



**DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE COLUMNAS  
RECTANGULARES CONFINADAS DE CONCRETO  
REFORZADO  
(HERRAMIENTA COMPUTACIONAL)**

Alejandro Rendón Osorno  
Jeisson Steven Vera López

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Seleccione tipo de orientador(es)  
Juan Carlos Velez C, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras  
Medellín, Antioquia, Colombia

2023

---

<b>Cita</b>	(Rendón Osorno & Vera López, 2023)
<b>Referencia</b>	Rendón Osorno, A., & Vera López, J. S. (2023). <i>DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE COLUMNAS RECTANGULARES CONFINADAS DE CONCRETO REFORZADO (HERRAMIENTA COMPUTACIONAL)</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte X.



Elija un elemento.

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

---

**Tabla de contenido**

2 Justificación.....	5
3 Objetivos .....	5
5 Marco teórico .....	6
Comportamiento de los materiales .....	6
Comportamiento del acero de refuerzo.....	6
Concreto no confinado.....	7
Modelos constitutivos de los materiales.....	8
Modelo para el concreto confinado.....	8
Modelo para el acero de refuerzo.....	10
Análisis de sección .....	10
6 Estado del Arte .....	11
Diagrama de interacción.....	11
7 Guía de Usuario.....	13
Requisitos del sistema operativo .....	13
Paquetes NuGet necesario para la ejecución.....	14
Ingreso de datos.....	14
Modelos constitutivos .....	14
Geometría de la sección.....	14
Configuración del acero de refuerzo longitudinal .....	15
Configuración del acero que confina la sección (Estribos y ramas adicionales).....	15
8 Ejemplo Práctico .....	15
Datos de análisis.....	17
Referencias .....	22

---

### Lista de figuras

Figura 1. Curva esfuerzo - deformación para el acero en tracción (Park & Paulay, 1983). .....	7
Figura 2. Curva esfuerzo deformación para el concreto no confinado (Park & Paulay, 1983). .....	8
Figura 3. Curva esfuerzo deformación para el concreto confinado (Mander, Priestley, & Park, 1988).....	9
Figura 4. Diagrama de interacción (MacGregor & Wight, 2011). .....	11
Figura 5. Zonas de importancia del diagrama de interacción (MacGregor & Wight, 2011). .....	12
Figura 6. Sección de análisis (Fuente: Elaboración propia). .....	16
Figura 7. Esfuerzo vs Deformación para el concreto confinado según separación de estribos (Fuente, elaboración propia). .....	19
Figura 8. Variación del diagrama de interacción con la separación del acero de confinamiento (Fuente, elaboración propia). .....	20
Figura 9. Porcentaje de carga axial vs separación del acero de confinamiento (Fuente: Elaboración propia). .....	21

## 2 Justificación

A modo de reto personal, se quiere profundizar en la literatura orientada al análisis seccional y mediante esta desarrollar una hoja de cálculo, donde se pueda estudiar el comportamiento elástico e inelástico de secciones rectangulares de CR.

Es de mucho interés saber, ¿Qué pasa con la capacidad de la sección si se tiene en cuenta los comportamientos más reales de los materiales (valores que superan los estipulados en los códigos de diseño para el análisis de la sección)? La normativa vigente se centra únicamente en la capacidad de los elementos de CR dentro del rango elástico, asumiendo valores de deformación máxima para el concreto de  $\epsilon_{uc} = 0.003$ , despreciando así, las deformaciones que puede alcanzar el CR cuando se tiene un buen confinamiento. ¿Es prudente hacer uso de estos modelos constitutivos más realistas para diseñar?

Referente al esfuerzo máximo en el acero establecido por la normativa vigente, esta tampoco tiene en cuenta la zona de sobre-resistencia del acero en sus análisis, también es de interés conocer, ¿Cómo se comportarían los elementos si se considera este rango de sobre-esfuerzos que son superiores al esfuerzo de fluencia, producto del endurecimiento por deformación?

## 3 Objetivos

### 3.1 Objetivo general

Desarrollar un programa orientado al análisis seccional de columnas rectangulares de concreto reforzado, con el fin de estudiar el comportamiento a flexión uniaxial de los mismos en el rango elástico e inelástico.

### 3.2 Objetivos específicos

- Investigar y recopilar información aplicada al análisis de secciones de concreto reforzado.
- Estudiar las curvas de esfuerzo-deformación para el acero de refuerzo, concreto confinado y sin confinar.

- Analizar el efecto en magnitud y forma de los diagramas de interacción si se consideran valores de deformación unitaria para el concreto confinado donde  $\epsilon_{co} > 0.003$ , adicionalmente considerar el esfuerzo en el acero cuando entra en la zona de endurecimiento por deformación donde  $f_s > f_y$ . Finalmente comparar estos diagramas de interacción más “realistas” con los diagramas convencionales donde las deformaciones unitarias máximas del concreto son de  $\epsilon_{co} = 0.003$  y los esfuerzos en el acero alcanzan un valor máximo de  $f_y = 420\text{MPa}$ .

