

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE COLUMNAS DE PUENTES DE CONCRETO
REFORZADO A TRAVÉS DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN Y RELACIONES
MOMENTO-CURVATURA”

PRESENTADO POR:
KARLA MORÁN CASTILLO

DIRECTOR DE TESIS:
ING. PABLO LINDAO TOMALÁ

PUENTES: Introducción

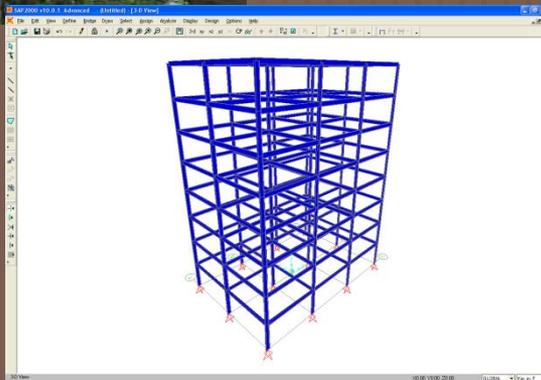
- Hace casi tres décadas debido a la gran cantidad de sismos y los severos daños que éstos han causado a diferentes tipos de estructuras se concluyó que era necesario tomar medidas urgentes para contrarrestar el **riesgo sísmico** que estaba aumentando. De ahí que surgió la investigación de filosofías de diseño sísmico y dentro de éstas, métodos de diseño sismorresistente basados en desplazamientos y no solo en fuerzas como aquellos tradicionales.



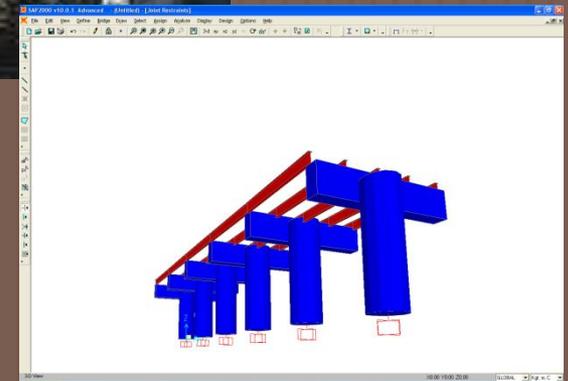
Puente “Octavio Frías de Oliveira” en Sao Paulo

PUENTES: Introducción

REDUNDANCIA ESTRUCTURAL



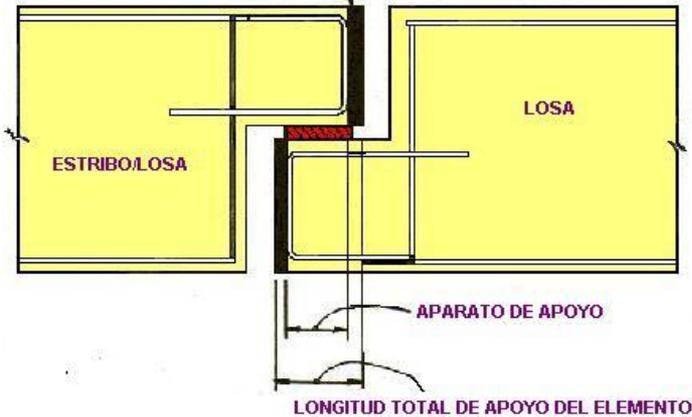
EDIFICIO



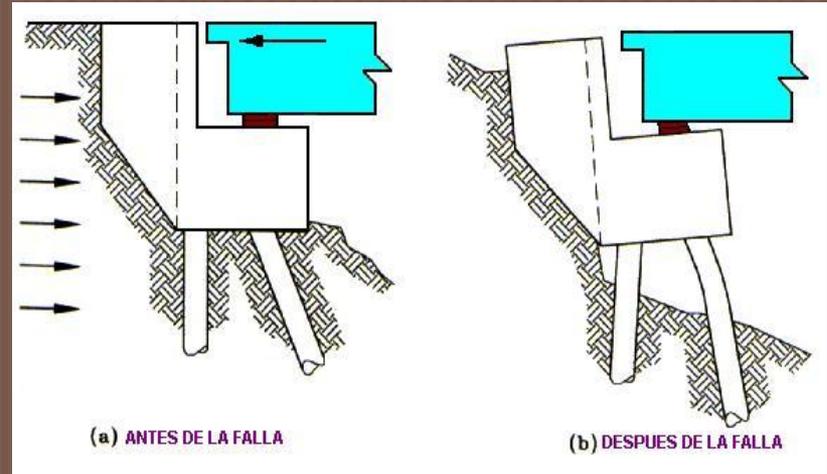
PUENTE

PUENTES: Daños por eventos sísmicos

RECUBRIMIENTO QUE SE PUEDE PERDER POR EFECTOS SISMICOS Ó POR GOLPETEO ENTRE ELEMENTOS



Falta de asiento en puentes con esviaje



Falla por deslizamiento en los estribos y golpeteo entre la subestructura y superestructura



Falla de un tramos del Puente Nishinomiya-ko en el sismo de Kobe en 1995

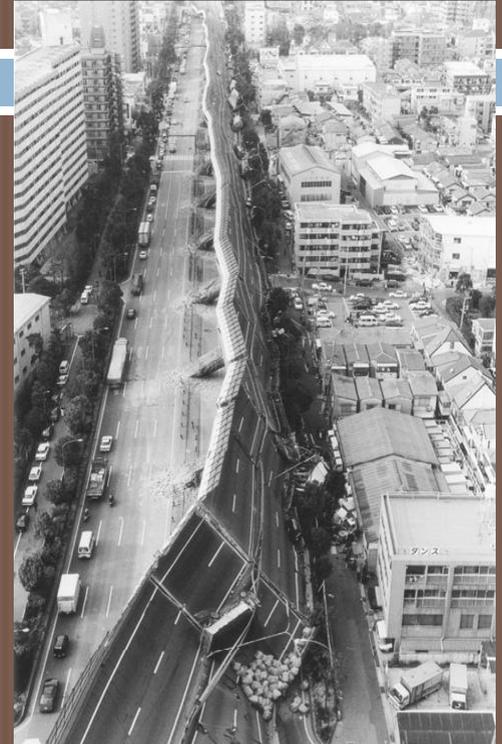
PUENTES: Fallas en Columnas



Falla del confinamiento en la parte superior de la columna durante el sismo de San Fernando en 1971.



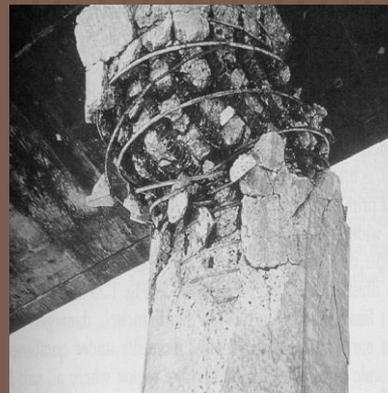
Falla por flexión y corte en la mitad de la altura de la pila del paso elevado de la ruta 43/2, debido a la terminación prematura del refuerzo longitudinal durante el Terremoto de Kobe.



Falla por flexión arriba de la base de las columnas de la autopista Hanshin, debido a la terminación prematura del refuerzo longitudinal en el Sismo de Kobe de 1995.



Rótulas plásticas en columnas restringidas por un muro que las conecta en el Puente sobre el Canal Bull Creek Canyon.



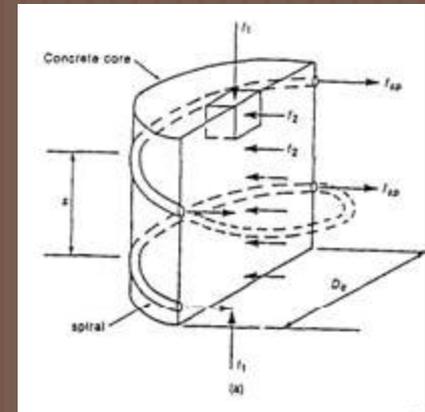
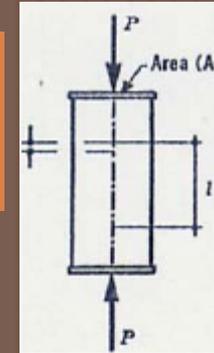
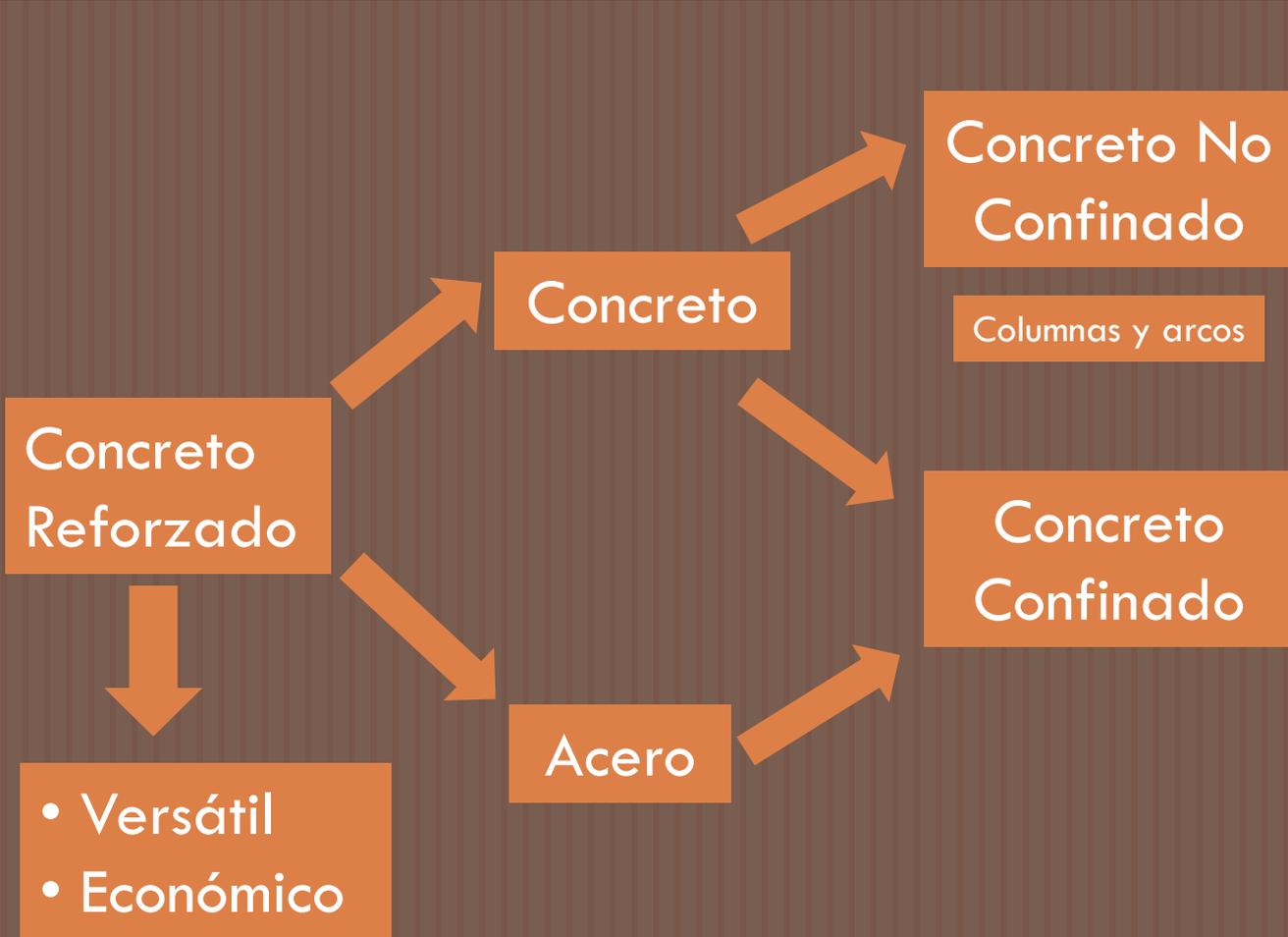
Falla por cortante dentro de la región de la articulación plástica en el terremoto de San Fernando.

Fotos tomadas de Priestley, Seible y Calvi, 1996)

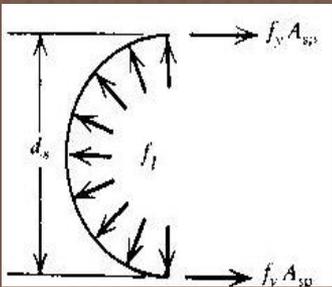
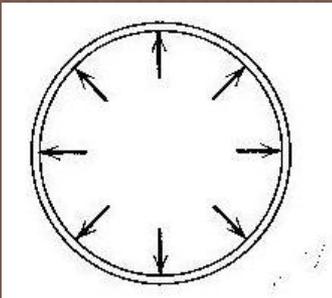
Objetivos

- Incentivar la investigación en alumnos de Pregrado a través de la lectura y la búsqueda de nuevas herramientas o software que permitan realizar más estudios y proyectos que contribuyan a la Ingeniería Civil.
- Promover el uso del Software XTRACT v3.0.8 como una herramienta para el análisis de secciones transversales de diferentes formas geométricas de columnas y vigas.
- Analizar los diagramas de interacción obtenidos a través del XTRACT v3.0.8 y establecer ábacos para diferentes tipos de secciones y resistencia del concreto que permitan un diseño más rápido.
- Analizar las relaciones Momento-Curvatura obtenidas a través del XTRACT v3.0.8 y establecer ábacos para diferentes tipos de secciones y resistencia del concreto que permitan un diseño más rápido.
- Estudiar a través de las curvas generadas el posible comportamiento de las columnas de puentes a diseñar en nuestro medio.
- Evaluar el uso de las curvas mencionadas al momento de diseñar una columna de un puente por medio de un ejemplo.

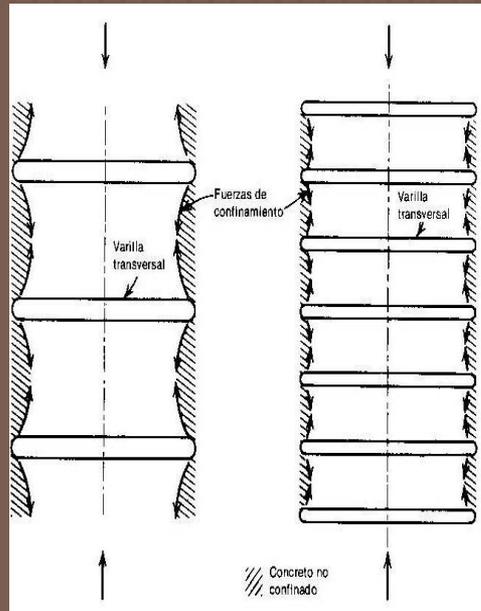
MATERIALES: Concreto Reforzado



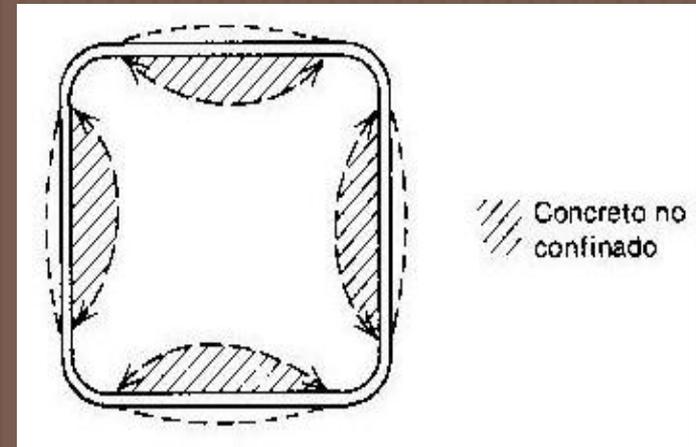
MATERIALES: Concreto Reforzado - Confinamiento



Confinamiento con espirales o aros sometidos a tensión axial (Tomado de Park y Paulay, 1997)

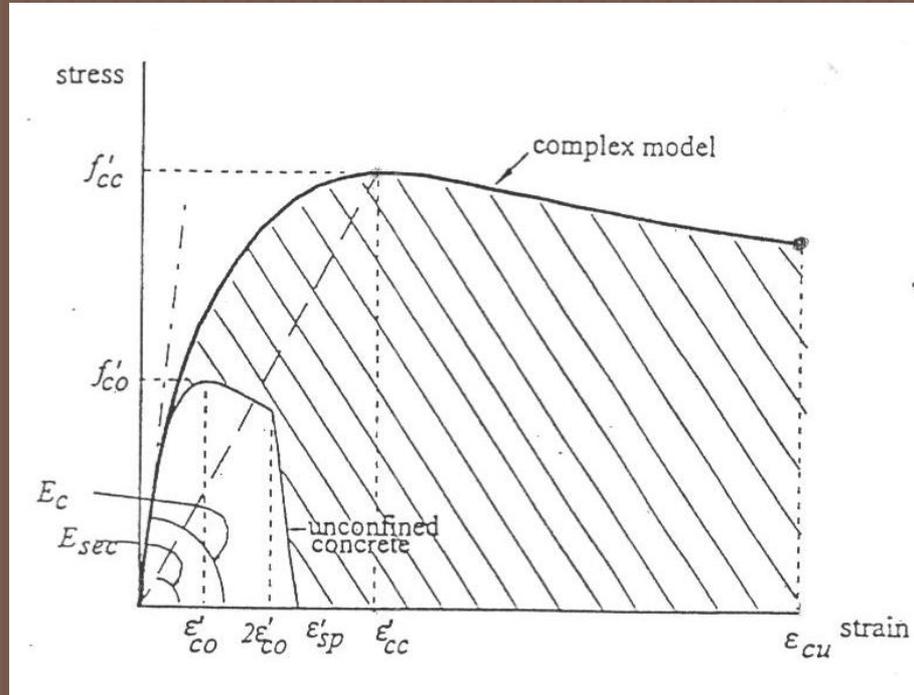


Espaciamiento del acero transversal (Tomado de Park y Paulay, 1997)



Los estribos rectangulares proveen confinamiento efectivo solo en las esquinas y en la región central de la sección. (Tomado de Park y Paulay, 1997)

MATERIALES: Concreto Reforzado - Relación Esfuerzo-Deformación



Modelo de Mander para Concreto Confinado y No Confinado aplicado para cualquier forma de sección y nivel de confinamiento. (Tomada de Priestley, Seible y Calvi, 1996)

MATERIALES: Acero



$$f_y = 15 \times f'_c \text{ (Compresión)}$$
$$f_y = 100 \times f_t \text{ (Tensión)}$$

COSTOSO

ECONÓMICO

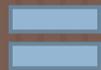
MATERIALES: Acero



ACERO DE REFUERZO

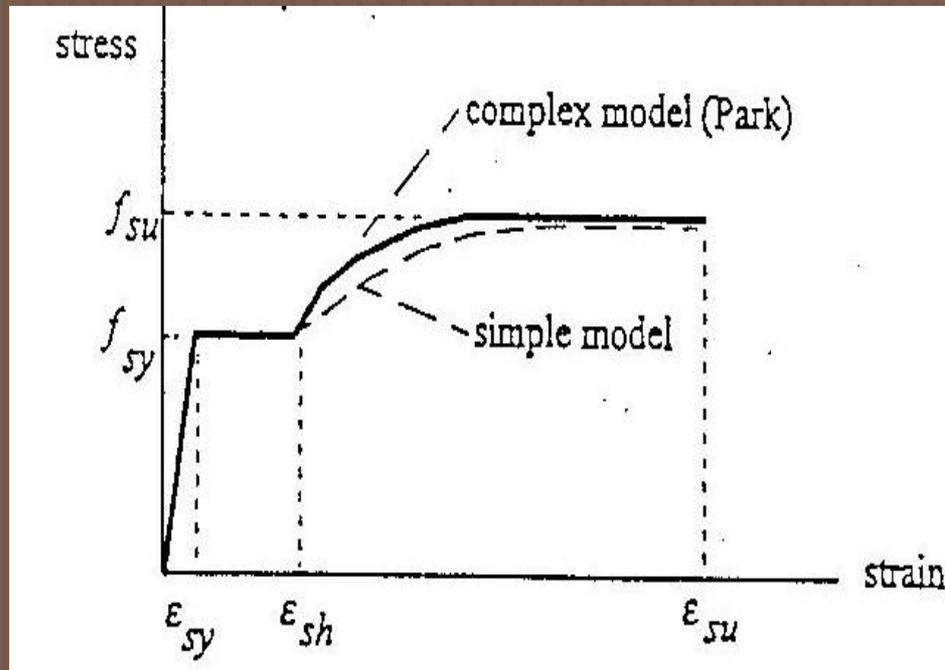


HORMIGÓN SIMPLE



CONCRETO
REFORZADO

MATERIALES: Acero - Relación Esfuerzo-Deformación



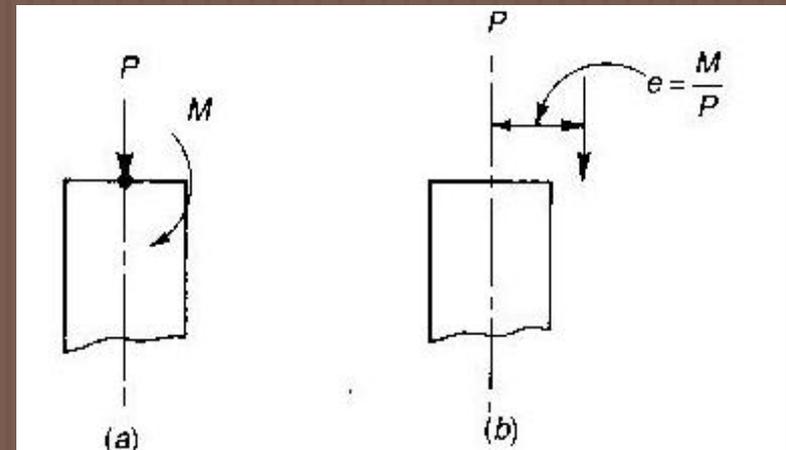
El modelo de Park que define los valores más importantes de la curva esfuerzo-deformación del acero. (Tomada de Seyed, 1994 - 1995)

