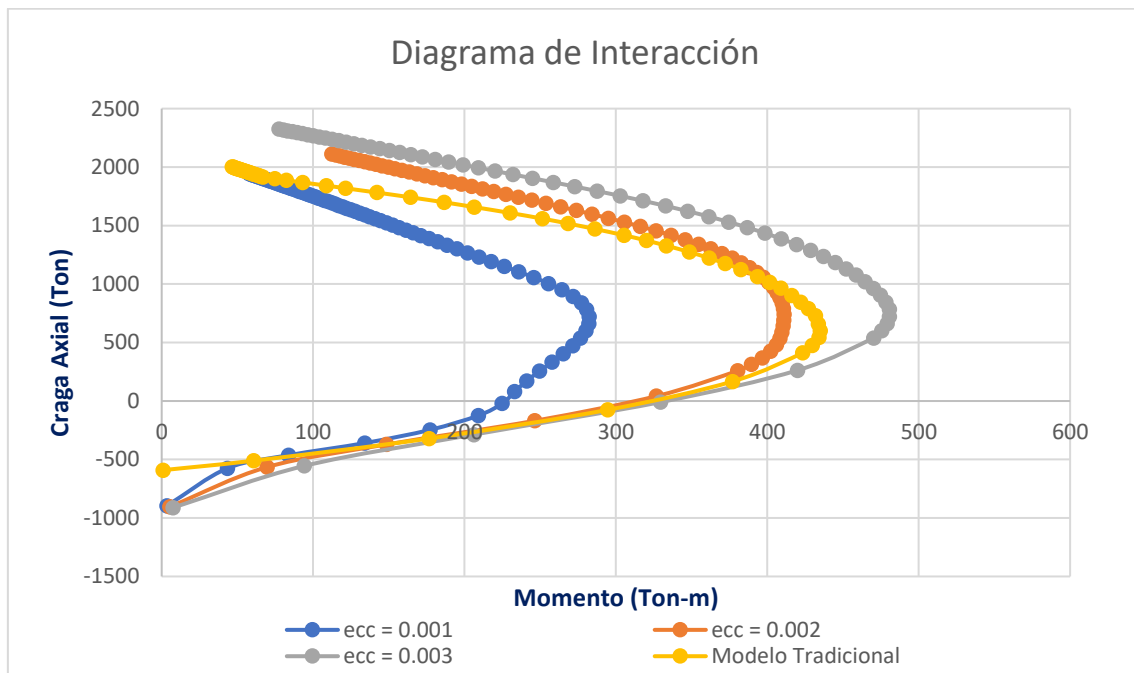


4.3.1.2 Diferente deformación unitaria máxima del concreto

Se presenta el diagrama de interacción para distintas deformaciones máximas del concreto, además del diagrama de interacción considerando los modelos tradicionales de diseño (Whitney y Modelo Bilineal-Acero).

Figura 29

Diagrama de Interacción sección irregular para distintas ecc máximas y para el modelo tradicional.



4.3.2 Diagrama de Momento Curvatura

4.3.2.1 Diferente división de Fibras

Se busca obtener el diagrama de momento curvatura para distintas divisiones de la sección, las cuales se presentaron anteriormente, se presenta como ejemplo la rutina de Matlab utilizada.

```
clc
clear

theta = 45; %grados
```

```

%c = 100;

Hormigon.fco = 240;
Hormigon.eco = 0.003;
Hormigon.es_max = 0.1;

Varilla.fy = 4200;
Varilla.E = 2.04*10^6;
Varilla.ey = Varilla.fy/Varilla.E;
Varilla.diametro = 22;
Varilla.NoB = 7;
Varilla.NoH = 3;

Seccion.b = 100;
Seccion.h = 40;
Seccion.rec = 3;

Estribo.diametro = 10;
Estribo.fy = 4200;
Estribo.NoB = 0;
Estribo.NoH = 0;
Estribo.espaciamiento = 10;

econcreto =[0.0001:0.005:0.1];

co = 0.00001;
cb = Hormigon.eco/(Hormigon.eco+Varilla.ey)*Seccion.h;
cmax = Seccion.h/0.5;

% Se definen los puntos del diagrama de interaccion
c1 = [co:(co+cb)/5:cb];
c2 = [cb+0.0001:(cb+cmax)/12:cmax];
c = [c1 c2];

for j = 1:length(econcreto)
    Filename = 'Muro de Corte 10 divisiones';

    [Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_
_fibras_Acero] = Lectura_Archivo(Filename);
    [coor_Fibras_G] = Fibras (Filename,theta);
    coor_Fibras_G(coor_Fibras_G==0) = NaN;
    [centroide_G] =
centroideG(theta,Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibr
as_Concreto,Area_fibras_Acero);
    [cp_inclinado] =
centroide_plastico(theta,Hormigon,Posicion_Fibras_Concreto,Posicion_Fibra
s_Acero,Area_fibras_Concreto,Area_fibras_Acero);
    for i = 1: length(c)