## 5 Marco teórico

Para introducir el análisis de sección de elementos de concreto reforzado (CR) se debe inicialmente establecer qué es el concreto reforzado; McCormac & Brown (2011) define el concreto reforzado como *“una combinación entre concreto y acero, en la que el acero de refuerzo proporciona la resistencia a la tensión de la que carece el concreto”*.

Una sección de concreto reforzado es entonces un elemento diseñado para soportar cargas externas y equilibrarlas con los esfuerzos internos en el concreto y el acero; para que esto se dé, se parte de la hipótesis de perfecta adherencia entre ambos materiales. Esto se genera gracias a diferentes factores como la adherencia química debido a algunos componentes del acero y del concreto, la rugosidad natural del acero y a las corrugas propias de las varillas de refuerzo generadas en el proceso de fabricación del material (McCormac & Brown, 2017).

### Comportamiento de los materiales

#### *Comportamiento del acero de refuerzo*

El acero es un material *Dúctil*, y su comportamiento se analiza generalmente mediante ensayos a tracción directa; comúnmente es presentado en barras que oscilan en diámetros de  $\frac{1}{4}$ ” a 2 - $\frac{1}{4}$ ”. Como las secciones de las varillas son esbeltas esto las vuelve muy sensibles al fenómeno del pandeo, reduciendo así su resistencia a compresión (García, 2017).

El comportamiento del acero de refuerzo a través de la tracción se puede evidenciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se observan 2 puntos importantes referentes al esfuerzo, y 3 puntos importantes referentes a las deformaciones. La curva representa el estado del acero de refuerzo en 3 ocasiones:

1. Estado elástico lineal, existe entre la línea AB y es la zona donde teóricamente no se presentan deformaciones permanentes en el material.
2. Estado de fluencia, es la meseta que forma la línea BC y es la zona donde la deformación aumenta con poco o ningún incremento del esfuerzo (Park & Paulay, 1983).
3. Estado de endurecimiento, curva que une los puntos C, D y allí los esfuerzos se incrementan a media que aumenta la deformación del acero.

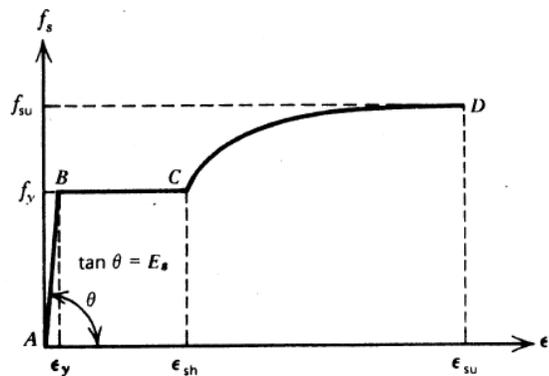


Figura 1. Curva esfuerzo - deformación para el acero en tracción (Park & Paulay, 1983).

### Concreto no confinado

No es común encontrar el concreto sin confinamiento, y mucho menos sometido a esfuerzos en una sola dirección; en la mayoría de los casos este material se ve sometido a esfuerzos en varias direcciones (Park & Paulay, 1983).

La resistencia del concreto a esfuerzos de compresión se ve representada en la Figura 2, donde se muestra la relación esfuerzo deformación para diferentes valores de  $f'_c$ , es de resaltar que a medida que el valor máximo de esfuerzo a compresión aumenta, su capacidad de deformación disminuye,

permitiendo concluir que concretos de gran resistencia pueden presentar reducciones drásticas de ductilidad (Paulay & Priestley, 1992).

La resistencia a la tracción de este material se considera como el 20% o menos de la resistencia a la compresión; sin embargo, debido a la baja resistencia a la tracción del concreto y a la cantidad de variables de las que depende su cálculo normalmente se desprecia su aporte (Park & Paulay, 1983).

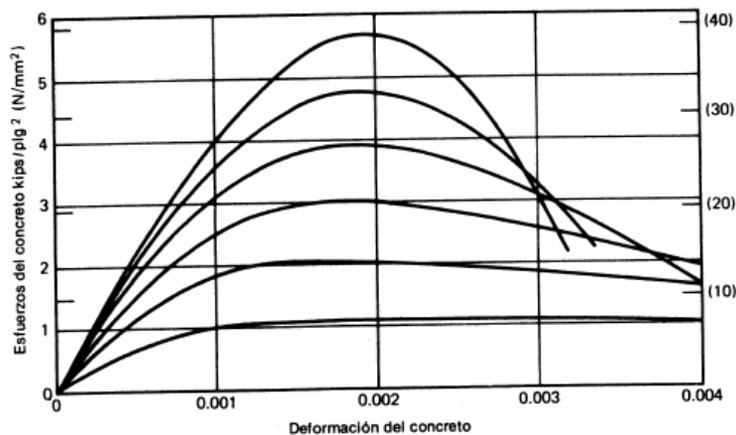


Figura 2. Curva esfuerzo deformación para el concreto no confinado (Park & Paulay, 1983).