COLUMNAS

- Las columnas pueden dividirse en:

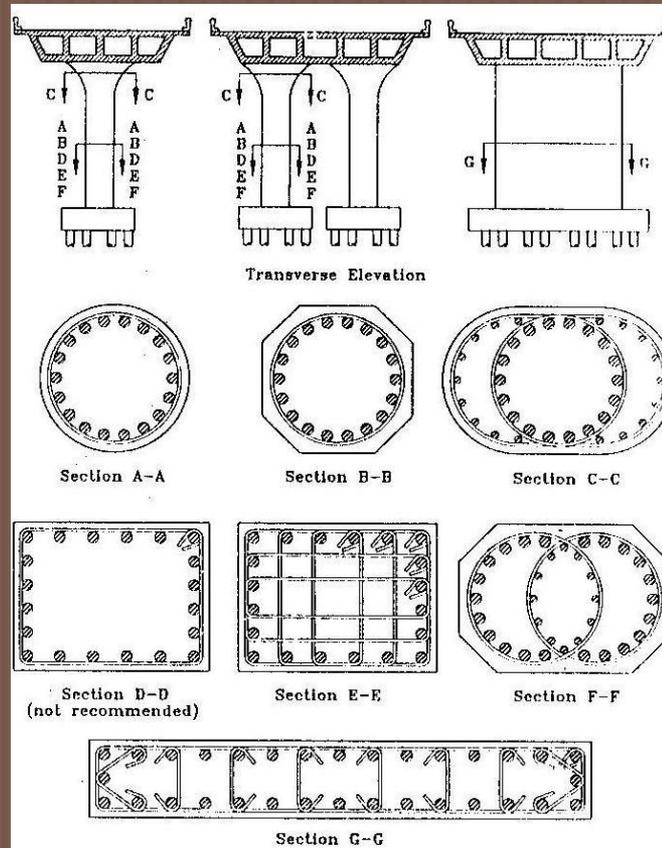
1.) *columnas cortas*, en las cuales la carga última para una excentricidad dada está solamente gobernada por la resistencia de los materiales y las dimensiones de la sección transversal.

2.) *columnas esbeltas*, en las cuales la carga última también está influida por la esbeltez, lo que produce flexión adicional debido a las deformaciones transversales.



Columna sometida a carga axial y flexión (Tomada de Nilson, 1999)

COLUMNAS: Secciones Típicas



Secciones de columnas sólidas. (Tomado de Priestley, Seible y Calvi 1996)

COLUMNAS: Diagramas de Interacción

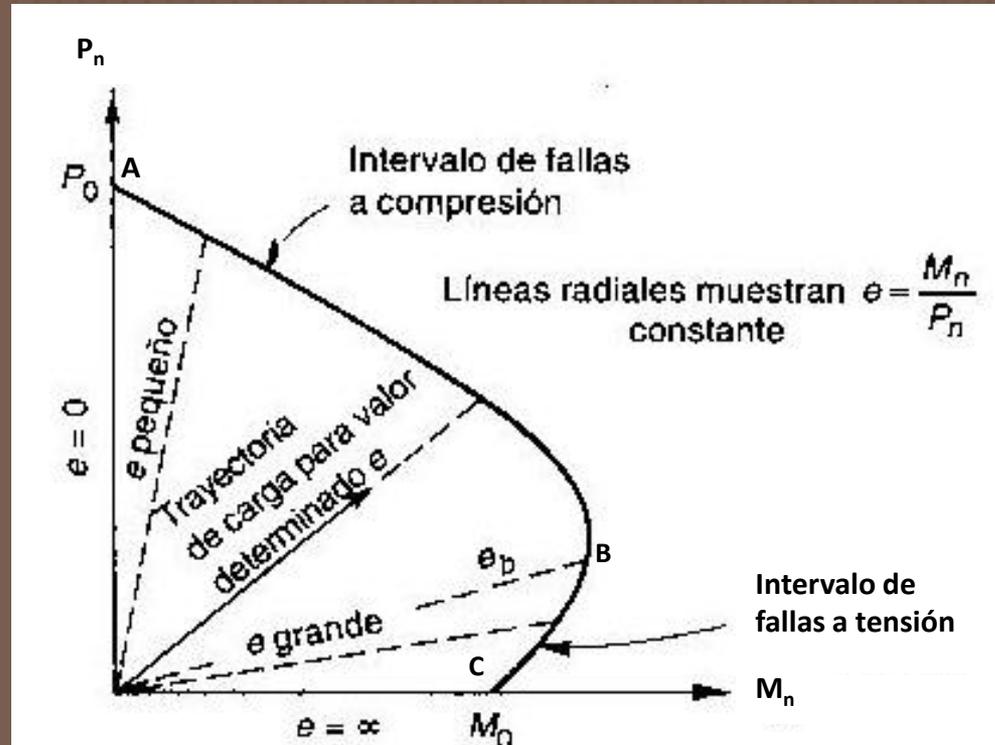
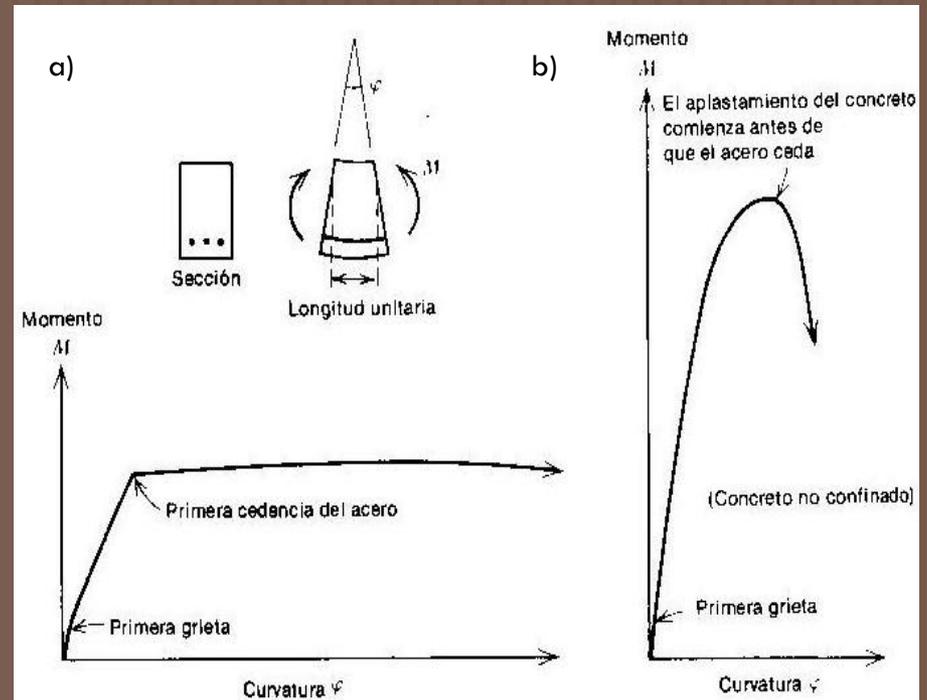


Diagrama de interacción para la resistencia nominal de una columna sometida a flexión y carga axial combinadas. (Tomado de Nilson, 1999).

COLUMNAS: Relaciones Momento-Curvatura

- La relación momento-curvatura de una sección de hormigón armado se obtiene a partir de los modelos del hormigón y del acero, además depende de la geometría y refuerzo longitudinal y transversal.
- La curvatura de un elemento se define como la rotación por longitud unitaria del miembro



Relaciones momento curvatura para secciones de viga simplemente reforzadas, (a) Sección que falla a tensión, $R < R_b$. (b) Sección que falla a compresión, $R > R_b$. (Tomada de Park y Paulay, 1997)

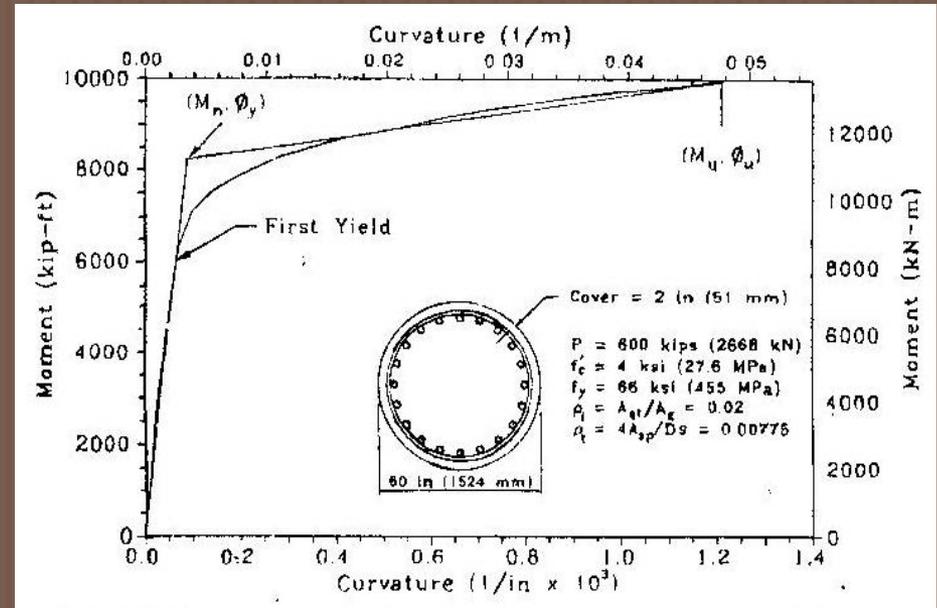
COLUMNAS: Relaciones Momento-Curvatura

- Para mayor facilidad, se considera una aproximación bilineal para la relación momento curvatura donde resaltan los términos:

1.) Curvatura de cedencia equivalente Φ_y

2.) Curvatura plástica Φ_p

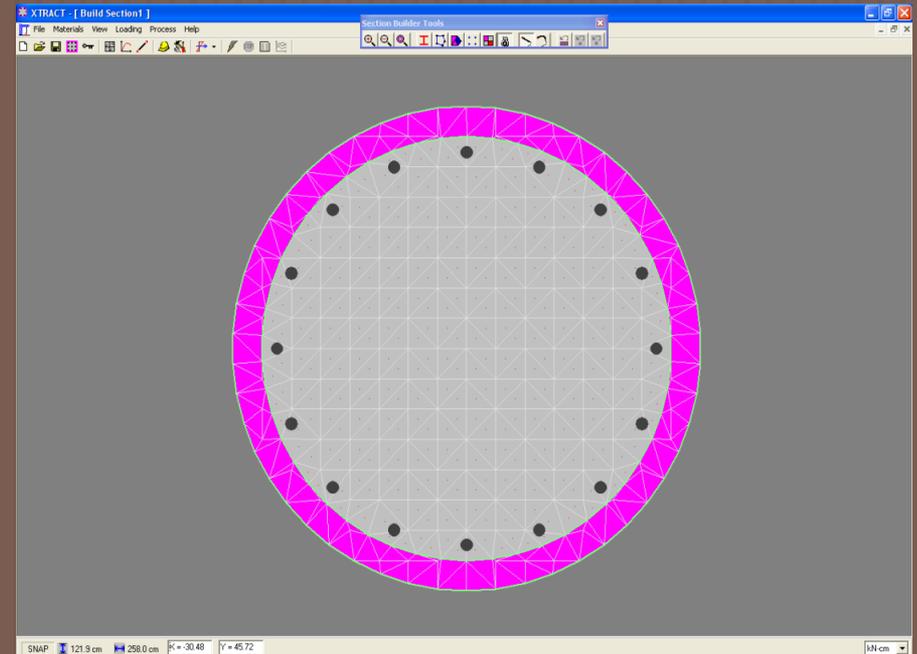
3.) Curvatura última Φ_u



Aproximación bilineal de la relación Momento-Curvatura de una columna. (Tomado de Priestley, Seible y Calvi, 1996)

XTRACT v. 3.0.8

- El programa UCFyber fue creado originalmente en la Universidad de California en Berkeley por el Dr. Charles Chadwell. En el 2001 Imbsen Software Systems adquirió el UCFyber y este fue renombrado como XTRACT.
- El XTRACT es en general un programa de análisis de secciones transversales de cualquier forma geométrica y material sujetas a cualquier tipo de carga. Las funciones de análisis disponibles que posee son:
 - 1.) Análisis de Interacción Fuerza Axial-Momento
 - 2.) Análisis Momento-Curvatura
 - 3.) Análisis de Interacción Momento-Momento



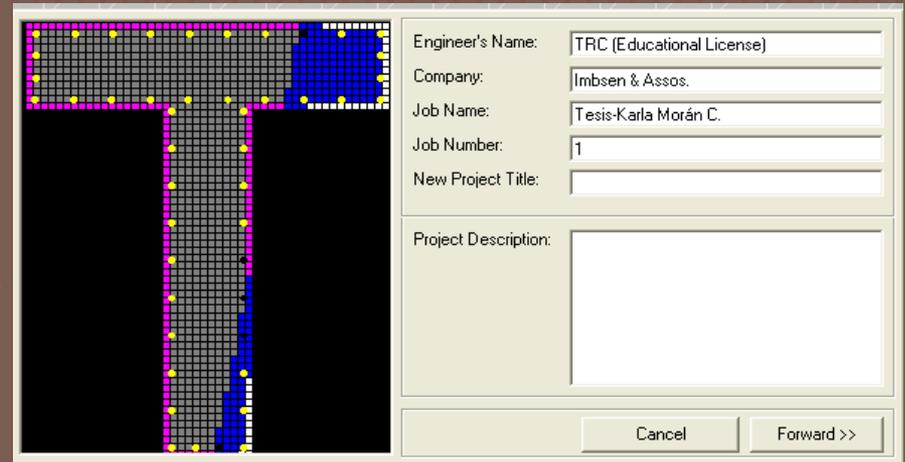
Ventana principal del programa XTRACT

XTRACT v3.0.8: Crear una sección



Paso 1:

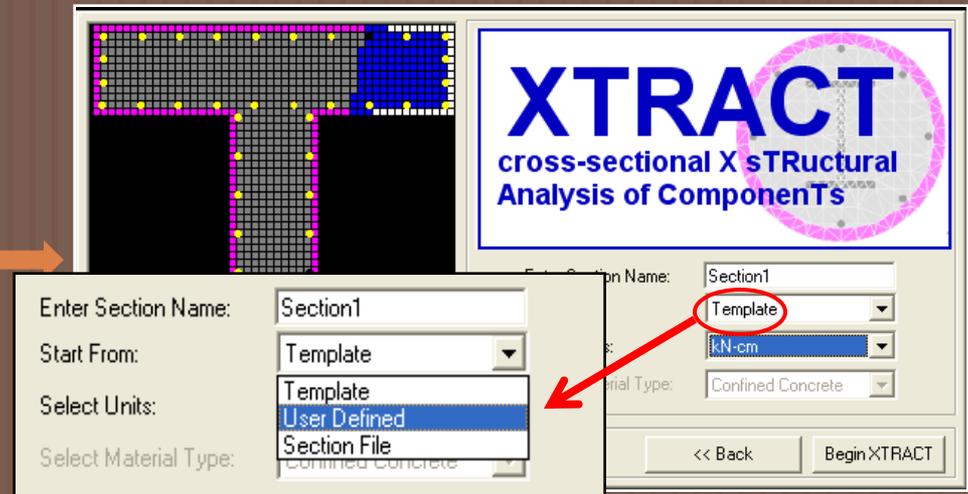
- Menú *File/New Project* o a través de la barra de herramientas con el ícono 
- El primer cuadro de diálogo permite agregar los datos del propietario y el nombre del proyecto.



Engineer's Name: TRC (Educational License)
Company: Imbsen & Assos.
Job Name: Tesis-Karla Morán C.
Job Number: 1
New Project Title:
Project Description:
Cancel Forward >>

Paso 2:

- En el recuadro que aparece a continuación se selecciona la forma como iniciar el proyecto, las unidades en la que se va a trabajar



XTRACT
cross-sectional X sTRuctural
Analysis of ComponentTs

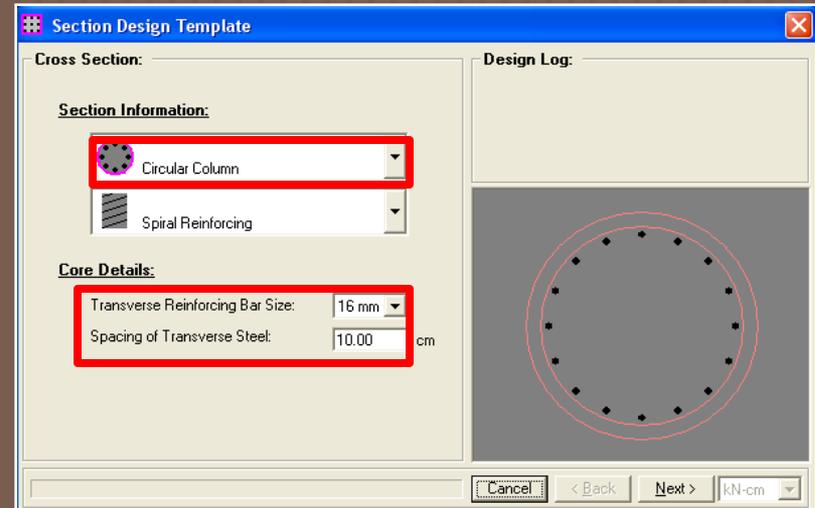
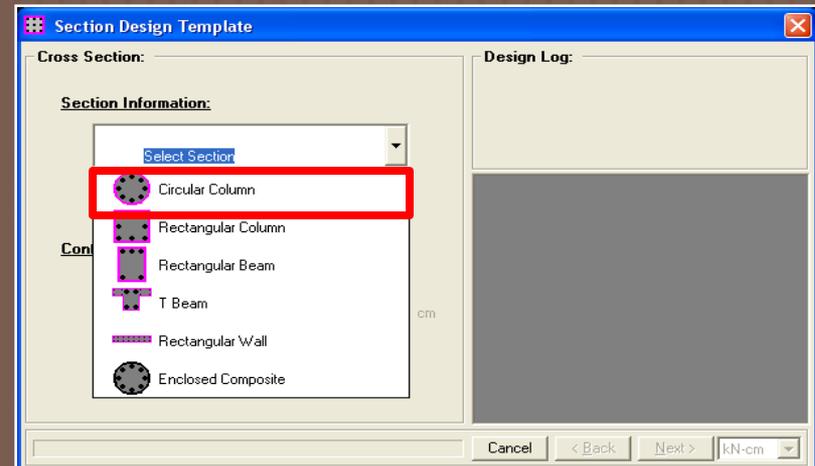
Enter Section Name: Section1
Start From: Template
Select Units: Template, User Defined, Section File
Select Material Type: Confined Concrete
Section Name: Section1
Units: N-cm
Material Type: Confined Concrete
<< Back Begin XTRACT

XTRACT v3.0.8: Crear una sección

- La opción *Template* presenta diferentes tipos de secciones.
- Para comprender mejor, se analizará un ejemplo con las siguientes características:

1.) Sección circular.

2.) Espiral $\phi=16$ mm c/10cm



XTRACT v3.0.8: Crear una sección Geometría

Geometría:

D=80 cm

Recubrimiento = 5 cm

16 varillas $\phi=20$ mm

Materiales:

1.) Concreto No confinado

2.) Concreto Confinado

3.) Acero de refuerzo

The screenshot shows the 'Section Design Template' dialog box with the 'Geometry' tab selected. The 'Geometry' section is highlighted with a red box and contains the following fields: 'Outside Diameter' (80 cm), 'Cover Thickness' (5.000 cm), 'Number of Longitudinal Bars' (16), and 'Longitudinal Bar Size' (20 mm). Below these fields, the 'Design Log' section displays: 'Section Type: Circular Column', 'Type of Reinforcing: Spiral Reinforcing', 'Transverse Reinforcing Bar Size: 16 mm', and 'Spacing of Transverse Steel: 10.00 cm'. A circular diagram of the column cross-section is shown on the right. At the bottom, there are 'Cancel', '< Back', 'Next >', and 'kN-cm' buttons.