```

```

        [AxialC,MomentoC] =
Concreto(coor_Fibras_G,c(i),Hormigon,Filename,Estribo,Seccion,Varilla,econcreto(j));
        [AxialA,MomentoA] =
Acero_fibras(theta,c(i),Varilla,Hormigon,Posicion_Fibras_Acero,Area_fibras_Acero,econcreto(j));
        Mn_Concreto(i,1) = MomentoC;
        Pn_Concreto(i,1) = AxialC;
        Mn_Acero(i,1) = MomentoA;
        Pn_Acero(i,1) = AxialA;
    end
    format shortE
    Pn = Pn_Concreto+Pn_Acero;
    for i = 1:length(Mn_Concreto)
        Mn(i,1) = -
(Mn_Concreto(i,1)+Mn_Acero(i,1))+(Pn(i,1).*centroide_G/100);

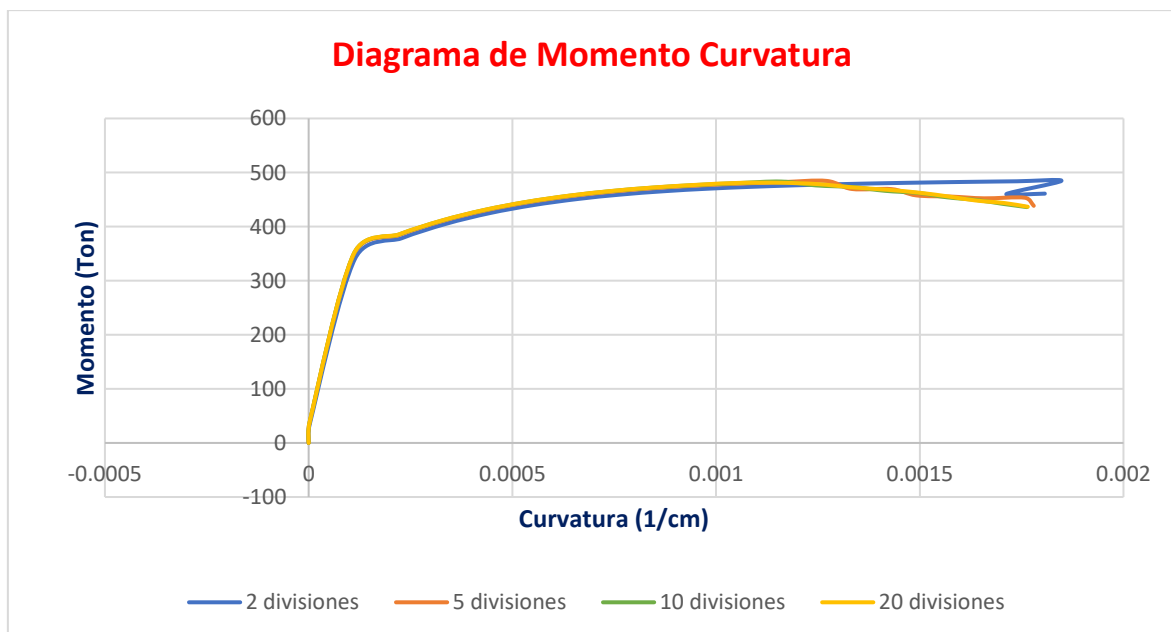
    end

    M(j,1) = interp1(Pn,Mn,0);
    c_iteracion = interp1(Pn,c,0);
    curvatura(j,1) = econcreto(j)./c_iteracion;
end

```

Figura 30

Diagrama de Momento Curvatura sección irregular para distintas discretizaciones de la sección.



4.3.2.2 Diferente confinamiento

Se presentan los siguientes casos de distintos confinamientos de la sección.