### Modelos constitutivos de los materiales

Para realizar el análisis de una sección de concreto reforzado, es imprescindible entender el comportamiento de los materiales que se van a estudiar, debido a esto es necesario hacer uso de los modelos constitutivos. Estos buscan representar por medio de métodos matemáticos cómo se relaciona el esfuerzo con la deformación para los materiales.

#### *Modelo para el concreto confinado*

Mander proporciona en su modelo una ecuación general (Ver la ecuación 1) que da como resultado una curva continua (Ver Figura 3), esta ecuación tiene en cuenta, la cuantía, resistencia a la cedencia y separación del acero transversal, adicionalmente incluye la sobre resistencia generada por dicho confinamiento.

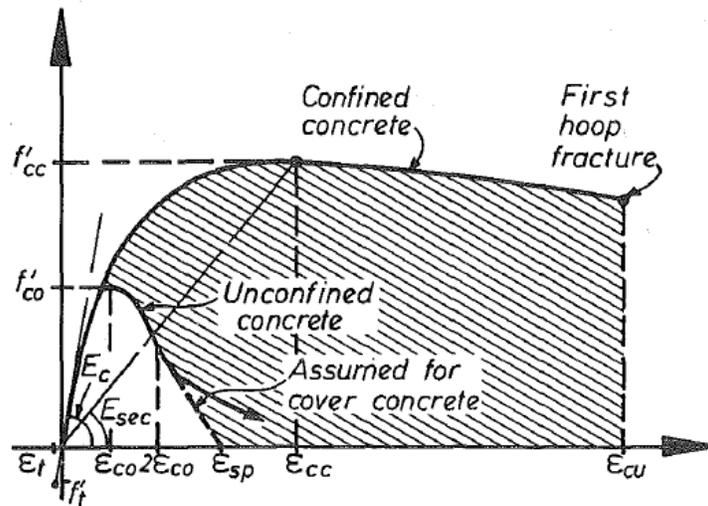


Figura 3. Curva esfuerzo deformación para el concreto confinado (Mander, Priestley, & Park, 1988).

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (\text{ecuación 2})$$

$\varepsilon_c$ : Deformación unitaria a compresión para el concreto

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \cdot \left(1 + 5 \cdot \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1\right)\right) \quad (\text{ecuación 3})$$

$\varepsilon_{co}$ : Deformación unitaria para  $f'_c$

$f'_{co}$ : Esfuerzo del concreto no confinado

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (\text{ecuación 4})$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (\text{ecuación 5})$$

La curva de esfuerzo deformación de Mander et al (1988), es hasta el día de hoy el modelo con mayor aceptación; este supone deformaciones lineales de las secciones, pero usa expresiones más realistas para las relaciones esfuerzo-deformación del concreto y del refuerzo. Además, permite tener en cuenta los efectos del confinamiento sobre las propiedades del concreto (Perez, 2019).

**Modelo para el acero de refuerzo**

Para representar el comportamiento del acero en los tres tramos presentados en la Figura 1, se utilizó el modelo utilizado por King (1986), en este modelo se tiene en cuenta el endurecimiento por deformación y este comportamiento obedece al tercer caso en la ecuación 7.

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \text{ cuando } \varepsilon_s < \varepsilon_y \text{ (ecuación 6)}$$

$$f_s = f_y \text{ (ecuación 5)}$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \text{ para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$$

$$f_s = f_y \text{ para } \varepsilon_s < \varepsilon_y < \varepsilon_{sh} \text{ (ecuación 7)}$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$$

$$f_s = f_y \quad \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_y < \varepsilon_{sh}$$

$$f_s = f_y \cdot \left( \frac{m(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right) \quad \text{para } \varepsilon_{sh} < \varepsilon_y < \varepsilon_{su} \text{ (ecuación 8)}$$

**Análisis de sección**

El análisis seccional para elementos de concreto reforzado se podría considerar un tema joven dentro del análisis estructural, especialmente si lo comparamos con los métodos de diseño tradicionales usados en la mayoría de los códigos sísmicos del mundo. Este tipo de análisis se pueden centrar principalmente en los principios del diseño por desempeño, que se basa principalmente en los diagramas Momento – Curvatura; a su vez dentro del análisis de sección se deben considerar los diagramas de interacción. Estos son las curvas que representan la relación entre carga axial y momento flector en un elemento.

En las metodologías de diseño por resistencia no se verifica la ductilidad de las secciones calculadas, desconociendo si los elementos diseñados cumplen con la capacidad asumida ante solicitaciones sísmicas. El análisis seccional permite tener control de los diseños realizados, garantizando así que los elementos alcanzarán el nivel de ductilidad esperado al momento de hallar la demanda a la que el elemento se verá expuesto (Perez, 2019).

## 6 Estado del Arte

### Diagrama de interacción

El diagrama de interacción representa la relación entre P y M (Carga axial y Momento flector) en el instante de falla del elemento, los puntos trazados en esta curva representan combinaciones de P y M correspondientes a la resistencia de la sección (Ver Figura 4). Los puntos que se encuentran dentro del diagrama representan todas las combinaciones que no causaran la falla del elemento. Así mismo todo punto que se encuentre por fuera del diagrama representa una combinación de esfuerzos que superarán la resistencia de la sección y por lo tanto estos causarán la falla del elemento (MacGregor & Wight, 2011).