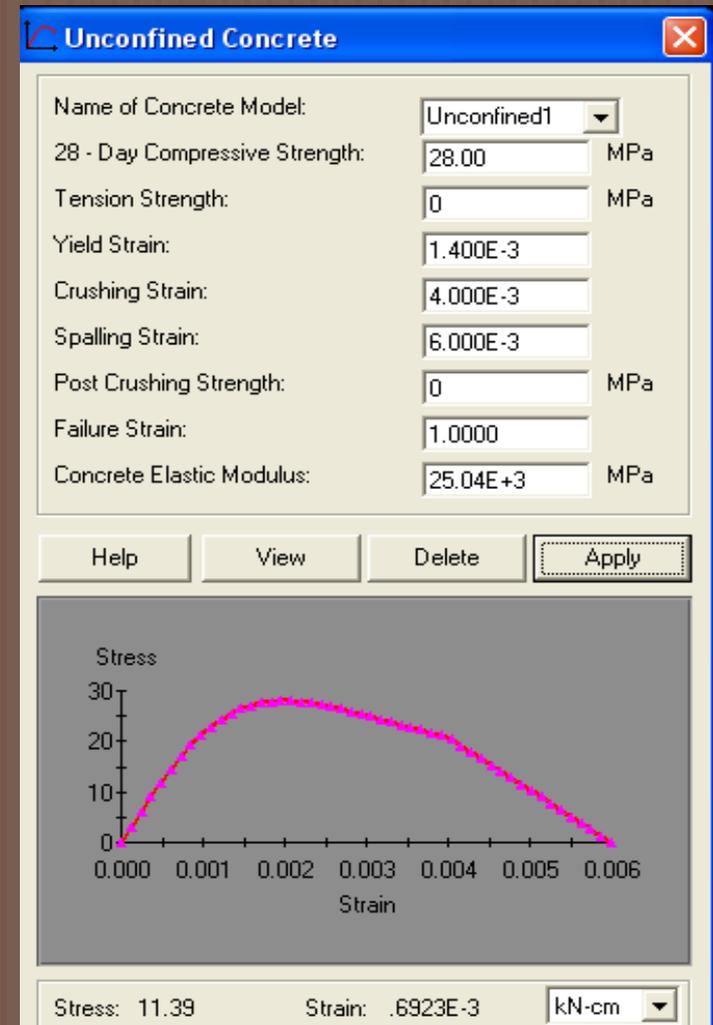
The screenshot shows the 'Section Design Template' dialog box with the 'Materials' tab selected. The 'Materials' section contains five rows: 'Cover Concrete', 'Column Core Concrete', 'Web Concrete', 'Longitudinal Steel', and 'Shell Steel'. Each row has a dropdown menu and an 'Add New' button. The 'Add New' buttons for 'Cover Concrete' and 'Longitudinal Steel' are highlighted with red boxes. The 'Design Log' section on the right displays: 'Section Type: Circular Column', 'Type of Reinforcing: Spiral Reinforcing', 'Transverse Reinforcing Bar Size: 16 mm', 'Spacing of Transverse Steel: 10.00 cm', 'Outside Diameter: 80 cm', and 'Cover Thickness: 5.000 cm'. A circular diagram of the column cross-section is shown on the right. At the bottom, there are 'Cancel', '< Back', 'Next >', and 'kN-cm' buttons.

XTRACT v3.0.8: Crear una sección Materiales

□ Concreto No Confinado

Parámetros:

- 1.) Resistencia del cilindro a los 28 días: f'_c
- 2.) Resistencia a la tensión (f_t)
- 3.) Deformación de fluencia (e_{cy})
- 4.) Deformación última (e_{cu})
- 5.) Deformación en el desprendimiento (e_{sp})
- 6.) Deformación de falla
- 7.) Módulo elástico (E_c)

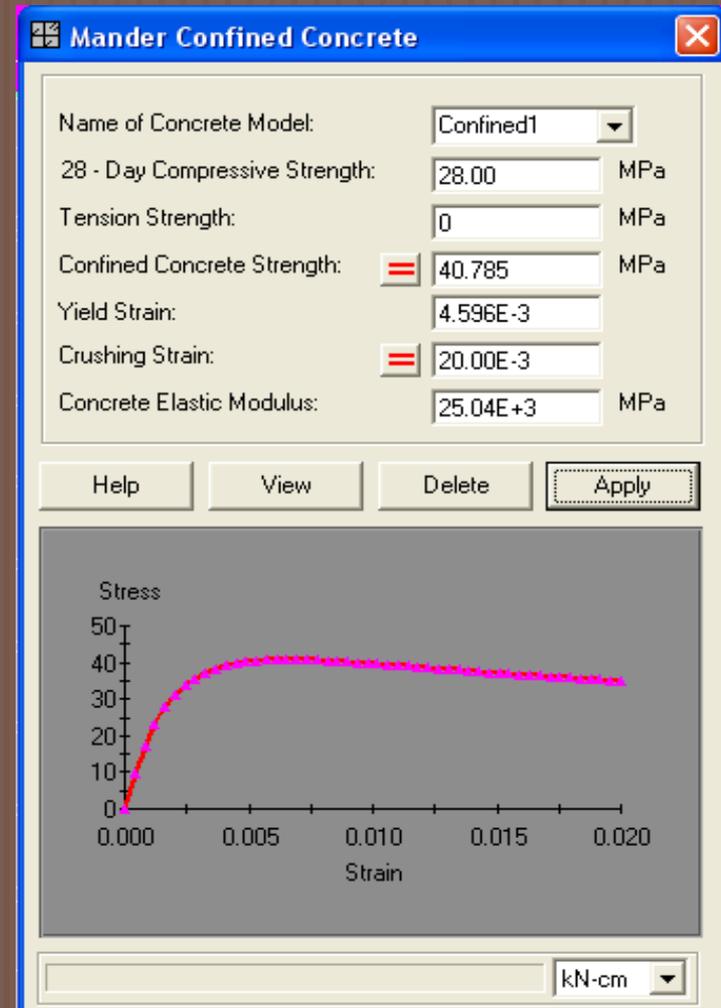


XTRACT v3.0.8: Crear una sección Materiales

Concreto Confinado

Parámetros:

- 1.) Resistencia del cilindro a los 28 días: f'_c
- 2.) Resistencia a la tensión (f_t)
- 3.) Resistencia del concreto confinado (f'_{cc})
- 4.) Deformación de fluencia (e_{cy})
- 5.) Deformación última (e_{cu})
- 6.) Módulo elástico (E_c)



XTRACT v3.0.8: Crear una sección Materiales

□ Acero de Refuerzo

Parámetros:

1.) Acero Standard y Grado

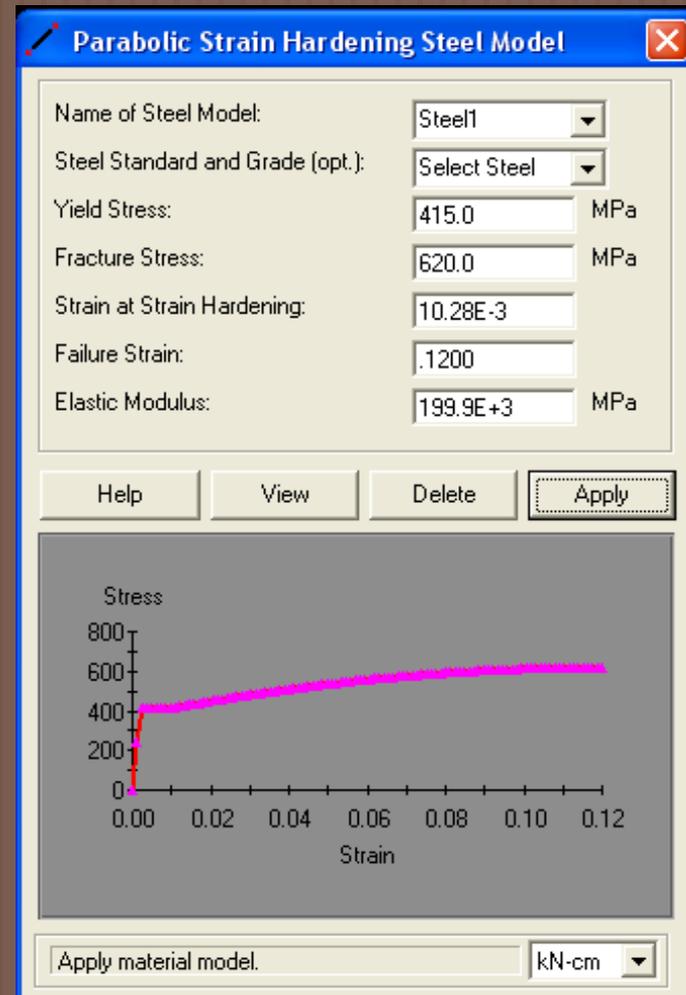
2.) Resistencia a la fluencia (f_y)

3.) Resistencia de fractura (f_{su})

4.) Deformación en el endurecimiento por deformación (e_{sh})

5.) Deformación última (e_{su})

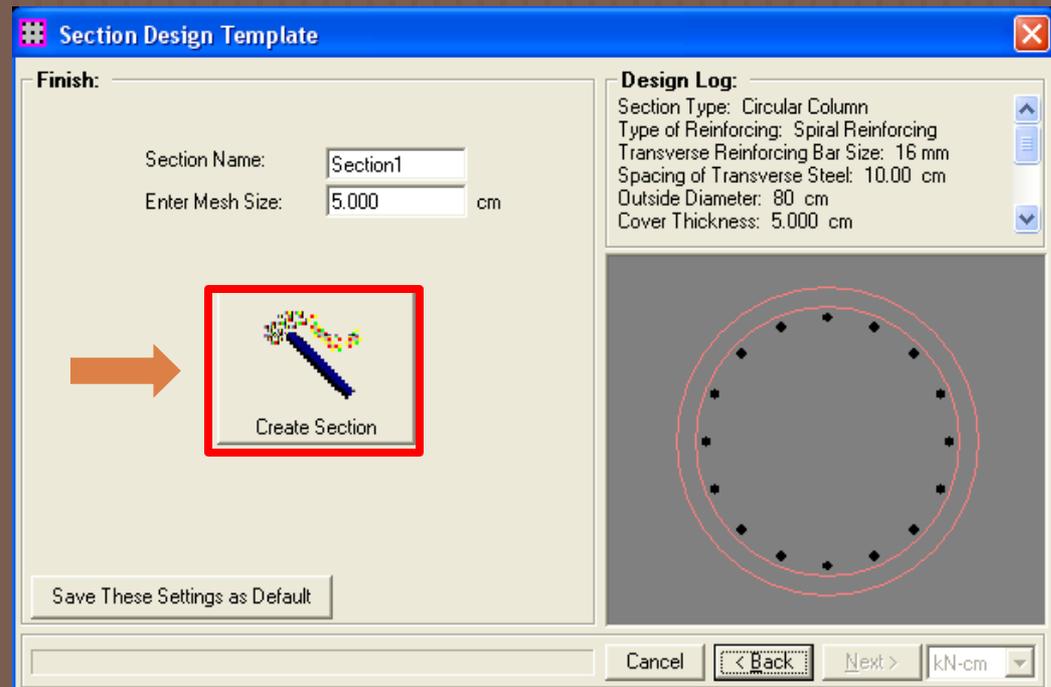
6.) Módulo elástico (E_s)



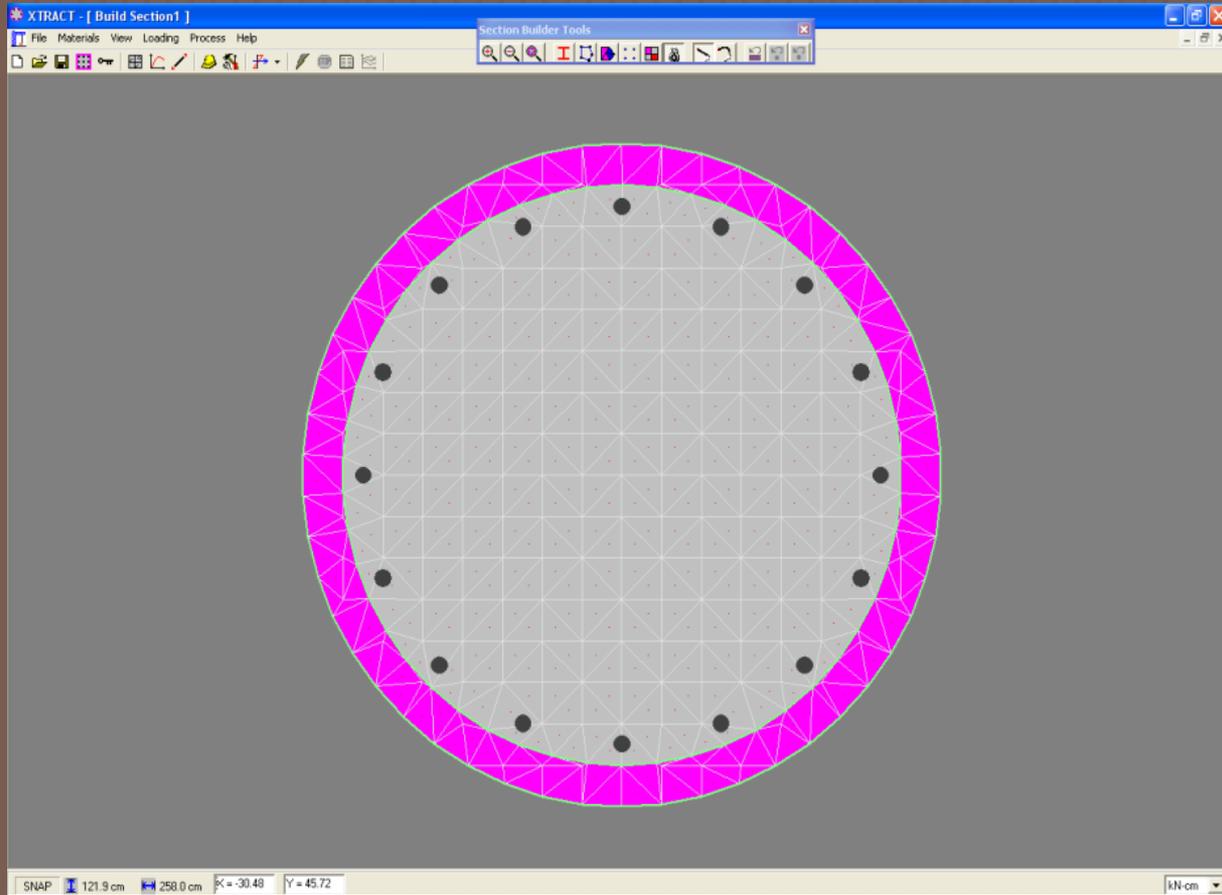
XTRACT v3.0.8: Crear una sección

Paso 4:

- Una vez definidas las características de la sección circular, en la última ventana se puede cambiar el nombre de la sección e ingresar el *mesh size*. Para finalizar se da click en *Create section*.



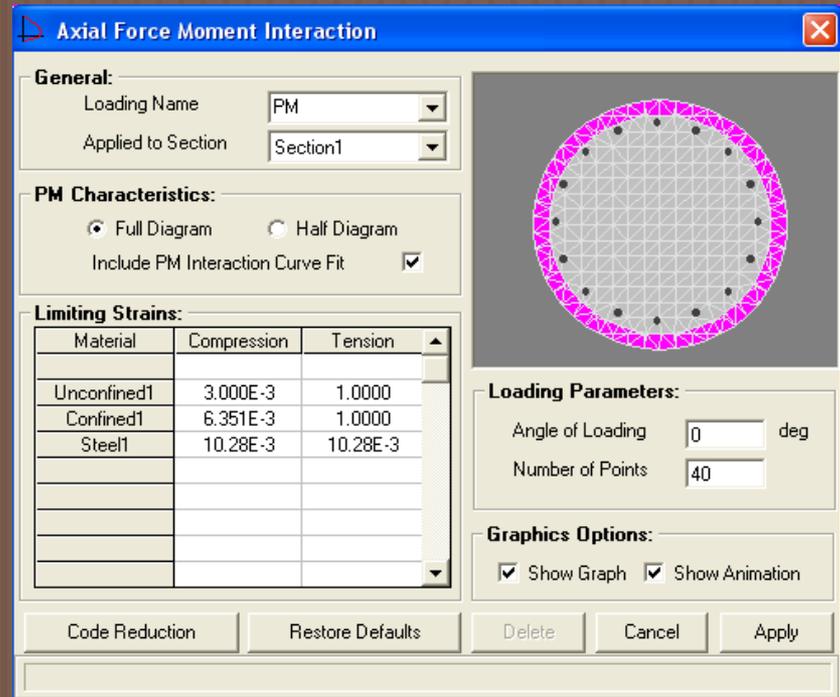
XTRACT v3.0.8: Sección Circular



XTRACT v3.0.8: Cargas

Interacción Carga-Momento

- Menú *Loading/PM Interaction*
- *General*
- *PM Characteristics*
- *Limiting strains*: Deformaciones máximas a las cuales se calcula la interacción.
 - 1.) **Concreto No Confinada**: 0.003
 - 2.) **Concreto Confinado**: deformación en el esfuerzo pico
 - 3.) **Acero**: deformación al inicio de la etapa de endurecimiento por deformación.
- *Loading Parameters*
 - 1.) **Ángulo de carga**: ángulo del eje alrededor del cual se aplicarán los momentos
 - 2.) **Número de puntos**: el número de puntos que se obtendrán en los resultados para graficar la curva.



XTRACT v3.0.8: Cargas Momento-Curvatura

- *Loading/Moment Curvature*
- *General*
- *Applied First Step Loads*
 - 1.) Axial Load: P_0
 - 2.) Momentos
- *Incrementing Loads*

Eje alrededor del cual se realizará el análisis.
- *Calculate Moment Rotation* que permite al usuario ingresar la altura de la rótula plástica directamente o calcularla en base a algunos modelos comúnmente usados a partir del cuadro de diálogo.