Figura 31

Sección Irregular con distintos Confinamientos iteraciones 1, 2, 3, 4 y 5.

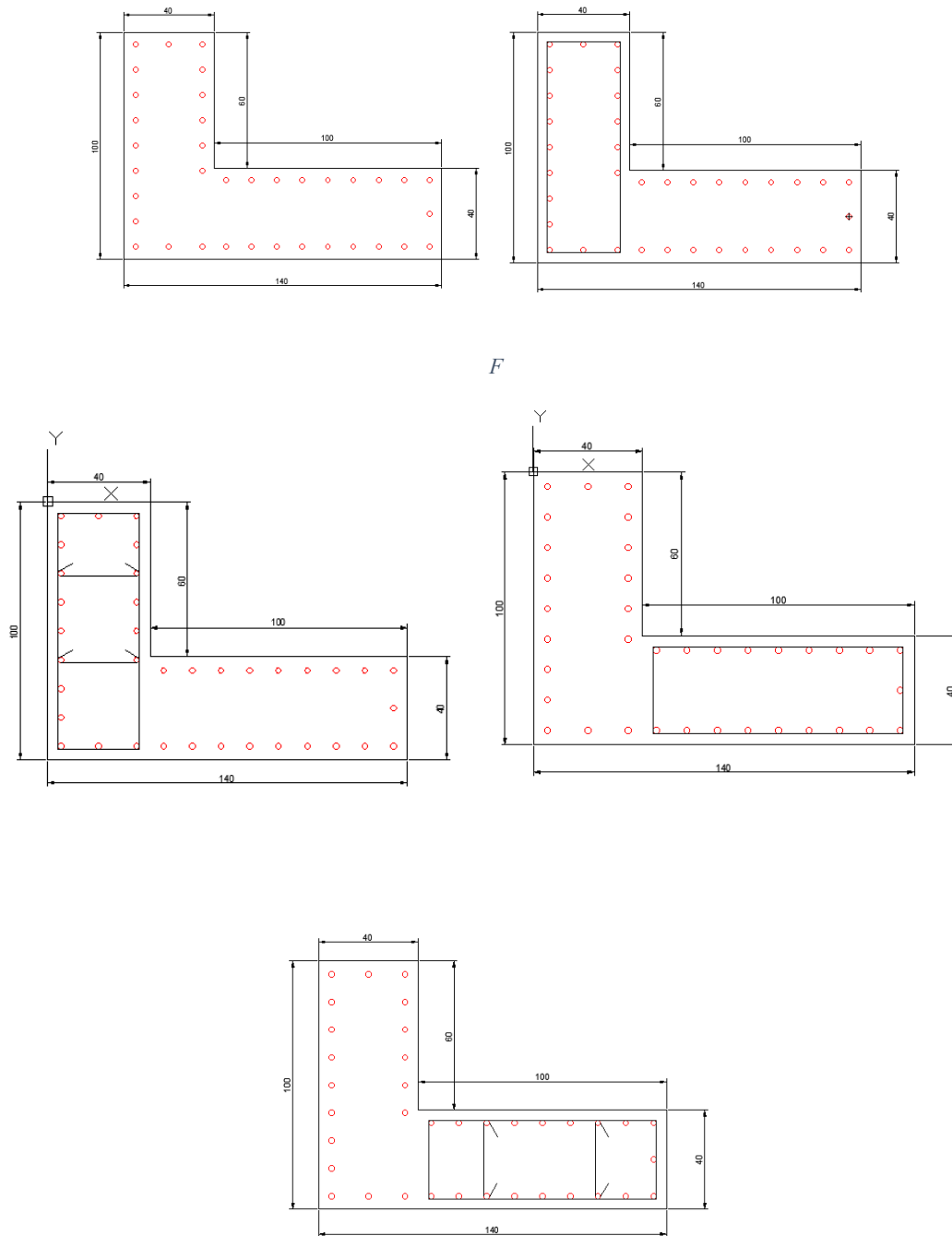
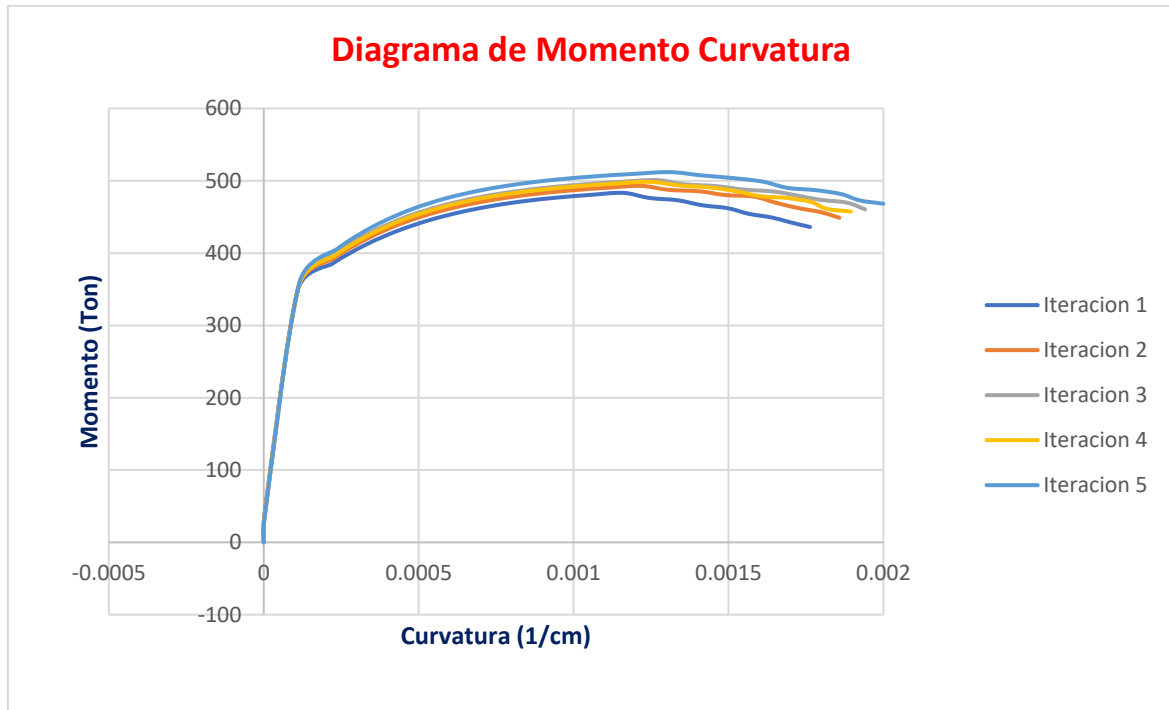