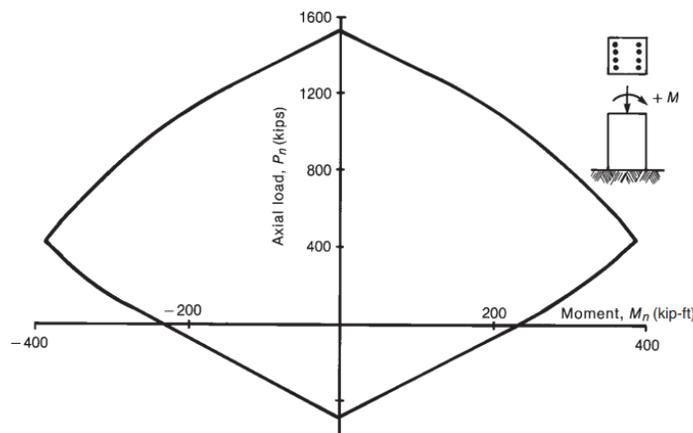


Figura 4. Diagrama de interacción (MacGregor & Wight, 2011).

El diagrama de interacción permite establecer cómo será el modo de falla de la sección ante solicitaciones externas. Para entender los tipos de falla que se pueden tener, es necesario visualizar la Figura 5.

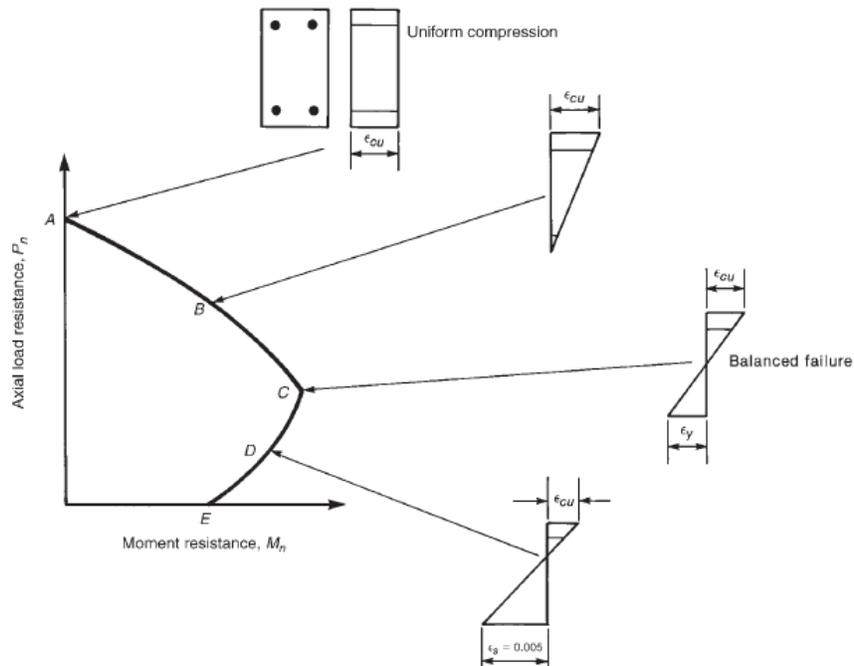


Figura 5. Zonas de importancia del diagrama de interacción (MacGregor & Wight, 2011).

En un diagrama de interacción se evidencian principalmente 2 tipos de falla, la controlada por compresión y por flexión (Verduzco, 2019). Aunque también es posible definir un punto donde ocurre la falla balanceada (Punto C, ver Figura 5), donde el concreto en la fibra extrema a compresión y el acero en la primera fila en tracción alcanzan simultáneamente los valores de deformaciones última y de fluencia respectivamente (MacGregor & Wight, 2011). Con esto se podría definir en el diagrama de interacción de la Figura 5 dos zonas de interés para predecir la falla del elemento.

- Zona A-C: Parte del diagrama de interacción que representa un comportamiento controlado por compresión, es una zona no recomendada para atender las solicitaciones, al tener cargas axiales muy elevadas, si bien, se gana resistencia a flexión se pierde ductilidad lo que representa una posible falla frágil.

- Zona C-E: Parte del diagrama de interacción que representa un comportamiento controlado por flexión, esta zona es la recomendada para atender las solicitudes, pues la mayor parte del esfuerzo demandado lo estaría atendiendo el acero, lo que llevaría a una falla dúctil en la sección gracias a la alta capacidad de deformación del mismo.

El punto A representa una sección controlada completamente por carga axial de compresión, indicando que el elemento en este punto fallaría por aplastamiento de concreto.

El punto E representa una sección en flexión pura, ocasionando que el acero alcance grandes deformaciones en tracción garantizando así un elemento con gran ductilidad.

El punto C representa la “*Falla balanceada*”, esta quiere decir que el concreto alcanza la deformación máxima en compresión ( $\epsilon_{cu}$ ) mientras que el acero se encuentra en la deformación de fluencia ( $\epsilon_y$ ), provocando así una falla de tipo frágil.