Moment Curvature Loading

General:
Loading Name: MC
On Section: Section1

Applied First Step Loads:
 Axial Load: 18800 kN
 Mxx: 0 kN-m
 Myy: 0 kN-m

Incrementing Loads:
 Axial Load
 Moment About the X-Axis (Mxx)
 Moment About the Y-Axis (Myy)

Loading Direction:
 Positive Negative

Moment Rotation Options:
 Calculate Moment Rotation
Plastic Hinge Length: 0 cm

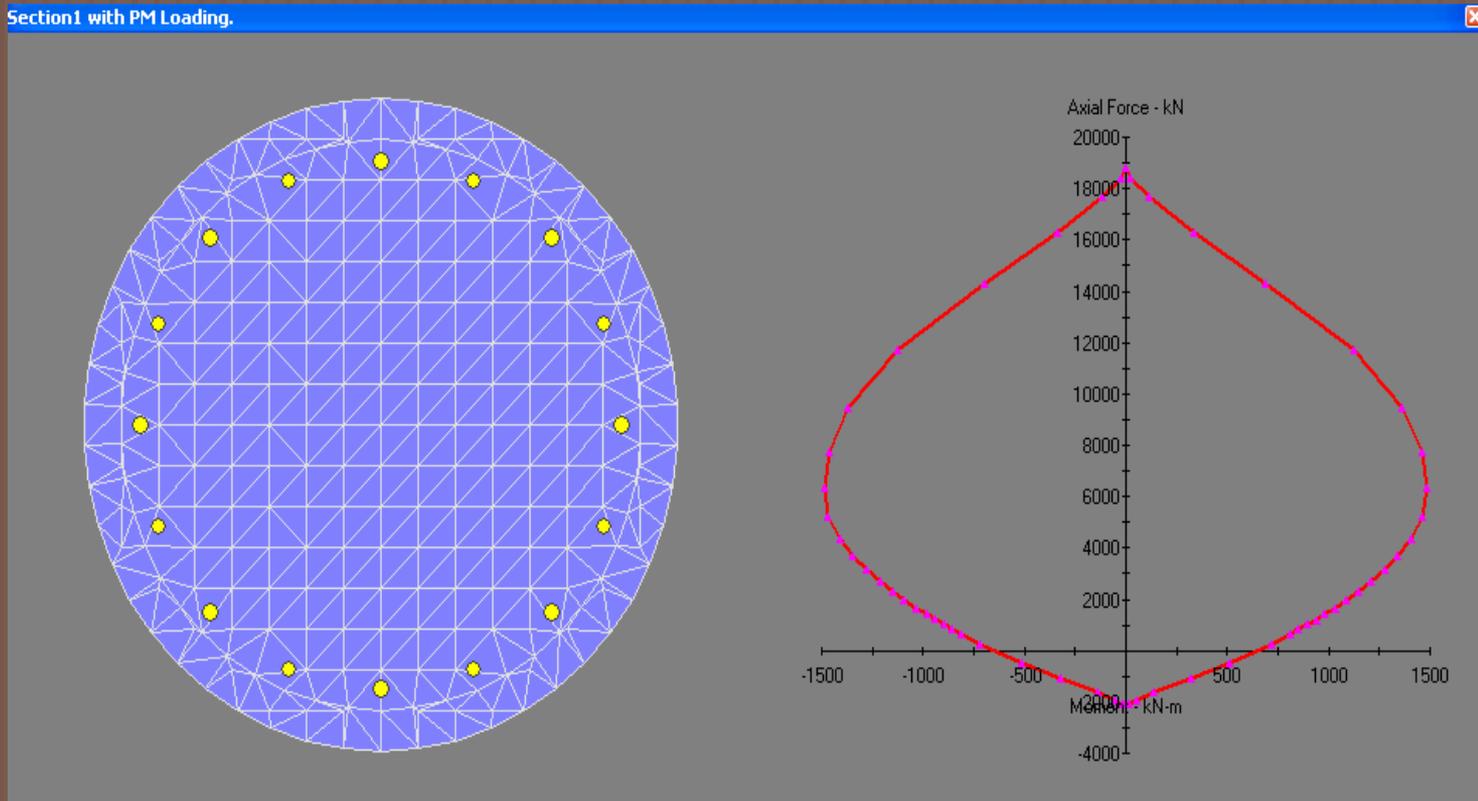
Graphics Options:
 Show Graph Show Animation

Solution Method Delete Cancel Apply

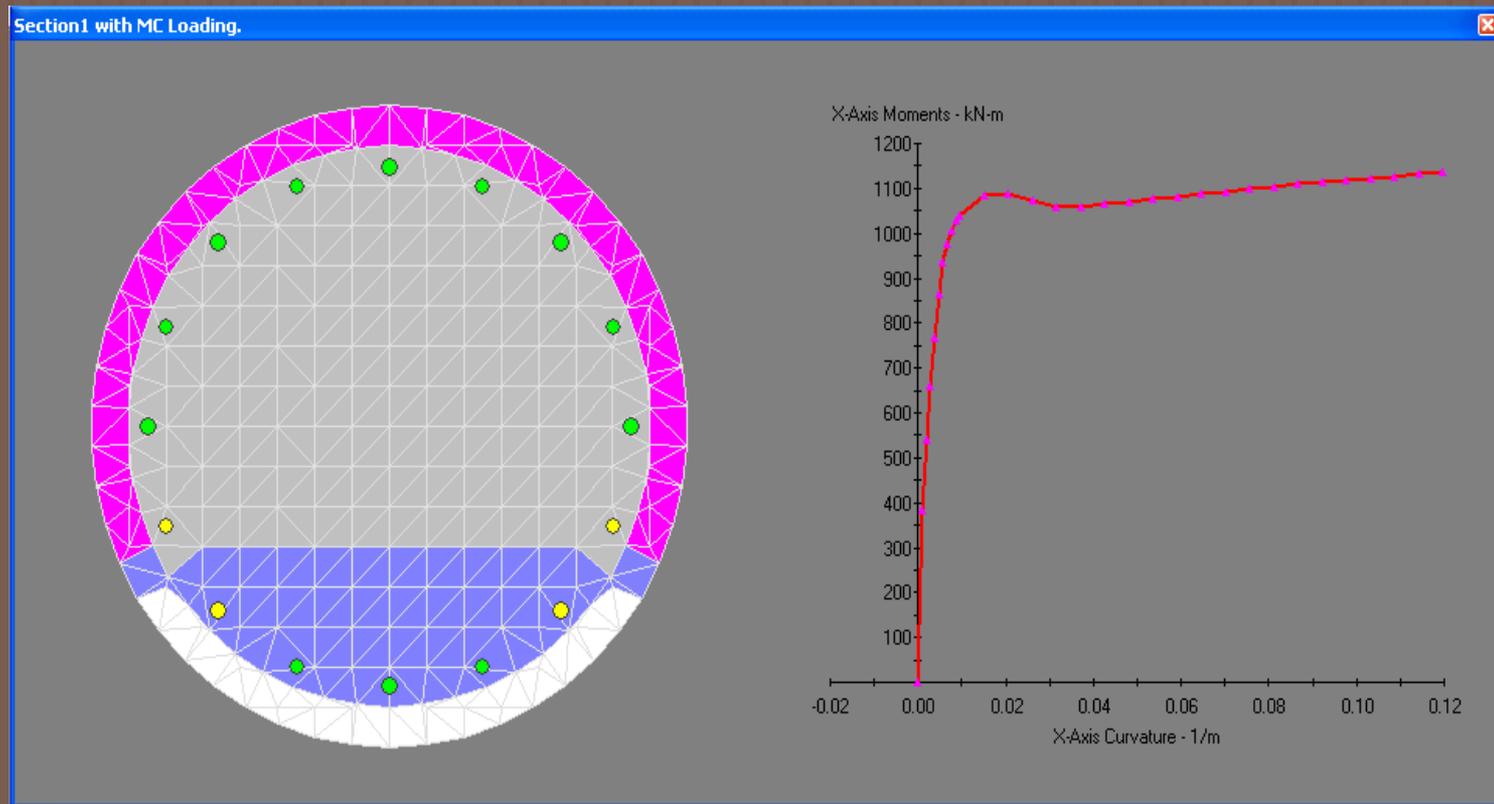
kN-cm

XTRACT v3.0.8: Análisis de Interacción Carga-Momento

□ Menú *Process/Run Analysis*

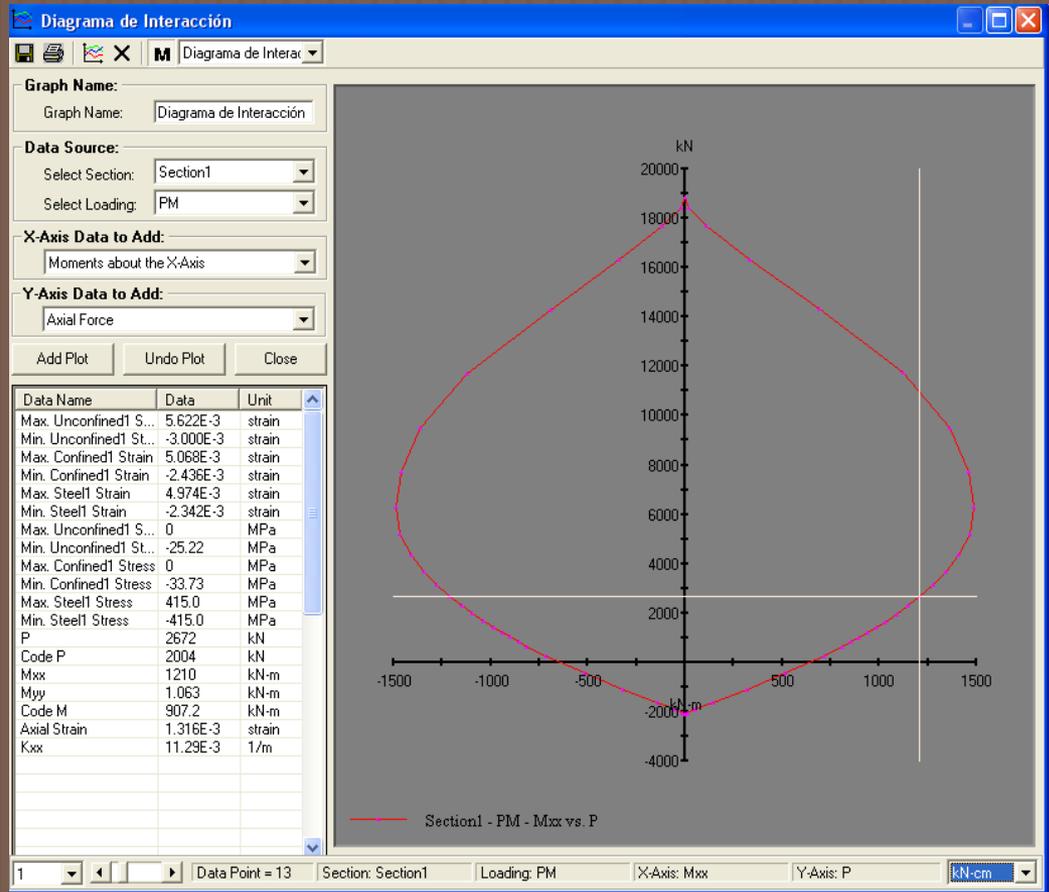


XTRACT v3.0.8: Análisis Momento-Curvatura

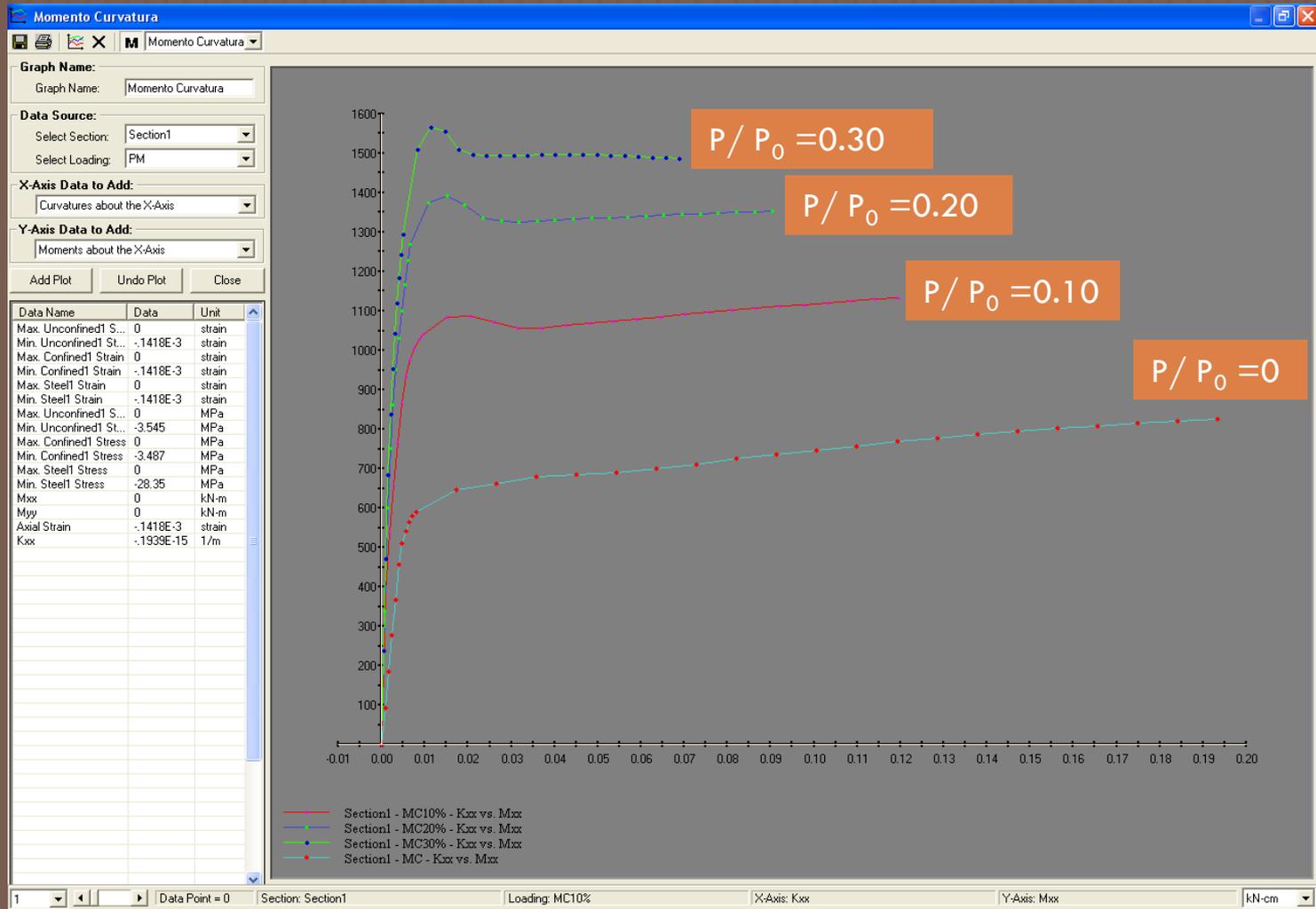


XTRACT v3.0.8: Resultados Diagrama de Interacción

- Process/ Add Graph
- Graph Name: *Diagrama de Interacción*
- Section: *Section 1*
- Loading: *PM*
- X Axis: *Moments about the X-axis*
- Y Axis: *Axial Force*
- Add plot.



XTRACT v3.0.8: Resultados Relación Momento-Curvatura



Section Name: Section1
Loading Name: MC
Analysis Type: Moment Curvature

06/03/2009
Tesis-Karla Morán C.
circular 80 cm
Page __ of __

Reporte

Section Details:

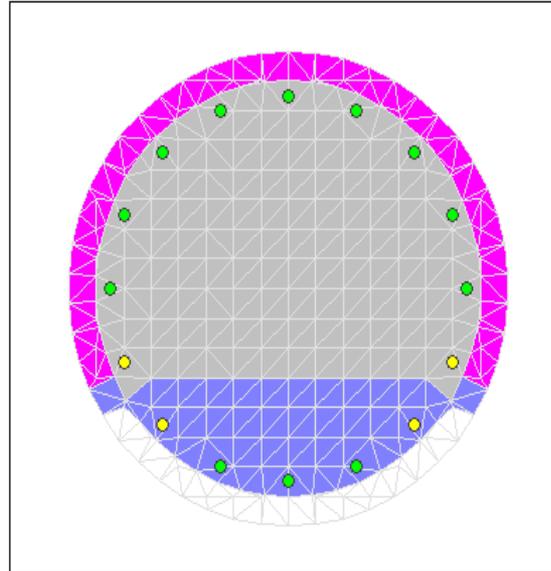
X Centroid: -6388E-6 cm
Y Centroid: .1062E-15 cm
Section Area: 5013 cm²

Loading Details:

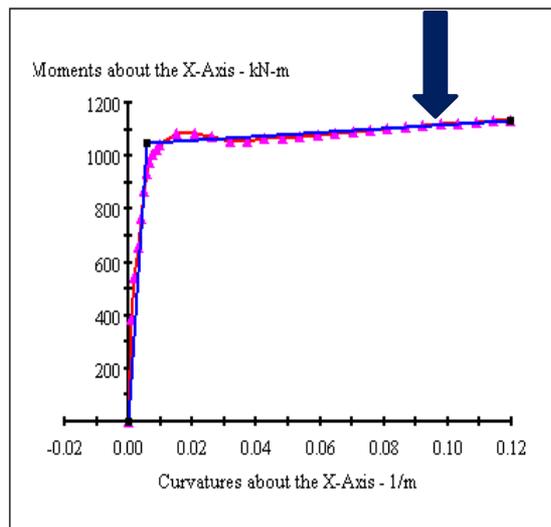
Constant Load - P: 1880 kN
Incrementing Loads: Mxx Only
Number of Points: 30
Analysis Strategy: Displacement Control

Analysis Results:

Failing Material: Confined1
Failure Strain: 20.00E-3 Compression
Curvature at Initial Load: -1.945E-15 1/m
Curvature at First Yield: 4.800E-3 1/m
Ultimate Curvature: .1197 1/m
Moment at First Yield: 866.7 kN-m
Ultimate Moment: 1136 kN-m
Centroid Strain at Yield: .4348E-3 Ten
Centroid Strain at Ultimate: 19.78E-3 Ten
N.A. at First Yield: 9.059 cm
N.A. at Ultimate: 16.52 cm
Energy per Length: 127.6 kN
Effective Yield Curvature: 5.825E-3 1/m
Effective Yield Moment: 1052 kN-m
Over Strength Factor: 1.080
EI Effective: 1.81E+8 N-m²
Yield EI Effective: 737.4E+3 N-m²
Bilinear Hardening Slope: .4084 %
Curvature Ductility: 20.55



Bilinearización



Comments:

XTRACT v3.0.8: Resultados

Hoja de cálculo

The screenshot displays two windows from the XTRACT v3.0.8 software. The 'Project Manager' window on the left shows a tree view of the project structure. The 'Project Output' window on the right displays a table of results for Section 1 under loading PM.

Project Manager

- circular 80 cm
 - Section1
 - Section Report
 - Section Materials
 - PM
 - Interactive Output
 - Analysis Report
 - Undeformed Shape
 - Material Output
 - Section Output**
 - Axial Force
 - Code Axial Force
 - Moments about the X-Axis
 - Moments about the Y-Axis
 - Code Moments about bending axis
 - Axial Strain at the Centroid
 - Curvatures about the X-Axis
 - MC
 - MC1
 - CD
 - Section2
 - Section3
 - Materials

Project Output

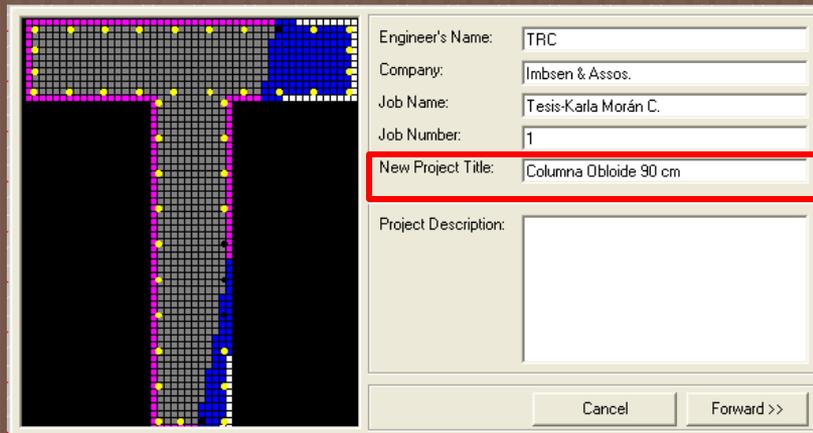
	P	Mxx
Section	Section1	Section1
Loading	PM	PM
Units	kN	kN-m
Data		
0	18.82E+3	-.1421E-12
1	18.42E+3	22.03
2	17.67E+3	114.1
3	16.32E+3	335.8
4	14.30E+3	690.8
5	11.73E+3	1122
6	9491	1365
7	7727	1463
8	6311	1487
9	5205	1465
10	4351	1409
11	3671	1343
12	3137	1278
13	2672	1210
14	2281	1147
15	1953	1091
16	1643	1032
17	1404	981.8
18	1200	937.6
19	1013	895.8
20	831.8	853.2

Buttons: Select All, Remove, Save Data, Close, kN-cm

XTRACT v3.0.8: Crear Sección Oblong

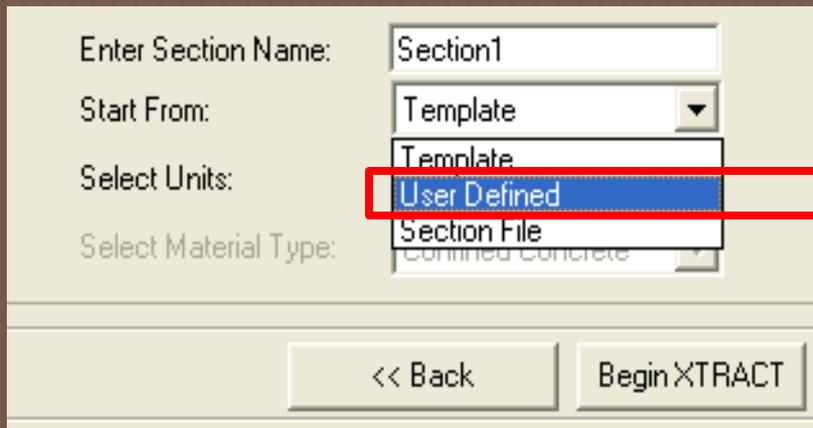


1.) Nombre del proyecto



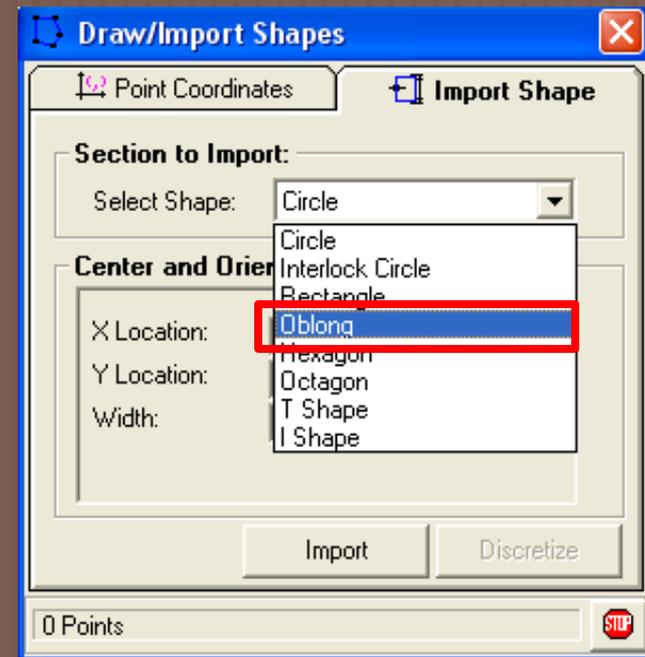
Engineer's Name: TRC
Company: Imbsen & Assos.
Job Name: Tesis-Karla Morán C.
Job Number: 1
New Project Title: Columna Oblorde 90 cm
Project Description:
Cancel Forward >>