Figura 32

Diagrama de Momento Curvatura sección irregular para distintos confinamientos de la sección



5. CAPITULO V: CONCLUSIONES

- Se puede observar que el método de fibras al ser un método numérico depende de la discretización que se le dé a la sección, sin embargo, en esta sección regular, a partir de dividir la sección en 10 segmentos por lado, se puede notar que la diferencia de resultados no es significativa, por lo que, no es necesario realizar divisiones exageradas para obtener resultados muy aproximados a los reales.
- Se puede observar que la deformación unitaria máxima del concreto es un parámetro muy influyente en la caracterización de la flexocompresión de una sección de hormigón armado, puesto que si la deformación unitaria máxima es mayor, aumenta la capacidad a flexocompresión de la sección, por otro lado, si se compara el modelo tradicional (Whitney y modelo Bilineal) con los modelos de Mander y Park, se puede observar que se tienen los mismos resultados en la zona contralada por tensión, mientras que, en la zona controlada por compresión se tiene resultados más conservadores por parte del modelo tradicional.
- Se puede observar en la figura 24 que el confinamiento afecta a la resistencia de la sección, mientras mayor sea el confinamiento existirá mayor resistencia, sin embargo, esta resistencia solo es apreciable para curvatura pequeñas, puesto que, para curvaturas mayores el aumento de resistencia no es significativo.
- Si se analiza la figura 25 Se puede visualizar claramente que la cuantía de acero es un parámetro muy influyente en la capacidad de la sección, puesto que mientras más cuantía exista, mayor será la resistencia, sin embargo, si se tiene una resistencia mayor, la ductilidad de la sección bajará. A mayor resistencia de la sección menor ductilidad de la misma.
- El diagrama de interacción propuesto para una sección irregular en la figura 32 muestra que de igual manera que para la sección regular, la deformación unitaria máxima del concreto es un parámetro muy influyente en la capacidad a flexocompresión de la sección, sin embargo, a diferencia de la sección regular, se puede observar que el diagrama de interacción considerando modelos constitutivos tradicionales (Whitney y Modelo Bilineal Acero), dan resultados bastante más conservadores en la zona controlada por compresión e incluso para algunos puntos, este modelo es más conservadores que la curva con $\epsilon_{cc} = 0.002$.

- En la figura 33 se puede observar que de igual manera existe una situación donde por más que se discretice a las fibras, existirá una variación muy pequeña de los resultados, para este grafico se observar que a partir de las 5 divisiones se tiene una aproximación bastante buena.
- En la figura 39 se observa que los resultados obtenidos en la iteración 5, dan mejores resultados esto indica que confinando el cabezal horizontal de la sección existe mayor resistencia y ductilidad, por lo que es de suma importancia confinar la sección puesto que esto se aumenta la ductilidad de la sección que es imprescindible para eventos sísmicos, por otro lado, se puede ver que cuando no existe confinamiento se pierde resistencia y ductilidad, por lo que , no se recomienda no confinar una sección de concreto armado.
- El uso de un modelo computacional brinda la capacidad de llevar a cabo una amplia gama de cálculos repetitivos de manera muy eficiente. Este enfoque permite automatizar tareas que normalmente requerirían mucho tiempo y recursos humanos. Al aprovechar la potencia de procesamiento de un modelo computacional, se pueden lograr resultados rápidos y precisos, lo que aumenta la productividad en los procesos. Además, este enfoque ofrece la ventaja de minimizar los errores humanos, puesto que, el modelo sigue instrucciones programadas y actúa de manera coherente en cada iteración.

6. Bibliografía

Baji, H., Ronagh, H. R., & Baji, H. (2011). *Investigation of ductility of rc beams designed based on AS3600 Composite overwrap repair system for pipelines View project Corrosion of steel in stormwater reinforced concrete pipes View project investigation of ductility of rc beams designed based on AS3600*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/281831960>

Cardona, A., Kohan, R. y Quinteros, M. (2012). *Resolución de las ecuaciones de Euler compresibles mediante el método de los elementos finitos*. Recuperado de <https://dokumen.tips/engineering/4070-18616-1-pb.html?page=1>

Crespi P., Zucca M., Longarini N. y Giordano N. (2020). *Seismic Assesment of Six Typologies of Existing RC Bridges*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/342526478_Seismic_Assesment_of_Six_Typologies_of_Existing_RC_Bridges

García, David. (2017). Manual para la elaboración de diagramas momento-curvatura de secciones de concreto reforzado. (Tesis de pregrado). Universidad de Pamplona. Recuperado de http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/3712/1/Garcia_2017_TG.pdf

Kofman, H. (2000). Modelos y simulaciones computacionales en la enseñanza de la física.

James K Wight. (2021). Reinforced Concrete Mechanics and Design (8th ed.).

Luccioni, B. (1993). Formulación de un Modelo Constitutivo para materiales. Universidad Nacional de Tucumán.

Mander, J. B., Priestley, J. N., & Park, R. (1998). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete (1.a ed.).

Marín, J.A., (2009). *Análisis del método de las fibras para la revisión y diseño de elementos de hormigón armado* (Tesis de pregrado) Universidad de Antioquia, Colombia.

Mora, D., & Aguiar, R. (2015). Modelación de Diagrama Momento-Curvatura y Momento-Rotación en Secciones de Acero Estructural. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

Muñoz, Diego. (2020). *Diagramas de interacción de columnas circulares mediante el software DIIN*. (Tesis de post grado). Universidad Autónoma de Puebla, México.

Romero, Ignacio. (2005). *Modelos constitutivos*. Recuperado de <http://w3.mecanica.upm.es/mmc-ig/Apuntes/constitutivas.pdf>

Toro Carvajal, L. (2010). *Modelo Computacional Representacional de la Matemática*.

Villagrán, E., Vera, C., & Posada, A. (2013). Modelo esfuerzo-deformación para elementos de concreto reforzado que cumple con las hipótesis de las NTC RCDF 2004. Revista Scielo, Volumen 5, No 1, 8 páginas.

Weht, G, Sacco, C y D'Errico, M. (2012). Resolución de las ecuaciones de Euler compresibles mediante el método de los elementos finitos. Recuperado de <https://dokumen.tips/engineering/4070-18616-1-pb.html?page=1>

Zúñiga, Pablo. (2005). Aplicaciones para análisis y diseño de elementos de concreto reforzado. Instituto tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Construcción.