## 7 Guía de Usuario

### Requisitos del sistema operativo

El código fue realizado en el lenguaje de programación C# con la modalidad “aplicación de consola”, vale aclarar que la accesibilidad a este es gratuita. El motor recomendado para su ejecución es el de Visual Studio Community, no se requieren características especiales para el sistema operativo, lo que permite su uso en cualquier equipo.

El código realizado tiene como función analizar secciones rectangulares de concreto reforzado sometidas a flexión uniaxial, teniendo en cuenta 2 modelos constitutivos para cada material, acero de refuerzo y concreto. Los modelos constitutivos utilizados son:

- Modelo simplificado esfuerzo – deformación para el concreto (Bloque de compresiones de Whitney).
- Modelo teórico de esfuerzo – deformación para el concreto confinado de Mander.
- Modelo de esfuerzo – deformación bilineal para el acero de refuerzo.
- Modelo de esfuerzo – deformación considerando el endurecimiento del acero de King.

## **Paquetes NuGet necesario para la ejecución**

Los paquetes tipo NuGet son bibliotecas que deben estar previamente instalados para que el código pueda exportar los datos de análisis a una hoja de Excel, el paquete usado para ejecutar esta función es “**EPPlus**”. Este se puede instalar desde la consola de administrador de paquetes de Visual Studio, una vez ejecutado el archivo *PMM V6.sln* digitando el siguiente comando:

Install-Package EPPlus

## **Ingreso de datos**

El código cuenta con valores por defecto para los modelos constitutivos considerados, sin embargo, estos valores se pueden modificar según la necesidad del usuario.

Cada variable cuenta con una pequeña descripción, adicionalmente se indican las unidades en las que se deben ingresar. A continuación, se presenta un ejemplo de cómo es el ingreso de los datos y sus posibles variaciones.

Inicialmente se deben definir los modelos constitutivos con los que se desea realizar el análisis (se recomienda copiar el texto directamente de los comentarios del código y sobre-escribir el nombre del modelo existente).

### ***Modelos constitutivos***

MetodoAcero = “King” ó “Bilineal”

MetodoConcreto = “Mander” ó “Whitney”

La dirección de análisis se realiza en sentido ‘Y’ (Paralelo a  $L_w$ ).

### ***Geometría de la sección***

$L_w$ : Es la altura del elemento en mm.

$t_w$ : Es el ancho del elemento en mm.

r: Recubrimiento de la sección en mm.

### ***Configuración del acero de refuerzo longitudinal***

El acero de refuerzo es de doble simetría. Se ingresa inicialmente el número de barras en las caras mencionadas.

$b_{arl}$  = Cantidad de barras paralelas a  $L_w$  en una cara.

$b_{arb}$  = Cantidad de barras paralelas a  $t_w$  en una cara.

El área de acero se ingresa según la barra usada, y su configuración se distribuye en 2 posiciones, refuerzo en las esquinas y refuerzo para el resto de barras en la sección.

$r_{efesq}$  = área de refuerzo de una de las barras de las esquinas de la sección en  $mm^2$ .

$r_{efr}$  = área de refuerzo de una de las barras que componen el resto de la sección en  $mm^2$ .

### ***Configuración del acero que confina la sección (Estribos y ramas adicionales)***

Para definir la configuración se pide el número de ramas que van paralelas a las caras  $L_w$  y  $t_w$ .

$D_{est}$  = Diámetro de los estribos en mm.

$S_{est}$  = Separación a lo largo del elemento para los estribos en mm.

$n_{rl}$  = Cantidad de ramas paralelas a  $L_w$  (mínimo 2 las del estribo cerrado).

$n_{rb}$  = Cantidad de ramas paralelas a  $t_w$  (mínimo 2 las del estribo cerrado).

### **Salida de datos**

Para exportar los datos analizados se remplaza la línea 20 del código:

```
20      | : | |      string URL = "D:\\Especialización\\Seminario\\Export";
```

En esta se ingresa entre comillas (“”) la dirección donde se guardará el archivo de extensión (.xlsx); los datos exportados por el código son, el diagrama de interacción, las curvas de esfuerzo vs deformación para el concreto confinado y sin confinar y el gráfico para el acero correspondiente al método ingresado bien sea “bilineal” o “King”. Una vez ejecutado el código se abrirá la consola de Visual Studio, en esta se debe digitar el nombre del archivo con el que se almacenará.

## **8 Ejemplo Práctico**

Para este caso se realizará el análisis de una columna con sección 0.40x0.80m, la configuración del refuerzo se observa en la Figura 6.