2.) Tipo de proyecto



Enter Section Name: Section1
Start From: Template
Select Units: **User Defined**
Select Material Type: Section File
<< Back Begin XTRACT

3.) Materiales y Geometría



Draw/Import Shapes

Point Coordinates Import Shape

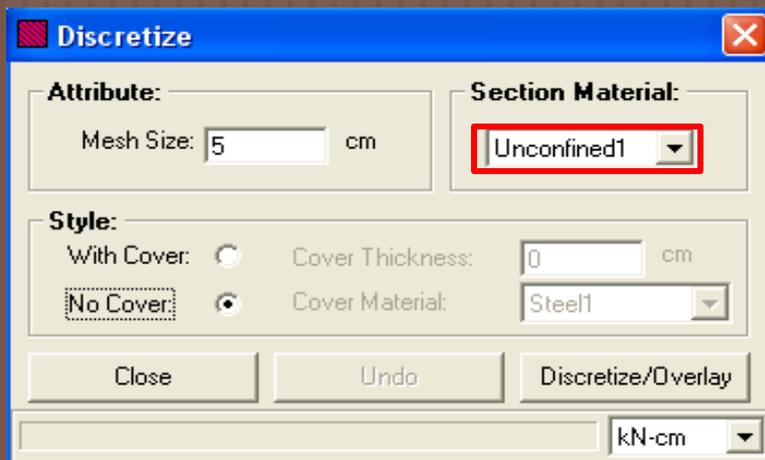
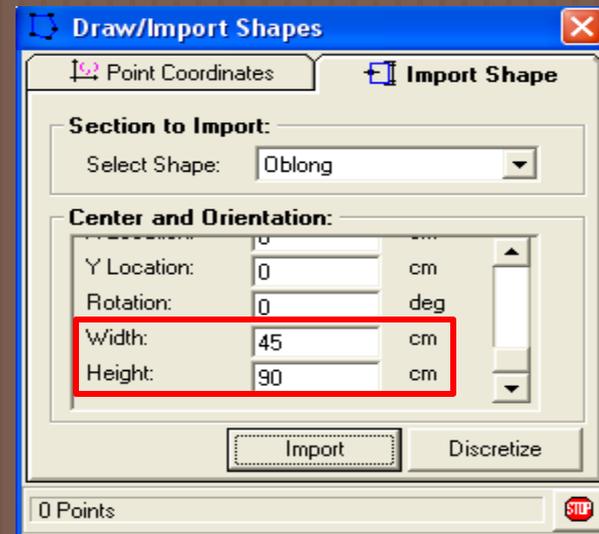
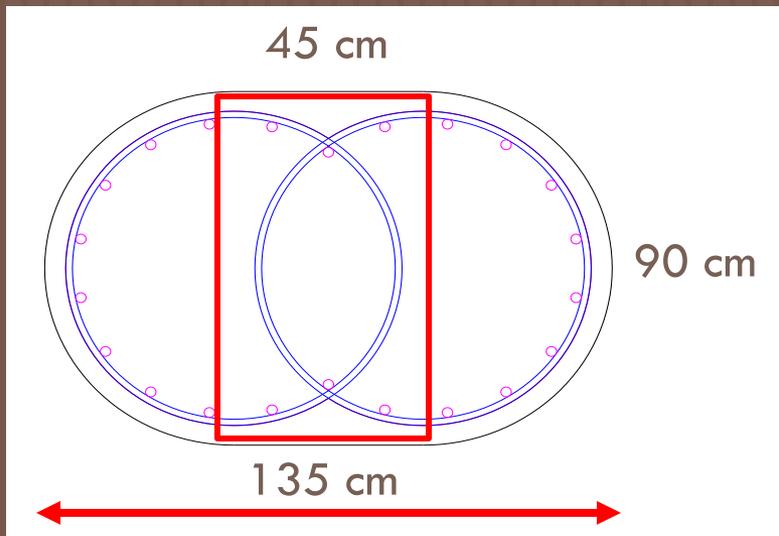
Section to Import:
Select Shape: Circle
Circle
Interlock Circle
Rectangle
Oblong
Hexagon
Octagon
T Shape
I Shape

Center and Orientation
X Location:
Y Location:
Width:

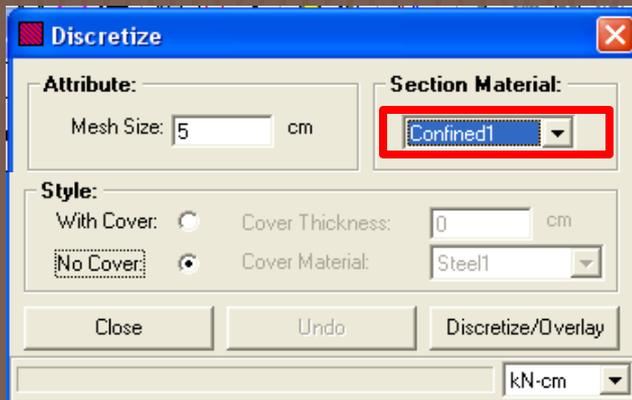
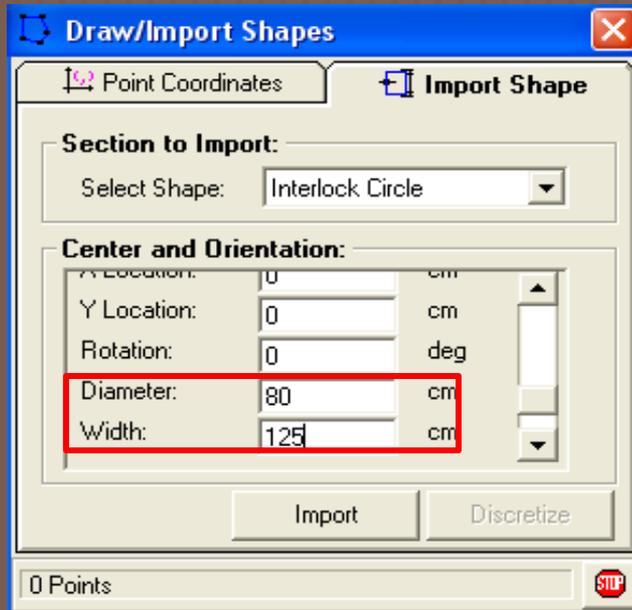
Import Discretize

0 Points STOP

XTRACT v3.0.8: Crear Sección Oblong



XTRACT v3.0.8: Crear Sección Oblong



XTRACT v3.0.8: Crear Sección Oblong Refuerzo

Seleccionar las varillas existentes
Añadir o borrar las varillas
Generar las varillas
Ingresar la ubicación de las varillas por coordenadas
Seleccionar todas las varillas
Seleccionar ninguna varilla
Editar las varillas seleccionadas

Draw bars Draw with arcs



Rebar Characteristics:

Material: Steel1 Area: 4.909 cm²
Bar Size: 25 mm Prestress: 0 kN

Generate By Spacing Enter number of bars:
 Generate By Number 12
 Running Generation Mode

Generation points are added by clicking on the builder while in either Line or Arc Mode.

Enter Generation Points By Coordinates:

Bar Locations:

First bar:	0	29.56	cm
Second Bar:	-58.90	7.450	cm
Last Bar:	0	-29.56	cm

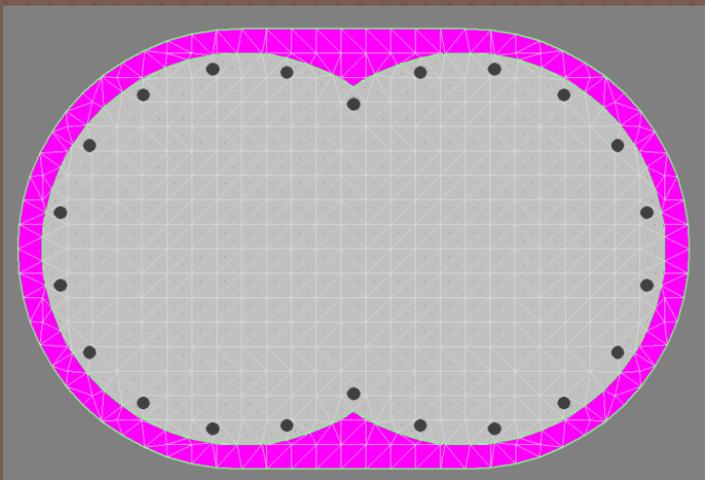
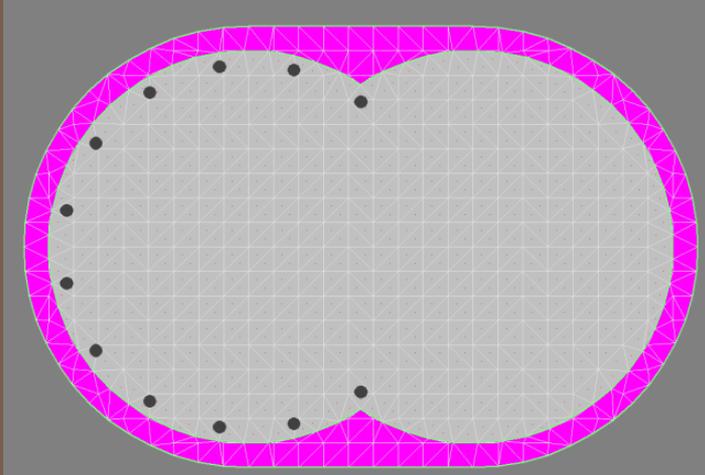
Relative Locations:

Delta:	58.90	-37.01	cm
Arc:	307.	53.	deg
Radius:		37.15	cm

Apply
Undo

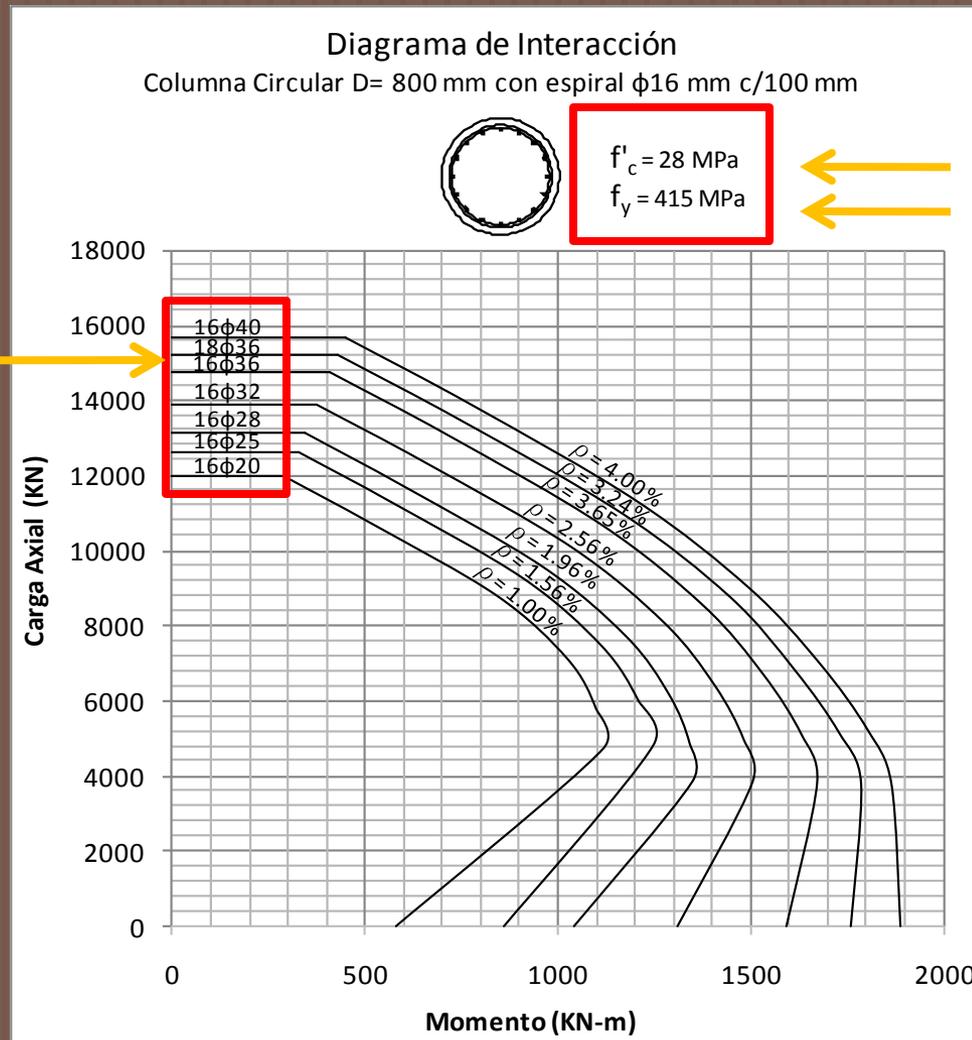
Enter X coordinate of the middle point in generation.

XTRACT v3.0.8: Crear Sección Oblong Refuerzo



Lo siguiente es completar el refuerzo para el lado derecho de la sección, para lo cual se siguen de igual forma los pasos anteriores con la diferencia de que el segundo par ordenado será $(58.90, 7.45)$ ya que está en el eje positivo de las X.

Organización de los Resultados: Diagramas de Interacción

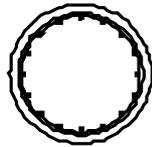


Resistencia del hormigón
Resistencia a la fluencia del acero

Organización de los Resultados: Relación Momento Curvatura

Relación Momento - Curvatura

Columna Circular D = 800 mm con espiral $\phi 16$ mm c/100 mm



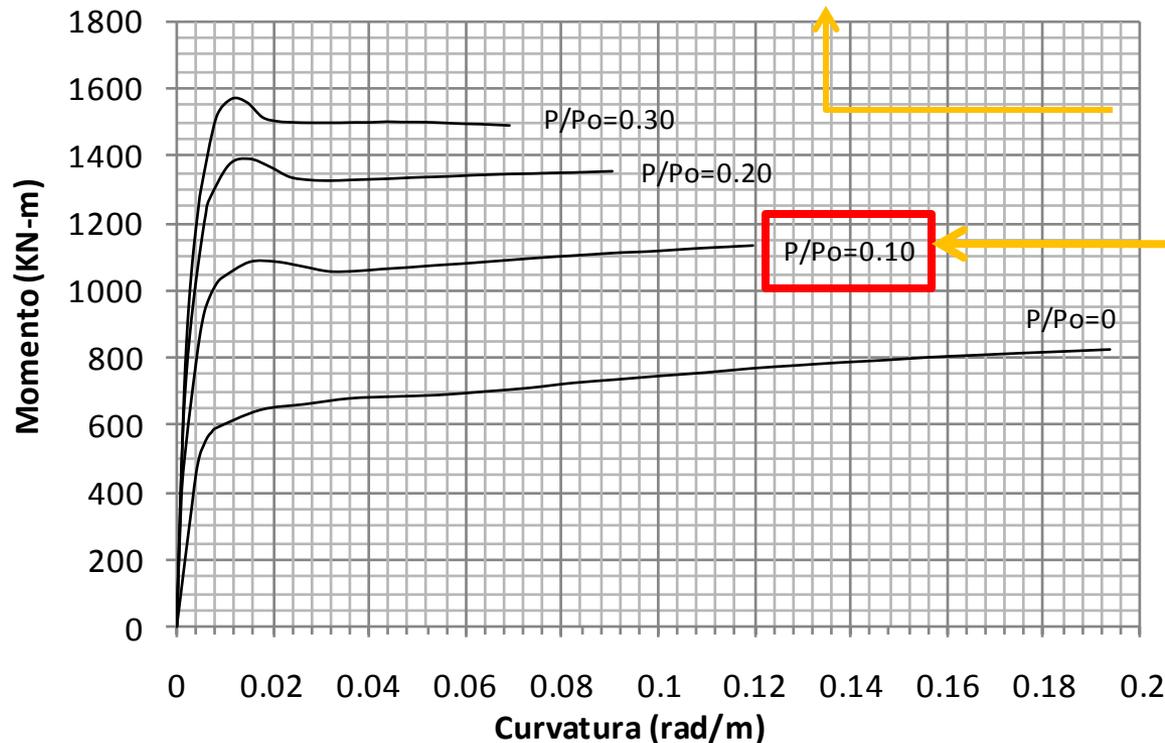
16 ϕ 20mm
r =1.00%

$P_0 = 18800$ KN
 $f'_c = 28$ MPa
 $f_y = 415$ MPa

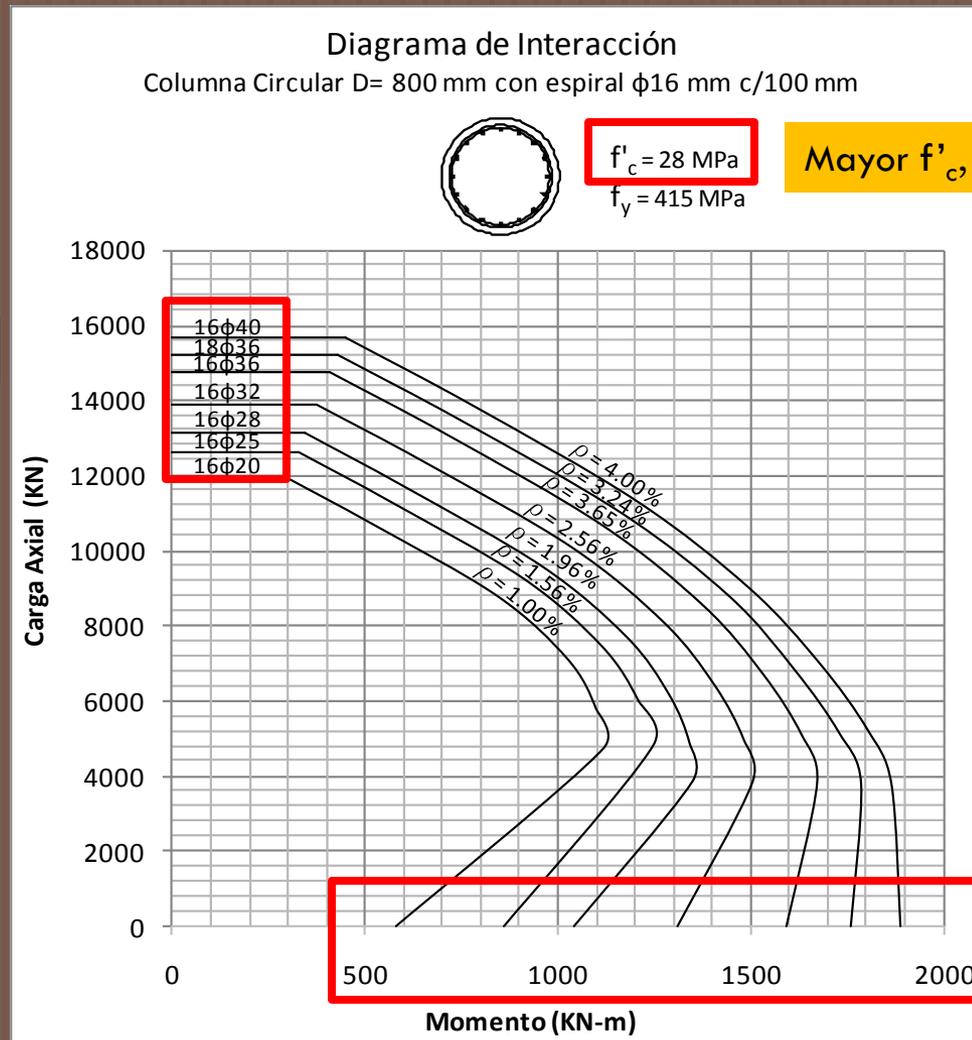
Carga Axial P_0
Resistencia del hormigón
Resistencia a la fluencia del acero

Número y diámetro de la varilla y Cuantía de acero

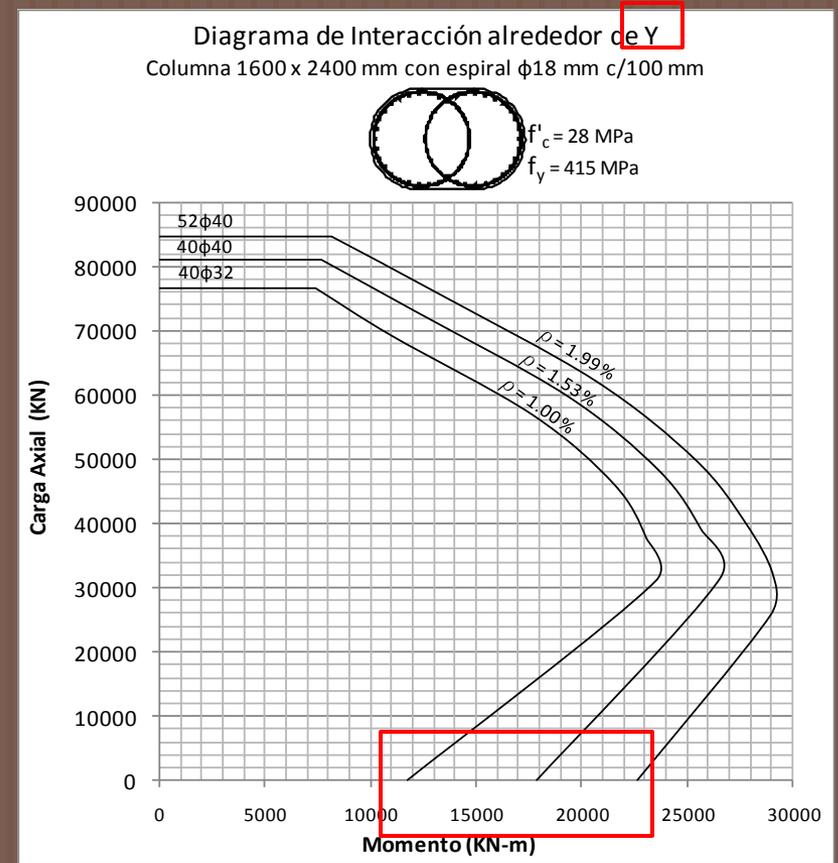
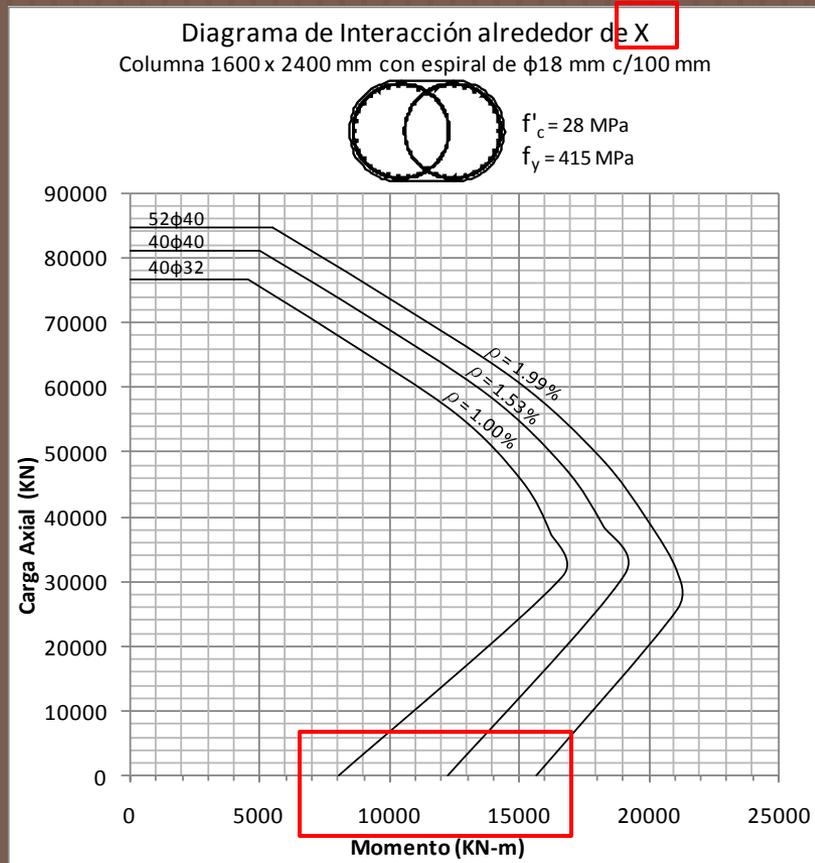
Porcentaje de P_0 aplicado a la columna



Análisis de los Resultados: Diagramas de Interacción – Secciones Circulares



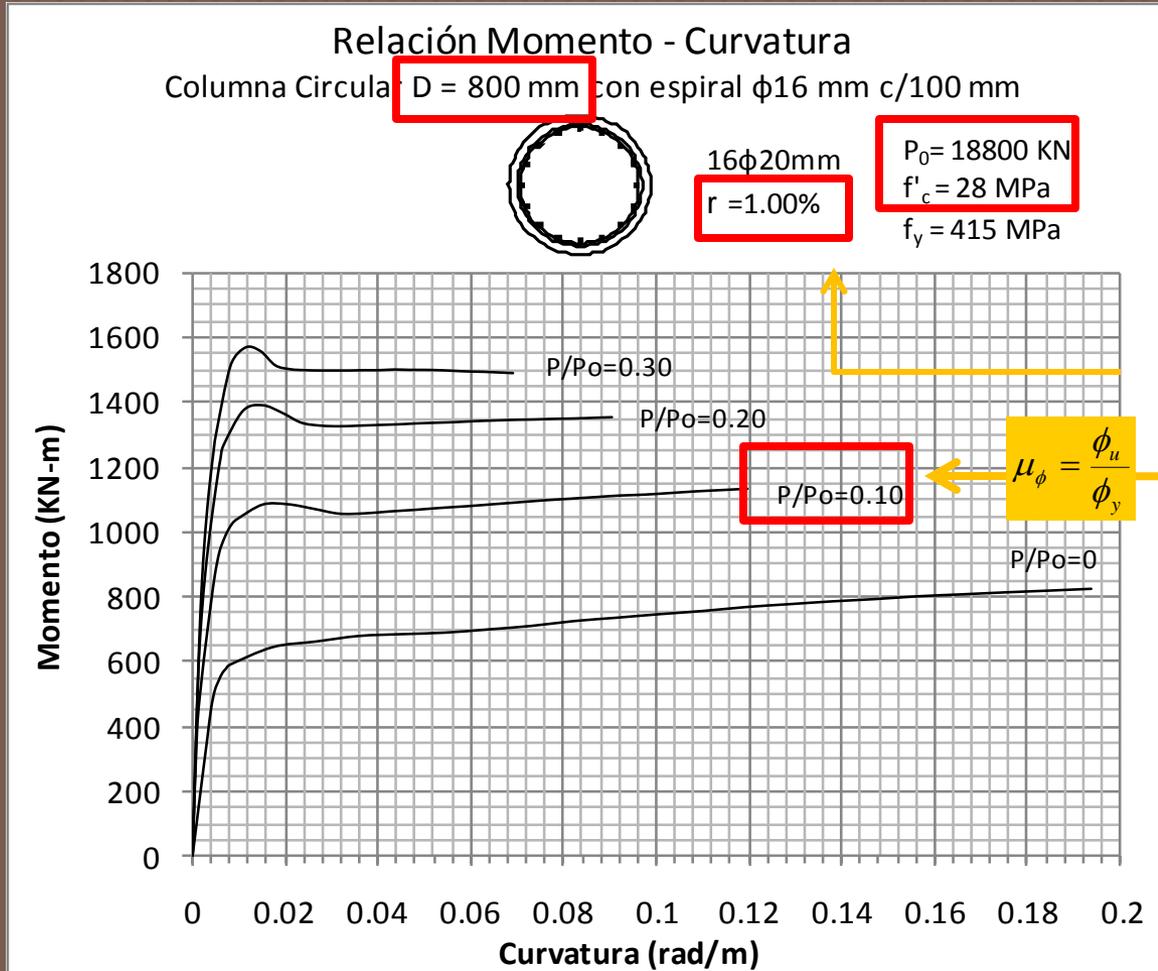
Análisis de los Resultados: Diagramas de Interacción - Secciones Oblong



$$EI = MR = \frac{M}{\phi}$$

Mayor Inercia, Mayor capacidad a Momento

Análisis de los Resultados: Relación Momento Curvatura

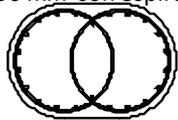


$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$
Mayor Ductilidad

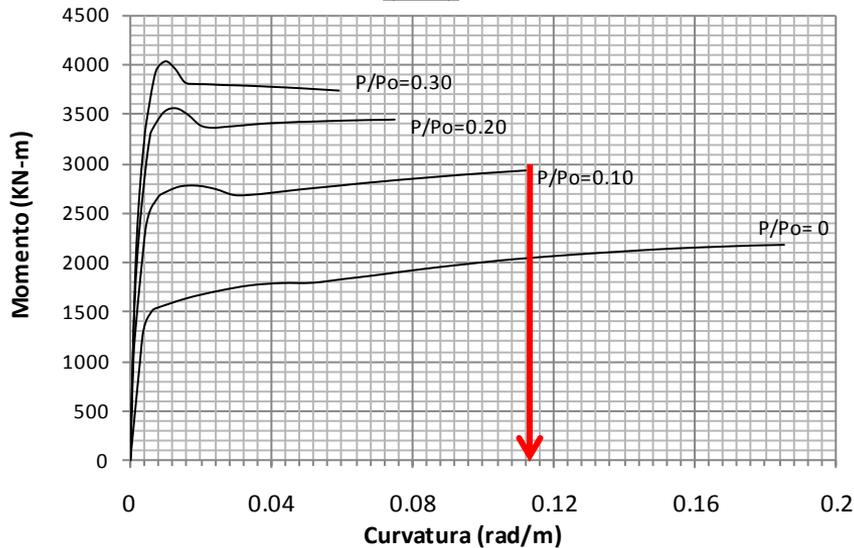
Análisis de los Resultados: Relación Momento Curvatura

Relación Momento - Curvatura alrededor de X

Columna 900 x 1350 mm con espiral $\phi 16$ mm c/100 mm

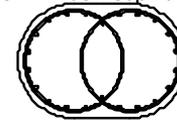


22 $\phi 25$ mm $P_0 = 38690$ KN
 $f'_c = 28$ MPa
 $r = 1.04\%$ $f_y = 415$ MPa

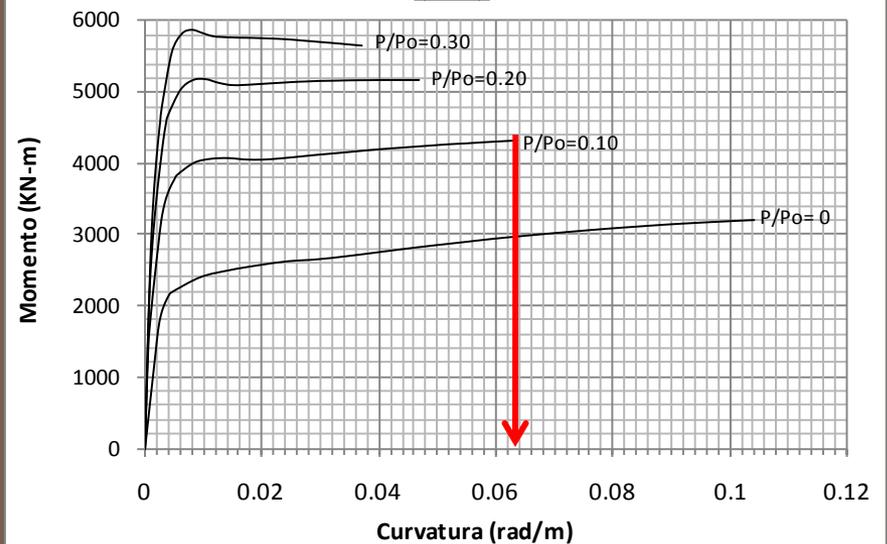


Relación Momento - Curvatura alrededor de Y

Columna 900 x 1350 mm con espiral $\phi 16$ mm c/100 mm



22 $\phi 25$ mm $P_0 = 38690$ KN
 $f'_c = 28$ MPa
 $r = 1.04\%$ $f_y = 415$ MPa



$$EI = MR = \frac{M}{\varphi}$$

Mayor
Ductilidad

Ejemplo de aplicación: Puente tipo

□ Geometría:

1.) *Elevación:*

10 tramos de 30000 mm en el sentido longitudinal.

2.) *Planta:*

El ancho del puente es de 15600 mm.

3.) *Subestructura:*

Configuración de pórtico formado por dos columnas circulares de 1500 mm de diámetro, cuantía de acero $30\phi 28$ y una viga cabezal tipo T.

Las longitudes de las columnas son:

Pórtico 1: 2400 mm

Pórtico 2: 4300 mm.

Pórtico 3: 6000 mm.

Pórtico 4: 6800 mm.

Pórtico 5: 7000 mm

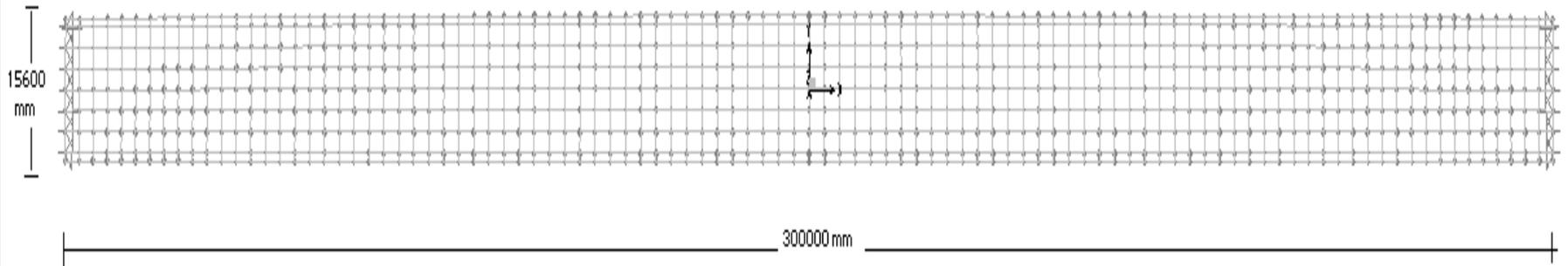
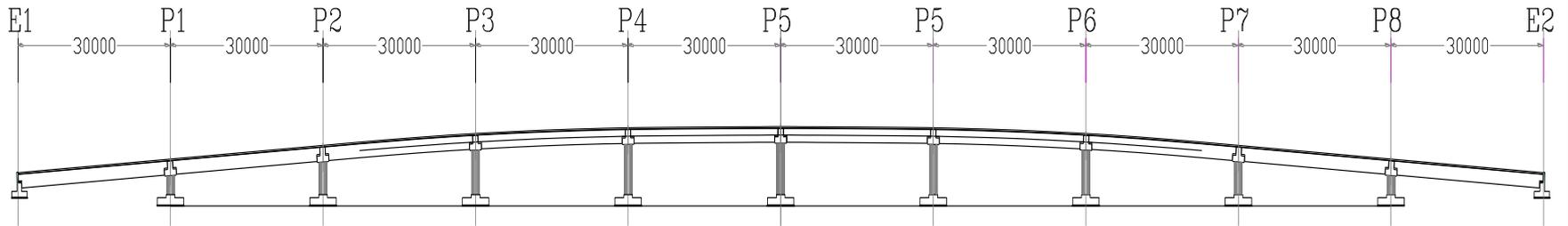
Pórtico 6: 6800 mm

Pórtico 7: 6000 mm

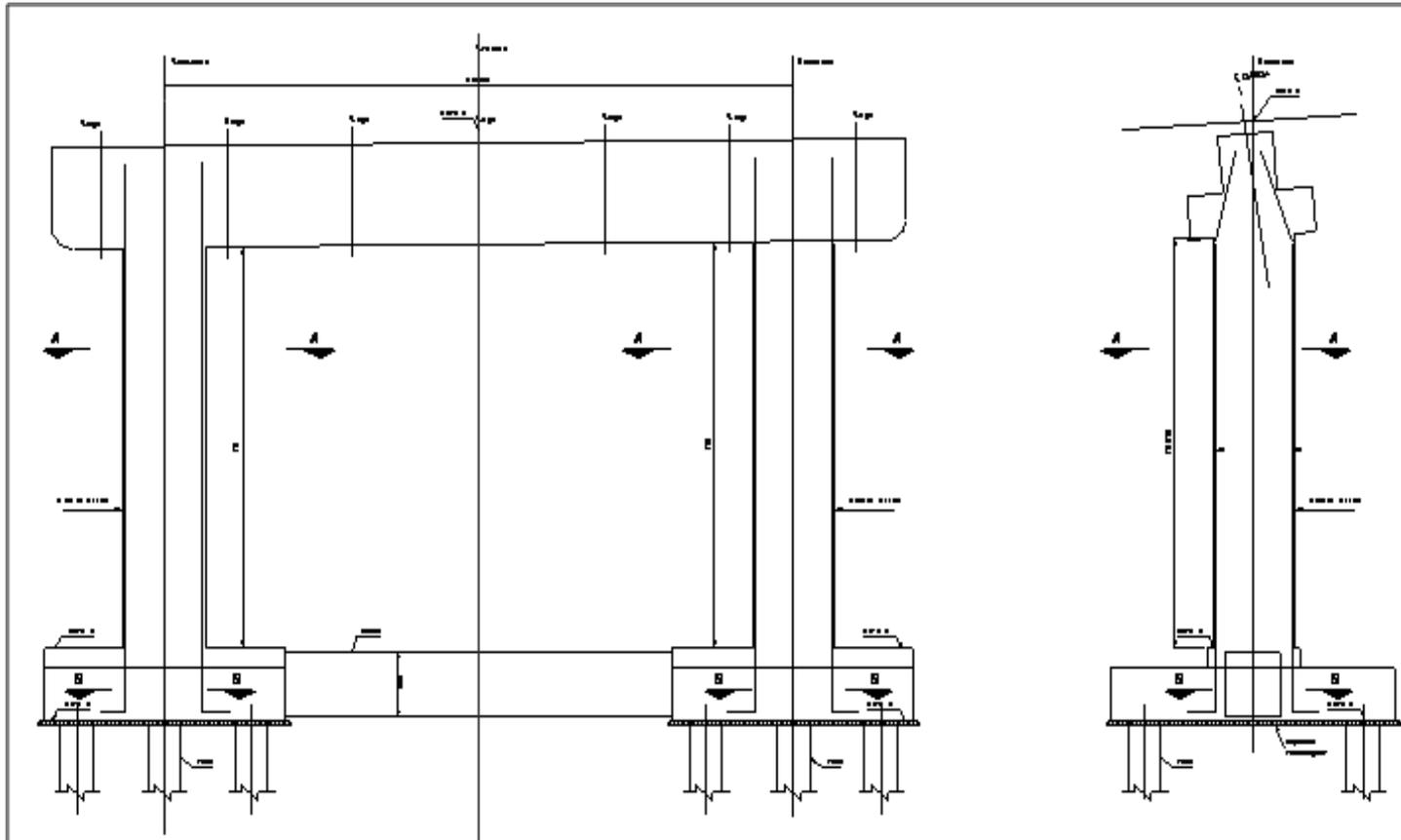
Pórtico 8: 4300 mm

Pórtico 9: 2400 mm

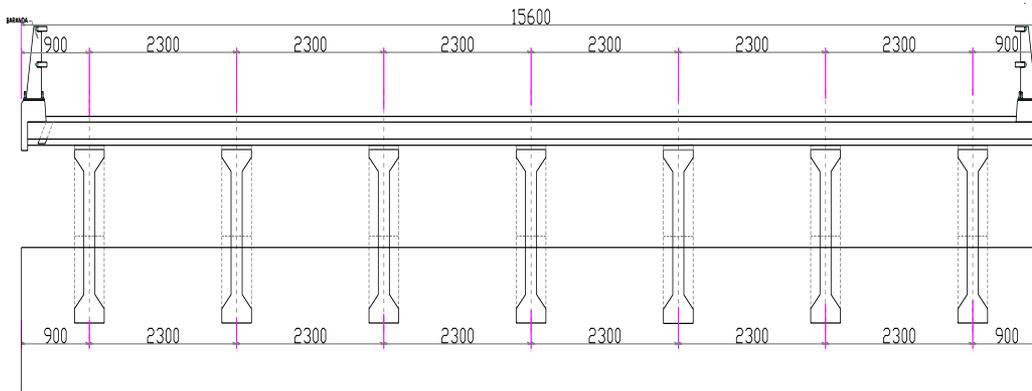
Ejemplo de aplicación: Puente tipo



Ejemplo de aplicación: Puente tipo



Ejemplo de aplicación: Puente tipo



4.) Superestructura:

7 vigas I postensadas separadas por 2300 mm centro a centro.

La losa continua de 180 mm.

Barandas y postes, las mismas que se representan por cargas repartidas

Ejemplo de aplicación: Puente tipo

□ Materiales:

El puente será de concreto armado con las siguientes especificaciones:

$f'_c = 35$ MPa para las columnas y losa del tablero.

$f_y = 415$ MPa para el acero de refuerzo.

Las vigas I longitudinales serán de hormigón presforzado.

□ Secciones:

I/Wide Flange Section

Section Name: VIGA-I-PRESF

Section Notes: Modify/Show Notes...

Properties: Section Properties...

Property Modifiers: Set Modifiers...