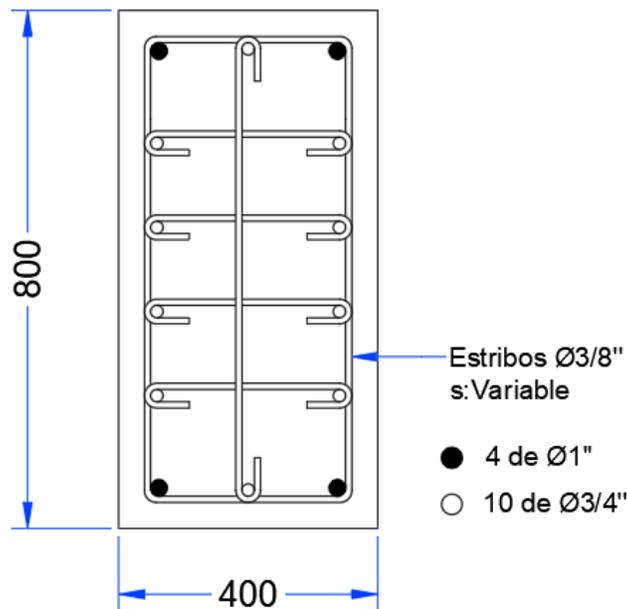


Figura 6. Sección de análisis (Fuente: Elaboración propia).

Las propiedades de los materiales usados para el análisis son los siguientes:

- Resistencia a la compresión del concreto,  $f'_c = 28\text{MPa}$ .
- Esfuerzo de Fluencia del acero longitudinal,  $f_y = 420\text{MPa}$ .
- Esfuerzo de Fluencia del acero de confinamiento,  $f_{yh} = 420\text{MPa}$ .
- Para el cálculo del Módulo de elasticidad del concreto,  $4700 \cdot \sqrt{f'_c}$ .
- Módulo de elasticidad del acero, 200000 MPa.

Para la calibración de los modelos constitutivos se utilizaron los siguientes límites de deformación unitaria de los materiales:

- Deformación unitaria para la fluencia del acero, 0.0021.
- Deformación unitaria del acero donde inicia el endurecimiento por deformación, 0.008.
- Deformación unitaria última para el acero, 0.12.
- Deformación unitaria última para el concreto no confinado, 0.003.

Nota: La deformación última para el concreto confinado está implícita en el modelo constitutivo (Mander, Priestley, & Park, 1988).

En este caso, se pretende analizar la variación de los parámetros que se presentan a continuación, cuando se incrementa la separación del refuerzo transversal.

**ALR<sub>b</sub>**: Axial Load Ratio en la sección bruta para el punto donde se presenta la falla balanceada

*f'<sub>cc</sub>*: Resistencia máxima a la compresión para el concreto confinado

*ε<sub>cu</sub>*: Deformación unitaria máxima que puede alcanzar el concreto confinado

### Datos de análisis

El índice de carga axial “ALR” permite establecer qué demanda de carga axial tiene un elemento respecto a su capacidad bruta a compresión (Ver ecuación 9). Convencionalmente, diseñar secciones manteniendo el “ALR” por debajo de 40% permite tener elementos con comportamientos dúctiles.

El ALR es una relación entre la carga axial del elemento vs área bruta de la sección y su resistencia a la compresión (sin considerar el confinamiento).

$$\%ALR = \frac{P}{A_g \cdot f'_c} \cdot 100 \text{ (ecuación 9)}$$

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se establecen los valores de separación de acero transversal analizados, a su vez, en ella esta se encuentra los valores máximos de, *f'<sub>cc</sub>* y *ε<sub>cu</sub>* para cada una de las separaciones.

Tabla 1. Valores máximos de  $f'_{cc}$  y  $\varepsilon_{cu}$  según separación del acero de confinamiento.

Valores máximos $\varepsilon_{cu}$ y $f'_{cc}$			
Separación [mm]	c [mm]	$\varepsilon_{cu}$ [mm/mm]	$f'_{cc}$ [Mpa]
50	691	0.0549	51.4
100	679	0.0373	40.0
150	670	0.0295	35.4
200	661	0.0249	32.9
250	654	0.0217	31.4
300	647	0.0195	30.4
350	642	0.0178	29.7

Los valores de “ $\varepsilon_{cu}$ ” obtenidos en la Tabla 1, permiten confirmar la premisa mencionada anteriormente donde se aseguraba que secciones con buen confinamiento serán más dúctiles y a su vez tendrán una mayor capacidad a la compresión. Para el presente caso, considerar una separación de 350mm, permite a la sección obtener niveles de deformación hasta 6 veces mayores respecto a la deformación unitaria para concreto no confinado ( $\varepsilon_{cu}=0.003$ ).

Esto también se evidencia en la Figura 7, donde se presentan las curvas de esfuerzo vs deformación para el concreto confinado mediante estribos con las separaciones especificadas en la Tabla 1.

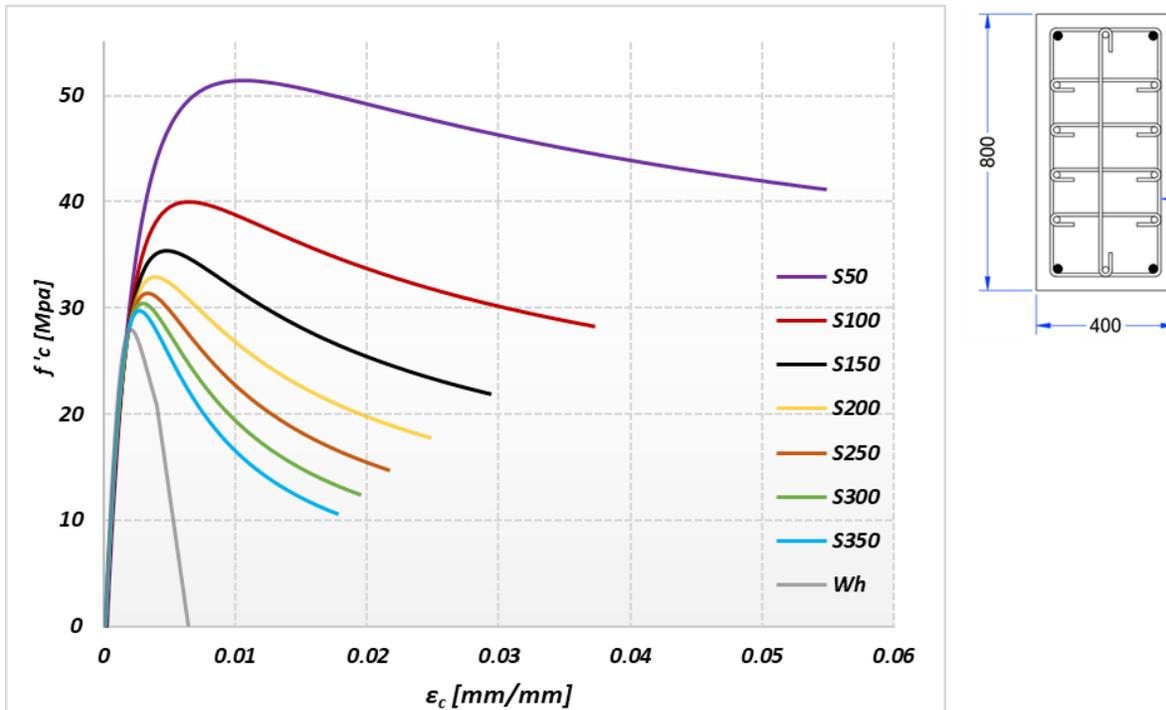


Figura 7. Esfuerzo vs Deformación para el concreto confinado según separación de estribos (Fuente, elaboración propia).

Es notorio el aumento de la resistencia a la compresión, reducir la separación de 300mm a 100mm incrementa en un 33% la resistencia máxima a la compresión. A su vez la capacidad de deformación en el concreto se incrementa en un 85%. El aumento en la resistencia y la capacidad de deformación en el concreto, garantizan un comportamiento de tipo dúctil en la sección haciendo que gobierne principalmente la falla por tracción en el acero.

El incremento de la capacidad de la sección en términos de ductilidad y resistencia en el concreto se ven reflejados en las curvas de interacción que se presentan en la Figura 8.

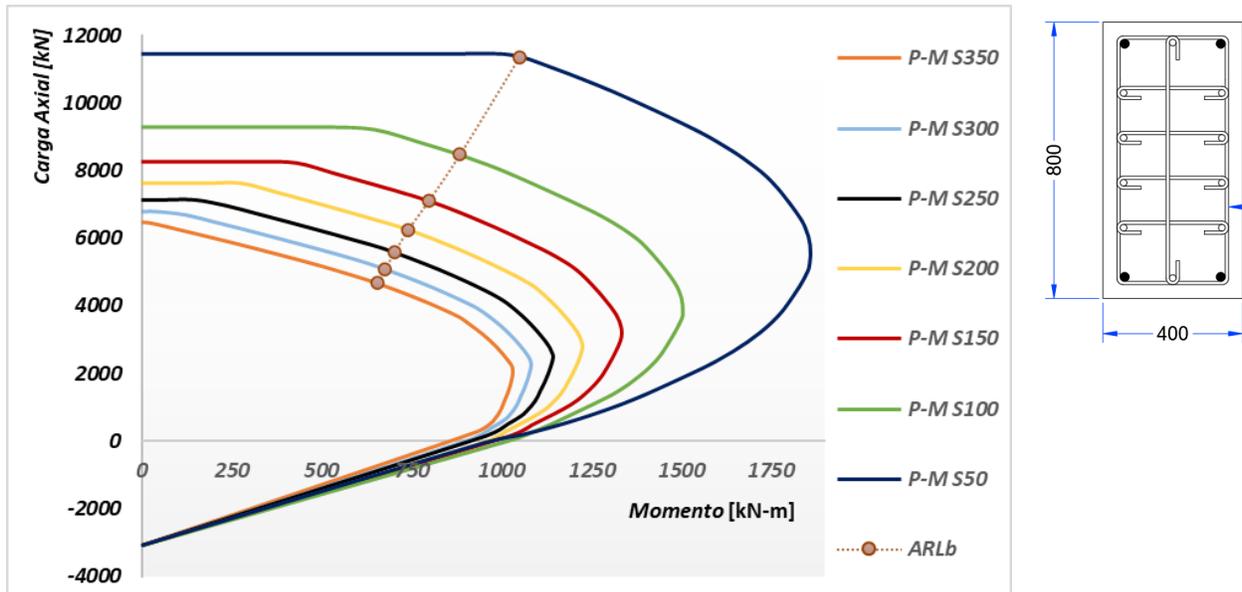


Figura 8. Variación del diagrama de interacción con la separación del acero de confinamiento (Fuente, elaboración propia).

De la Figura 8 se destaca no sólo el incremento en la resistencia a causa de la disminución en la separación del refuerzo transversal sino también, el punto donde se presenta la falla balanceada. En la medida que disminuye la separación este punto se desplaza hacia arriba en la gráfica. Esto significa que, se necesita de una carga axial mayor para que falle primero el concreto por aplastamiento (Falla frágil en el elemento) antes de que la primera fila del acero empiece a fluir.

En la medida que el confinamiento de la sección aumenta también lo hace el  $ALR_b$ , si bien, es adecuado seguir predimensionando para un  $ALR$  inferiores al 40%, no hay que perder de vista que, mientras mayor sea el confinamiento también lo será el margen de seguridad de las estructuras.

Por otro lado, los niveles de deformación que alcanza el concreto cuando se confina adecuadamente hacen que, cuando el concreto alcanza la deformación última ( $\epsilon_{ccu}$ ) para valores muy elevados de  $ALR$ , el acero para la mayoría de pares PM ya ha fluído; físicamente significa que la columna se seguirá comportando de manera dúctil para cargas axiales muy elevadas. esto último se muestra gráficamente en la Figura 9.

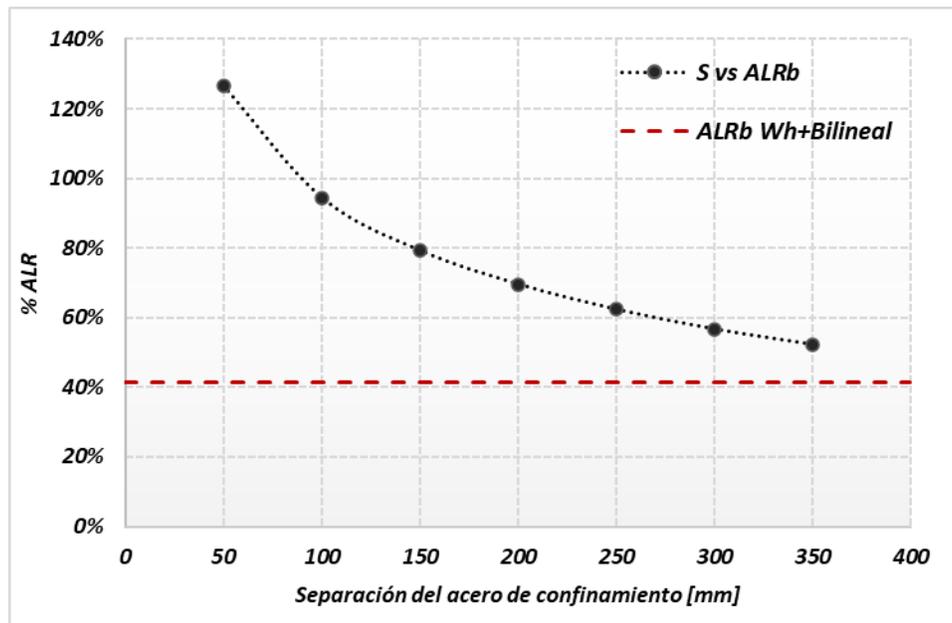


Figura 9. Porcentaje de carga axial vs separación del acero de confinamiento (Fuente: Elaboración propia).

Para secciones con acero de confinamiento, los valores de  $ALR_b$  son superiores al valor recomendado para el predimensionamiento de columnas según las metodologías convencionales donde el  $ALR_b$  debe ser inferior al 40% para que el elemento tenga un comportamiento dúctil. Esto se debe a que en la ecuación 1, la resistencia a la compresión de la sección es considerada sin el aporte del confinamiento, y los valores de carga axial analizados corresponden a la falla balanceada, donde se espera que el concreto llegue a su deformación última (sin considerar el confinamiento) cuando el acero empieza a fluir.

## Referencias

- García Sanabria, D. F. (2017). *Manual para la Elaboración de Diagramas Momento - Curvatura de Secciones de Concreto Reforzado*.
- King, D. J. (1986). *Computer Programs For Concrete Column Design*. Chrischurch.
- MacGregor, J., & Wight, J. (2011). *Reinforced Concrete Mechanics & Design*. . New Jersey: Person Education Inc. Sexta edición.
- Mander, B. J., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*. Journal of Structural Engineering, vol. 114, No. 8.
- McCormac, J., & Brown, R. (2017). *Diseño de concreto reforzado* (Décima ed.). México: Alfaomega.
- Park, R., & Paulay, T. (1983). *Estructuras de Concreto Reforzado*. México: Editorial Limusa, Segunda reimpresión.
- Paulay, T., & Priestley, M. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry buildings*.
- Perez Vargas, F. (2019). *Diseño Sísmico Basado en Desplazamientos (DBD)*. Medellín, Colombia: Primera edición.
- Verduzco Martínez, L. (2019). *Optimización de Acero de Refuerzo para el Diseño de Columnas de Concreto*.