Material: + CONC

Dimensions:

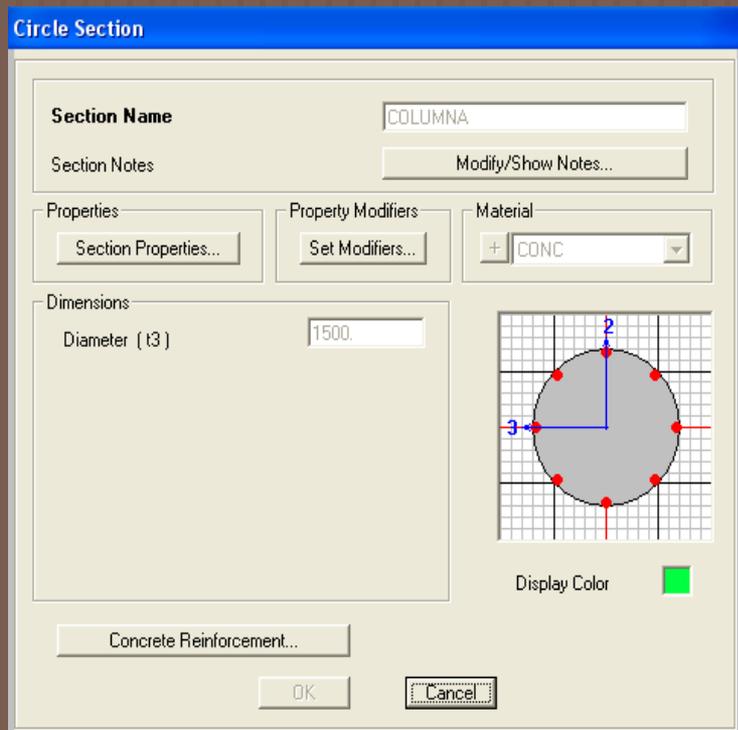
Outside height (t3)	1825.
Top flange width (t2)	480.
Top flange thickness (tf)	220.
Web thickness (tw)	180.
Bottom flange width (t2b)	480.
Bottom flange thickness (tfb)	220.

Display Color:

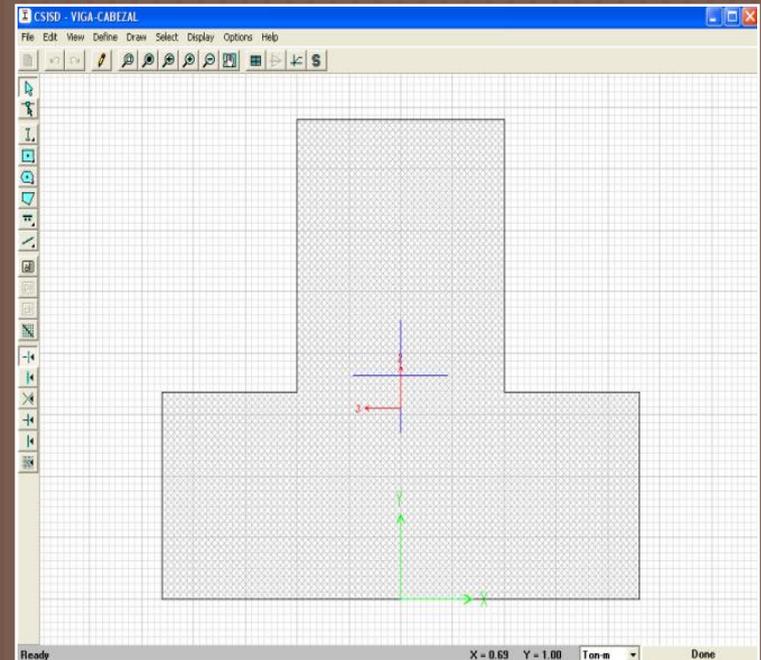
OK Cancel

Viga postensada I

Ejemplo de aplicación: Puente tipo



Sección de Columna



Sección de la Viga
Cabezal tipo T

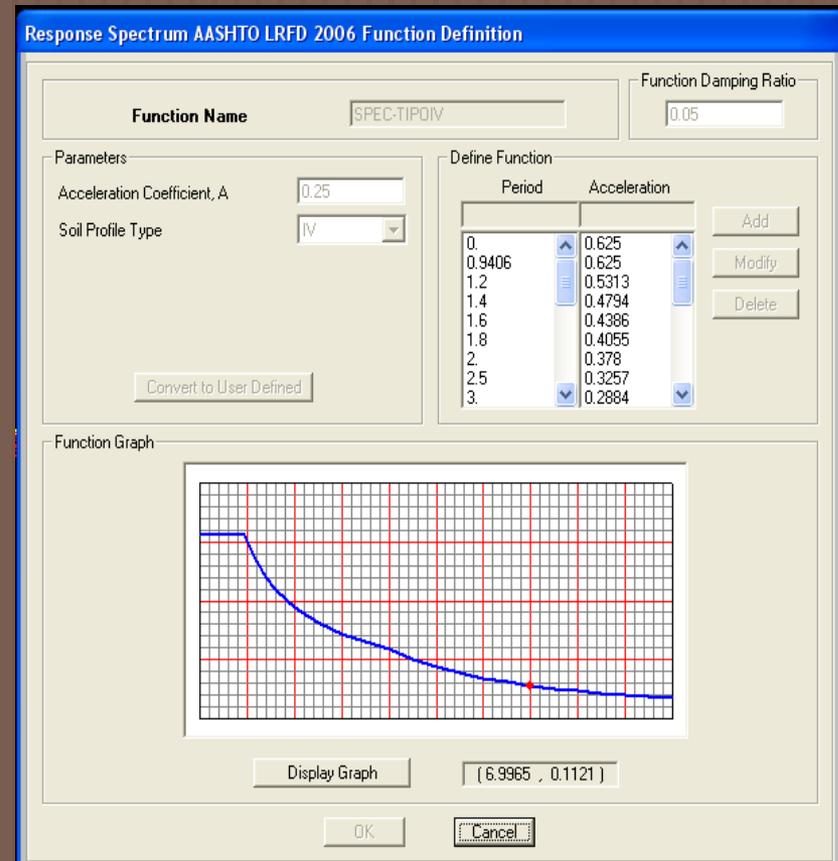
Ejemplo de aplicación: Puente tipo

2.) Cargas Sísmicas

Espectro elástico para un suelo tipo IV que representa un estrato blando como los suelos típicos de la ciudad de Guayaquil, de acuerdo con la especificación AASHTO LRFD 2006

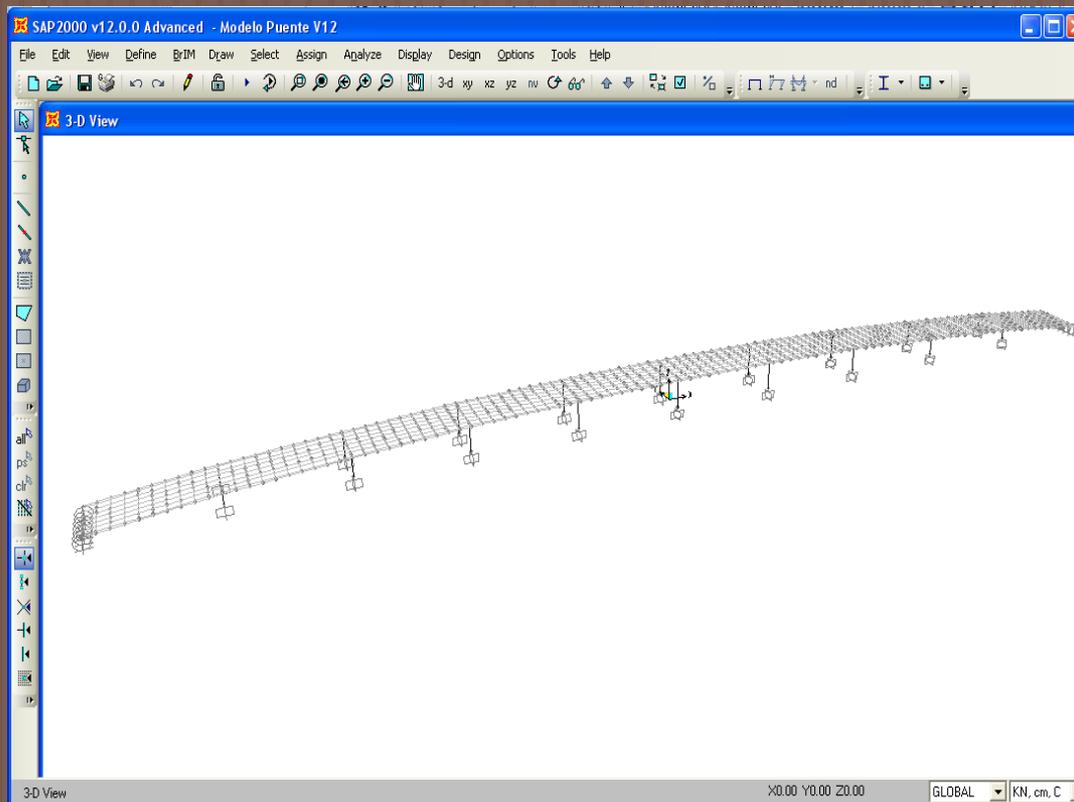
□ Apoyos:

Se consideró que las columnas estuvieran empotradas en las bases y en ambos extremos del puente se consideró un soporte de rodillo en el sentido longitudinal.



Ejemplo de aplicación: Puente tipo

- Combinaciones:
Combinación: Carga Muerta + Sismo en sentido longitudinal
Combinación: Carga Muerta + Sismo en sentido transversal



Diseño Preliminar de las columnas

□ Sentido Longitudinal

La Verificación consiste en demostrar que la sección y el refuerzo proporcionado satisfacen la demanda sísmica obtenida del ANÁLISIS ESTRUCTURAL ELÁSTICO.

En otras palabras, se debe verificar que el punto carga axial-momento flector cae dentro del diagrama de interacción, si el punto (M, P) cae fuera se entenderá que la columna se ha plastificado por el sismo

Para los casos en que (M, P) cae fuera del Diagrama de Interacción, se demostrará que la columna tiene una capacidad de deformación plástica lateral mayor que la demanda por el sismo de diseño mediante la fórmula:

$$\Delta_y = \frac{(\phi_y L^2)}{3} \quad (3.32)$$

Reemplazando ϕ_y con:

$$\phi_y = \frac{M_y}{EI} \quad (3.29)$$

La rigidez K para una columna empotrada en voladizo del Texto “Seismic Design and Retrofit of Bridges” (4.17) es:

$$K = \alpha \frac{EI}{L^2}$$

Con $A=3$,Entonces:

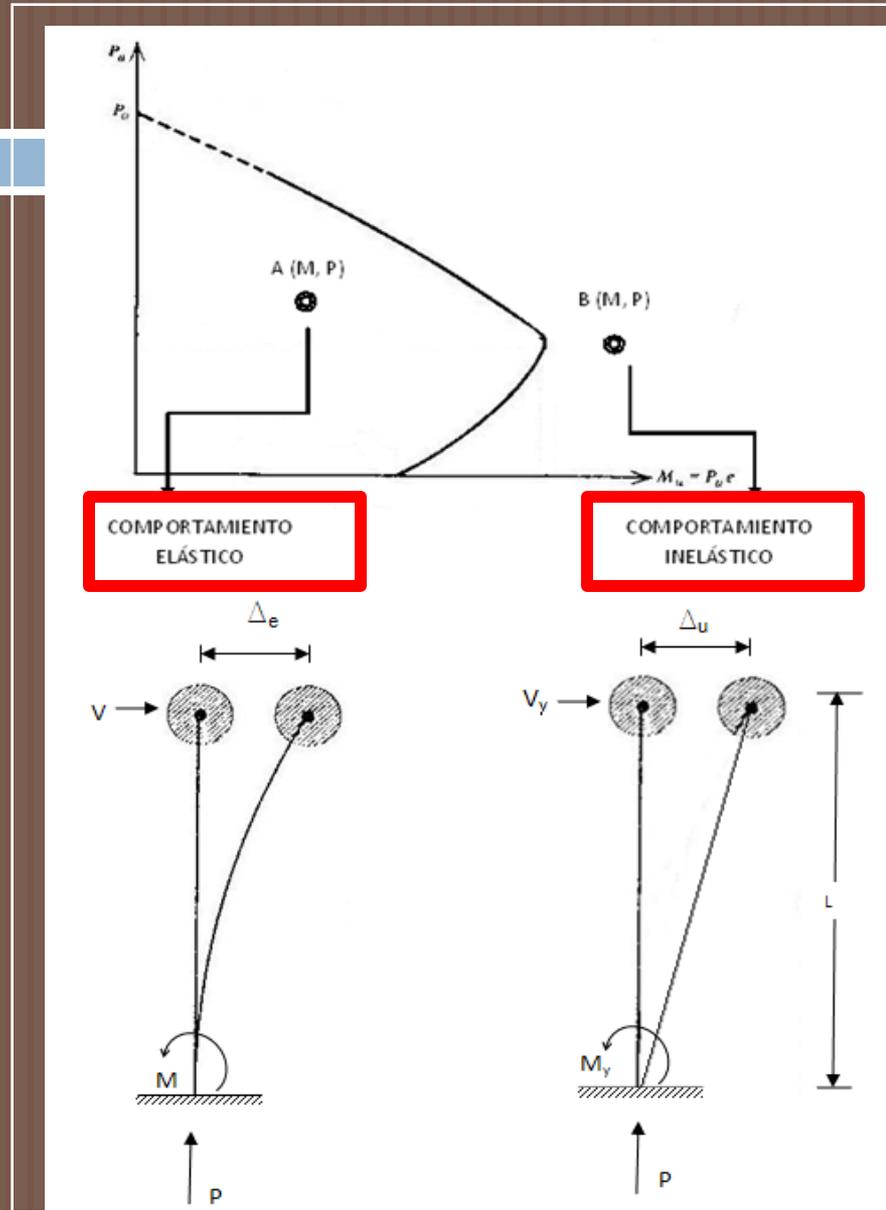
$$\Delta_y = \frac{M_y}{KL} \quad (5.1)$$

Del análisis Momento-Curvatura se obtiene la rotación plástica θ_p , la misma que permitirá obtener el valor de la deformación plástica, D_p , por medio de la fórmula:

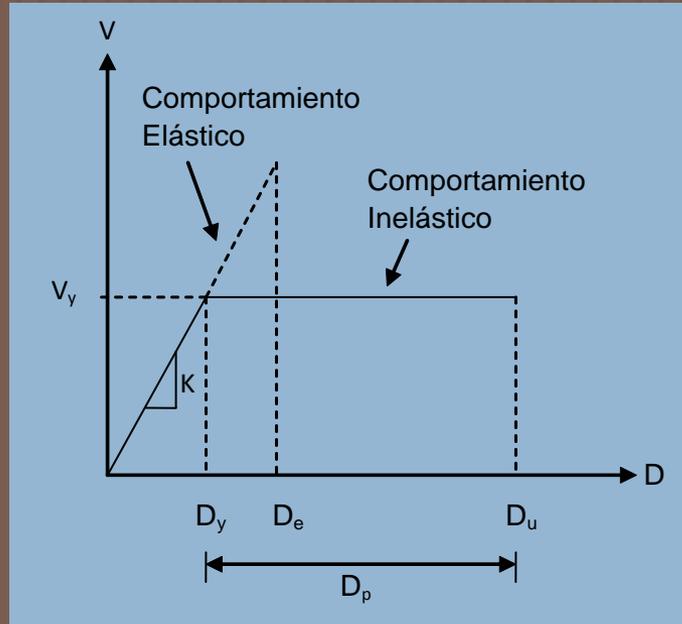
$$\Delta_p = \theta_p (L - 0.5L_p) \quad (3.33)$$

Entonces:

$$\Delta_u = \Delta_y + \Delta_p \quad (3.34)$$



Diseño Preliminar de las columnas



Relación Cortante-Desplazamiento

Del gráfico se deduce:

$$K = \frac{V}{\Delta_e} = \frac{V_y}{\Delta_y} \therefore \Delta_y = \frac{V_y}{K}$$

Reemplazando D_y con la ecuación (5.1) se obtiene el cortante:

$$V_y = \frac{M_y}{L}$$

SOLUCIÓN SATISFACTORIA:

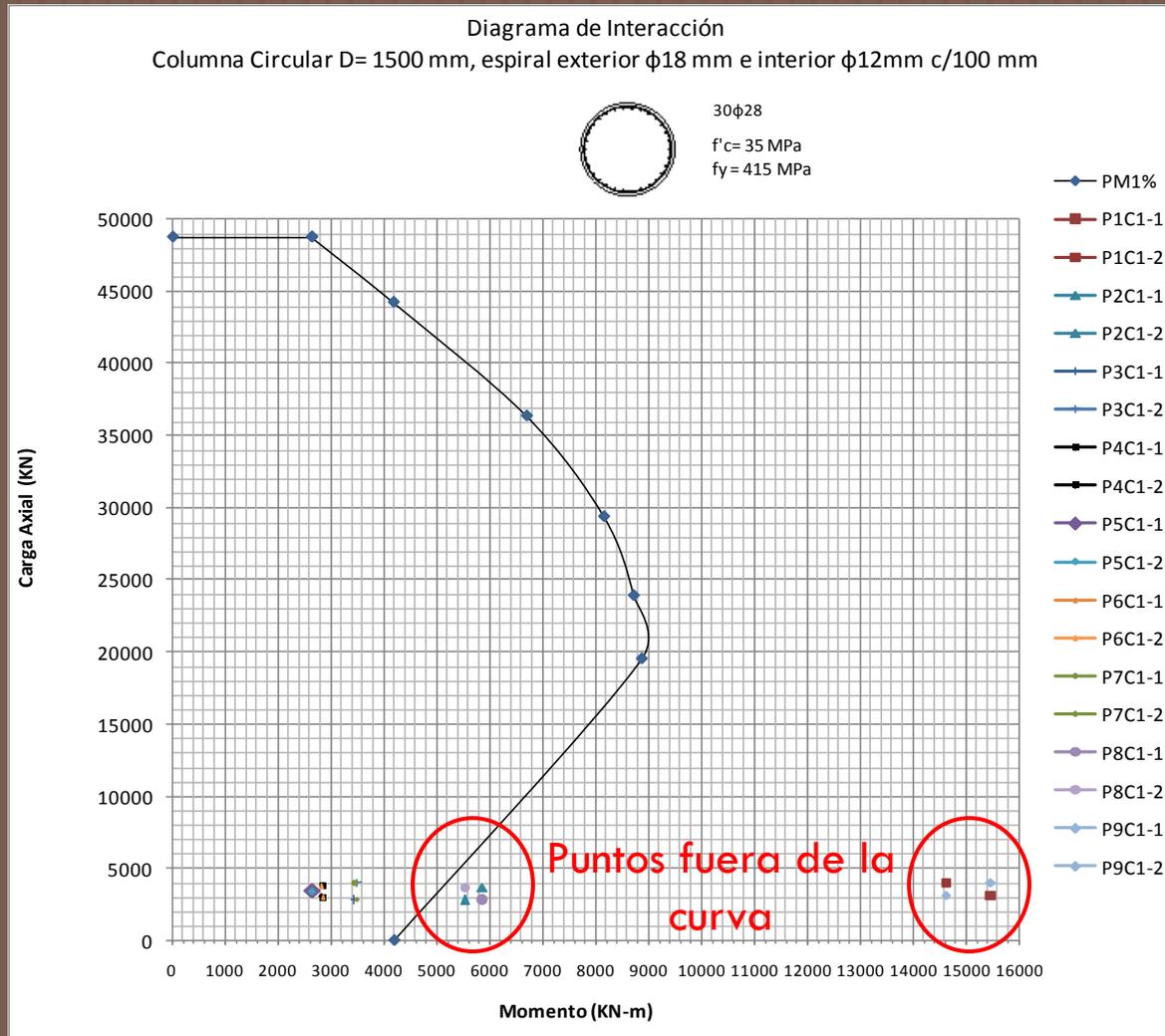
$$\Delta_u \gg \Delta_e$$

Resultados del SAP 2000: Sentido Longitudinal

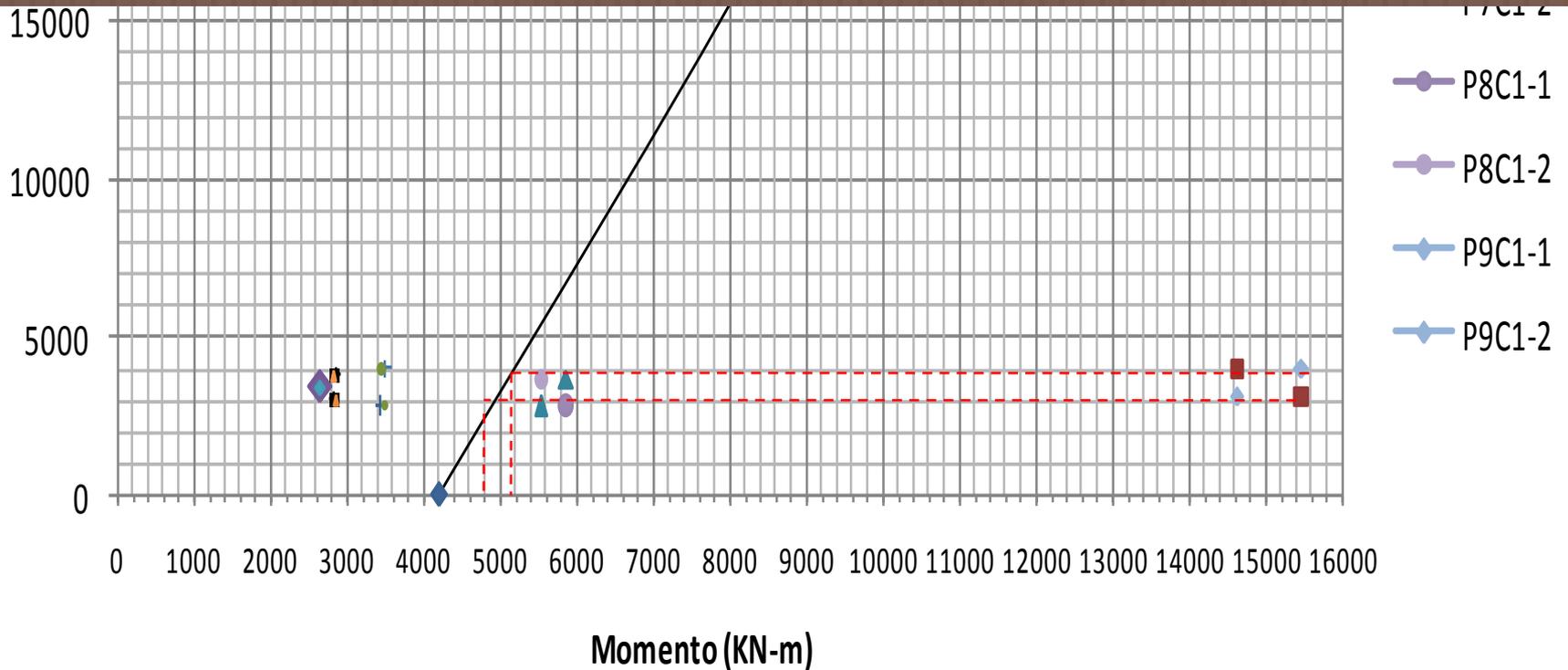
P1C1	P1N1-P1N2	AXIAL	KN	3140.60400	3990.41100
		MOMENTO	KN-m	15449.38150	14613.87210
		CORTANTE	KN	6448.60800	-6099.86400
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	-0.01219	
P2C1	P2N1-P2N2	AXIAL	KN	2838.14300	3631.14100
		MOMENTO	KN-m	5529.05410	5850.27500
		CORTANTE	KN	1287.09300	-1361.86900
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	-0.01384	
P3C1	P3N1-P3N2	AXIAL	KN	2836.46400	3981.38000
		MOMENTO	KN-m	3442.13120	3484.61980
		CORTANTE	KN	574.09300	-581.18000
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	-0.01515	
P4C1	P4N1-P4N2	AXIAL	KN	3038.06600	3785.18500
		MOMENTO	KN-m	2822.74240	2848.63790
		CORTANTE	KN	415.36800	-419.17800
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	-0.01595	
P5C1	P5N1-P5N2	AXIAL	KN	3427.41900	3427.44500
		MOMENTO	KN-m	2641.67640	2641.67640
		CORTANTE	KN	377.61100	-377.61100
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	-0.01618	
P6C1	P6N1-P6N2	AXIAL	KN	3038.05800	3785.19300
		MOMENTO	KN-m	2848.63760	2822.74220
		CORTANTE	KN	419.17800	-415.36800
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.01595	
P7C1	P7N1-P7N2	AXIAL	KN	2836.47600	3981.36800
		MOMENTO	KN-m	3484.62110	3442.13250
		CORTANTE	KN	581.18000	-574.09300
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.01515	
P8C1	P8N1-P8N2	AXIAL	KN	2838.14600	3631.13800
		MOMENTO	KN-m	5850.27520	5529.05430
		CORTANTE	KN	1361.86900	-1287.09300
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.01384	
P9C1	P9N1-P9N2	AXIAL	KN	3140.60100	3990.41400
		MOMENTO	KN-m	14613.88090	15449.39030
		CORTANTE	KN	6099.86800	-6448.61200
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.01219	

Puntos que salen del
Diagrama de Interacción

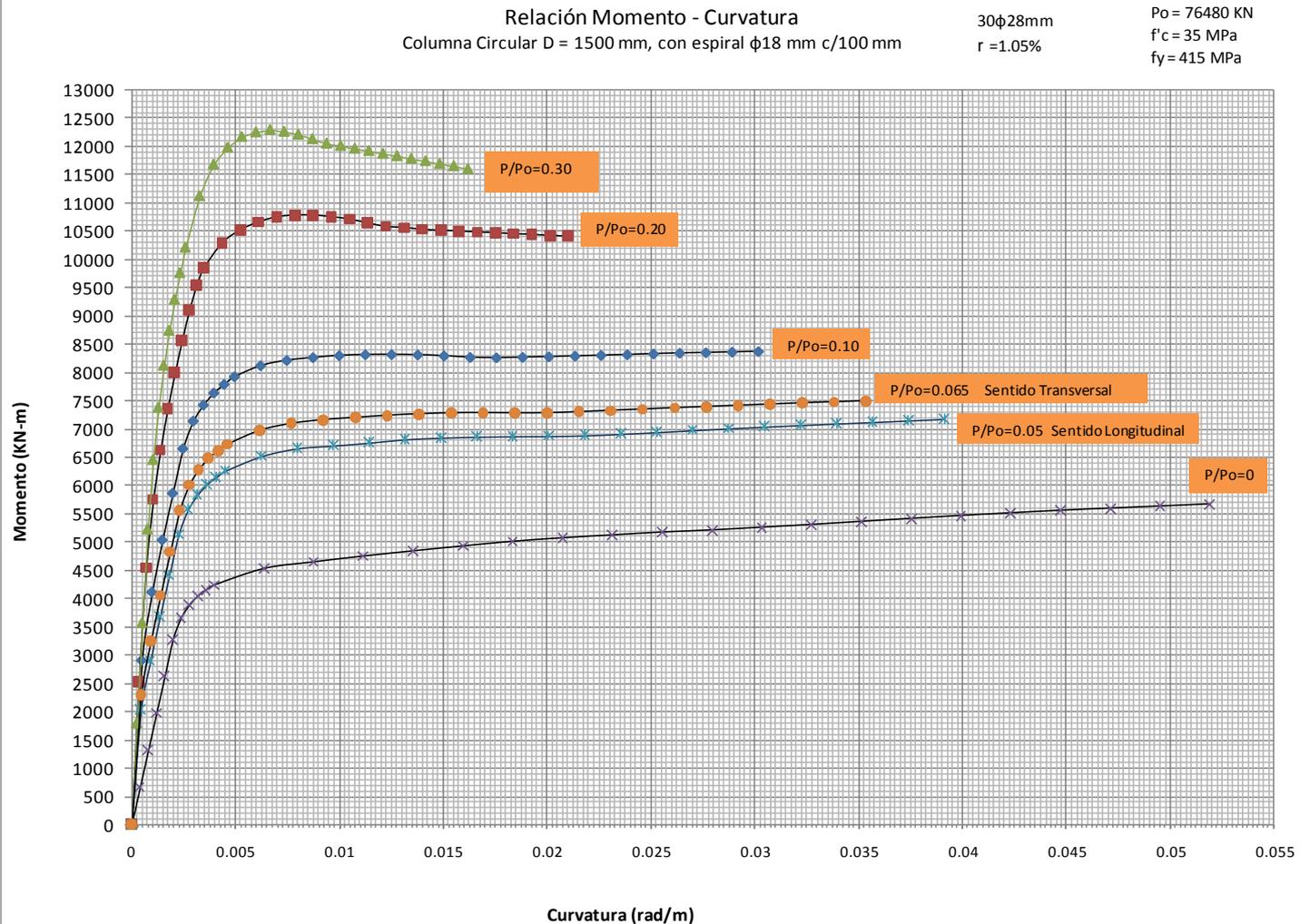
Diagrama de Interacción



Proyección de Momentos



Relación Momento-Curvatura



Cálculos

- De la curva Momento-Curvatura se obtienen las curvaturas de cedencia y última mediante la bilinearización, cuyos valores son:

$$\Phi_u = 0.03914 \text{ rad/m}$$

$$\Phi_y = 0.00290 \text{ rad/m}$$

- La curvatura plástica es:

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y \quad (3.26)$$

$$\Phi_p = 0.03624 \text{ rad/m}$$

- la longitud de articulación plástica es:

$$L_p = 0.08L + 0.022 f_{ye} d_{bl} \geq 0.044 f_{ye} d_{bl} \quad (3.27)$$

Las alturas de los pórticos son:

$$L = h = \begin{cases} 2.4 \text{ m (Pilas 1 y 9)} \\ 4.3 \text{ m (Pilas 2 y 8)} \end{cases}$$

Con $f_y = 415 \text{ MPa}$, entonces:

$$L_p = \begin{cases} 447.64 \text{ mm} > 511.28 \text{ (no se cumple)} \\ 599.64 \text{ mm} > 511.28 \text{ (si se cumple)} \end{cases}$$

La rotación plástica es:

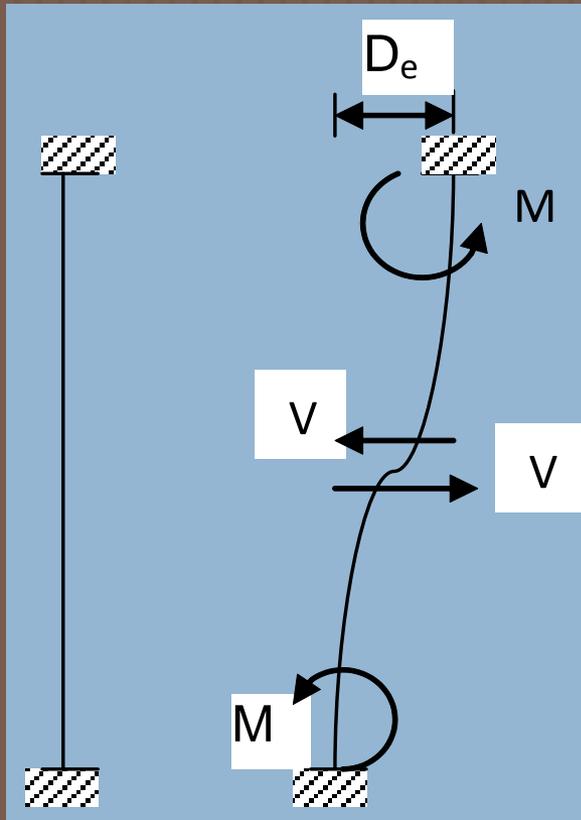
$$\theta_p = \begin{cases} 0.01853 \text{ rad} \\ 0.02173 \text{ rad} \end{cases}$$

Resumen de Resultados del Análisis en el Sentido Longitudinal

PILAS	V	De (mm)	K (KN/mm)	h (m)	My (KN-m)	Dy (mm)	Dp (mm)	Du (mm)
1	6448.61	12.19	528.83	2.40	4940.00	3.89	39.73	43.62
2	1361.87	13.84	98.40	4.30	5070.00	11.98	86.93	98.91
8	1361.87	13.84	98.40	4.30	4900.00	11.58	86.93	98.51
9	6448.61	12.19	528.83	2.40	5150.00	4.06	39.73	43.79

PILAS	D _u (mm) >> D _e (mm)
1	43.62 >> 12.19 OK
2	98.91 >> 13.84 OK
8	98.51 >> 13.84 OK
9	43.79 >> 12.19 OK

Diseño Preliminar de las columnas: Sentido Transversal



DCL de la columna en el
sentido transversal

Para este caso la rigidez se define con la misma ecuación (5.3):

$$K = \frac{V}{\Delta_e} = \frac{V_y}{\Delta_y} \therefore \Delta_y = \frac{V_y}{K}$$

Pero esta vez el cortante, conforme la figura, estará dado por la ecuación:

$$V_y = \frac{2M_y}{L} \quad (5.5)$$

Resultados de SAP 2000: Sentido Transversal

P1	N1-N4	AXIAL	KN	3596.20100
		MOMENTO	KN-m	795.74470
		CORTANTE	KN	871.54600
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.00060
	N2-N3	AXIAL	KN	3496.44100
		MOMENTO	KN-m	1292.28110
CORTANTE		KN	871.54600	
P2	N1-N4	AXIAL	KN	3605.75900
		MOMENTO	KN-m	2719.53820
		CORTANTE	KN	1228.43600
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.00345
	N2-N3	AXIAL	KN	3426.88300
		MOMENTO	KN-m	2557.53980
CORTANTE		KN	1228.43600	
P3	N1-N4	AXIAL	KN	4252.39500
		MOMENTO	KN-m	5346.23860
		CORTANTE	KN	1685.40800
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.01362
	N2-N3	AXIAL	KN	4002.73100
		MOMENTO	KN-m	4759.07800
CORTANTE		KN	1685.40800	
P4	N1-N4	AXIAL	KN	4770.90800
		MOMENTO	KN-m	7802.43340
		CORTANTE	KN	2155.23700
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.02569
	N2-N3	AXIAL	KN	4487.93300
		MOMENTO	KN-m	6844.05840
CORTANTE		KN	2155.23700	
P5	N1-N4	AXIAL	KN	4992.24200
		MOMENTO	KN-m	8889.13150
		CORTANTE	KN	2381.11800
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.03107
	N2-N3	AXIAL	KN	4700.93800
		MOMENTO	KN-m	7768.62160
CORTANTE		KN	2381.11800	

P6	N1-N4	AXIAL	KN	4770.90000
		MOMENTO	KN-m	7802.43400
		CORTANTE	KN	2155.23700
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.02569
	N2-N3	AXIAL	KN	4487.92400
		MOMENTO	KN-m	6844.05920
CORTANTE		KN	2155.23700	
P7	N1-N4	AXIAL	KN	4252.38300
		MOMENTO	KN-m	5346.23430
		CORTANTE	KN	1685.40600
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.01362
	N2-N3	AXIAL	KN	4002.72000
		MOMENTO	KN-m	4759.07030
CORTANTE		KN	1685.40600	
P8	N1-N4	AXIAL	KN	3605.75100
		MOMENTO	KN-m	2719.53110
		CORTANTE	KN	1228.43200
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.00345
	N2-N3	AXIAL	KN	3426.87500
		MOMENTO	KN-m	2557.52840
CORTANTE		KN	1228.43200	
P9	N1-N4	AXIAL	KN	3596.20400
		MOMENTO	KN-m	795.74670
		CORTANTE	KN	871.54900
	superior	DEFORMACION ELASTICA	m	0.00060
	N2-N3	AXIAL	KN	3496.44400
		MOMENTO	KN-m	1292.28560
CORTANTE		KN	871.54900	

Cálculos

- De la curva Momento-Curvatura se obtienen las curvaturas de cedencia y última mediante la bilinearización, cuyos valores son:

$$\Phi_u = 0.03539 \text{ rad/m}$$

$$\Phi_y = 0.00295 \text{ rad/m}$$

- La curvatura plástica es:

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y \quad (3.26)$$

$$\Phi_p = 0.03244 \text{ rad/m}$$

- la longitud de articulación plástica es:

$$L_p = 0.08L + 0.022 f_{ye} d_{bl} \geq 0.044 f_{ye} d_{bl} \quad (3.27)$$

Las alturas de los pórticos son:

$$L = h = \begin{cases} 6.0 \text{ m (Pilas 3 y 7)} \\ 6.8 \text{ m (Pilas 4 y 6)} \\ 7.0 \text{ m (Pilas 5)} \end{cases}$$

Con $f_y = 415 \text{ MPa}$, entonces:

$$L_p = \begin{cases} 735.64 \text{ mm} > 511.28 \text{ (si se cumple)} \\ 799.64 \text{ mm} > 511.28 \text{ (si se cumple)} \\ 815.64 \text{ mm} > 511.28 \text{ (si se cumple)} \end{cases}$$

La rotación plástica es:

$$\theta_p = \begin{cases} 0.02386 \text{ rad} \\ 0.02594 \text{ rad} \\ 0.02646 \text{ rad} \end{cases}$$

Resumen de Resultados del Análisis en el Sentido Transversal

PILAS	V (KN)	De (mm)	K (KN/mm)	h (m)	My (KN-m)	Vy (KN)	Dy (mm)	Dp (mm)	Du (mm)
3	1685.41	13.6150	123.79	6.00	5250.00	1750.00	14.1368	134.39	148.53
4	2155.24	25.6860	83.91	6.80	5370.00	1579.41	18.8233	166.00	184.83
5	2381.12	31.0670	76.64	7.00	5450.00	1557.14	20.3164	174.40	194.72
6	2155.24	25.6860	83.91	6.80	5370.00	1579.41	18.8233	166.00	184.83
7	1685.41	13.6150	123.79	6.00	5250.00	1750.00	14.1368	134.39	148.53

PILAS	D_u (mm) >> D_e (mm)
3	148.53 >> 13.62 OK
4	184.83 >> 25.69 OK
5	194.72 >> 31.07 OK
6	184.83 >> 25.69 OK
7	148.53 >> 13.62 OK

CONCLUSIONES:

- El programa XTRACT v. 3.0.8 es una herramienta muy útil y sencilla de usar en el análisis de secciones transversales de distintas formas geométricas y de cualquier material, tales como concreto, acero, presforzado o miembros compuestos, para columnas, vigas, muros, etc. Con este software se puede realizar análisis de Interacción Carga Axial-Momento, Momento-Curvatura y Contorno de Carga. Los dos primeros son el objetivo de esta tesis y se aplicaron a secciones circulares y *oblong* típicas de los puentes de la ciudad de Guayaquil.
- El XTRACT es un software que comparado con otros, tales como el XSECTION (programa en DOS) y el USC RC (solo para secciones rectangulares y circulares), tiene una interface amigable en Windows y permite analizar cualquier tipo de secciones. El capítulo 4 corresponde a un Manual para que los estudiantes e ingenieros consultores puedan realizar los análisis preliminares para el diseño de columnas o vigas de edificios y puentes.
- Los Diagramas de Interacción tanto para las secciones circulares como para las *oblong* han sido dispuestas a manera de ábacos, ubicando todas las curvas con diferentes porcentajes de refuerzo en un mismo gráfico de acuerdo al diámetro de la sección y la resistencia del hormigón.

CONCLUSIONES:

- Las relaciones Momento-Curvatura se dispusieron en ábacos, pero esta vez, según su geometría, porcentaje de refuerzo y resistencia del hormigón debido a que se elaboraron 4 curvas aplicando el 0, 10, 20 y 30% de la carga P_o para cada sección transversal.
- Los Diagramas de Interacción presentan las disposiciones de seguridad de acuerdo a la AASHTO 2002 para la resistencia de diseño (Artículo 8.16.1.2.2). Estas curvas son de gran ayuda ya que se han elaborado con los valores de carga y momento balanceados obtenidos del XTRACT para conocer el punto de falla y así facilitar el diseño de las columnas.
- Las relaciones Momento-Curvatura revelan los valores de curvatura máxima y de curvatura cedente conforme la bilinearización. A través de estos puntos se obtiene la ductilidad de la columna, la misma que disminuye conforme aumentan los niveles de carga y el refuerzo longitudinal. En el diseño de columnas es muy importante conocer la ductilidad que poseen estos elementos para asegurar su comportamiento en el rango inelástico y así evitar su falla y el colapso de la estructura.
- El ejemplo realizado de un puente típico de la ciudad de Guayaquil dio como resultado un comportamiento satisfactorio en las columnas, tanto en el sentido longitudinal, como en el transversal. Las deformaciones últimas son mucho mayores que las elásticas lo cual demuestra que las columnas tendrán suficiente ductilidad para desarrollarse en el rango inelástico.

RECOMENDACIONES:

- Es recomendable que los resultados sean extraídos del programa para poder graficarlos en Excel, ya que cuando se grafican dentro del XTRACT y se desea Guardar, el archivo tiene la extensión de una figura de Paint y no es susceptible a cambios ni es útil para los ingenieros.
- El XTRACT permite agregar muchas secciones en un mismo proyecto lo cual es importante para casos como el de la tesis donde una misma sección tiene diferentes porcentajes de acero. Esto permite un análisis más rápido y además tener los resultados dentro de una misma ventana para poder hacer comparaciones de los diferentes comportamientos.
- El programa presenta diferentes modelos para los materiales y además permite agregar un modelo del usuario, si los ingenieros deciden agregar modelos diferentes al de Park y Mander el XTRACT es versátil y permite además que las secciones estén compuestas de muchos materiales, lo cual es importante ya que este software no tiene limitaciones en ese sentido.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN...