



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación Estudios de Posgrado

**DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE COLUMNAS
CIRCULARES MEDIANTE EL SOFTWARE DIIN**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL EN
ESTRUCTURAS**

Presenta:

ING. DIEGO MARCELO MUÑOZ PÉREZ

Director de tesis:

M. I. MARTÍN CASTILLO FLORES

Codirector:

DR. FILIBERTO CANDIA GARCÍA

Puebla, Pue.

Junio 2020



BUAP

Oficio No. 1399/2019

C. Diego Marcelo Muñoz Pérez
Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Estructuras
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Diagramas de interacción de columnas circulares mediante software DIIN**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director al M.I. Martín Castillo Flores y Co-director al Dr. Filiberto Candia García.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, Junio 6 de 2019

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p M.I. Martín Castillo Flores y Dr. Filiberto Candia García, Director y Co-director del tema de tesis.

C.c.p. Archivo

ABH/MCF/sco*

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

H. Puebla de Zaragoza, a 01 de junio de 2020

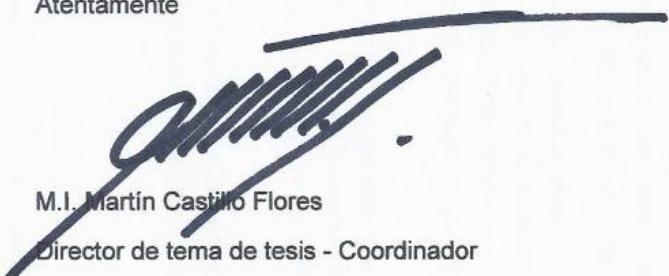
M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
P R E S E N T E

Por medio de la presente informo que la tesis autorizada en el Oficio No. 1399/2019 con el tema titulado: **“Diagramas de interacción de columnas circulares mediante software DIIN”**, de la cual fui asignado como director, ha sido concluida, alcanzando y cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planeados inicialmente.

Por lo anterior no tengo inconveniente en que el alumno Diego Marcelo Muñoz Pérez, con matrícula 218470111, continúe con los trámites de titulación pertinentes para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras.

Hago válida la ocasión para reiterar a usted la seguridad de su más alta y distinguida consideración.

Atentamente



M.I. Martín Castillo Flores
Director de tema de tesis - Coordinador
de la Maestría en Ingeniería con opción
terminal en estructuras

C.c.p. Archivo

C.c.p. interesado

DEDICATORIA

A mis padres

Por todo el amor que me han dado, su apoyo para siempre salir adelante, sus consejos y por todos los valores que me han inculcado para ser una persona de bien.

A mis hermanos.

Zuleika María, Diana Ivette y Arturo, por ser mi inspiración para ser mejor persona y mejor profesionalista, por su amor, por sus consejos y sus buenos deseos.

A mi novia.

María Cristina Casas, por su amor, por haberme dado siempre su apoyo incondicional, por siempre querer lo mejor para mí y querer que sea una persona exitosa que pueda alcanzar mis sueños.

A mis amigos de la maestría.

Por ser una parte fundamental de mi vida, con quienes compartí alegrías y horas de estudio a lo largo de mi formación académica, su apoyo e inspiración para siempre ir adelante y aspirar a más.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por haberme dado la fortaleza necesaria para terminar esta etapa de mi vida, por rodearme de una hermosa familia y excelentes amigos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría y el presente trabajo de investigación.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Por darme el apoyo para seguir formándome como profesionista.

A mi director M.I. Martín Castillo Flores.

Por ser una parte muy importante en mi formación académica dándome las herramientas necesarias para culminar con mis estudios de posgrado y su gran vocación como docente me inspiró para enseñar a futuros profesionistas.

A mi co-director de tesis Dr. Filiberto Candia García.

Por todas sus enseñanzas, dedicación y apoyo incondicional en mis estudios de Maestría.

INDICE

RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCIÓN	X
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	11
1.1 Planteamiento del problema.	18
1.2 Justificación	19
1.3 Objetivo general	20
1.4 Marco conceptual	20
1.5 Hipótesis	21
1.6 Diseño metodológico y técnicas de investigación	21
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 Concreto	24
2.2 Acero	26
2.3 Columnas.....	28
2.4 Suposiciones de diseño para resistencia a flexión y a carga axial.	28
2.4 Diagrama de interacción.....	29
2.5 Factores de reducción de resistencia	30
2.6 Flexión Biaxial.....	31
2.7 Métodos aproximados de diseño para columnas en flexión biaxial.	32
2.8 Límites de refuerzo.	35
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO	37
3.1 Diagrama de interacción por medio del análisis de compatibilidad de deformaciones.	37
3.2 Falla balanceada.	38
3.3 Flexión Pura.....	39
3.4 Columna rectangular.	39
3.5 Columna circular.....	58
3.6 Software DIIN.	75
3.7 Interfaz Gráfica de Usuario.	75
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	82
4.1 Comparación de diagramas de interacción MANUAL VS DIIN	82
4.2 Comparación de gráficas de interacción SAP2000 VS DIIN	83
4.3 Comparación eficiencias ETABS VS DIIN	88

4.3.1 Características del modelo	88
4.3.2 Sección de la columna.	89
CONCLUSIONES	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	94

RESUMEN

La continua e indispensable actualización de los códigos de diseño y construcción estructural, conlleva una grave problemática en los posgrados y pregrados, ya que la enseñanza de los contenidos del curriculum no es pertinente debido a que los periodos de actualización curricular no están alineados con los periodos de actualización de la normativa regional, nacional o internacional.

El desarrollo de la presente tesis se lleva a cabo mediante la continuación del trabajo realizado por el M. I. Martín Castillo Flores llamado DIIN V. 1.0, el cual tiene como propósito la elaboración de diagramas de interacción de columnas rectangulares de concreto reforzado mediante los códigos de construcción, ACI-318-14, NTC-2017 y NTC-2004, este software ha sido de gran utilidad en la enseñanza de la materia de diseño de elementos de concreto reforzado II y gracias a ello es posible profundizar en los temas de normativa.

Partiendo de esto, se pretende continuar con el trabajo desarrollando el módulo de columnas circulares con base a los códigos de construcción, ACI-318-19, ACI-318-14, NTC-2017 y NTC-2004. Las herramientas que se utilizarán serán Microsoft Office Excel para el desarrollo de la hoja de cálculo, el software SAP2000 (versión educativa), como calibración entre diagramas de interacción y el software ETABS (versión educativa) para la calibración entre las eficiencias a cargas solicitadas.

ABSTRACT

The continuous and indispensable update of the rules of design and structural construction, entails a serious problem in the postgraduate and undergraduate, since the teaching of the contents of the curriculum is not relevant because the periods of curricular update are not aligned with the periods for updating regional, national or international regulations.

The development of this thesis is carried out through the continuation of the software created by M.I. Martín Castillo Flores called DIIN V. 1.0, which has as its purpose the elaboration of interaction diagrams of rectangular columns of reinforced concrete using the codes, ACI-318-14, NTC-2017 and NTC -2004, this software has been very useful in teaching the subject of design of reinforced concrete II and thanks to this it is possible to deepen in terms of building codes.

Based on this, it is intended to continue the work developing the module of circular columns with the standards, ACI-318-19, ACI-318-14, NTC-2017 and NTC-2004. The tools that will be used will be Microsoft Office Excel for the development of the spreadsheet, the SAP2000 (Educational version) software as calibration between interaction diagrams and the ETABS (Educational version) software for the calibration between the efficiencies at requested loads.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la metodología utilizada en las clases de estructuras de concreto es el equilibrio de la sección y encontrar los límites de falla de la sección, para esto en las clases generalmente se calculan seis puntos del diagrama de interacción de la columna con los cuales podemos conocer un panorama de la resistencia a la flexión y carga axial, para encontrar estos puntos es necesario conocer la deformación unitaria de las capas de acero que conforman la columna, para de ésta forma encontrar los esfuerzos que actúan en cada capa y posteriormente determinar su fuerza, finalmente se realiza una sumatoria de fuerzas y sumatoria de momentos para obtener un punto en el diagrama nominal de la columna.

El proceso de la obtención de estos puntos resulta tardado y encontrar los 6 puntos del diagrama de interacción le puede llevar a un alumno alrededor de 3 horas y sólo habrá encontrado el diagrama de interacción en una sola dirección.

El propósito de la presente tesis es el desarrollar una herramienta la cual permita agilizar el proceso de la enseñanza en las columnas circulares, los alumnos al realizar sus primeros ejercicios a mano aprenderán las hipótesis necesarias para su elaboración y que parámetros son necesarios, para después validarlo con la herramienta, realizar modificaciones en sus secciones, cambiar propiedades de los materiales para observar su comportamiento, comparar diferentes códigos de construcción, lo cual le otorgará una mejor comprensión del tema y mejorar su criterio al entender el comportamiento de la columna.

Para evitar limitaciones en la herramienta, se adoptarán los 3 sistemas de unidades más utilizados en el mundo, Sistema Internacional (S.I.), Metro Kilogramo Segundo (M.K.S.) y el Sistema de unidades usuales en Estados Unidos (U.S.C.S.), además contará con los códigos de construcción del Instituto Americano del Concreto (ACI) y las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México. Esto permitirá que pueda ser usado en cualquier parte del mundo que tenga como base los anteriores códigos y únicamente tengan que cambiar los factores de reducción dependiendo de cada país.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

En la actualidad existe una variedad de programas educativos para diferentes áreas de las estructuras, específicamente para la elaboración de diagramas de interacción se encuentran los siguientes:

a) DID.

Software elaborado por el Dr. Oscar M. González Cuevas, creado específicamente con base en las Normas Técnicas Complementarias 2004 y 2017. La primera versión del 2004 genera automáticamente el diagrama de interacción nominal uniaxial de columnas rectangulares y circulares. En su versión 2017 permite generar los diagramas de interacción ortogonales para columnas rectangulares y circulares.

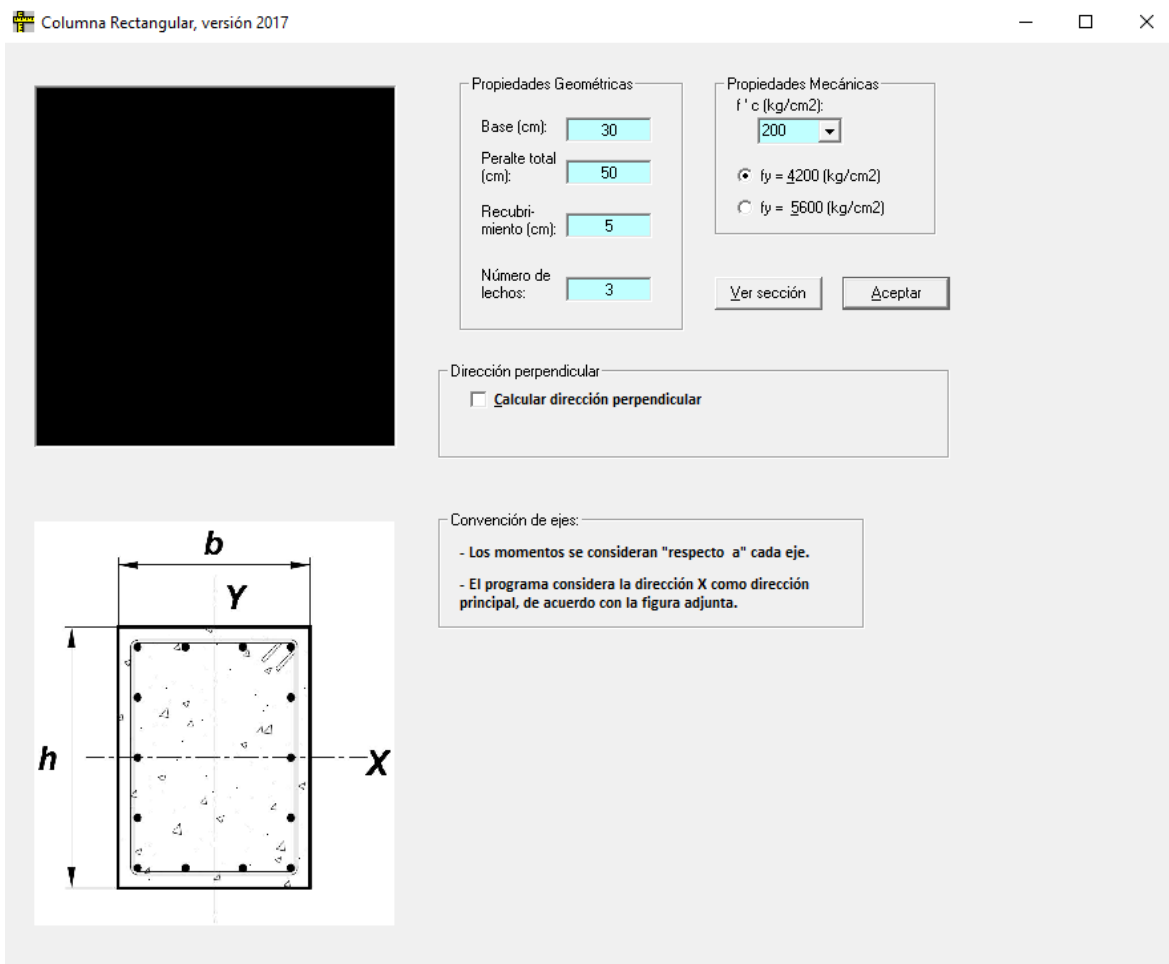


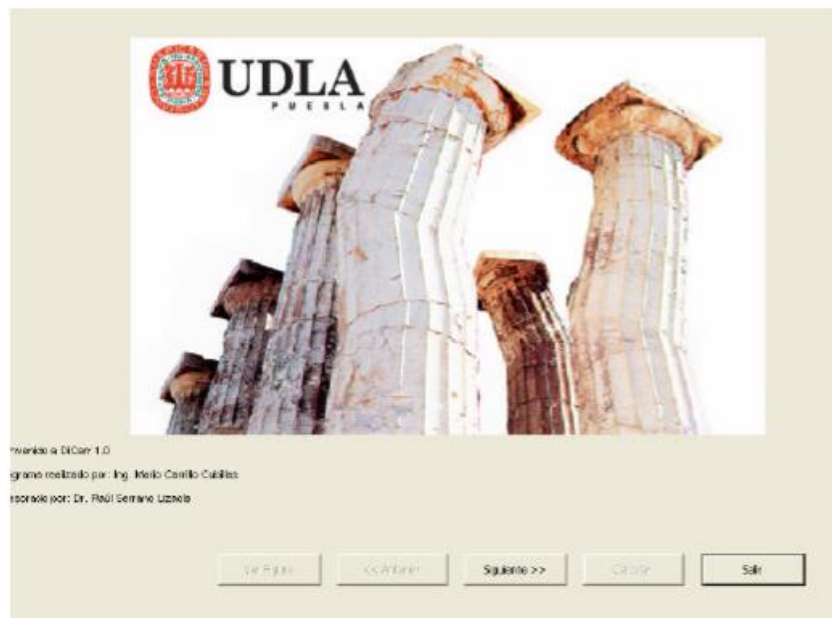
Figura 1.1 Ingreso datos de columna rectangular DID. (González, 2017)

b) Software Educativo para el análisis y diseño de elementos de concreto reforzado.

Elaborado en el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey por Delma V. Almada Navarro y Humberto López Salgado. El software está desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic 5.0 y contiene 4 módulos, uno de ellos específicamente sobre columnas de concreto reforzado. Utilizando el reglamento ACI-318-95 el programa considera únicamente columnas cortas sujetas a flexión uniaxial, de sección transversal circular o rectangular. El software determina los diagramas de interacción de la columna, además de tener la capacidad de revisar y diseñarlas.

c) Programa interactivo para el dimensionamiento de columnas de concreto reforzado DICARR 1.0.

Elaborado por Mario Miguel Carrillo Cubillas y Raúl Serrano Lizaola, se trata de un paquete interactivo, elaborado en Microsoft Excel, para el dimensionamiento de columnas de concreto reforzado, cortas y esbeltas, sujetas a carga axial excéntrica uniaxial y biaxial. Las normas utilizadas en el software son las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto

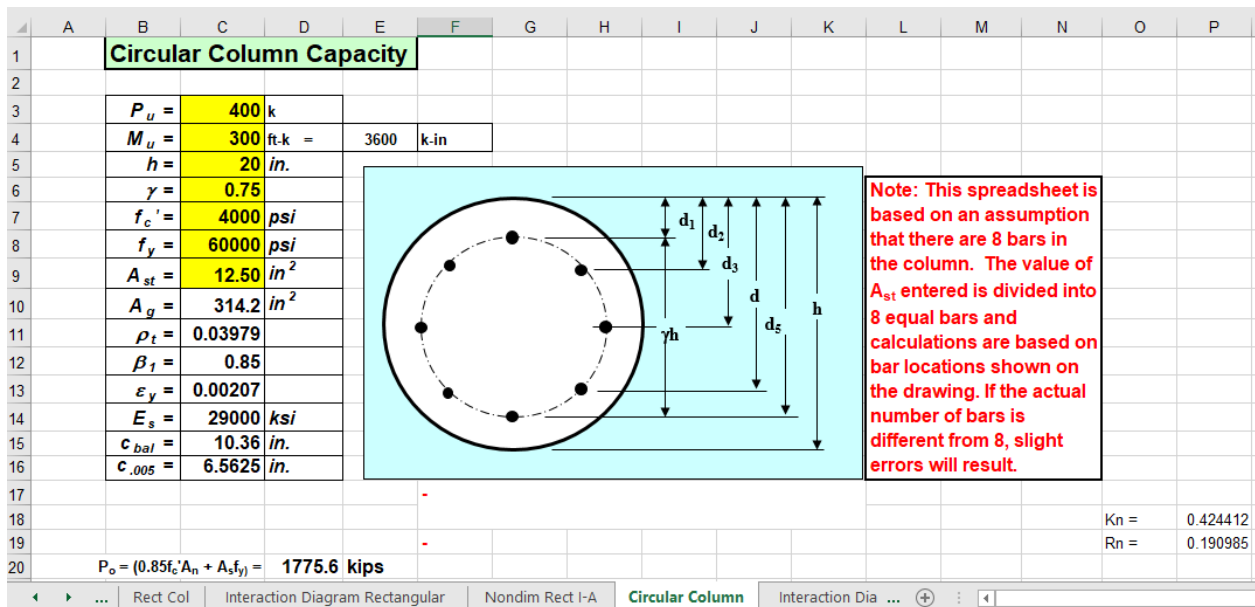


Reforzado del Distrito Federal de 1993.

Figura 1.2 Ventana de inicio Dicarr 1.0. (Carrillo & Serrano, 2004)

d) Archivo de Excel “Design of reinforced concrete 10th Edition”

Archivo de Excel proporcionado en el libro “Design of reinforced concrete 10th Edition” de los autores Jack C. McCormac y Russel H. Brown. Se trata de un archivo de Excel el cual contiene hojas para columna rectangulares y circulares, para cargas axiales y para flexión uniaxial. En el caso columnas rectangulares el programa está diseñado para 3 capas de acero, en caso de que se utilice una cantidad diferentes de capas el resultado podría tener pequeños errores, para las columnas circulares está programado para 8 varillas de acero, al igual que para la columna rectangular, columnas con una cantidad diferente a 8 podría tener



pequeños errores.

Figura 1.3 Excel “Design of reinforced concrete 10th Edition”. (Mc Cormac & Brown, 2011)

e) ACI “SP-17 Columninteractiondiagram”.

Módulo educacional elaborado por el American Concrete Institute, el cual tiene como función la elaboración de diagramas de interacción uniaxial de columnas de concreto rectangulares de hasta 40 capas de acero.

El programa utiliza el código ACI-318-14, calcula 1091 puntos de la gráfica de interacción de la columna con los cuales obtiene el diagrama nominal y el diagrama de diseño.

en la mayoría de las ocasiones no es posible y solo se llega a un diagrama nominal de la columna.

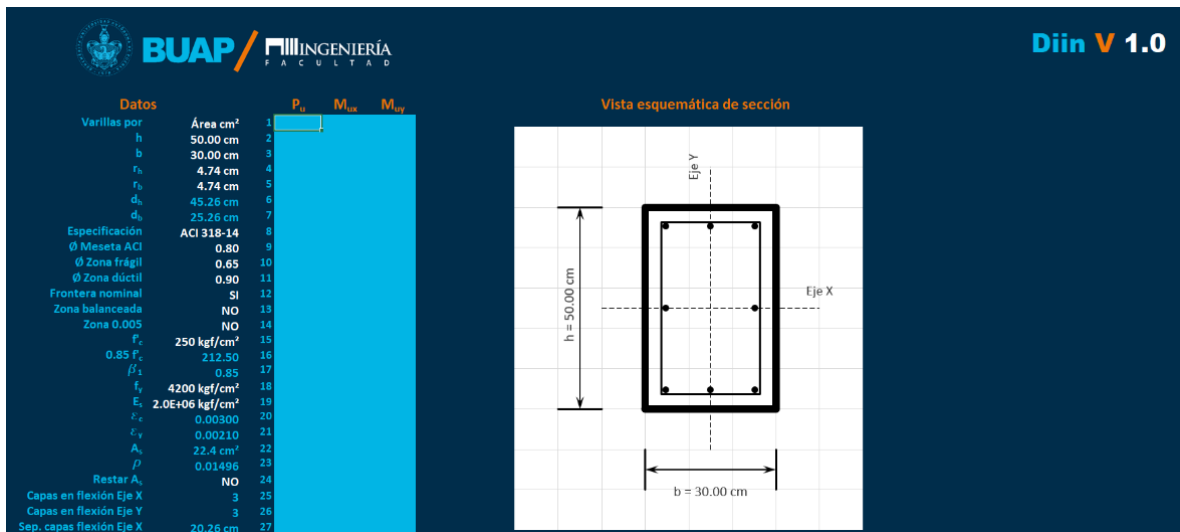


Figura 1.5 Interfaz de Usuario DIIN V 1.0. (Castillo, 2019)

El objetivo de los programas educativos es apoyar la formación de los futuros ingenieros estructurales en comprender el proceso necesario para el diseño de columnas de concreto, y los programas educativos favorecen en mostrar paso a paso el procedimiento de diseño.

En la tabla 1.1 se muestra una tabla comparativa entre los programas educativos antes mencionados y las características de cada uno de ellas.

Concepto	DID	ITESM	DICARR 1.0	McCormac	ACI SP-17	DIIN V.1.0
Códigos	NTC-2004 NTC-2017	ACI-318-95	NTCDF-93	ACI-318-14	ACI-318-14	NTC-2004 NTC-2017 ACI-318-14
Sección Rectangular	SI (n capas de acero)	SI (No especifica capas de acero)	SI (No especifica capas de acero)	SI (3 capas de acero)	SI (40 capas de acero)	SI (50 capas de acero)
Sección Circular	SI (n varillas)	SI (No especifica la cantidad de varillas)	SI (No especifica la cantidad de varillas)	SI (8 varillas)	NO	NO
Esfuerzo fluencia de acero	4200 kgf/cm ² 5600 kgf/cm ²	Definido por el usuario	Definido por el usuario	Definido por el usuario	Definido por el usuario	Definido por el usuario
Flexión Biaxial	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Diagrama Nominal	SI	SI	NO Diagramas adimensionales	SI	SI	SI
Diagrama resistente	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Interpolación zona transición	NO	NO	NO	SI	SI	SI
Sistema de unidades	M.K.S	M.K.S	M.K.S	U.S.C.S	U.S.C.S	S.I. U.S.C.S M.K.S.
Combinación de cargas	SI 1 combinación	SI 1 combinación	SI 1 combinación	SI 1 combinación	NO	SI (50 Combinaciones

Tabla 1.1. Comparativa programas educativos. (Fuente autoría propia, 2019)

1.1 Planteamiento del problema.

Debido a la actualización del código ACI-318 y las NTC-CDMX es una necesidad para los actuales y próximos ingenieros estructurales estar actualizados en las modificaciones y recomendaciones que se presentaron en éstos códigos de construcción.

Como ingeniero estructural se reconoce que es aquella que se dedica a realizar proyectos estructurales, los cuales incluyen el análisis de cargas, análisis estructural, diseño estructural, planos estructurales y como producto final presenta una memoria de cálculo que incluya lo antes mencionado.

El diseño de columnas de concreto puede resultar complicado para los alumnos de ingeniería civil ya que es necesario desarrollar los diagramas de interacción de una columna con base a sus dimensiones y cantidad de acero de refuerzo, un proceso el cual resulta tardado, por lo que se pretende brindar una herramienta para fines académicos donde los alumnos de ingeniería civil puedan interactuar con un software que le permitan observar la elaboración de los diagramas de interacción uniaxial de las columnas en sus ambas direcciones, y conocer su comportamiento en flexión biaxial.

Además, se busca que el alumno compare los resultados obtenidos utilizando los códigos de construcción ACI-318-19, ACI-318-14, NTC-2017 y NTC-2004.

Preguntas de investigación.

Dentro de las preguntas que debe abordar la presente tesis, para enfocar de manera adecuada la investigación, se presentan las siguientes:

- ¿El tiempo designado para el tema de columnas en las clases de diseño de elementos de concreto es suficiente para abarcar los aspectos normativos?
- ¿Qué herramienta utilizan las universidades de México para la elaboración de los diagramas de interacción de columnas de concreto?

- ¿Además de la elaboración de diagramas de interacción, las universidades en México utilizan otro tipo de herramienta para diseñar columnas de concreto?
- ¿Cuáles son las diferencias entre las NTC-2017, NTC-2004, ACI-318-14 y ACI-318-19?

1.2 Justificación

A partir de los años de experiencia en la enseñanza de estructuras de concreto a nivel de licenciatura y maestría se ha observado que el proceso necesario para la elaboración de diagramas de interacción de columnas y comprensión por parte de los alumnos consume la mayoría del tiempo destinado a la materia de diseño de estructuras de concreto, por lo que es necesario la creación de nuevas herramientas que permita a los alumnos ver el procedimiento de elaboración de diagramas de interacción lo más transparente posible y facilitará el proceso de enseñanza. Por tal motivo se decidió desarrollar el programa educativo DIIN V 1.0, desarrollados por M. I. Martín Castillo Flores y Dr. Filiberto Candia García, docentes de la Facultad de Ingeniería de la BUAP con apoyo de Ing. Pilar Nayeli Madrid Báez y Ing. Diego Marcelo Muñoz Pérez, estudiantes de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en estructuras. Este programa permite la elaboración de diagramas de interacción en columnas rectangulares sometidas a flexocompresión biaxial mediante los códigos, ACI-318-19, ACI-318-14, NTC-2017 y NTC-2004.

Actualmente DIIN V 1.0 no cuenta con el módulo de columnas circulares, por lo que se decidió incluirlas como trabajo de tesis, esto será de gran ayuda para las clases de diseño de elementos de concreto II ya que este tipo geometría de columna generalmente no pueden verse en clase debido al tiempo, lo que les beneficiará a los alumnos a tener una mayor comprensión del tema a causa de la gran cantidad de ejercicios que se pueden realizar en poco tiempo.

1.3 Objetivo general

Desarrollar una herramienta académica para los alumnos de ingeniería civil y maestría en estructuras para diseño y revisión de columnas de concreto rectangulares y circulares mediante Microsoft Excel.

Objetivos Específicos

Elaborar un software académico donde se muestre el proceso de diseño de columnas circulares de concreto aplicando los códigos de construcción mencionados.

Realizar una interfaz amigable para evitar errores en la captura de datos e interpretación de resultados.

Validar que los resultados estén dentro de parámetros aceptables para los diferentes códigos de construcción.

1.4 Marco conceptual

Las columnas de concreto se presentan, con mayor frecuencia, como miembros reforzados, con el concreto colado in situ y el acero de refuerzo compartiendo las cargas de compresión y trabajando, como en las vigas, para producir la resistencia necesaria a la flexión. Las formas comunes consisten en secciones transversales redondas, cuadradas o rectangulares de concreto macizo, con varillas de acero colocadas tan cerca como sea posible del perímetro de la columna. Con la altura normal de las columnas, las varillas de acero por sí mismas son bastantes esbeltas y para evitar su pandeo a través del delgado revestimiento de concreto, se utiliza alguna forma de restricción para mantenerlas en el núcleo de la columna.

En la actualidad, los cálculos para el diseño de columnas son bastantes complejos y, en general, se realizan en la computadora, en la práctica profesional. El trabajo de diseño preliminar puede utilizar algunos elementos auxiliares en el diseño, en la

forma de tabulaciones de manuales, como las que aparecen en el CRSI Handbook o la información disponible en el American Concrete Institute o la Portland Cement Association. Sin embargo, con el amplio intervalo de variables, que incluye la resistencia del concreto, la resistencia a la fluencia del acero, el tipo de columna, forma de la sección transversal y dimensiones de la columna, es difícil aportar tablas adecuadas que no lleguen a ser excesivamente voluminosas. (Parker & James, 2008)

1.5 Hipótesis

Si se desarrolla un software académico que desarrolle diagramas de interacción donde se incluyan los códigos de construcción ACI-318-19, ACI-318-14, NTC-2017 y NTC-2004, y muestre el proceso para elaborar diagramas de interacción en columnas de concreto sujetas a flexocompresión. Entonces el alumno tendrá un criterio más amplio al momento de diseñar una columna de concreto y podrá apegarse a la normativa que se le exige, obteniendo como resultados estructuras seguras y económicas.

1.6 Diseño metodológico y técnicas de investigación

Para la presente tesis se emplea una metodología de investigación “cuantitativa” porque se elaborarán diagramas de interacción de columnas circulares de concreto reforzado con base a los códigos utilizados en el país. Para poder elaborar estos diagramas es necesario contar con datos de entrada como las dimensiones de la columna, la resistencia a la compresión del concreto, la cantidad de varillas en la columna, el esfuerzo de fluencia del acero y su módulo de elasticidad, los datos anteriores, deberán de ser analizados para posteriormente utilizarlos en el diseño de columnas circulares.

Tipo de Investigación.

Descriptiva - Explicativa

Se deduce que la investigación es “Descriptiva” porque detalla el método convencional de elaboración de diagramas de interacción para columnas de concreto reforzado, junto con las respuestas que se esperan de dicho método. También, se describe el procedimiento para aplicar los factores de resistencia según la norma utilizada.

De igual manera, se infiere que la investigación es “Explicativa” porque su finalidad es determinar el comportamiento de las columnas circulares de concreto reforzado, para lograr una mayor comprensión para los alumnos de ingeniería civil y de maestría en estructuras.

Casos de estudio

Se analizarán los siguientes casos:

- Columna de concreto circular.
- Códigos de construcción: ACI-318-19, ACI-318-14, NTC-2017 y NTC-2004.
- Sistema de unidades: MKS (Metro, Kilogramo, Segundo), S.I. (Sistema Internacional) y U.S.C.S (Unidades tradicionales de Estados Unidos).

Los casos de estudios llevaron a la comparación entre un software especializado en diseño estructural el cual utiliza los códigos de construcción y unidades anteriormente mencionadas.

Técnica e instrumentos de recolección de datos

Para la elaboración de la presente tesis fue necesario recopilar información en libros de texto y códigos de construcción para contemplar las bases teóricas del diseño de columnas de concreto y aspectos de cada código. Con base a esta

información se crea el software DIIN, éste pasa al proceso de validación de resultados comparando con software comerciales, en el caso de la presente tesis se utiliza SAP2000 y ETABS.

Recursos humanos, materiales y financieros.

La realización de la presente tesis se considera de alta viabilidad puesto que el beneficio es de carácter educativo para los estudiantes de ingeniería civil y maestría en estructuras. Con esto se busca que realicen diseños que cumplan con los principales códigos de uso cotidiano en nuestro país.

El trabajo de investigación será realizado por Diego Marcelo Muñoz Pérez, con apoyo de un director de tesis que cuenta con experiencia laboral y Maestría en el área de Estructuras. M. I. Martín Castillo Flores; además de la colaboración de un codirector de tesis con Maestría en Estructuras, Dr. Filiberto García Candia.

Dentro de los recursos materiales se empleará Microsoft Excel, para la programación, y los softwares comerciales SAP2000 y ETABS, los cuales validarán el software educativo.

En lo concerniente a los gastos propios de la investigación, éstos serán solventados por CONACYT, mediante la beca “Estudiantes de Tiempo Completo”, y por apoyo de la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado de la facultad de ingeniería BUAP, en lo respectivo al costeo de recursos electrónicos. Asimismo, la existencia de información, sustento de la presente tesis, es basta y proveniente de diversas fuentes de información debidamente avaladas por los organismos pertinentes.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentarán toda la información técnica necesaria para la elaboración de diagramas de interacción de columnas. A partir del comportamiento del concreto y el acero como elemento estructural, las hipótesis de diseño para elementos sujetos a flexocompresión y los reglamentos que rigen actualmente el diseño de las columnas de concreto reforzado.

2.1 Concreto

2.1.1 Características general del concreto

El concreto es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena y grava u otro agregado, y agua; después, esta mezcla se endurece en formaletas con la forma y dimensiones deseadas. El cuerpo del material consiste en agregado fino y grueso. El cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conformar una masa sólida. (Nilson & Darwin, 1999)

2.1.2 Comportamiento del concreto a esfuerzos de compresión

Por lo general la resistencia a compresión del concreto se obtiene de cilindros con una relación de altura a diámetro igual a 2. Los cilindros se cargan longitudinalmente a una tasa lenta de deformación para alcanzar la deformación máxima en 2 o 3 minutos. La figura 2.1 presenta curvas típicas esfuerzo-deformación obtenidas de cilindros de concreto cargado en compresión uniaxial en una prueba desarrollada durante varios minutos. Las curvas casi son lineales hasta aproximadamente un medio de la resistencia a compresión. El pico de la curva para concreto de alta resistencia es relativamente agudo, pero para concreto de baja resistencia la curva tiene un copete plano. La deformación en el esfuerzo máximo es aproximadamente 0.002. A deformaciones más elevadas, después de alcanzarse el esfuerzo máximo, todavía pueden transmitirse esfuerzos, aunque se hacen visibles en el concreto grietas paralelas a la dirección de la carga. (Park & Paulay, 1988)

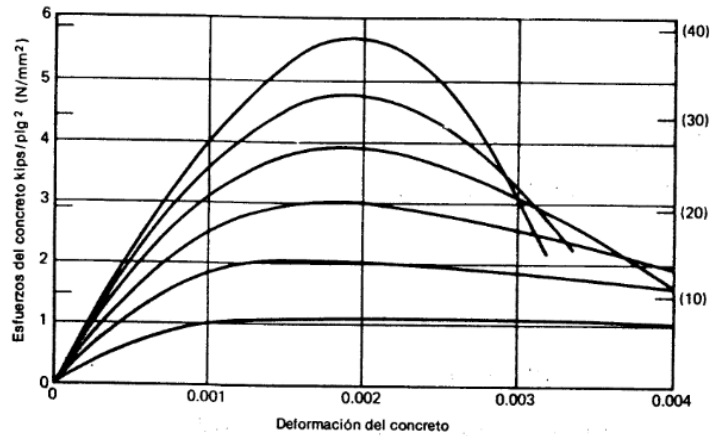


Figura 2.1 Curvas esfuerzo-deformación de concreto en compresión uniaxial (Park & Paulay, 1988)

2.1.3 Comportamiento del concreto a esfuerzos de tensión

Es difícil encontrar una manera sencilla y reproducible de determinar la resistencia a tensión uniaxial. En 1948, Lobo Carneiro en Brasil y, casi simultáneamente Akazawa en Japón, idearon un procedimiento de ensaye indirecto en tensión, que se conoce como el ensaye brasileño. En esencia consiste en someter un cilindro a compresión lineal diametral. La carga se aplica a través de un material relativamente suave, como triplay o corcho. En realidad, el concreto no es elástico y, además, la resistencia en tensión que se mide no es la resistencia en tensión uniaxial. Sin embargo, lo que se pretende es tener una medida de resistencia del concreto a la tensión por medio de un ensaye fácil y reproducible por muchos operadores en distintas regiones.

Robles,

(Gonzalez & 2005)

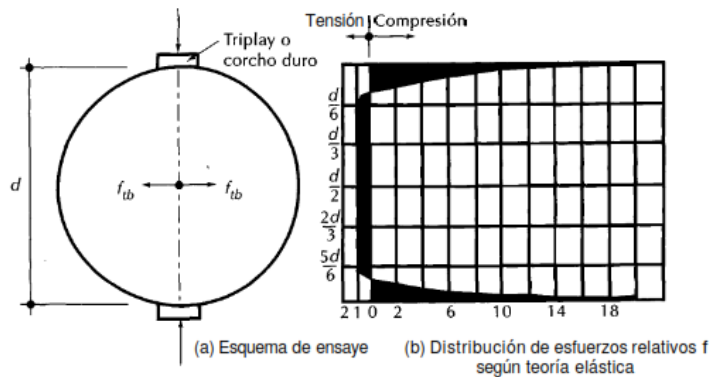


Figura 2.2 Distribución de esfuerzos ensaye brasileño.(Gonzalez & Robles, 2005)

2.1.4Módulo de elasticidad del concreto.

El concreto no tiene un módulo de elasticidad bien definido. Su valor varía con las diferentes resistencias del concreto, con la edad de éste, con el tipo de carga, las características y proporciones del cemento y los agregados. Además, hay varias definiciones diferentes del módulo:

- a) El módulo inicial es la pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación en el origen de la curva.
- b) El módulo por tangente es la pendiente de una tangente a la curva en algún punto de ésta, por ejemplo, en 50% de la resistencia última del concreto.
- c) A la pendiente de una línea trazada del origen a un punto en la curva entre 25 y 50% de su resistencia última a compresión, se le llama módulo por secante.
- d) Otro módulo, llamado módulo aparente o módulo a largo plazo, se determina usando los esfuerzo y deformaciones unitarias obtenidas después de que la carga se ha aplicado durante cierto periodo.(Mc Cormac & Brown, 2011)

2.2 Acero

2.1.1 Características general del acero

Las varillas de refuerzo de acero generalmente tienen sección transversal redonda. Para restringir el movimiento longitudinal de las varillas relativo al concreto que las rodea, se rolan costillas o protuberancias llamadas corrugaciones en la superficie de la varilla. Mediante investigación experimental se han determinado los requerimientos mínimos para las corrugaciones (espaciamiento, altura y distribución perimetral) que indican las especificaciones del acero. Las especificaciones del ASTM requieren que las corrugaciones tengan un

espaciamiento promedio que no sea mayor que 0.7 del diámetro nominal de la varilla; deben además encontrarse distribuidas por lo menos en un 75% del perímetro nominal de la varilla. (Park & Paulay, 1988)

2.2.2 Curvas esfuerzo-deformación

Las curvas esfuerzo-deformación para varillas de acero se obtienen de varillas de acero cargadas monotónicamente a tracción. Las curvas exhiben una porción inicial elástica lineal, una plataforma de cedencia (zona más allá de la cual, la deformación aumenta con poco o ningún aumento del esfuerzo), una región de endurecimiento por deformación, en la que el esfuerzo nuevamente aumenta con la deformación; y, finalmente, una región en la que el esfuerzo decae hasta que ocurre la fractura. (Ortega, 2014)

2.3 Columnas

Las columnas son elementos utilizados para resistir básicamente solicitaciones de compresión axial, aunque por lo general, ésta actúa en combinación con corte, flexión o torsión ya que en las estructuras de concreto armado, la continuidad del sistema genera momentos flectores en todos sus elementos. (Harmsen, 2002)

2.4 Suposiciones de diseño para resistencia a flexión y a carga axial.

La determinación de resistencia a flexión y carga axial, se realizará con base en las siguientes suposiciones:

- a) Debe cumplirse con la condición de equilibrio en cada sección.
- b) Las deformaciones unitarias en el concreto y el refuerzo no preesforzado deben suponerse directamente proporcionales a la distancia desde el eje neutro.
- c) La máxima deformación unitaria utilizable en la fibra extrema sometida a compresión del concreto debe suponerse igual a 0.003.
- d) Se debe suponer un esfuerzo de $0.85f_c$ uniformemente distribuido en una zona de compresión equivalente, limitada por los bordes de la sección transversal por una línea recta paralela al eje neutro, ubicada a una distancia a de la fibra de deformación unitaria máxima en compresión, tal como se calcula con: $a = \beta_1 c$

- e) La distancia desde la fibra de deformación unitaria máxima al eje neutro, c , se debe medir en dirección perpendicular al eje neutro. (ACI, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14), 2014)

f'_c , MPa	β_1	
$17 \leq f'_c \leq 28$	0.85	(a)
$28 < f'_c < 55$	$0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$	(b)
$f'_c \geq 55$	0.65	(c)

Tabla 2.1 Valores de β_1 para distintos valores de f'_c . (ACI, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14), 2014)

2.4 Diagrama de interacción.

Para el diseño de columnas, sean de concreto reforzado, acero estructural y/o sección compuesta, es útil contar con la mayor cantidad de herramientas para obtener con facilidad un diseño lo más adecuado posible. Una de las herramientas o ayudas de diseño más utilizadas son los llamados diagramas de interacción, que permiten conocer todas las combinaciones de momento flexionante, M , y carga axial, P , a las que se encuentra sometida una sección transversal en particular. (Ramírez, Mendoza, Alejandro, & Valdés, 2012).

Un diagrama de interacción de resistencia define la carga y el momento de falla para determinada columna en el intervalo completo de excentricidades desde cero hasta el infinito. Para cualquier excentricidad, existe un solo par de valores P_n y M_n , que producirán un estado inminente de falla. (Nilson & Darwin, 1999)

2.5 Factores de reducción de resistencia

a) NTC-2004.

$F_R=0.8$ Cuando el núcleo esté confinado con refuerzo transversal circular o con estribos que cumplan con los requisitos del inciso 6.2.4 o 7.3.4.b de las NTC-2004 para diseño y construcción de estructuras de concreto.

$F_R=0.8$ Cuando el elemento falle en tensión.

$F_R=0.7$ si el núcleo no está confinado y la falla es en compresión. (Federal, 2004)

b) NTC-2017.

$F_R=0.75$ Cuando el elemento falle en tensión.

$F_R=0.75$ Cuando el núcleo esté confinado con refuerzo transversal circular que cumpla con los requisitos del inciso 6.1.4, o con estribos que cumplan con los requisitos de los incisos 7.3.4, 8.3.4 o 9.3.4, según el valor de Q usado.

$F_R=0.65$ si el núcleo no está confinado y la falla es en compresión. (México, 2017)

c) ACI-2014

Deformación unitaria neta a tracción, ϵ_t	Clasificación	ϕ			
		Tipo de refuerzo transversal			
		Espirales que cumplen con 25.7.3	TM	Otro	
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Controlada por compresión	0.75	(a)	0.65	(b)
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0.005$	Transición ^[1]	$0.75 + 0.15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.005 - \epsilon_{ty})}$	(c)	$0.65 + 0.25 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.005 - \epsilon_{ty})}$	(d)
$\epsilon_t \geq 0.005$	Controlada por tracción	0.90	(e)	0.90	(f)

^[1]Para las secciones clasificadas como de transición, se permite usar el valor de ϕ correspondiente a secciones controladas por compresión.

Tabla 2.2 Factor de reducción de resistencia para elementos a flexocompresión (ACI, 2014).

Net tensile strain ϵ_t	Classification	ϕ			
		Type of transverse reinforcement			
		Spirals conforming to 25.7.3		Other	
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Compression-controlled	0.75	(a)	0.65	(b)
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < \epsilon_{ty} + 0.003$	Transition ^[1]	$0.75 + 0.15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.003)}$	(c)	$0.65 + 0.25 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.003)}$	(d)
$\epsilon_t \geq \epsilon_{ty} + 0.003$	Tension-controlled	0.90	(e)	0.90	(f)

^[1]For sections classified as transition, it shall be permitted to use ϕ corresponding to compression-controlled sections.

d) ACI-2019

Tabla 2.3 Factor de reducción de resistencia para elementos a flexocompresión (ACI, 2019)

2.6 Flexión Biaxial

Cuando la carga es aplicada con una excentricidad que no se encuentra a lo largo del eje principal se dice que la columna presenta flexión biaxial. El análisis del bloque esfuerzos en una sección rectangular con flexión biaxial implicaría un área de compresión triangular o trapezoidal, además el eje neutro no sería perpendicular a la dirección de la excentricidad. En la figura 2.3 se muestra un diagrama de interacción de superficie para la resistencia última de una columna rectangular de concreto reforzado. (Furlong, Thomas, & Mirza, 2004)

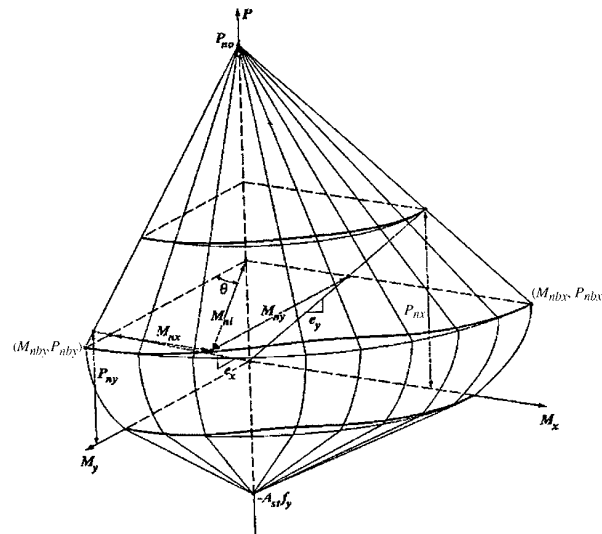


Figura 2.3 Diagrama de interacción de superficie columna rectangular. (Furlong, Thomas, & Mirza, 2004)

2.7 Métodos aproximados de diseño para columnas en flexión biaxial.

La capacidad última de secciones sometidas a flexo-compresión biaxial no puede ser encontrada con fórmulas directas de manera exacta. Las formulaciones matemáticas al respecto están basadas en la descripción de las isocargas y tratan de establecer expresiones matemáticas que relacionen las resistencias M_x y M_y relativas a los ejes de simetría ortogonales de la sección.

El problema se simplifica tomando en cuenta que la capacidad a flexo-compresión biaxial puede expresarse como función de la capacidad uniaxial (alrededor de los ejes de simetría ortogonales x , y) de la sección transversal. Dicha simplificación permite recurrir a los diagramas de interacción que son fáciles de usar y expresan de manera adecuada la resistencia uniaxial. (Delgado & Barboza, 2014)

a) Método de la Carga Recíproca

Método propuesto por Boris Bresler en el año 1961 y consiste en la siguiente expresión:

$$\frac{1}{P_t} = \frac{1}{P_x} + \frac{1}{P_y} - \frac{1}{P_o}$$

Donde:

P_t = Carga última bajo flexión biaxial.

P_x = Carga última en el diagrama uniaxial en x con excentricidad en y .

P_y = Carga última en el diagrama uniaxial en y con excentricidad en x .

P_o = Carga axial en compresión pura.

Esta aproximación tiene las siguientes ventajas:

- Tiene una forma simple
- Los parámetros P_o, P_x, P_y , son determinados relativamente fáciles.

- El método parece ser general, por lo menos para secciones comunes de columnas. (Bresler, 1961)

b) Método carga de la superficie

$$\left(\frac{M_{nx}}{M_{ox}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{ny}}{M_{oy}}\right)^\alpha = 1.0$$

Donde:

$$M_{nx} = P_n e_y \text{ y } M_{ny} = P_n e_x.$$

$M_{ox} = M_{nx}$ a tal carga axial P_n donde M_{ny} o e_x sea igual a cero.

$M_{oy} = M_{ny}$ a tal carga axial P_n donde M_{nx} o e_y sea igual a cero.

α tiene el valor de $(\log 0.5 / \log \beta)$

En la figura 2.4 se muestra la gráfica del contorno ABC

Para cuestiones de diseño el contorno es aproximado mediante 2 líneas rectas BA y BC, las siguientes ecuaciones simplifican éstas dos condiciones.

- Para AB cuando $M_{ny} / M_{oy} < M_{nx} / M_{ox}$

$$\frac{M_{nx}}{M_{ox}} + \frac{M_{ny}}{M_{oy}} \left[\frac{1 - \beta}{\beta} \right] = 1.0$$

- Para BC cuando $M_{ny} / M_{oy} > M_{nx} / M_{ox}$

$$\frac{M_{ny}}{M_{oy}} + \frac{M_{nx}}{M_{ox}} \left[\frac{1 - \beta}{\beta} \right] = 1.0$$

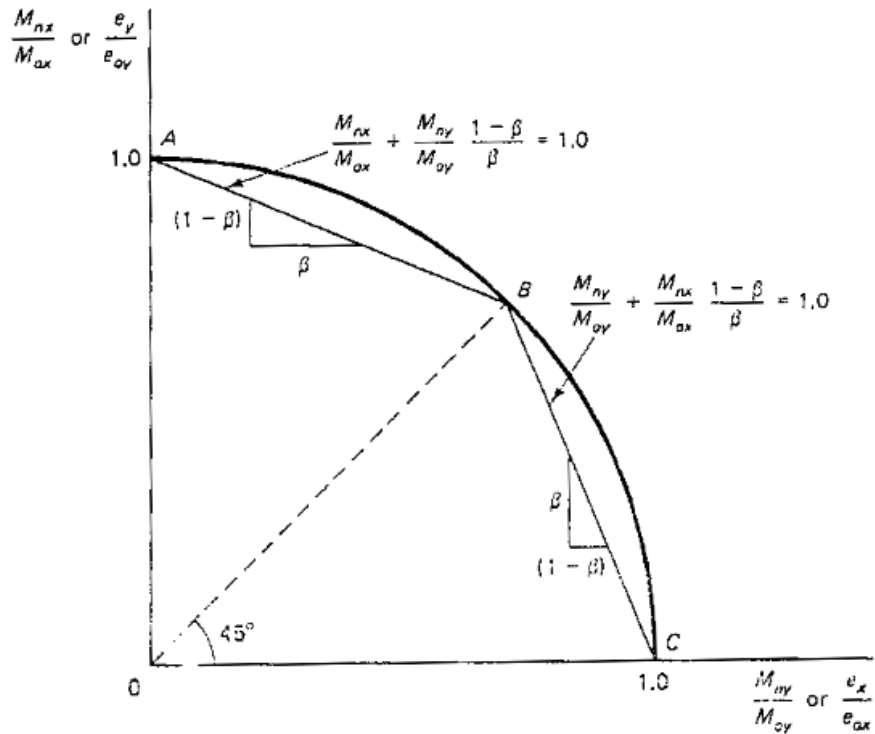


Figura 2.4 Diagrama de interacción de superficie columna rectangular.(Nawy, 2005)

Para columnas rectangulares donde el refuerzo se encuentra distribuido uniformemente a lo largo de todas las caras de la columna, la relación M_{oy}/M_{nx} puede ser tomado aproximadamente igual a b/h . Por lo que las ecuaciones anteriores pueden ser modificadas de la siguiente manera.(Nawy, 2005)

- Para $M_{ny}/M_{nx} > b/h$

$$M_{ny} + M_{nx} \frac{b}{h} \frac{1 - \beta}{\beta} = M_{oy}$$

- Para $M_{ny}/M_{nx} \leq b/h$

$$M_{nx} + M_{ny} \frac{h}{b} \frac{1 - \beta}{\beta} = M_{ox}$$

2.8 Límites de refuerzo.

e) NTC-2004.

La cuantía del refuerzo longitudinal de la sección no será menor que $2/f_y$ (f_y en MPa, o $20/f_y$, con f_y en kg/cm^2) ni mayor que 0.06. El número mínimo de barras será seis en columnas circulares y cuatro en rectangulares. (Federal, 2004)

f) NTC-2017.

- Ductilidad baja y media.

La cuantía del refuerzo longitudinal de la sección no será menor que 1% ni mayor que 6%. El número mínimo de barras será seis en columnas circulares y cuatro en rectangulares. (México, 2017)

- Ductilidad alta.

La cuantía de refuerzo longitudinal no será menor que 1% ni mayor que 4%. El número mínimo de barras será seis en columnas circulares y cuatro en rectangulares. (México, 2017)

g) ACI-2014

- Pórticos ordinarios resistentes a momento.

Para columnas sin preesfuerzo el refuerzo longitudinal mínimo y máximo no debe ser menor que 1% ni mayor que el 8% del área gruesa de la columna. (ACI, 2014)

- Pórticos intermedios resistentes a momento.

Para columnas sin preesfuerzo el refuerzo longitudinal mínimo y máximo no debe ser menor que 1% ni mayor que el 8% del área gruesa de la columna. (ACI, 2014)

- Pórticos especiales resistentes a momento.

Para columnas sin preesfuerzo el refuerzo longitudinal mínimo y máximo no debe ser menor que 1% ni mayor que el 6% del área gruesa de la columna. (ACI, 2014)

h) ACI-2019

- Pórticos ordinarios resistentes a momento.

Para columnas sin preesfuerzo el refuerzo longitudinal mínimo y máximo no debe ser menor que 1% ni mayor que el 8% del área gruesa de la columna.(ACI, 2014)

- Pórticos intermedios resistentes a momento.

Para columnas sin preesfuerzo el refuerzo longitudinal mínimo y máximo no debe ser menor que 1% ni mayor que el 8% del área gruesa de la columna.(ACI, 2014)

- Pórticos especiales resistentes a momento.

Para columnas sin preesfuerzo el refuerzo longitudinal mínimo y máximo no debe ser menor que 1% ni mayor que el 6% del área gruesa de la columna.(ACI, 2014)

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presentará el procedimiento necesario para la elaboración de diagramas de interacción para columnas rectangulares y circulares, además del proceso de elaboración del software DIIN para columnas circulares de concreto reforzado. Para poder entender los pasos para la elaboración del diagrama de interacción a mano es importante conocer los conceptos de diagrama de interacción, falla balanceada y flexión pura.

3.1 Diagrama de interacción por medio del análisis de compatibilidad de deformaciones.

El diagrama de interacción se elabora mediante el cálculo de miles de puntos, éstos se obtienen variando el eje neutro en la sección, entre más pequeña la variación se tendrán más puntos por lo cual será un diagrama más preciso.

Se tomarán en cuenta las suposiciones de diseños descritas en el ACI-318. Aplicando éstas suposiciones se debe de cumplir con la condición de equilibrio en cada uno de los puntos.

Para fines didácticos solo se obtendrán los 7 puntos más representativos en un diagrama de interacción, ver la Fig. 3.1, los cuales se irán explicando conforme los vayamos calculando.

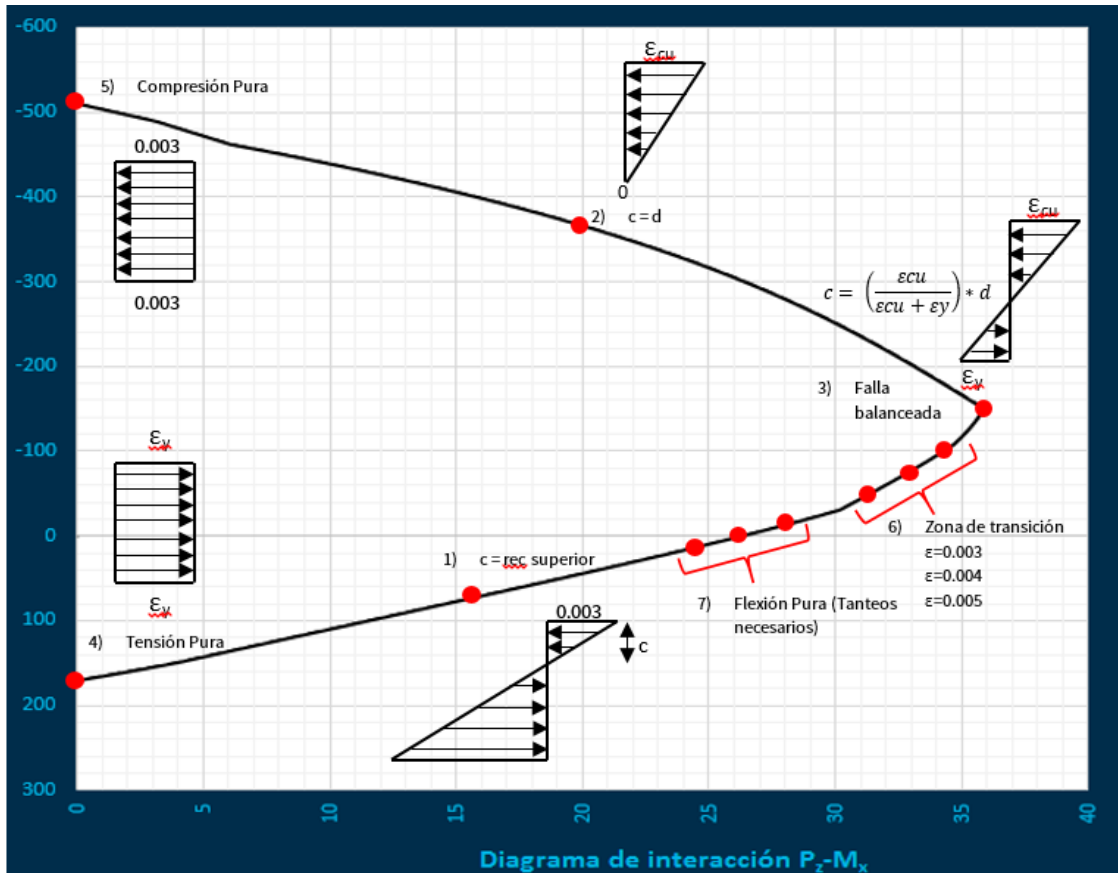


Figura 3.1 Diagrama de interacción uniaxial. (Fuente autoría propia, 2019)

3.2 Falla balanceada.

La falla balanceada ocurre cuando simultáneamente el acero llega a su esfuerzo de fluencia y el concreto alcanza su deformación unitaria máxima de 0.003 en compresión. Este criterio es general y se aplica a secciones de cualquier forma sin acero de compresión o con él. (Miramontes, Garamendi, Márquez, Ávalos, & Pimentel, 2004)

Para esto debemos de conocer el valor del eje neutro c donde ocurre esta condición, utilizando triángulos semejantes. Además, debemos conocer la deformación unitaria en cada capa de acero ya que gracias a esto podemos conocer el esfuerzo y posteriormente la fuerza en cada una de ellas.

El comportamiento del acero estará dado por una gráfica de esfuerzo-deformación elasto-plástico perfecto.

El modelo elasto-plástico perfecto, es un modelo parecido al bilineal, con la variación de que la pendiente del gráfico después de la fluencia no es positiva sino igual a cero, lo que implica que no se considera el endurecimiento debido a la deformación. Como se puede observar en la figura 3.2 éste modelo no considera la degradación de la rigidez. (López, Ugel, & Reyes, 2017)

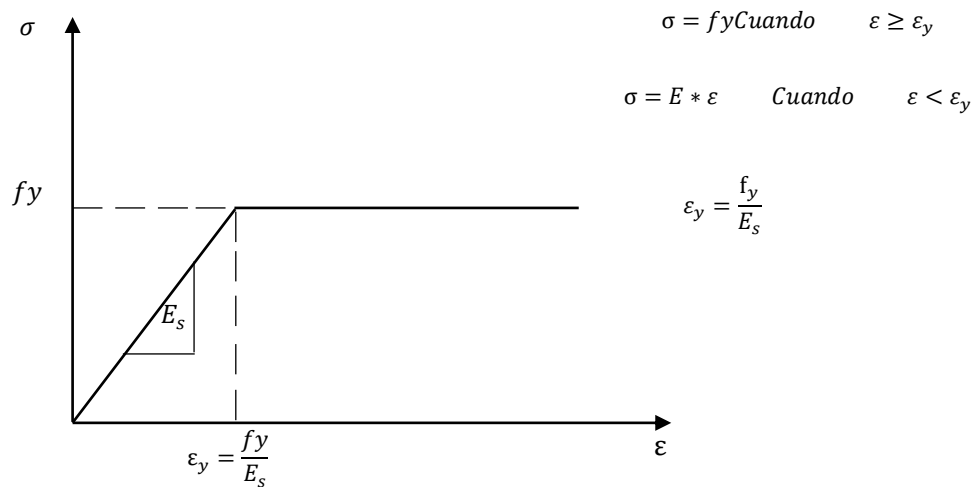


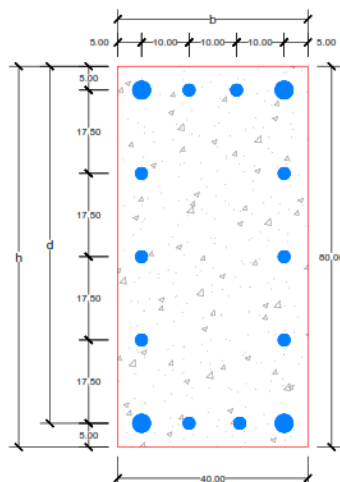
Figura 3.2 Comportamiento del acero de refuerzo. (Fuente autoría propia, 2019)

3.3 Flexión Pura.

Ocurre cuando la columna está sometida a flexión pura, esto quiere decir que no existen cargas axiales y solo están actuando momentos alrededor de la columna. Se debe proponer diferentes distancias de eje neutros hasta que el valor de la fuerza axial sea igual a cero.

3.4 Columna rectangular.

Graficar el diagrama de eje x de la siguiente



interacción alrededor del columna.

Figura 3.3 Esquema de columna rectangular. (Fuente autoría propia, 2019)

Datos:

$$f'_c = 30 \text{ MPa} \quad A_g = h \cdot b$$

$$f_y = 420 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

4 varillas # 12

10 varillas #8

$$A_{st} = 96.274 \text{ cm}^2$$

- **Cálculo punto 1 (Compresión pura)**

El punto de compresión pura se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_{n_1} = -[f''_c \cdot A_g + f_y \cdot A_{st}]$$

Donde:

P_{n_1} = Carga axial nominal a compresión

$$f''_c = 0.85 \cdot f'_c$$

A_g = Área total de la sección

f_y = Esfuerzo de fluencia acero

A_{st} = Área total del refuerzo longitudinal

Por convención de signos el signo menos significa compresión y el signo positivo significa tensión.

- **Cálculo punto 1 (Compresión pura)**

$$f'c = 0.85 * 30 \text{ MPa} = 25.5 \text{ MPa}$$

$$Pn_1 = -[f'c * Ag + fy * Ast]$$

$$Pn_1 = -[(25.5 \text{ MPa}) * ((0.8 \text{ m}) * (0.4 \text{ m})) + (420 \text{ MPa}) * (96.274 \text{ cm}^2)]$$

$$Pn_1 = -12.2035 \text{ MN}$$

$$Pn_1 = -12203.53 \text{ kN}$$

- **Cálculo punto 2 (Tensión Pura)**

Como el concreto no resiste esfuerzos de tensión, éstos son soportados por el acero de refuerzo, por lo que la expresión para el cálculo de la tensión pura está dada por:

$$Pn_2 = fy * Ast$$

- Cálculo Pn_2

$$Pn_2 = fy * Ast$$

$$Pn_2 = 420 \text{ MPa} * 96.274 \text{ cm}^2$$

$$Pn_2 = 4.0435 \text{ MN}$$

$$Pn_2 = 4043.53 \text{ kN}$$

- **Cálculo punto 3 (Fallabalanceada)**

En este ejercicio se tiene un esfuerzo de fluencia $fy = 420 \text{ MPa}$ y un Módulo de elasticidad del acero $E_s = 200000 \text{ MPa}$ por lo que se tiene una deformación unitaria a la fluencia del acero igual a $\epsilon_y = 0.0021$, esto quiere decir que valores iguales o

mayores de $\epsilon=0.0021$ el acero fluirá, por lo que el esfuerzo será igual a f_y ($\sigma=f_y$), en caso contrario multiplicaremos $\sigma=E_s*\epsilon$

- Cálculo eje neutro c

$$c = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) * d \quad c = \left(\frac{0.003}{0.003 + 0.0021} \right) * 75 \text{ cm} = 44.118 \text{ cm}$$

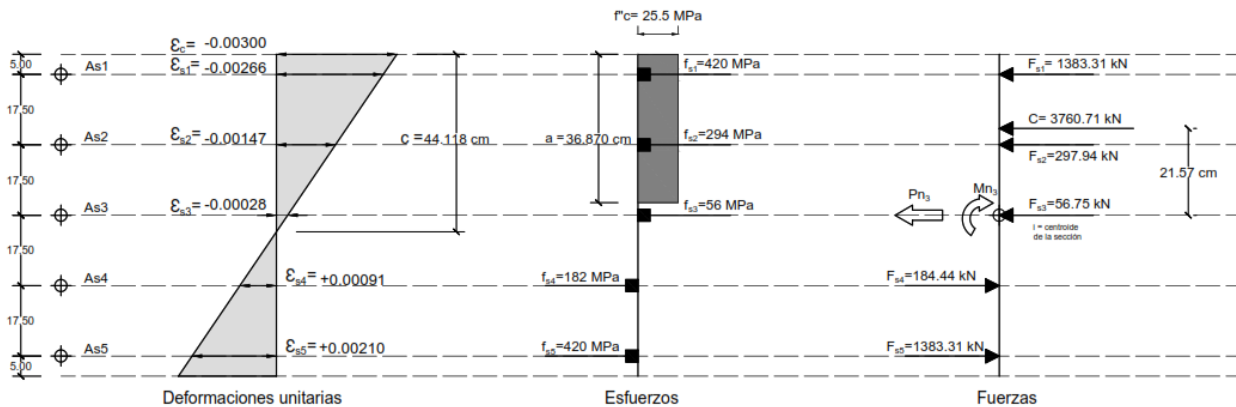


Figura 3.4 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 3. (Fuente autorípropi, 2019)

$$A_{s1}=32.94 \text{ cm}^2 \quad A_{s2}=10.1341 \text{ cm}^2 \quad A_{s3}=10.1341 \text{ cm}^2 \quad A_{s4}=10.1341 \text{ cm}^2 \quad A_{s5}=32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo Pn_3

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \longrightarrow$$

$$Pn_3 = -F_{s1} - F_{s2} - F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$Pn_3 = -1383.31 \text{ kN} - 297.94 \text{ kN} - 56.75 \text{ kN} + 184.44 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN} - 3760.71 \text{ kN}$$

$$Pn_3 = -3930.97 \text{ kN}$$

- Cálculo Mn_3

Por suma de momentos en el punto i

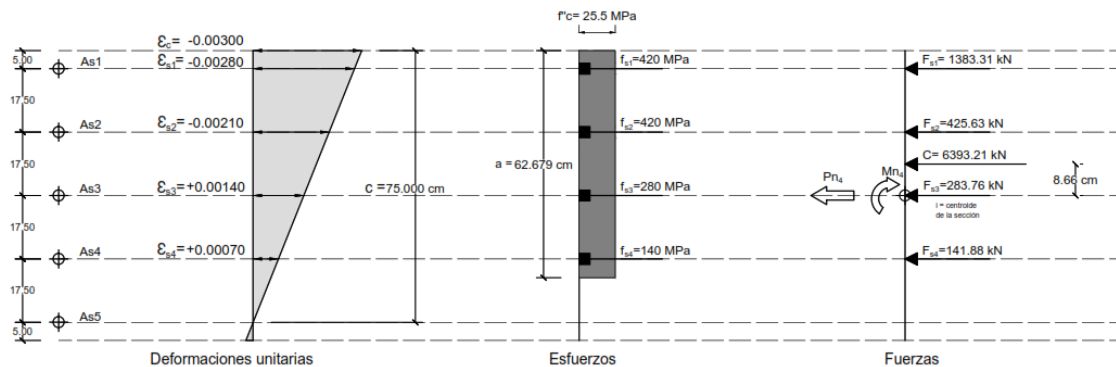
$$\sum M_i = 0 \curvearrowright^+$$

$$Mn_3 = (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (3760.71 \text{ kN}) * (21.565 \text{ cm}) + (297.94 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) \\ + (184.44 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_3 = 1863.74 \text{ kN} - m$$

- **Cálculo punto 4 (c = d)**

Para obtener la carga axial (Pn_4) y el momento (Mn_4) en este punto ubicaremos el eje neutro c en la última capa de acero y mediante triángulos semejantes



obtendremos las deformaciones unitarias en cada capa de acero.

Figura 3.5 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 4. (Fuente autorípropi, 2019)

$$As_1 = 32.94 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2 \\ As_5 = 32.94 \text{ cm}^2$$

- **Cálculo Pn_4**

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \longrightarrow$$

$$Pn_4 = -F_{s1} - F_{s2} - F_{s3} - F_{s4} - C$$

$$Pn_4 = -1383.31 \text{ kN} - 425.63 \text{ kN} - 283.76 \text{ kN} - 141.88 \text{ kN} - 6393.21 \text{ kN}$$

$$Pn_4 = -8627.79 \text{ kN}$$

- **Cálculo Mn_4**

Por suma de momentos en el punto i

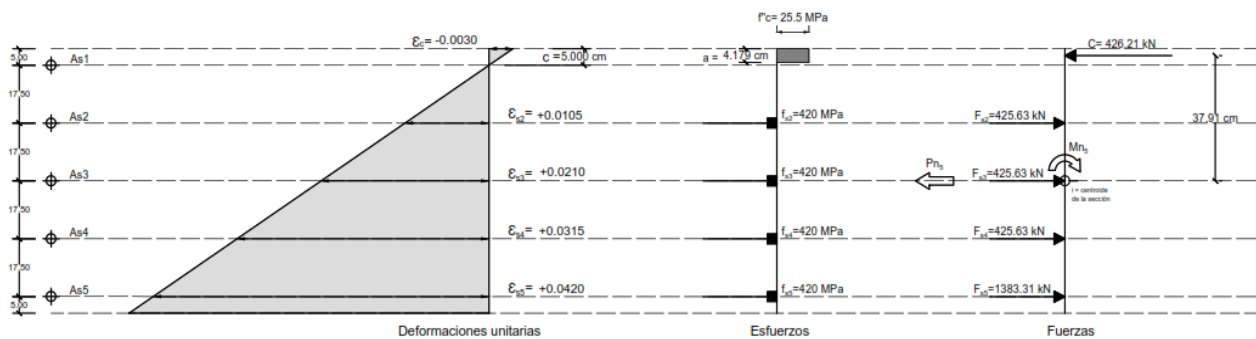
$$\sum M_i = 0 \quad \curvearrowright^+$$

$$Mn_4 = (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (425.63 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (6393.21 \text{ kN}) * (8.66 \text{ cm}) - (141.88 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_4 = 1087.51 \text{ kN} - \text{m}$$

- **Cálculo punto 5 (c = r)**

Para obtener la carga axial (Pn_5) y el momento (Mn_5) en este punto ubicaremos el eje neutro c en la primera capa de acero y mediante triángulos semejantes



obtendremos las deformaciones unitarias en cada capa de acero.

Figura 3.6 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 5. (Fuente autoría propia, 2019)

$$As_1 = 32.94 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5 = 32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo Pn_5

Por suma de fuerzas horizontales

$$\sum F_H = 0 \quad \longrightarrow^+$$

$$-Pn_5 - C + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} = 0$$

$$Pn_5 = -426.21 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN}$$

$$Pn_5 = 2234 \text{ kN}$$

- Cálculo Mn_5

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \quad \curvearrowright^+$$

$$Mn_5 = 426.21 \text{ kN} * (37.91 \text{ cm}) - 425.63 \text{ kN} * (17.5 \text{ cm}) + 425.63 \text{ kN} * (17.5 \text{ cm}) + 1383.31 \text{ kN} * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_5 = 645.74 \text{ kN} - m$$

- **Cálculo punto 6 (Flexión pura)**

Podemos deducir que para que exista la condición de flexión pura el eje neutro se encuentra entre el punto 5 calculado y la falla balanceada, esto quiere decir que el eje neutro está ubicado entre 5 cm y 44.118 cm. Para este ejercicio realizaremos 3 tanteos con lo cual pretendemos acercarnos a la flexión pura.

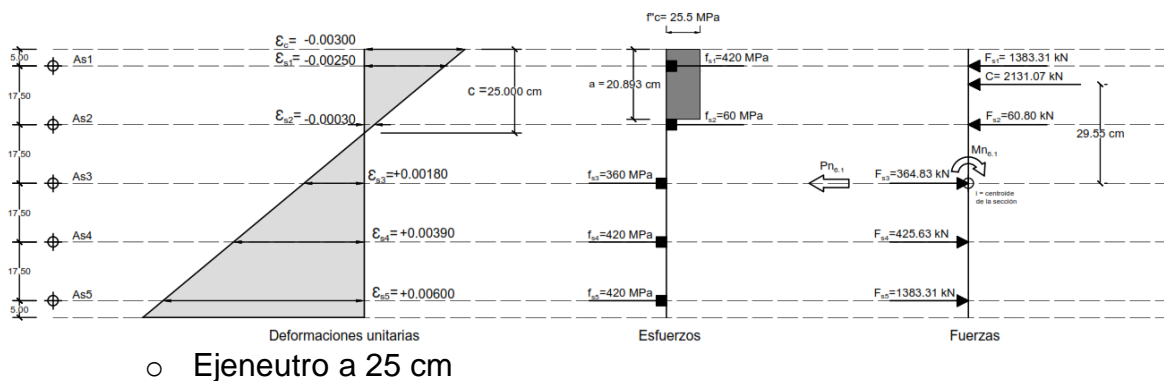


Figura 3.7 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 6.1. (Fuente autorípropi, 2019)

$$As_1 = 32.94 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5 = 32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{6.1}$

Por suma de fuerzas horizontales

$$\sum F_H = 0 \quad \longrightarrow^+$$

$$-Pn_{6.1} - C - F_{s1} - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} = 0$$

$$Pn_{6.1} = -1383.31 \text{ kN} - 2131.07 \text{ kN} - 60.80 \text{ kN} + 364.83 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN}$$

$$Pn_{6.1} = -1401.41 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{6.1}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \quad \curvearrowright^+$$

$$Mn_{6.1} = (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (2131.07 \text{ kN}) * (29.55 \text{ cm}) + (60.80 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (425.63 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_{6.1} = 1683.25 \text{ kN} - m$$

Analizando el resultado obtenido podemos observar que la columna se encuentra en la zona de compresión cuando el eje neutro se ubica a 25 cm, esto quiere decir que debemos subir el eje neutro a un valor entre 5 y 25 cm para acercarnos más a la zona de tensión. Realizaremos otros dos tanteos sin embargo este resultado es otro punto obtenido de la gráfica de interacción de la columna.

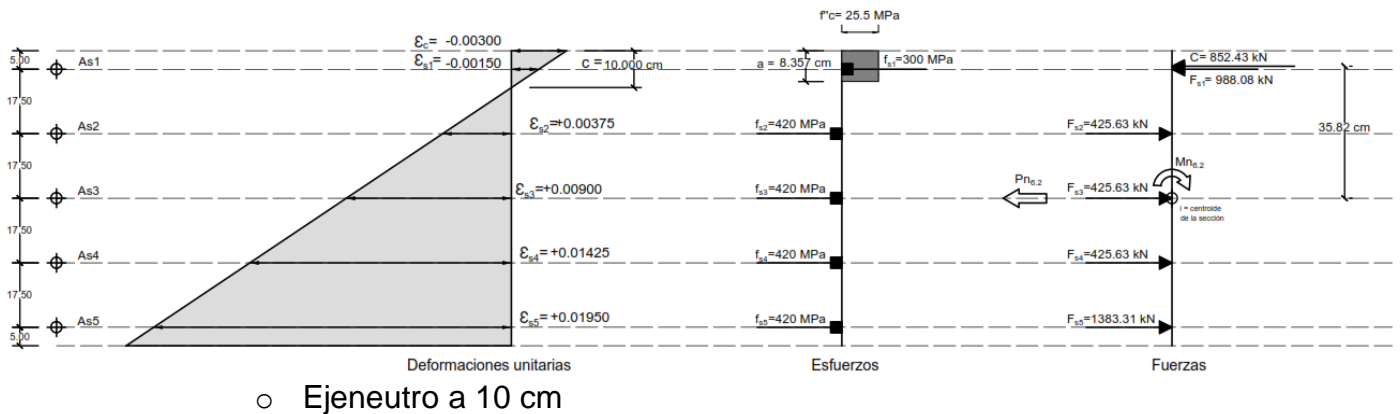


Figura 3.8 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 6.2. (Fuente autoríapropia, 2019)

$$As_1=32.94 \text{ cm}^2 \quad As_2=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4=10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5=32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{6.2}$

Por suma de fuerzas horizontales

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$-Pn_{6.2} - C - F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} = 0$$

$$Pn_{6.2} = -988.08 \text{ kN} - 852.43 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN}$$

$$Pn_{6.2} = 819.71 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{6.2}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright$$

$$Mn_{6.2} = (988.08 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (852.43 \text{ kN}) * (35.821 \text{ cm}) - (425.63 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (425.63 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_{6.2} = 1135.34 \text{ kN} - m$$

El resultado obtenido muestra que la columna se encuentra en la zona de tensión, esto quiere decir que nos pasamos y que la zona de flexión pura se encuentra en 10 y 25 cm. Realizando otro tanteo obtendremos un valor más cercano a la flexión pura.

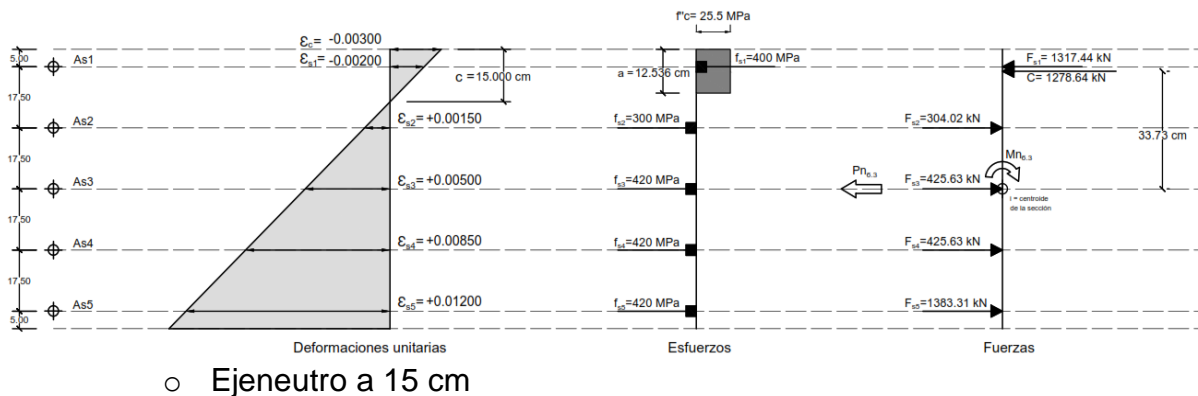


Figura 3.9 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 6.3. (Fuente autoría propia, 2019)

$$A_{s1}=32.94 \text{ cm}^2 \quad A_{s2}=10.1341 \text{ cm}^2 \quad A_{s3}=10.1341 \text{ cm}^2 \quad A_{s4}=10.1341 \text{ cm}^2$$

$$A_{s5}=32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{6.3}$

Por suma de fuerzas horizontales.

$$\sum F_H = 0 \longrightarrow$$

$$-Pn_{6.3} - C - F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} = 0$$

$$Pn_{6.3} = -1317.44 \text{ kN} - 1278.64 \text{ kN} + 304.02 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN}$$

$$Pn_{6.3} = -57.48 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{6.3}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright$$

$$Mn_{6.3} = (1317.44 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (1278.64 \text{ kN}) * (33.732 \text{ cm}) - (304.02 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$+ (425.63 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_{6.3} = 1397.86 \text{ kN} - m$$

En éste tanteo podemos observar que nos encontramos en la zona de compresión, sin embargo, el valor de la carga axial es más cercano a cero por lo que podemos utilizar este punto como la zona de flexión pura. Para obtener el valor de exacto de la flexión pura se tendría que realizar varios tanteos. Para este caso podemos deducir que la ubicación del eje neutro, para que la columna se encuentre en flexión pura, está entre 10 y 15 cm.

Además de los puntos calculados, se calcularán otros puntos que nos interesarán al momento de elaborar el diagrama de interacción de diseño.

- **Cálculo punto 7 (Zona de transición)**

A continuación, se calcularán los puntos donde los aceros en la última capa tengan deformaciones unitarias de 0.005, 0.004 y 0.003, para poder utilizar la interpolación del ACI-318-19

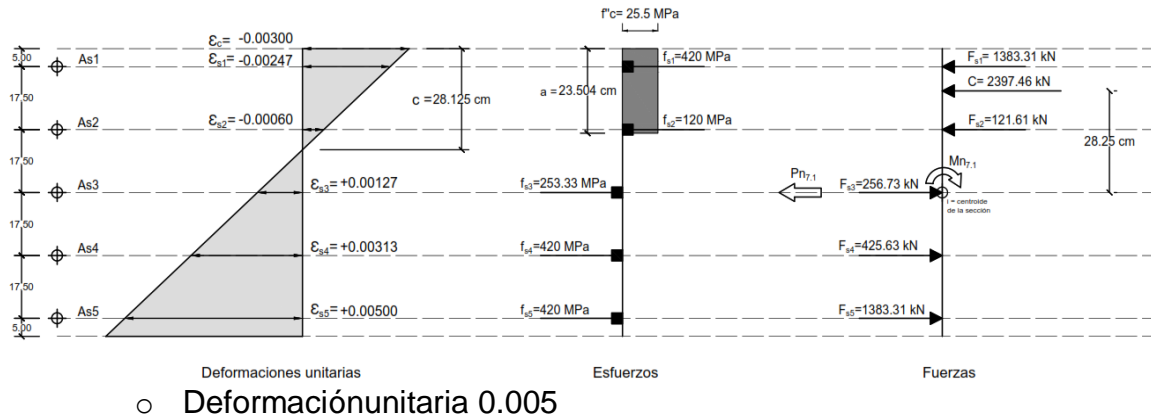


Figura 3.10 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 7.1. (Fuente autoría propia, 2019)

$$A_{S1}=32.94 \text{ cm}^2 \quad A_{S2}=10.1341 \text{ cm}^2 \quad A_{S3}=10.1341 \text{ cm}^2 \quad A_{S4}=10.1341 \text{ cm}^2$$

$$A_{S5}=32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{7.1}$

Por suma de fuerzas horizontales

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$-Pn_{7.1} - C - F_{S1} - F_{S2} + F_{S3} + F_{S4} + F_{S5} = 0$$

$$Pn_{7.1} = -2397.46 \text{ kN} - 1383.31 \text{ kN} - 121.61 \text{ kN} + 256.73 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN}$$

$$Pn_{7.1} = -1836.70 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{7.1}$

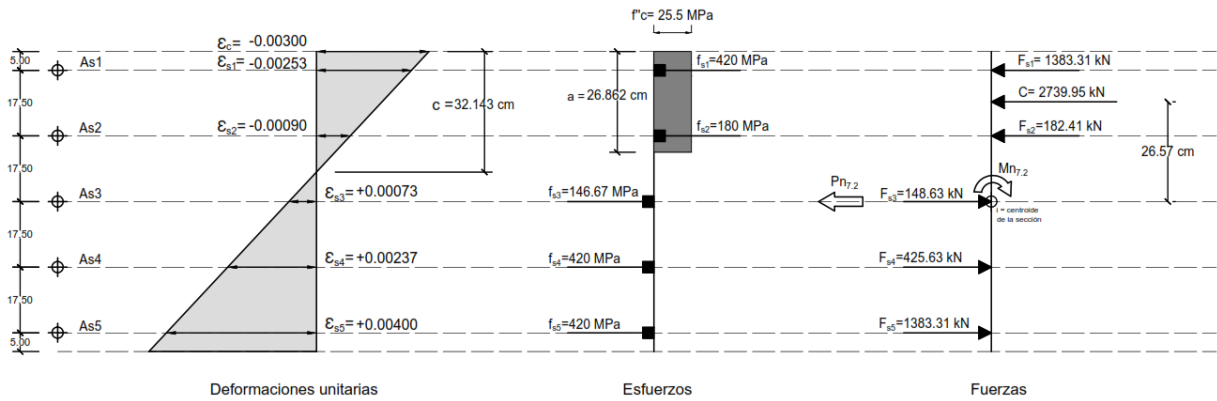
Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright$$

$$Mn_{7.1} = (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (2397.46 \text{ kN}) * (28.248 \text{ cm}) + (121.61) * (17.5 \text{ cm})$$

$$+ (425.63 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_{7.1} = 1741.31 \text{ kN} - m$$



○ Deformación unitaria 0.004

Figura 3.11 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 7.2. (Fuente autorípropi, 2019)

$$As_1 = 32.94 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5 = 32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{7.2}$

Por suma de fuerzas horizontales

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$-Pn_{7.2} - F_{s1} - C - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} = 0$$

$$Pn_{7.2} = -1383.31 \text{ kN} - 2739.95 \text{ kN} - 182.41 \text{ kN} + 148.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN}$$

$$Pn_{7.2} = -2348.1 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{7.2}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright$$

$$Mn_{7.2} = (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (2739.95 \text{ kN}) * (26.569 \text{ cm}) + (182.41 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) \\ + (425.63 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_{7.2} = 1802.7 \text{ kN} - m$$

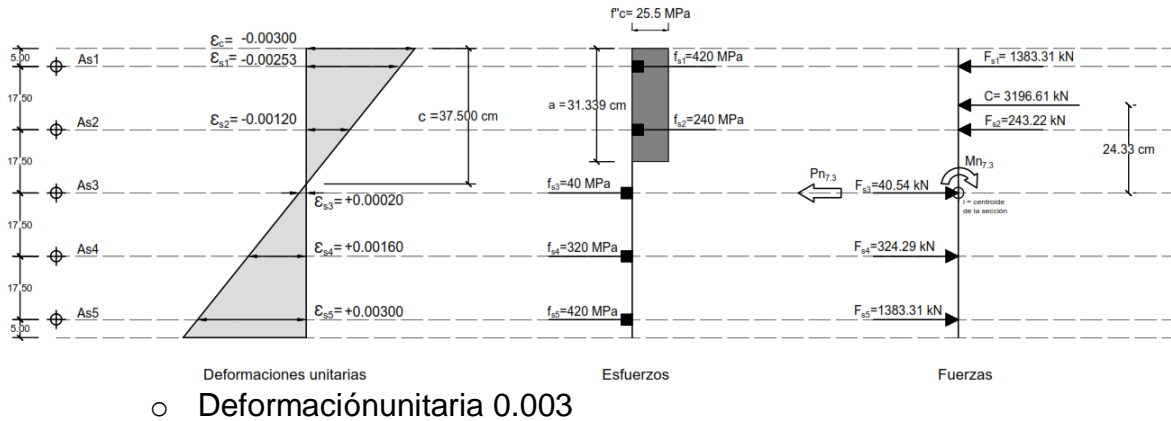


Figura 3.12 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 7.3. (Fuente autorípropi, 2019)

$$As_1 = 32.94 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2 \\ As_5 = 32.94 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{7.3}$

Por suma de fuerzas horizontales

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$-Pn_{7.3} - F_{s1} - C - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} = 0$$

$$Pn_{7.3} = -1383.31 \text{ kN} - 3196.61 \text{ kN} - 243.22 \text{ kN} + 40.54 \text{ kN} + 324.29 \text{ kN} + 1383.31 \text{ kN}$$

$$Pn_{7.3} = -3075 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{7.3}$

Por suma de momentos en el punto i



$$\sum M_i = 0$$

$$Mn_{7,3} = (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm}) + (3196.61 \text{ kN}) * (24.33 \text{ cm}) + (243.22 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) \\ + (324.29 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1383.31 \text{ kN}) * (35 \text{ cm})$$

$$Mn_{7,3} = 1845.38 \text{ kN} - m$$

El diagrama elaborado anteriormente fue con respecto al eje "x" de la sección transversal.

Hasta el momento solo hemos trabajado con valores nominales, mostrado en la figura 3.3, para efectos de diseño, es necesario aplicar factores de reducción que nos indican los códigos de construcción.

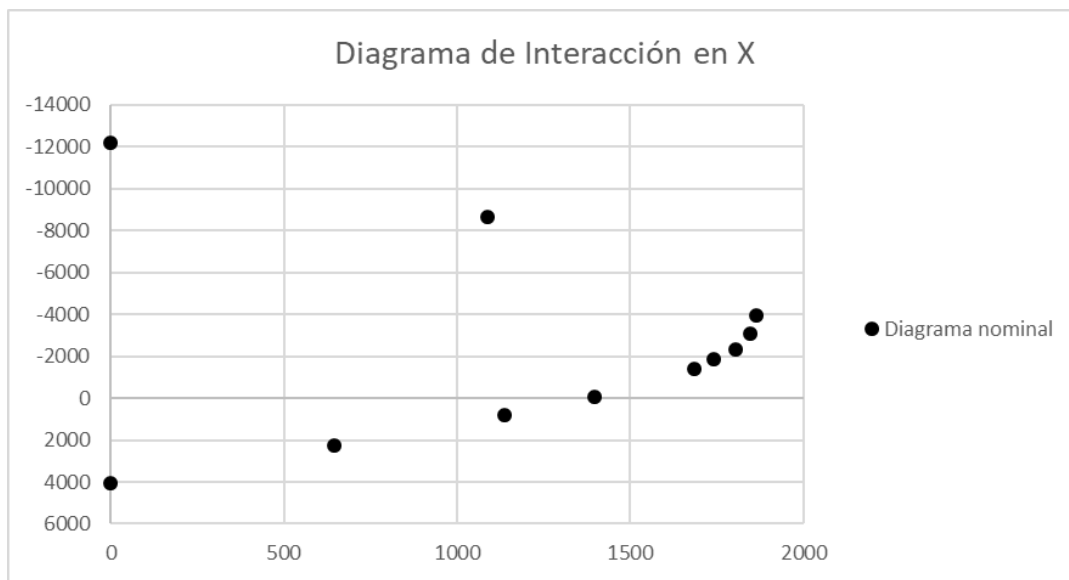


Figura 3.13 Diagrama de interacción nominal de columna rectangular en eje x. (Fuente autoría propia, 2019)

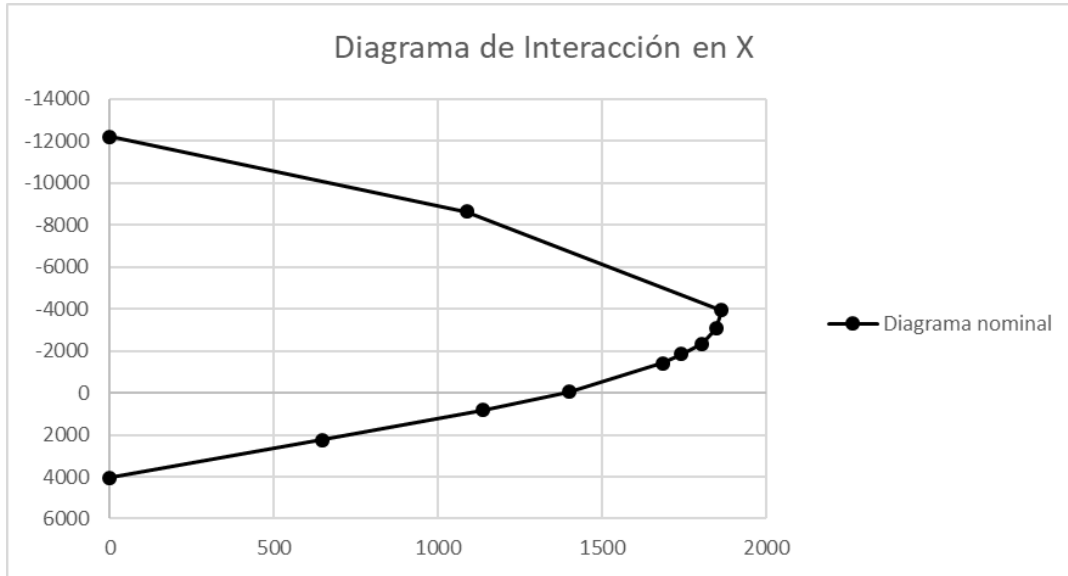


Figura 3.14 Diagrama de interacción nominal de columna rectangular en eje x. (Fuente autoría propia, 2019)

El código de construcción del ACI-318-19 utiliza los siguientes factores de reducción, e interpolaremos en la zona de transición como se muestra en la Tabla 3.1 del ACI 318-19.

Net tensile strain ϵ_t	Classification	ϕ			
		Type of transverse reinforcement			
		Spirals conforming to 25.7.3		Other	
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Compression-controlled	0.75	(a)	0.65	(b)
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < \epsilon_{ty} + 0.003$	Transition ^[1]	$0.75 + 0.15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.003)}$	(c)	$0.65 + 0.25 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0.003)}$	(d)
$\epsilon_t \geq \epsilon_{ty} + 0.003$	Tension-controlled	0.90	(e)	0.90	(f)

^[1]For sections classified as transition, it shall be permitted to use ϕ corresponding to compression-controlled sections.

Tabla 3.1 Factores de reducción de resistencia ACI-318-19. (ACI, 2019)

El factor de reducción fuera de la zona de transición se aplicará directamente al valor nominal, en el caso de sección controlada por compresión $\phi=0.65$, esto debido a que su falla es frágil, y $\phi=0.9$ para el caso de sección controlada por tensión, dado que es una falla dúctil.

A continuación, se calcularán las resistencias de diseño en dirección x de la columna rectangular, aplicando los factores de reducción del ACI-318-19.

- **Punto 1 (Compresión pura)**

$$Pn_1 = -12203.53 \text{ kN}$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.65$ afectado por 0.8 por encontrarse en la zona de compresión

$$0.8\phi Pn_1 = -6345.83 \text{ kN}$$

- **Punto 2 (Tensión Pura)**

$$Pn_2 = 4043.53 \text{ kN}$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.90$ por encontrarse en la zona de tensión

$$\phi Pn_2 = 3639.17 \text{ kN}$$

- **Punto 3 (Fallabalanceada)**

$$Pn_3 = -3930.97 \text{ kN}$$

$$Mn_3 = 1863.74 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.65$ por encontrarse en la zona de compresión

$$\phi Pn_3 = -2555.13 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_3 = 1211.43 \text{ kN} - m$$

- **Cálculo punto 4 (c = d)**

$$Pn_4 = -8627.79 \text{ kN}$$

$$Mn_4 = 1087.51 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.65$ por encontrarse en la zona de compresión

$$\phi Pn_4 = -5608.07 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_4 = 706.88 \text{ kN} - m$$

- **Punto 5 (c = r)**

$$Pn_5 = 2234 \text{ kN}$$

$$Mn_5 = 645.74 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.90$ por encontrarse en la zona de tensión

$$\phi Pn_5 = 2010.6 \text{ Tonf}$$

$$\phi Mn_5 = 581.17 \text{ kN} - m$$

- **Punto 6 (Flexión pura)**

$$Pn_6 = -57.48 \text{ kN}$$

$$Mn_6 = 1397.86 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.90$ por encontrarse en la zona de tensión

$$\phi Pn_6 = -51.73 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_6 = 1258.07 \text{ kN} - m$$

- **Punto 7 (Zona de transición)**

○ **Deformación unitaria 0.005**

$$Pn_{7,1} = -1836.7 \text{ kN}$$

$$Mn_{7,1} = 1741.31 \text{ kN} - m$$

Para los casos que se encuentren en la zona de transición, el factor de reducción de resistencia se obtendrá de la tabla 21.2.2 del ACI-318-19.

$$\phi = 0.65 + 0.25 \left[\frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{ty}}{0.003} \right]$$

Siendo ε_t la deformación unitaria de la última capa de acero, y ε_{ty} la deformación unitaria a la fluencia del acero.

$$\phi = 0.65 + 0.25 \left[\frac{0.005 - 0.0021}{0.003} \right]$$

$$\phi = 0.89$$

Utilizando $\phi=0.89$ como factor de reducción de resistencia.

$$\phi Pn_{7,1} = -1637.72 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_{7,1} = 1552.67 \text{ kN} - m$$

○ **Deformación unitaria 0.004**

$$Pn_{7,2} = -2348.1 \text{ kN}$$

$$Mn_{7,2} = 1802.7 \text{ kN} - m$$

Calculando el factor de reducción de resistencia

$$\phi = 0.65 + 0.25 \left[\frac{0.004 - 0.0021}{0.003} \right]$$

$$\phi = 0.808$$

Utilizando $\phi=0.808$ como factor de reducción de resistencia.

$$\phi Pn_{7,2} = -1898.05 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_{7,2} = 1457.18 \text{ kN} - m$$

○ **Deformación unitaria 0.003**

$$Pn_{7.3} = -3075 \text{ kN}$$

$$Mn_{7.3} = 1845.38 \text{ kN} - m$$

Calculando el factor de reducción de resistencia

$$\phi = 0.65 + 0.25 \left[\frac{0.003 - 0.0021}{0.003} \right]$$

$$\phi = 0.725$$

Utilizando $\phi=0.725$ como factor de reducción de resistencia.

$$\phi Pn_{7.3} = -2229.38 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_{7.3} = 1337.90 \text{ kN} - m$$

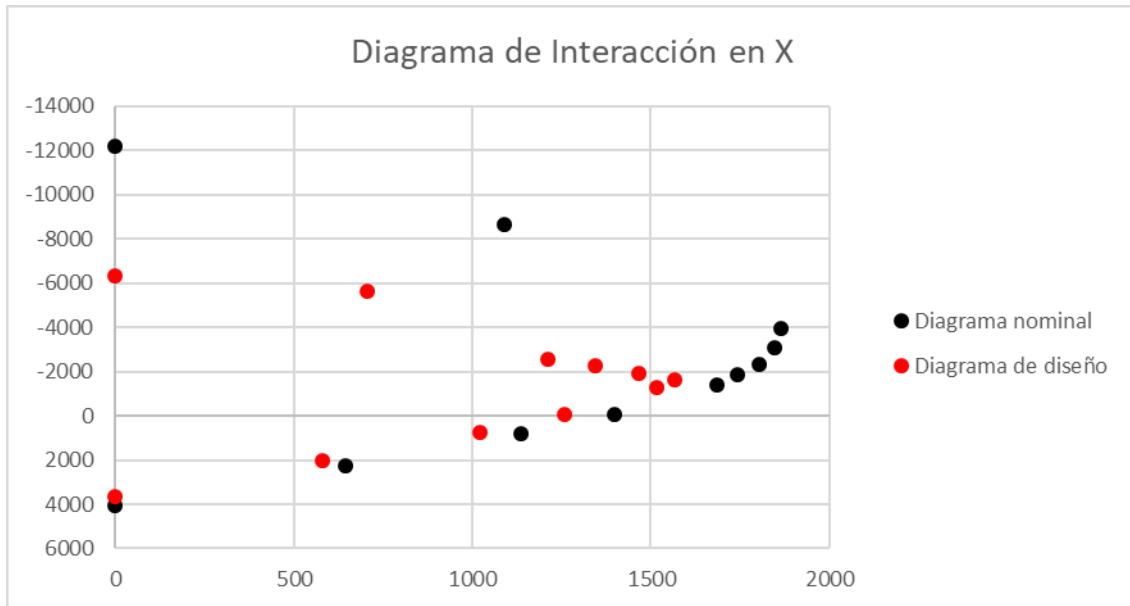


Figura 3.15 Diagrama de interacción de columna rectangular en eje x. (Fuente autoría propia, 2019)

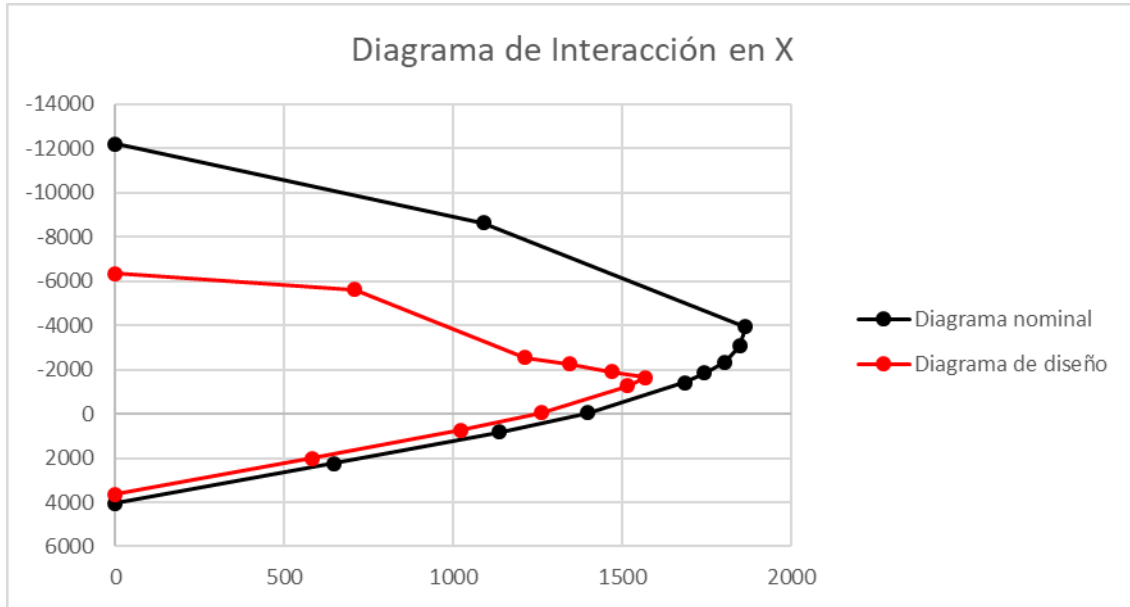


Figura 3.16 Diagrama de interacción de columna rectangular en eje x. (Fuente autoría propia, 2019)

3.5 Columna circular.

Graficar el interacción x de la siguiente

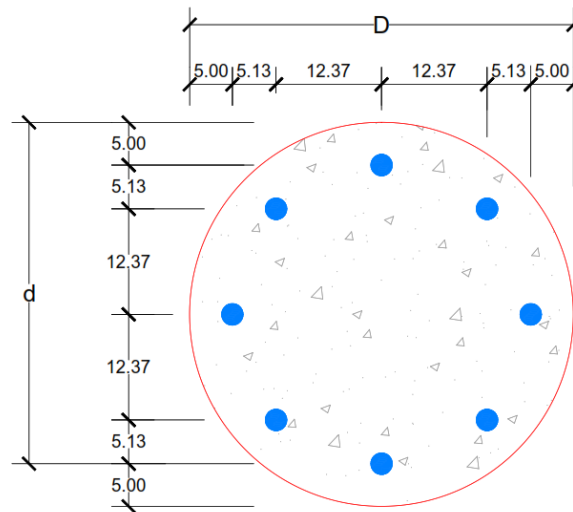


diagrama de alrededor del eje columna.

Figura 3.17 Esquema de columna circular. (Fuente autoría propia, 2019)

Datos:

$$f'_c = 25 \text{ MPa} \quad A_g = \pi * r^2$$

$$f_y = 420 \text{ MPa} \quad 8 \text{ varillas } \# 8$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa} \quad A_{st} = 40.537 \text{ cm}^2$$

- **Cálculo punto 1 (Compresión pura)**

$$f'_c = 0.85 * 25 \text{ MPa} = 21.25 \text{ MPa}$$

$$P_{n_1} = -[f'_c * A_g + f_y * A_{st}]$$

$$P_{n_1} = -[(21.25 \text{ MPa}) * (\pi * (0.225 \text{ m})^2) + (420 \text{ MPa}) * (40.537 \text{ cm}^2)]$$

$$P_{n_1} = -5.0822 \text{ MN}$$

$$P_{n_1} = -5082.22 \text{ kN}$$

- **Cálculo punto 2 (Tensión Pura)**

$$P_{n_2} = f_y * A_{st}$$

$$P_{n_2} = 420 \text{ MPa} * 40.537 \text{ cm}^2$$

$$P_{n_2} = 1.7025 \text{ MN}$$

$$P_{n_2} = 1702.54 \text{ kN}$$

- **Cálculo punto 3 (Fallabalanceada)**

$$c = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) * d \quad c = \left(\frac{0.003}{0.003 + 0.0021} \right) * 40 \text{ cm} = 23.529 \text{ cm}$$

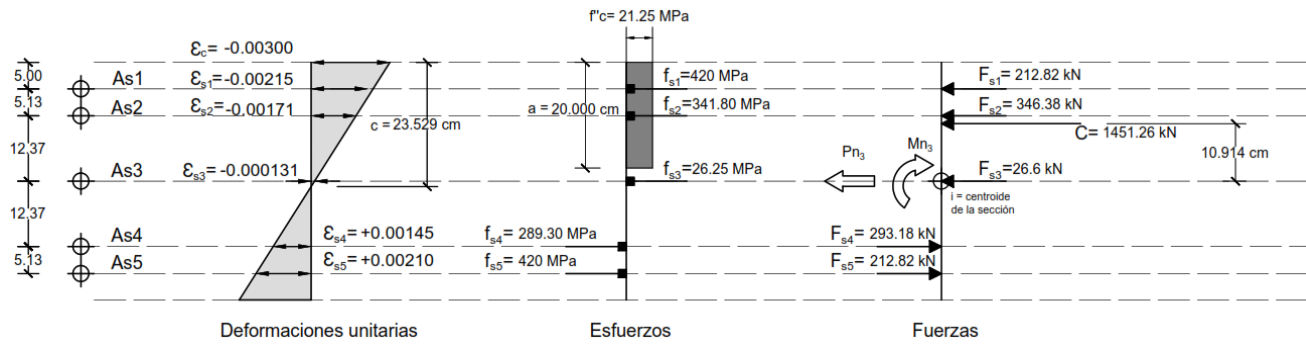


Figura 3.18 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 3. (Fuente autoríapropia, 2019)

$$As_1 = 5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5 = 5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo P_{n3}

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \longrightarrow$$

$$P_{n3} = -F_{s1} - F_{s2} - F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$P_{n3} = -212.82 \text{ kN} - 346.38 \text{ kN} - 26.60 \text{ kN} + 293.18 \text{ kN} + 212.82 \text{ kN} - 1451.26 \text{ kN}$$

$$P_{n3} = -1531.07 \text{ kN}$$

- Cálculo M_{n3}

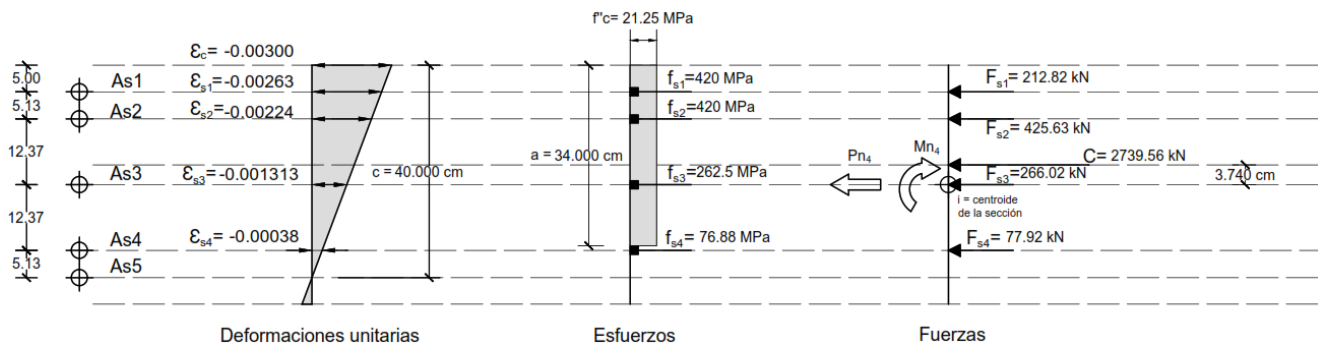
Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright^+$$

$$M_{n3} = (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (346.38 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (1451.26 \text{ kN}) * (10.914 \text{ cm})$$

$$+ (293.18 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$M_{n3} = 312.02 \text{ kN} - m$$



- **Cálculopunto 4 (c = d)**

Figura 3.19 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 4. (Fuente autoríapropia, 2019)

$$As_1 = 5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5 = 5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo Pn_4

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \longrightarrow$$

$$Pn_4 = -F_{s1} - F_{s2} - F_{s3} - F_{s4} - C$$

$$Pn_4 = -212.82 \text{ kN} - 425.63 \text{ kN} - 266.02 \text{ kN} - 77.92 \text{ kN} - 2739.56 \text{ kN}$$

$$Pn_4 = -3721.95 \text{ kN}$$

- Cálculo Mn_4

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright$$

$$Mn_4 = (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (2739.56 \text{ kN}) * (3.74 \text{ cm})$$

$$+ (77.92 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm})$$

$$Mn_4 = 182.74 \text{ kN} - m$$

- **Cálculo punto 5 (c = r)**

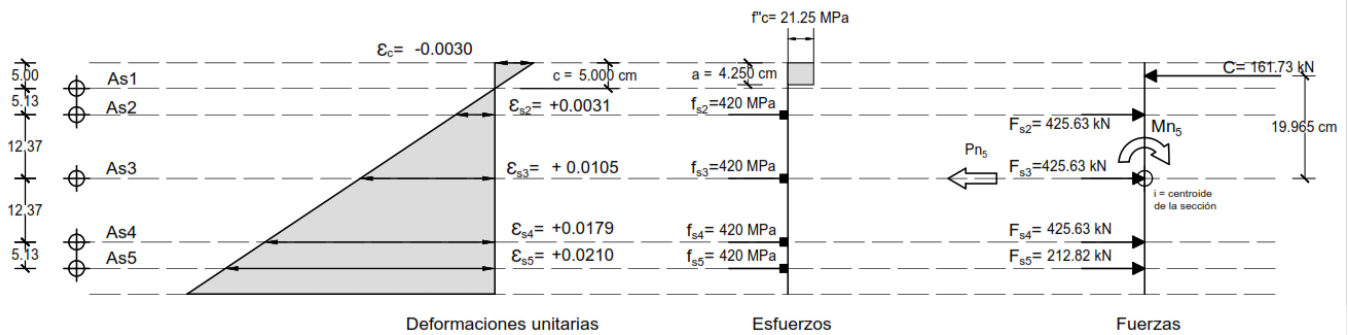


Figura 3.20 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 5. (Fuente autoríapropia, 2019)

$$As_1 = 5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5 = 5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo Pn_5

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$Pn_5 = F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$Pn_5 = -425.63 \text{ kN} - 425.63 \text{ kN} - 425.63 \text{ kN} - 212.82 \text{ kN} - 161.73 \text{ kN}$$

$$Pn_5 = 1328.00 \text{ kN}$$

- Cálculo Mn_5

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright$$

$$Mn_5 = (161.73 \text{ kN}) * (19.965 \text{ cm}) - (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm})$$

$$+ (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_5 = 69.53 \text{ kN} - m$$

- **Cálculo punto 6 (Flexión pura)**

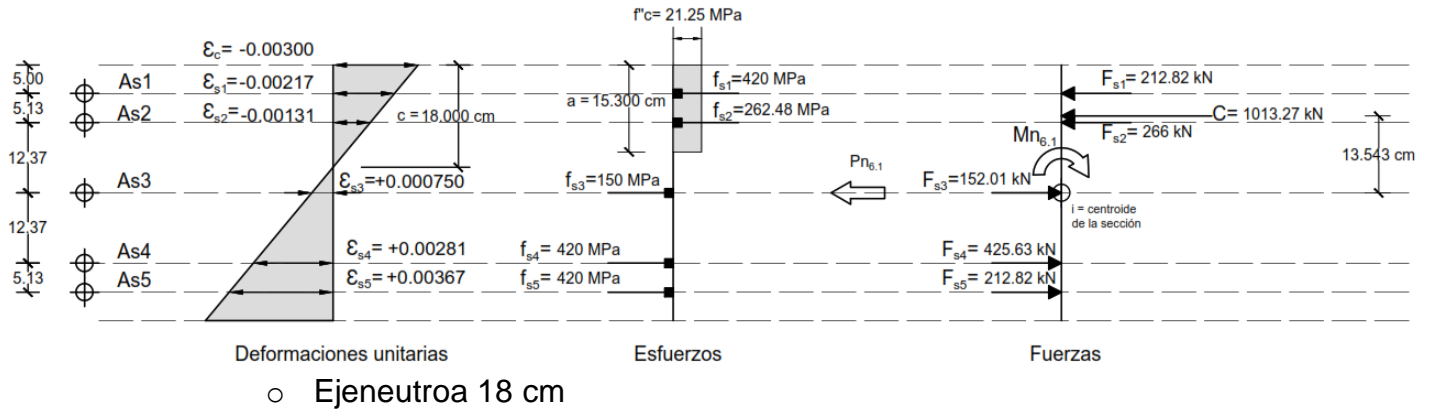


Figura 3.21 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 6.1.(Fuente autoría propia, 2019)

$$As_1=5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4=10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5=5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $P_{n6.1}$

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \longrightarrow$$

$$P_{n6.1} = -F_{s1} - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$P_{n6.1} = -212.82 \text{ kN} - 266 \text{ kN} + 152.01 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 212.82 \text{ kN} - 1013.27 \text{ kN}$$

$$P_{n6.1} = -701.63 \text{ kN}$$

- Cálculo $M_{n6.1}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright^+$$

$$M_{n6.1} = (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1013.27 \text{ kN}) * (13.543 \text{ cm}) + (266 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm})$$

$$+ (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_{6.1} = 297.30 \text{ kN} - m$$

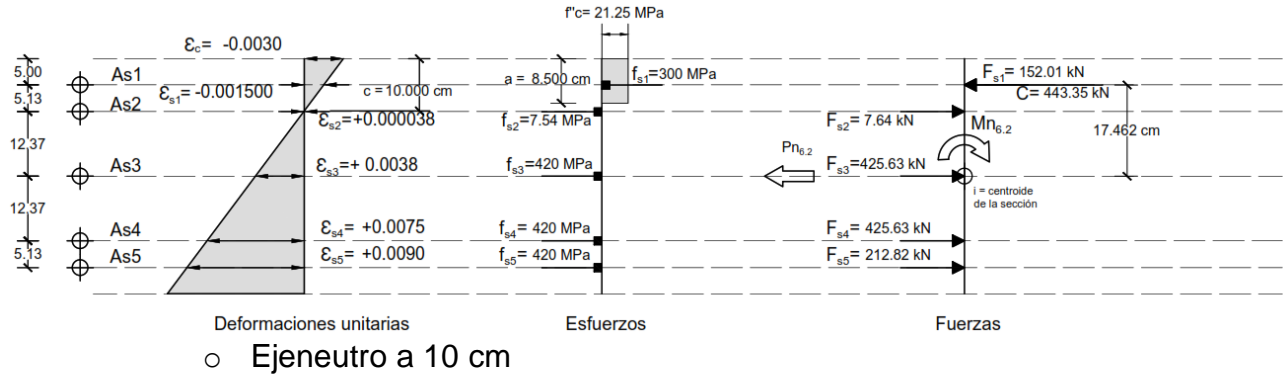


Figura 3.22 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 6.2.(Fuente autoríapropia, 2019)

$$As_1=5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4=10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5=5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{6.2}$

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$Pn_{6.2} = -F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$Pn_{6.2} = -152.01 \text{ kN} + 7.64 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 212.82 \text{ kN} - 443.35 \text{ kN}$$

$$Pn_{6.2} = 476.36 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{6.2}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \curvearrowright +$$

$$Mn_{6.2} = (152.01 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (443.35 \text{ kN}) * (17.462 \text{ cm}) + (7.64 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_{6.2} = 192.99 \text{ kN} - m$$

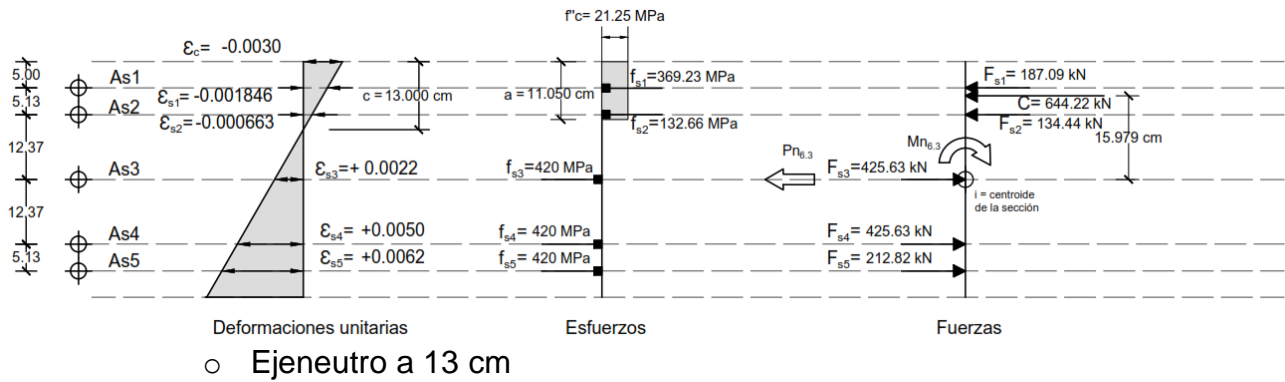


Figura 3.23 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 6.3. (Fuente autoría propia, 2019)

$$As_1=5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3=10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4=10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5=5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{6.3}$

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$Pn_{6.3} = -F_{s1} - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$Pn_{6.3} = -187.09 \text{ kN} - 134.44 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 212.82 \text{ kN} - 644.22 \text{ kN}$$

$$Pn_{6.3} = 98.34 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{6.3}$

Por suma de momentos en el punto i



$$\sum M_i = 0$$

$$Mn_{6,3} = (187.09 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (644.22 \text{ kN}) * (15.979 \text{ cm}) + (134.44 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) \\ + (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_{6,3} = 242.23 \text{ kN} - m$$

- **Cálculo punto 7 (Zona de transición)**

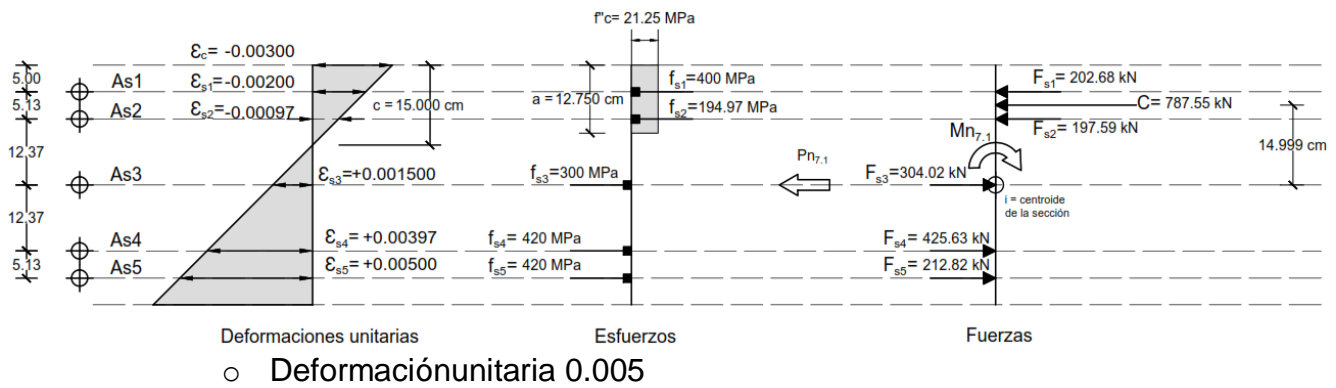


Figura 3.24 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 7.1. (Fuente autoría propia, 2019)

$$As_1 = 5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2 \\ As_5 = 5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{7,1}$

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \rightarrow$$

$$Pn_{7,1} = -F_{s1} - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$Pn_{7,1} = -202.68 \text{ kN} - 197.59 \text{ kN} + 304.02 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 212.82 \text{ kN} - 787.55 \text{ kN}$$

$$Pn_{7,1} = -245.35 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{7,1}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \quad \curvearrowright^+$$

$$Mn_{7,1} = (202.68 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (787.55 \text{ kN}) * (14.999 \text{ cm}) + (197.59 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) \\ + (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_{7,1} = 267.95 \text{ kN} - m$$

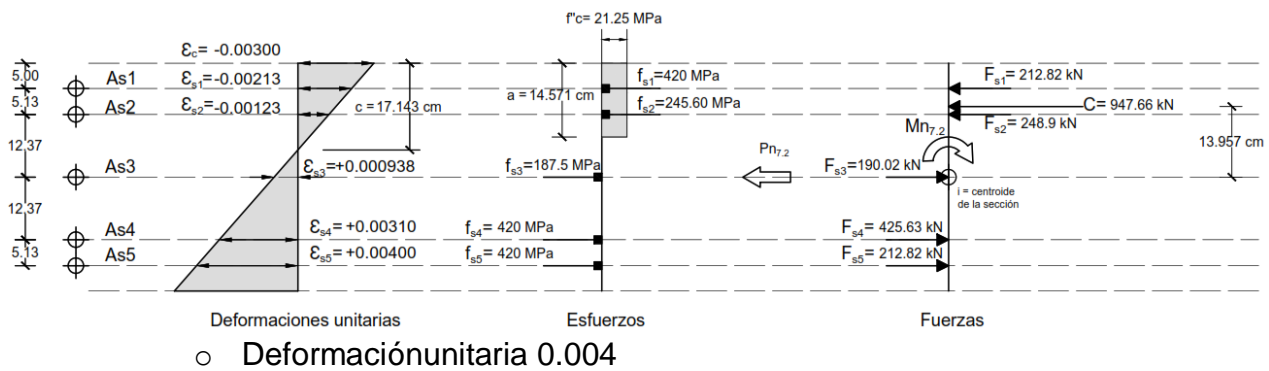


Figura 3.25 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 7.2. (Fuente autoría propia, 2019)

$$As_1 = 5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2$$

$$As_5 = 5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{7,2}$

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \quad \rightarrow^+$$

$$Pn_{7,2} = -F_{s1} - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$Pn_{7,2} = -212.82 \text{ kN} - 248.90 \text{ kN} + 190.02 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 212.82 \text{ kN} - 947.66 \text{ kN}$$

$$Pn_{7,2} = -580.91 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{7.2}$

Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \quad \curvearrowright^+$$

$$Mn_{7.2} = (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (947.66 \text{ kN}) * (13.957 \text{ cm}) + (248.90 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) \\ + (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_{7.2} = 290.22 \text{ kN} - m$$

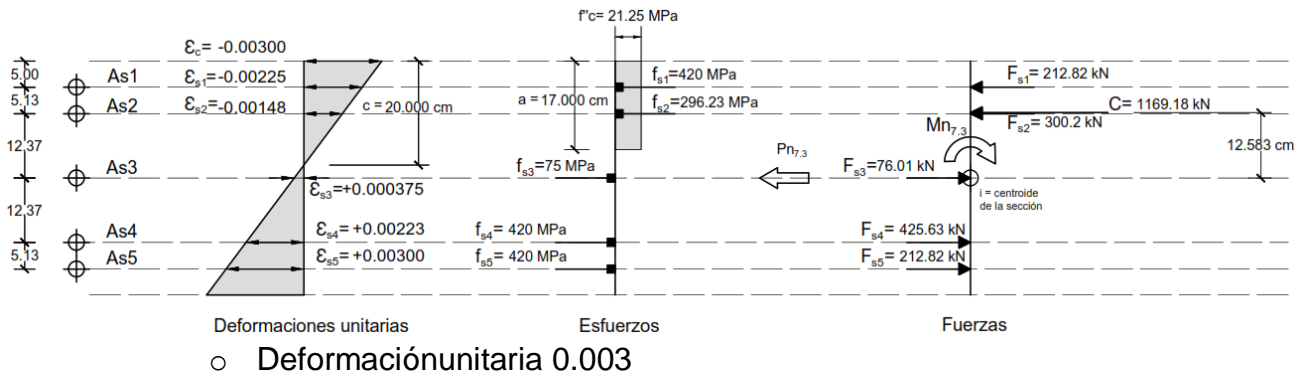


Figura 3.26 Diagrama de deformaciones, esfuerzos y fuerzas para punto 7.3. (Fuente autoría propia, 2019)

$$As_1 = 5.0671 \text{ cm}^2 \quad As_2 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_3 = 10.1341 \text{ cm}^2 \quad As_4 = 10.1341 \text{ cm}^2 \\ As_5 = 5.0671 \text{ cm}^2$$

- Cálculo $Pn_{7.3}$

Por suma de fuerzas

$$\sum F_H = 0 \quad \rightarrow^+$$

$$Pn_{7.3} = -F_{s1} - F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} - C$$

$$Pn_{7.3} = -212.82 \text{ kN} - 300.20 \text{ kN} + 76.01 \text{ kN} + 425.63 \text{ kN} + 212.82 \text{ kN} - 1169.18 \text{ kN}$$

$$Pn_{7.3} = -967.75 \text{ kN}$$

- Cálculo $Mn_{7,3}$

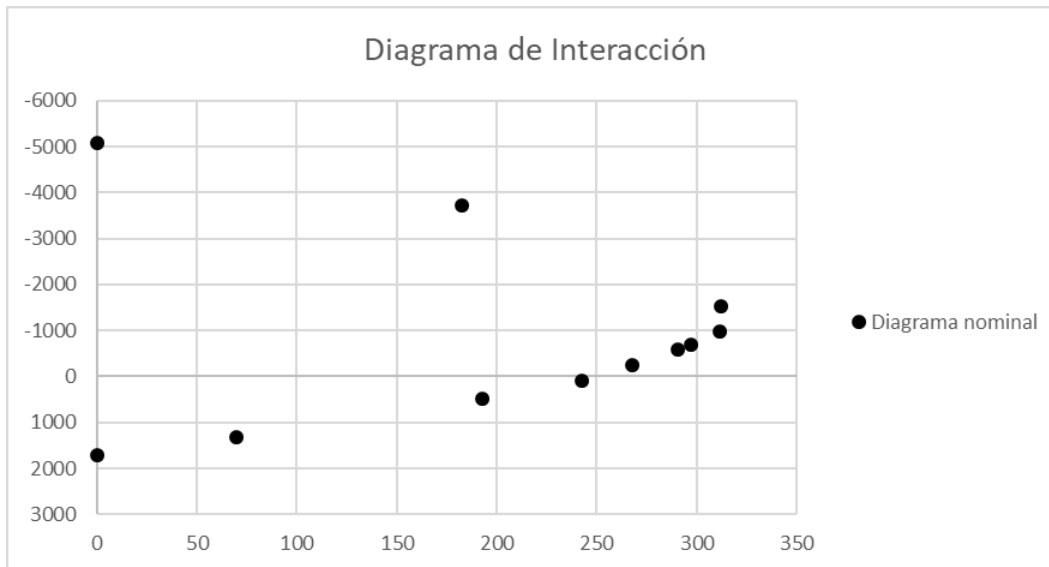
Por suma de momentos en el punto i

$$\sum M_i = 0 \quad \curvearrowright^+$$

$$Mn_{7,3} = (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm}) + (1169.18 \text{ kN}) * (12.583 \text{ cm}) + (300.20 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) \\ + (425.63 \text{ kN}) * (12.374 \text{ cm}) + (212.82 \text{ kN}) * (17.5 \text{ cm})$$

$$Mn_{7,3} = 311.43 \text{ kN} - m$$

En la figura 3.36 se presenta los valores nominales previamente obtenidos para la columna circular, en el caso de columnas circulares al tratarse de una figura geométrica simétrica, el diagrama de interacción es igual para cualquier eje, por lo



que no es necesario calcularlo nuevamente.

Figura 3.27 Diagrama de interacción de columna circular. (Fuente autoría propia, 2019)

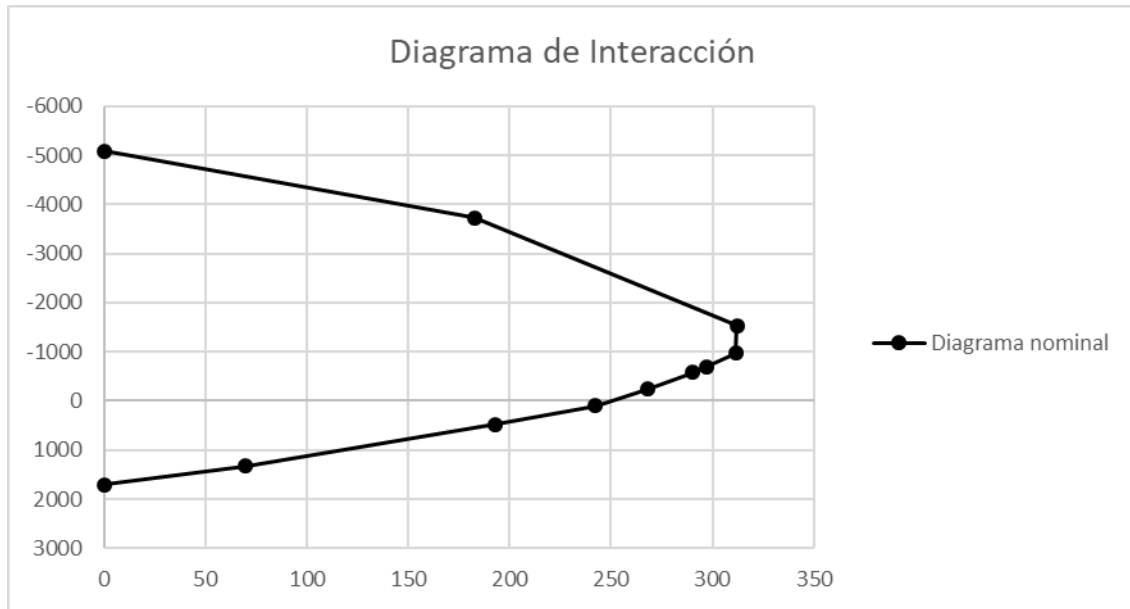


Figura 3.28 Diagrama de interacción de columna circular. (Fuente autoría propia, 2019)

A continuación, se calcularán las resistencias de diseño en dirección y de la columna rectangular, aplicando los factores de reducción del ACI-318-19.

- **Punto 1 (Compresión pura)**

$$Pn_1 = -5082.22 \text{ kN}$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.75$ afectado por 0.85 por encontrarse en la zona de compresión y tratarse de una columna circular.

$$0.85\phi Pn_1 = -3239.92 \text{ kN}$$

- **Punto 2 (Tensión Pura)**

$$Pn_2 = 1702.54 \text{ kN}$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.90$ por encontrarse en la zona de tensión.

$$\phi Pn_2 = 1532.28 \text{ kN}$$

- **Punto 3 (Fallabalanceada)**

$$Pn_3 = -1531.07 \text{ kN}$$

$$Mn_3 = 312.02 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.75$ por encontrarse en la zona de compresión.

$$\phi Pn_3 = -1148.30 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_3 = 234.02 \text{ kN} - m$$

- **Cálculo punto 4 (c = d)**

$$Pn_4 = -3721.95 \text{ kN}$$

$$Mn_4 = 182.74 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.75$ por encontrarse en la zona de compresión.

$$\phi Pn_4 = -2791.46 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_4 = 137.06 \text{ kN} - m$$

- **Punto 5 (c = r)**

$$Pn_5 = 1328.00 \text{ kN}$$

$$Mn_5 = 69.53 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.90$ por encontrarse en la zona de tensión.

$$\phi Pn_5 = 1195.19 \text{ Tonf}$$

$$\phi Mn_5 = 62.58 \text{ kN} - m$$

- **Punto 6 (Flexión pura)**

$$Pn_6 = 98.34 \text{ kN}$$

$$Mn_6 = 242.23 \text{ kN} - m$$

Aplicando el factor de reducción a resistencia $\phi=0.90$ por encontrarse en la zona de tensión.

$$\phi Pn_6 = 88.50 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_6 = 218.00 \text{ kN} - m$$

- **Punto 7 (Zona de transición)**

- **Deformación unitaria 0.005**

$$Pn_{7.1} = -245.35 \text{ kN}$$

$$Mn_{7.1} = 267.95 \text{ kN} - m$$

Para los casos que se encuentren en la zona de transición, el factor de reducción de resistencia se obtendrá de la tabla 21.2.2 del ACI-318-19.

$$\phi = 0.75 + 0.15 \left[\frac{\epsilon_t - \epsilon_{ty}}{0.003} \right]$$

Siendo ϵ_t la deformación unitaria de la última capa de acero, y ϵ_{ty} la deformación unitaria a la fluencia del acero.

$$\phi = 0.75 + 0.15 \left[\frac{0.005 - 0.0021}{0.003} \right]$$

$$\phi = 0.895$$

Utilizando $\phi=0.895$ como factor de reducción de resistencia.

$$\phi Pn_{7.1} = -219.59 \text{ kN}$$

$$\phi Mn_{7.1} = 239.82 \text{ kN} - m$$

○ **Deformación unitaria 0.004**

$$P_{n_{7.2}} = -580.91 \text{ kN}$$

$$M_{n_{7.2}} = 290.22 \text{ kN} - m$$

Calculando el factor de reducción de resistencia

$$\phi = 0.75 + 0.15 \left[\frac{0.004 - 0.0021}{0.003} \right]$$

$$\phi = 0.845$$

Utilizando $\phi=0.845$ como factor de reducción de resistencia.

$$\phi P_{n_{7.2}} = -490.87 \text{ kN}$$

$$\phi M_{n_{7.2}} = 245.24 \text{ kN} - m$$

○ **Deformación unitaria 0.003**

$$P_{n_{7.3}} = -967.75 \text{ kN}$$

$$M_{n_{7.3}} = 311.43 \text{ kN} - m$$

Calculando el factor de reducción de resistencia

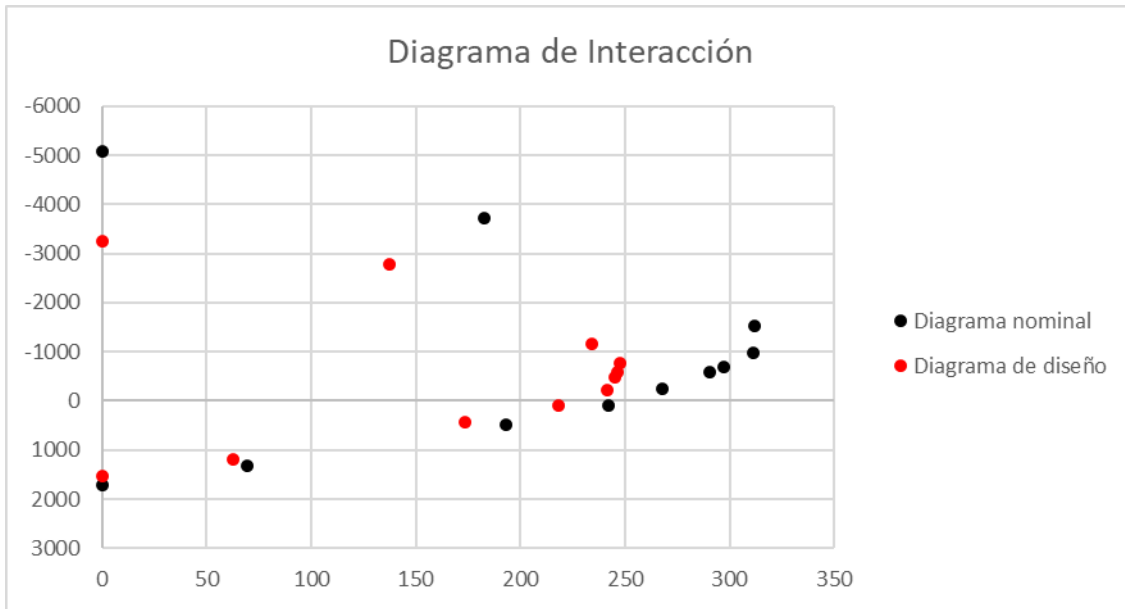
$$\phi = 0.75 + 0.15 \left[\frac{0.003 - 0.0021}{0.003} \right]$$

$$\phi = 0.795$$

Utilizando $\phi=0.795$ como factor de reducción de resistencia.

$$\phi P_{n_{7.3}} = -769.36 \text{ kN}$$

$$\phi M_{n_{7.3}} = 247.59 \text{ kN} - m$$



3.6 Software DIIN.

El software DIIN para columnas circulares se realizó como continuación del trabajo realizado por el M. I. Martín Castillo Flores acerca de columnas rectangulares, el cuál utiliza como herramienta de apoyo para las clases de Diseño de estructuras de concreto II en la facultad de ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

El software DIIN para columnas rectangulares se programó con ayuda de Excel y tiene la capacidad de desarrollar diagramas de interacción nominales y de diseño “x” y “y” de columnas rectangulares de hasta 50 capas de acero utilizando los códigos de construcción, ACI-318-14, NTC-2017 y NTC-2004. Además, es capaz de revisar 50 combinaciones de carga a flexión biaxial por medio del método de la carga recíproca.

Por lo anterior, se decidió mantener el mismo formato para el de columnas circulares, que tenga las mismas capacidades y utilice los mismos códigos de construcción, agregando para este trabajo el ACI-318-19.

3.7 Interfaz Gráfica de Usuario.

El software DIIN fue concebido como una herramienta que le ayude al alumno a comprender mejor el desarrollo de los diagramas de interacción de columnas y además de apoyo al profesor de la asignatura de Diseño de elementos de concreto, para que exista un mejor aprovechamiento del curso y sea posible abordar los códigos que existen para el diseño de columnas de concreto reforzado. Por lo tanto, es necesario que el software sea amigable al usuario y fácil de entender. En la figura 3.31 se puede observar el área donde se introducen los datos de entrada, un esquema representativo de la sección, y las combinaciones de cargas a las que estará sometida la columna.

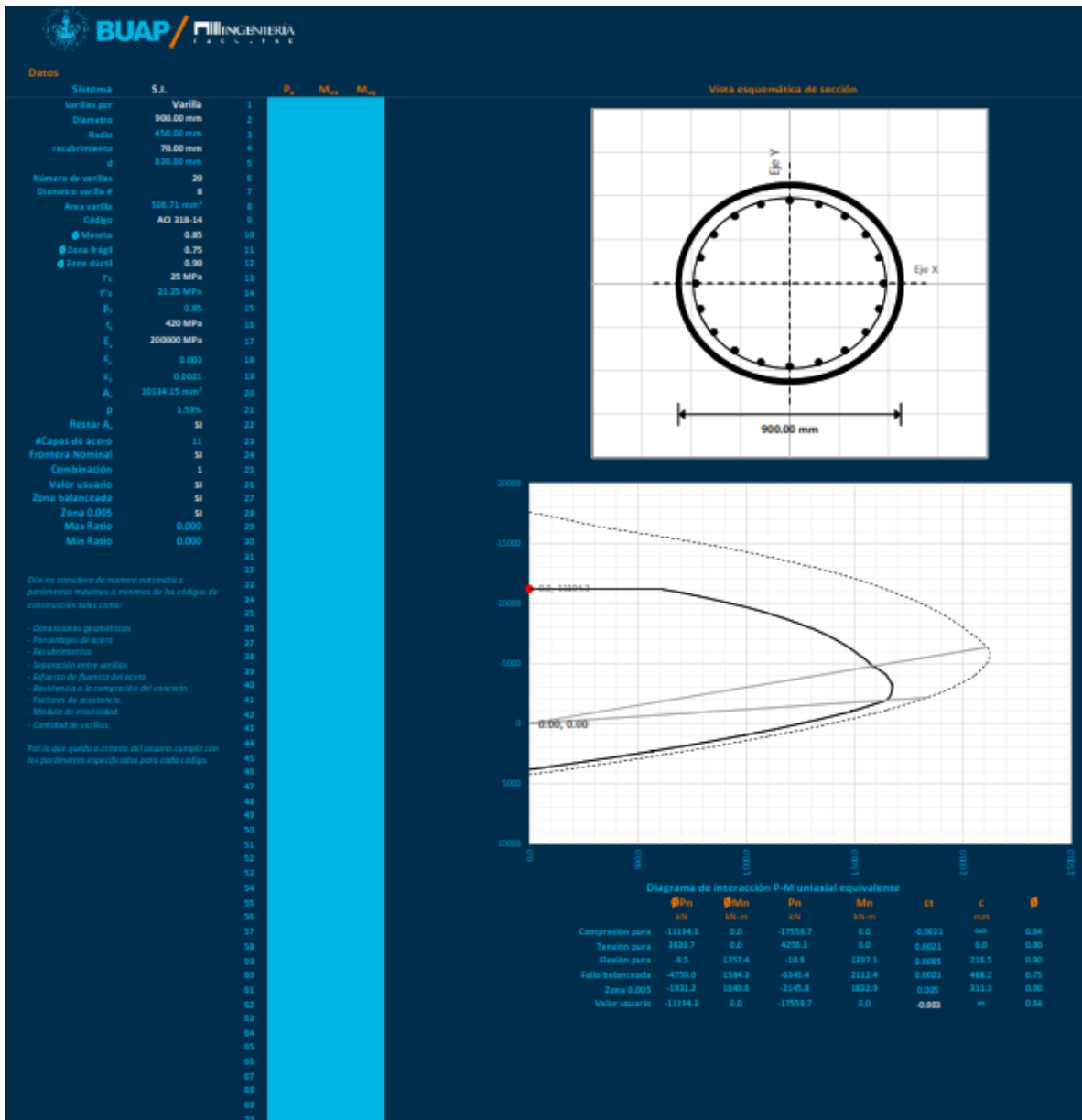


Figura 3.31 Datos de entrada del software DIIN para columnas circulares. (Fuente autoría propia, 2019)

Posteriormente en la Figura 3.32 y 3.33 se muestran los diagramas de interacción, tanto nominales como de diseño, para los ejes “x” y “y”, además una tabla donde se presentan algunos puntos de interés para la elaboración del diagrama y un punto a una distancia de eje neutro definido por el usuario.

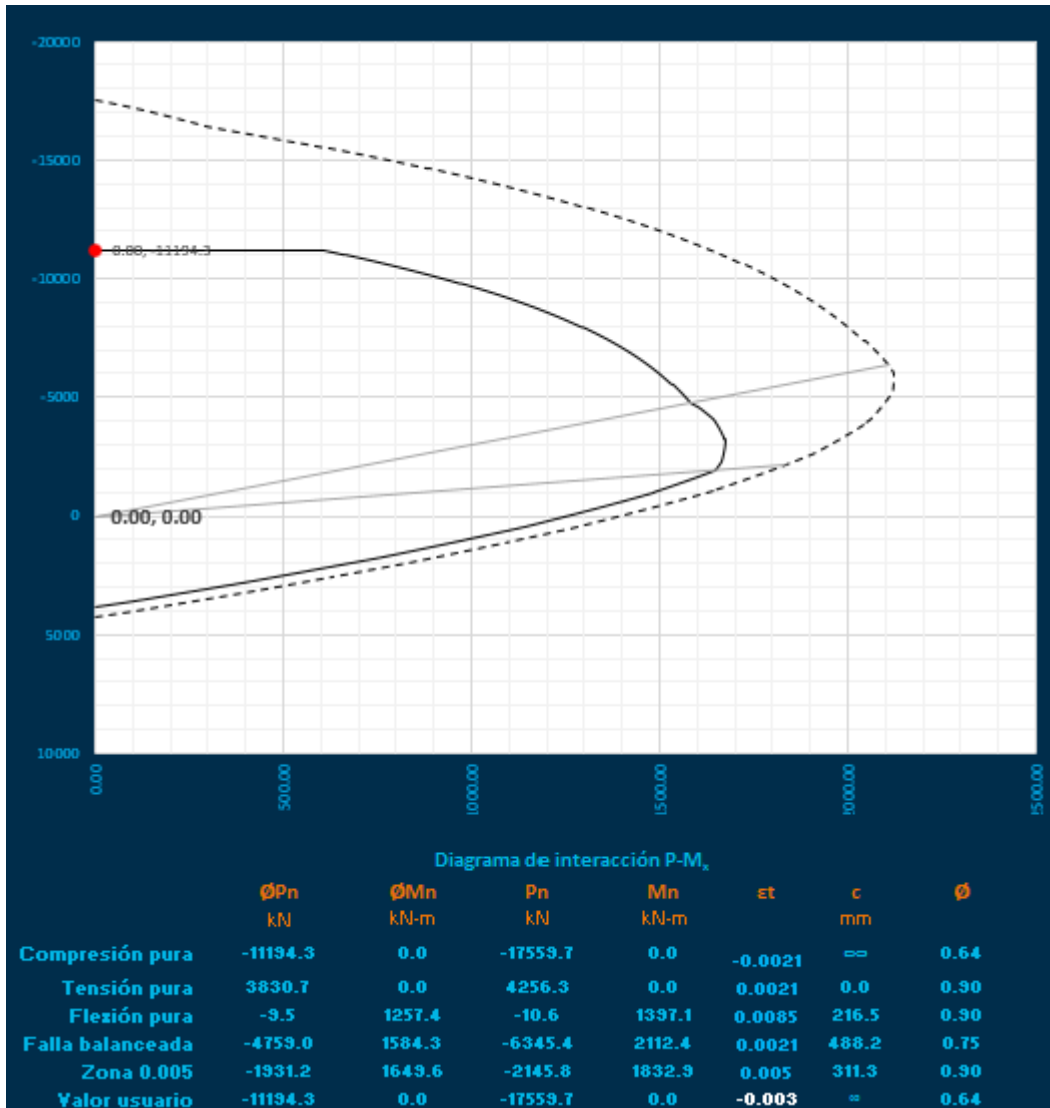


Figura 3.32 Diagrama de interacción eje x. (Fuente autoría propia, 2019)

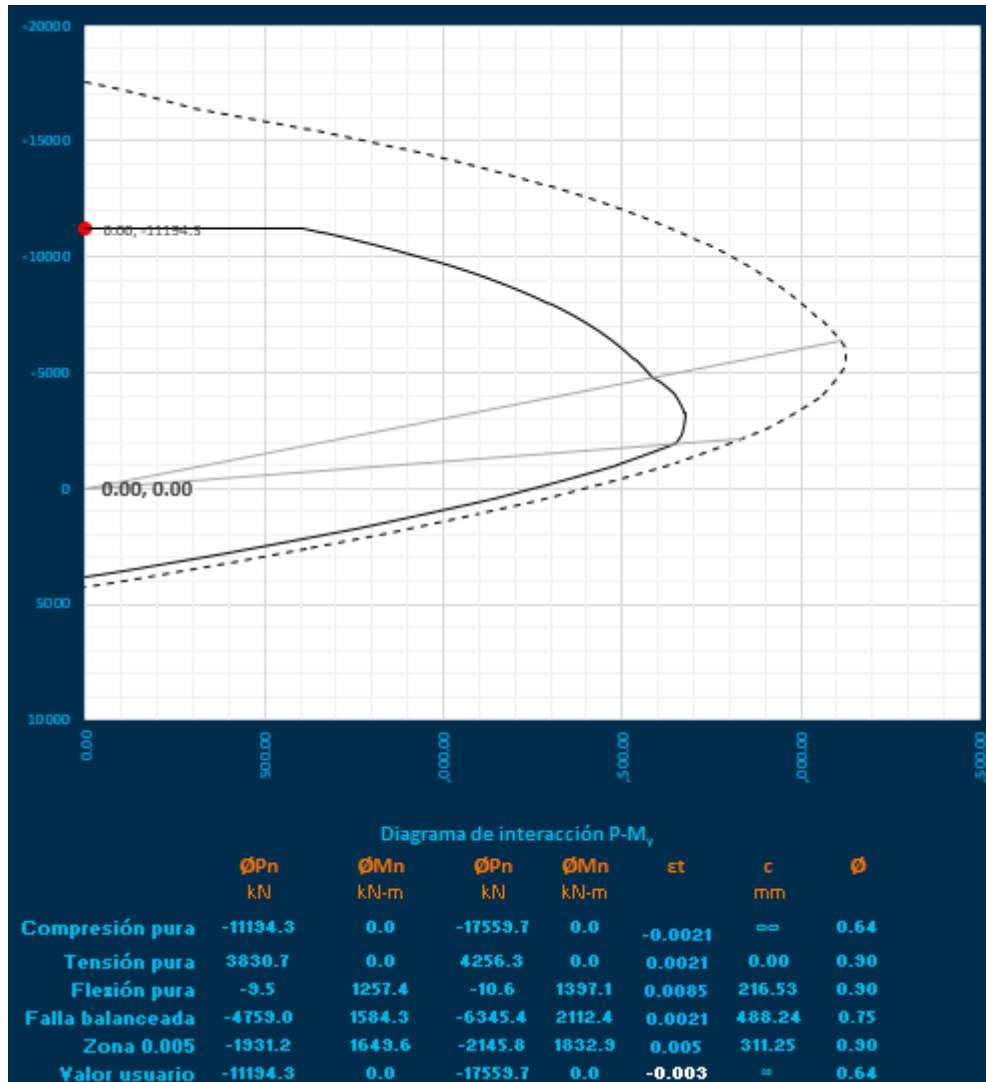


Figura 3.33 Diagrama de interacción eje y. (Fuente autoría propia, 2019)

Las columnas circulares tienen simetría polar y así la misma capacidad última en todas las direcciones. Por consiguiente, el proceso de diseño es el mismo, independientemente de las direcciones de los momentos. Si existe flexión respecto a los ejes x y y, el momento biaxial puede calcularse combinando los dos momentos o sus excentricidades (Mc Cormac & Brown, 2011).

Por lo tanto, el software DIIN cuenta con un diagrama de interacción uniaxial equivalente, el cual muestra la combinación a flexión biaxial combinando sus excentricidades. El propósito de esta gráfica es mostrar las combinaciones equivalentes a flexión biaxial y con esos valores calcular la eficiencia de la columna a tales acciones de carga.

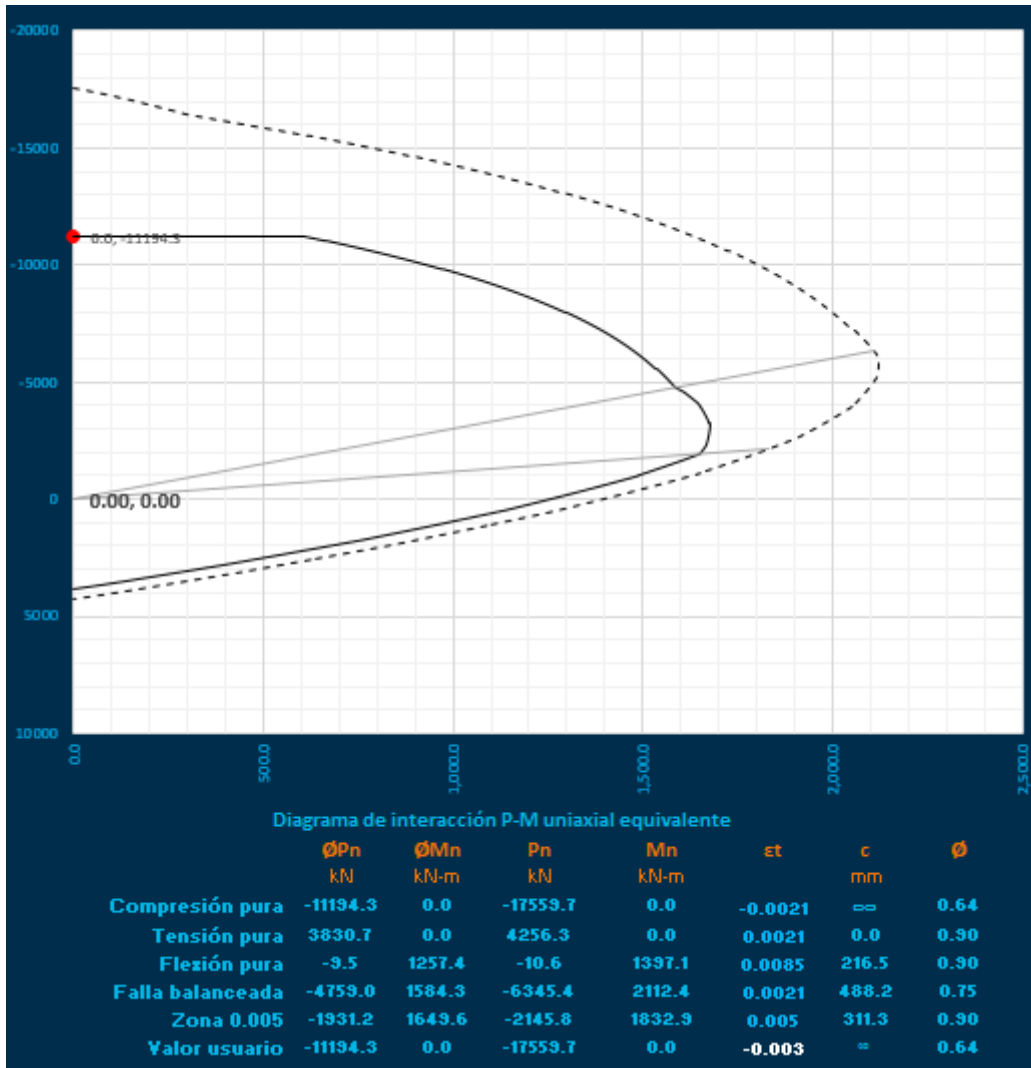


Figura 3.34 Diagrama de interacción uniaxial equivalente. (Fuente autoría propia, 2019)

El software DIIN tiene la capacidad de evaluar 70 combinaciones y mostrará la eficiencia de la columna a las acciones correspondientes, además de presentar su capacidad máxima de compresión con ese grupo de acciones.



Figura 3.35 Tabla de elementos mecánicos de la columna. (Fuente autoría propia, 2019)

	P_u	M_{ux}	M_{uy}	Ratio
1	6.22E+00	7.51E+02	1.54E+03	0.554
2	6.98E+01	3.40E+02	5.24E+02	0.207
3	-5.22E+02	-2.64E+02	1.38E+03	0.418
4	-4.59E+02	-7.45E+01	4.74E+02	0.137
5	-1.98E+03	2.14E+02	-1.40E+03	0.408
6	-1.91E+03	1.60E+02	-4.32E+02	0.165
7	-2.51E+03	-8.01E+02	-1.56E+03	0.507
8	-2.44E+03	-2.55E+02	-4.83E+02	0.201
9	-7.13E+01	1.75E+03	7.00E+02	0.603
10	-7.70E+00	7.60E+02	2.48E+02	0.258
11	-1.83E+03	-1.64E+03	1.57E+02	0.469
12	-1.77E+03	-6.21E+02	7.98E+01	0.202
13	-6.66E+02	1.59E+03	-1.81E+02	0.472
14	-6.03E+02	7.06E+02	-3.86E+01	0.201
15	-2.43E+03	-1.80E+03	-7.24E+02	0.553
55	-2.60E+03	-2.64E+02	-2.05E+03	0.591
56	-2.54E+03	-7.45E+01	-6.33E+02	0.225
57	-4.23E+01	1.59E+03	8.45E+02	0.578
58	2.13E+01	7.06E+02	2.93E+02	0.249
59	-1.80E+03	-1.80E+03	3.02E+02	0.519
60	-1.74E+03	-6.75E+02	1.25E+02	0.217
61	-6.95E+02	1.75E+03	-3.26E+02	0.528
62	-6.32E+02	7.60E+02	-8.36E+01	0.218
63	-2.46E+03	-1.64E+03	-8.69E+02	0.532
64	-2.39E+03	-6.21E+02	-2.52E+02	0.229
65	-1.49E+03	-3.17E+01	-1.52E+01	0.076
66	-1.42E+03	5.39E+01	2.59E+01	0.073
67	7.03E+01	3.95E+02	1.86E+03	0.619
68	1.34E+02	2.21E+02	6.24E+02	0.223
69	-3.93E+02	-9.82E+02	2.02E+03	0.699
70	-3.29E+02	-3.16E+02	6.74E+02	0.219

Figura 3.36 Combinaciones de cargas y eficiencias. (Fuente autoría propia, 2019)

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se presenta la validación del software DIIN, para esto se comparan los diagramas de interacción generados por DIIN contra un software comercial como lo es SAP2000. Además, se muestra un modelo en ETABS de un edificio regular de 6 niveles, al cual se le introdujeron cargas de gravedad y cargas sísmicas mediante un análisis sísmico estático. De este modelo se extrajeron sus elementos mecánicos para ingresarlos al software DIIN y evaluar la eficiencia de las columnas, de mismo modo se calcularon las eficiencias mediante ETABS.

4.1 Comparación de diagramas de interacción MANUAL VS DIIN

A continuación, se compara el diagrama de interacción hecha a mano mostrada anteriormente, contra el diagrama de interacción generado por DIIN V 3.0.

P_n (kN)	M_n (Kn-m)
-5082.22	0
-3721.95	182.74
-1531.07	312.02
-967.75	311.43
-701.63	297.3
-580.91	290.22
-245.35	267.95
98.34	242.23
476.36	192.99
1328	69.53
1702.54	0

Tabla 4.1 Puntos diagrama de interacción nominal. (Fuente autoría propia, 2019)

ϕP_n (kN)	ϕM_n (Kn-m)
-5082.22	0
-3721.95	182.74
-1531.07	312.02
-967.75	311.43
-701.63	297.3
-580.91	290.22
-245.35	267.95
98.34	242.23
476.36	192.99
1328	69.53
1702.54	0

Tabla 4.2 Puntos diagrama de interacción de diseño. (Fuente autoría propia, 2019)

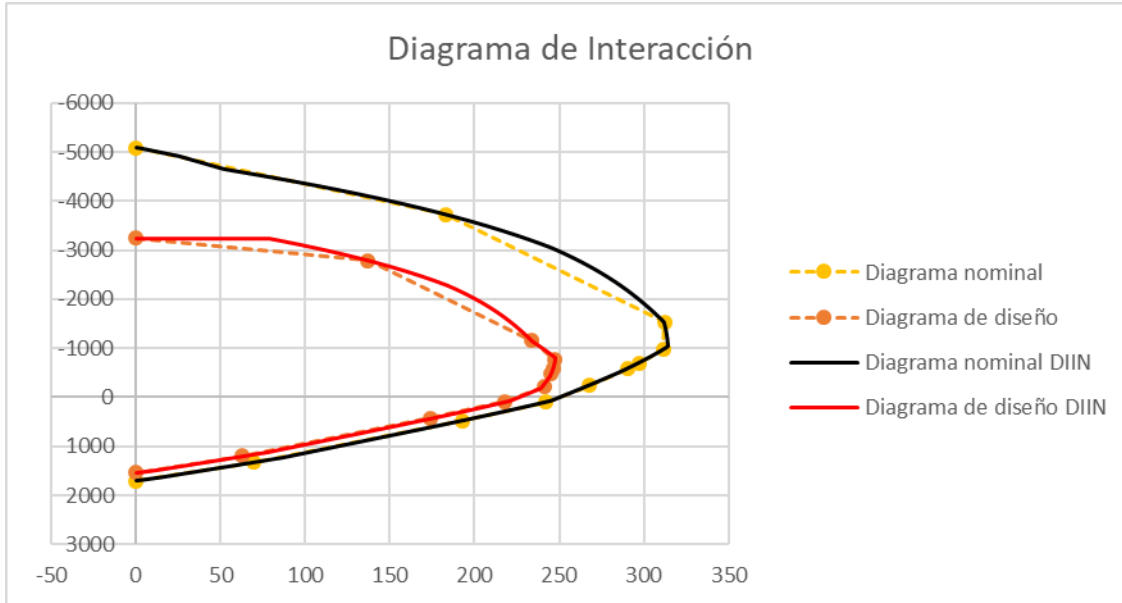


Figura 4.1 Comparación diagrama de interacción manual vs DIIN (Fuente autoría propia, 2019)

4.2 Comparación de gráficas de interacción SAP2000 VS DIIN

a) Columna #1

Sistema de unidad	Diámetro de columna	Armado	Código	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	ϕ Zona frágil	ϕ Zona dúctil	P_{nmax}
Sistema Internacional	900 mm	20 #8	ACI 318-19	25	420	0.75	0.90	$0.80 P_o$

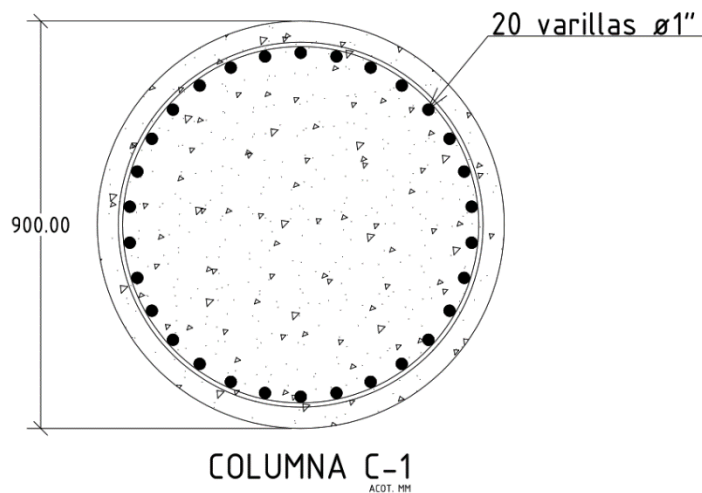


Figura 4.2 Vista esquemática de la sección. (Fuente autoría propia, 2019)

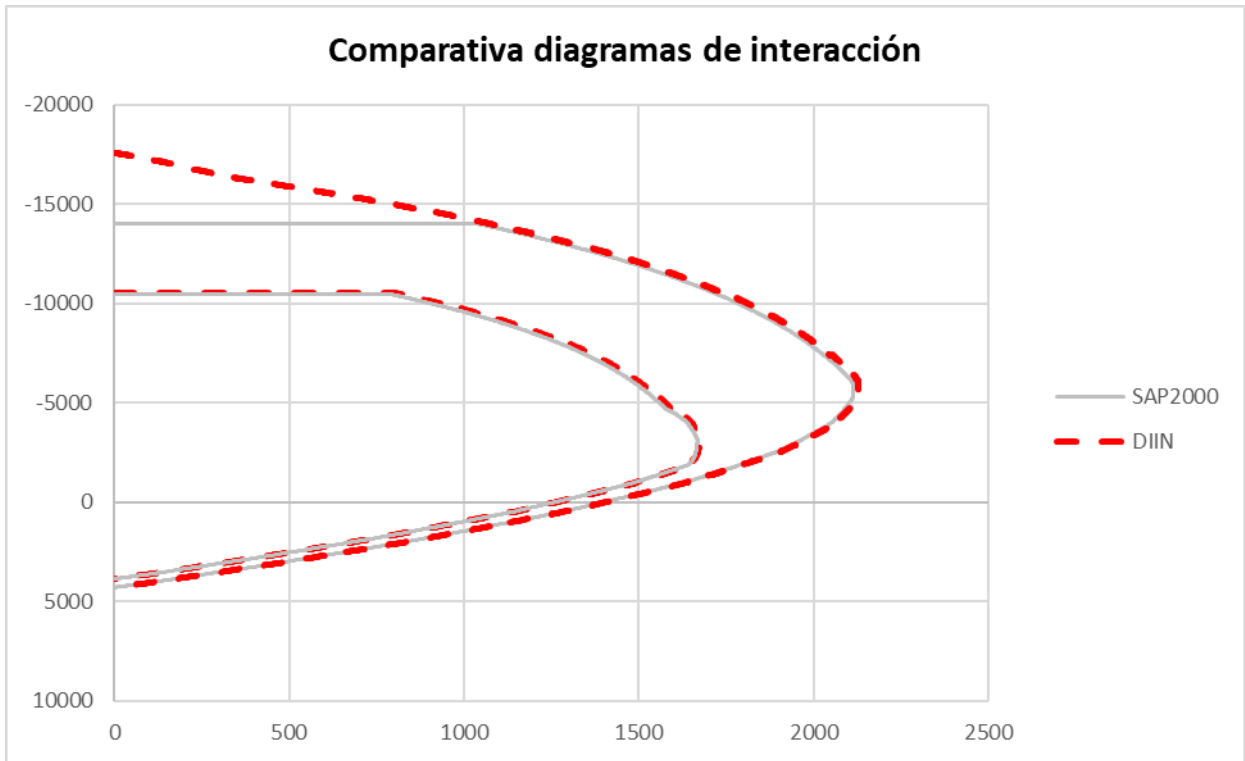


Figura 4.3 Comparación diagramas de interacción. (Fuente autoría propia, 2019)

b) Columna #2

Sistema de unidad	Diámetro de columna	Armado	Código	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	ϕ Zona frágil	ϕ Zona dúctil	P_{nmax}
Sistema Internacional	700 mm	20 #8	ACI 318-14	35	420	0.75	0.90	$0.80 P_o$

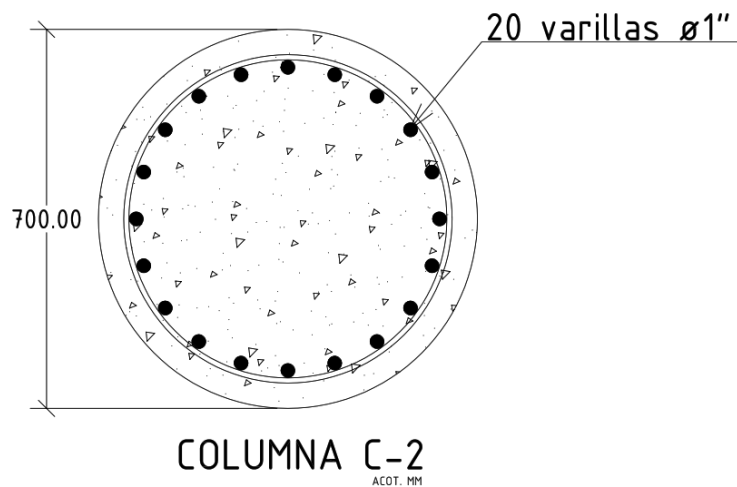


Figura 4.4 Vista esquemática de la sección. (Fuente autoría propia, 2019)

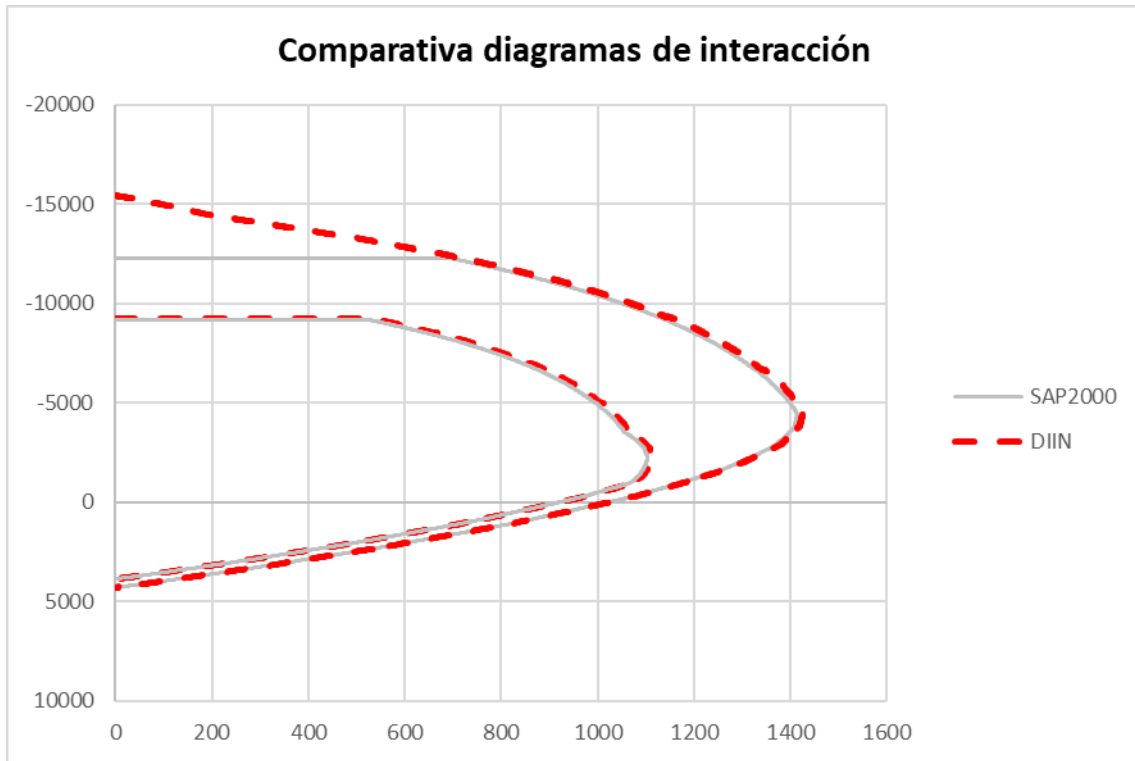


Figura 4.5 Comparación diagramas de interacción. (Fuente autoría propia, 2019)

c) Columna #3

Sistema de unidad	Diámetro de columna	Armado	Código	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	ϕ Zona frágil	ϕ Zona dúctil	P_{nmax}
Sistema Internacional	500 mm	10 #6	NTC-2017	30	420	0.75	0.90	1.00 P_o

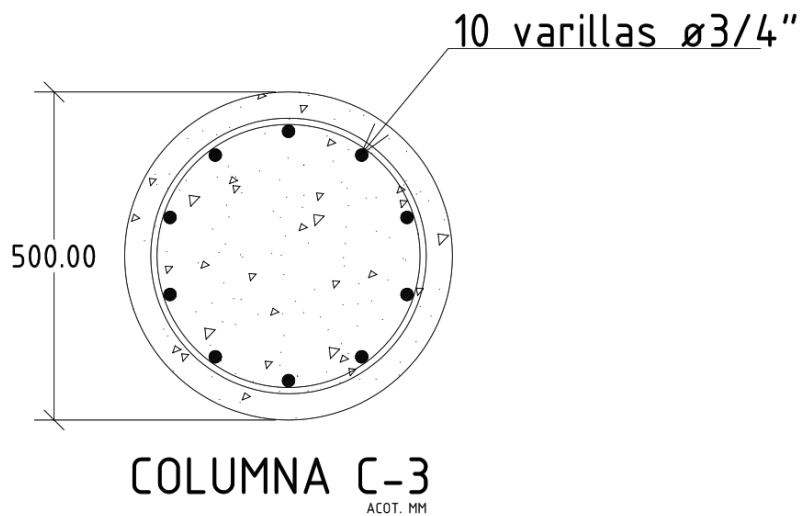


Figura 4.6 Vista esquemática de la sección. (Fuente autoría propia, 2019)

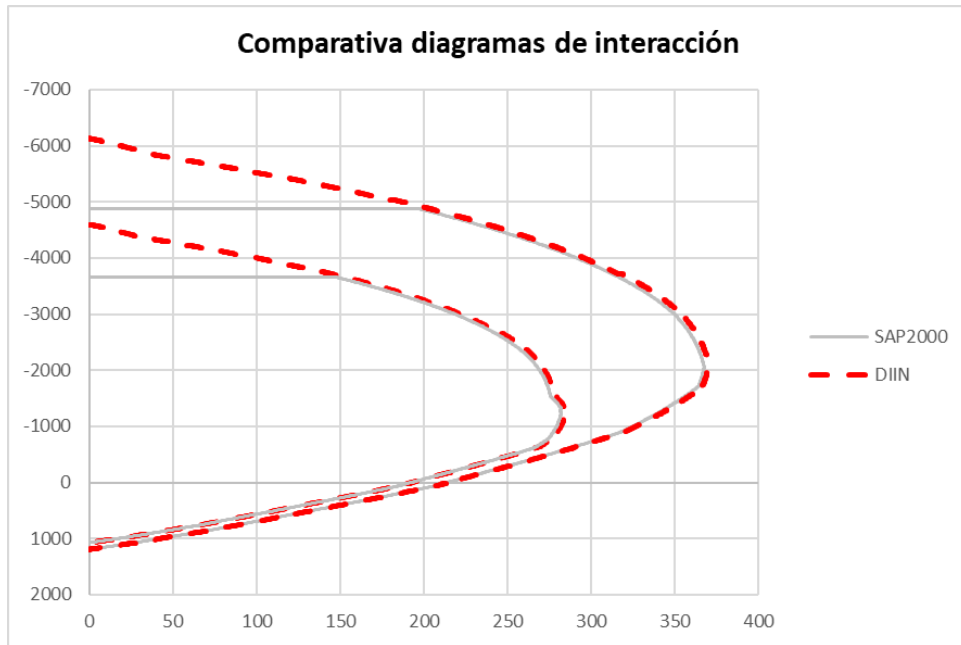


Figura 4.7 Comparación diagramas de interacción. (Fuente autoría propia, 2019)

En este ejemplo en particular, al no contar SAP2000 con las NTC-2017 se decidió utilizar el código ACI-318-14, esto se justifica porque los factores de reducción y resistencia son iguales a los del apéndice A de las NTC-2017, la diferencia es que no considera la meseta que si genera SAP2000.

d) Columna #4

Sistema de unidad	Diámetro de columna	Armado	Código	f'c (MPa)	fy (MPa)	φ Zona frágil	φ Zona dúctil	P _{nmax}
Sistema Internacional	300 mm	6 #5	NTC-2004	30	420	0.80	0.80	1.00 P _o

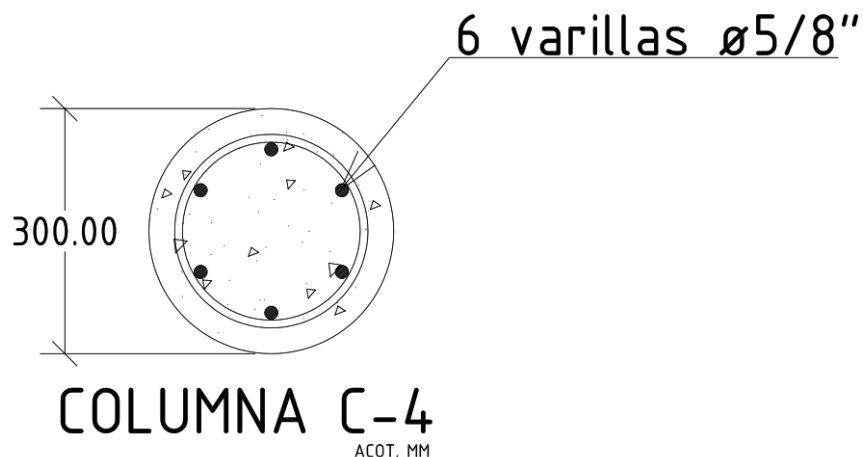


Figura 4.8 Vista esquemática de la sección. (Fuente autoría propia, 2019)

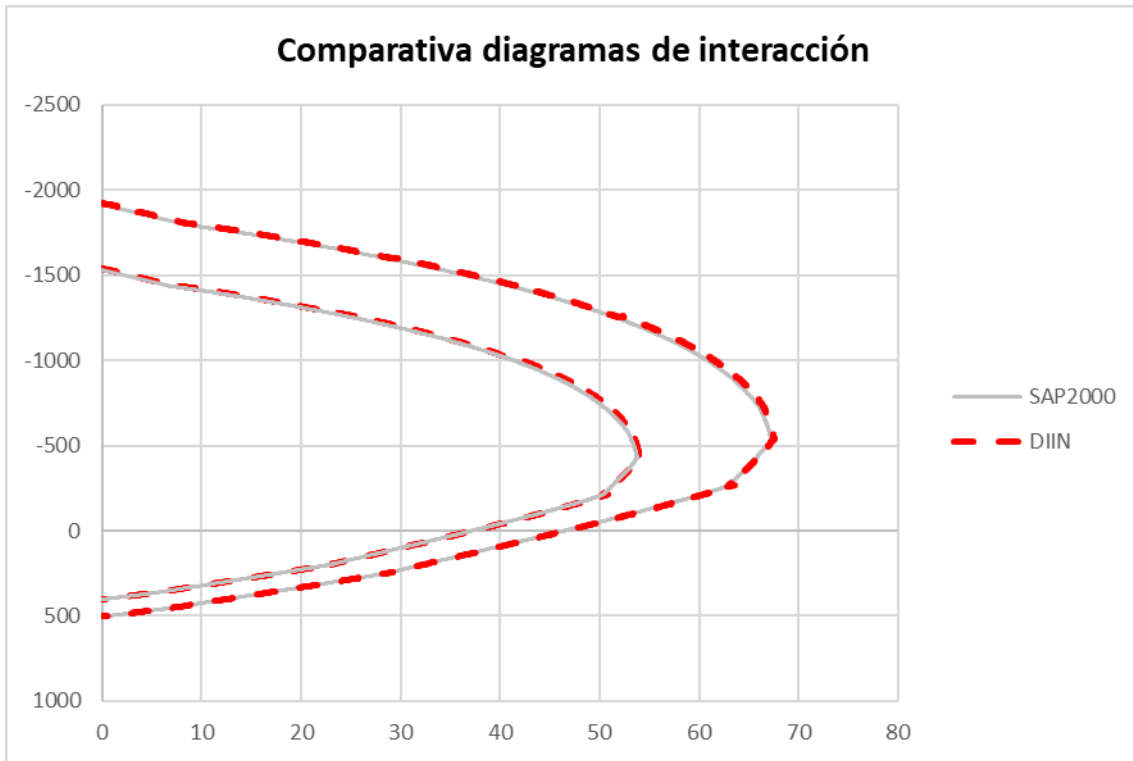


Figura 4.9 Comparación diagramas de interacción. (Fuente autoría propia, 2019)

e) Columna #5

Para fines demostrativos, compararemos los códigos ACI-318-19 y ACI-318-14, tomando como ejemplo la sección de la columna #1 pero cambiando el esfuerzo de fluencia del acero a 550 MPa. Con este ejemplo se ilustra el principal cambio del ACI-318-19

fórmula de la zona de

el cual es la interpolación en transición.

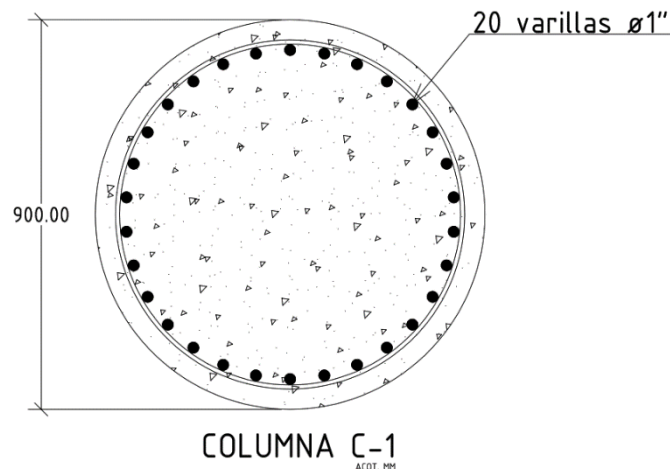


Figura 4.10 Vista esquemática de la sección. (Fuente autoría propia, 2019)

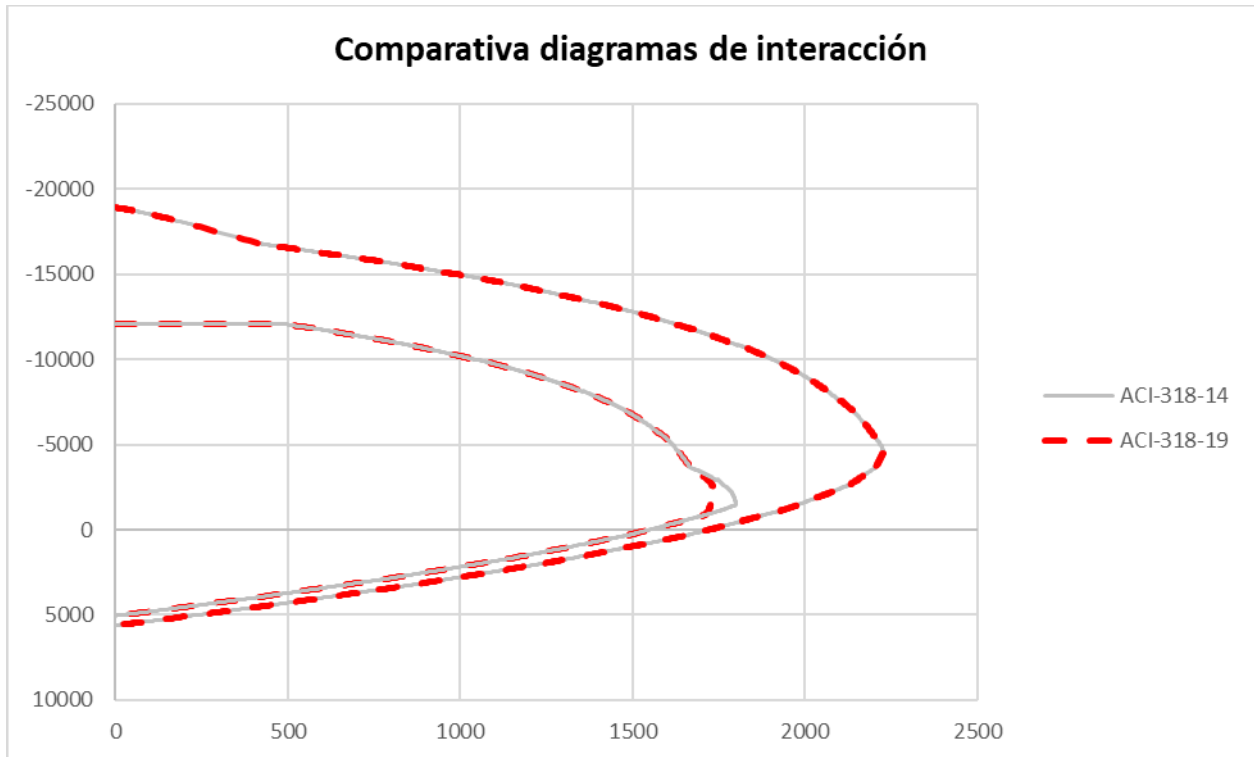


Figura 4.11 Comparación diagramas de interacción. (Fuente autoría propia, 2019)

Estos diagramas de interacción fueron realizados con DIIN V 3.0, y en ellas podemos observar que la principal diferencia que existe es la zona de transición donde cambia la fórmula de interpolación lineal.

4.3 Comparación eficiencias ETABS VS DIIN

4.3.1 Características del modelo

- Unidades del Sistema Internacional.
- 6 niveles.
- 2 crujías dirección x
- 3 crujías dirección y

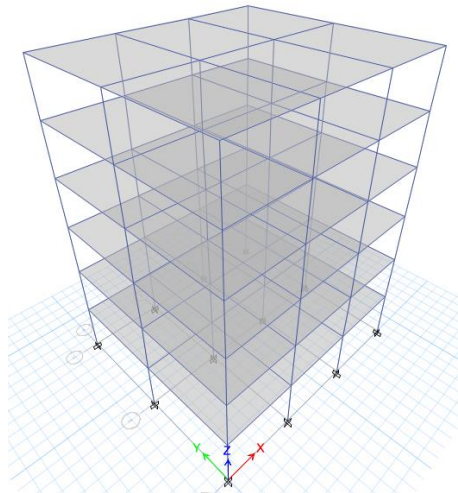


Figura 4.12 Modelo en ETABS.

4.3.2 Sección de la columna.

- Diámetro de 950 mm
- Recubrimiento de 50 mm
- 30 varillas de 804.20 mm²
- Código ACI 318-14
- Resistencia a la compresión del concreto de 35 MPa
- Esfuerzo a la fluencia del acero de 420 MPa
- Módulo de elasticidad del acero de 200000 MPa

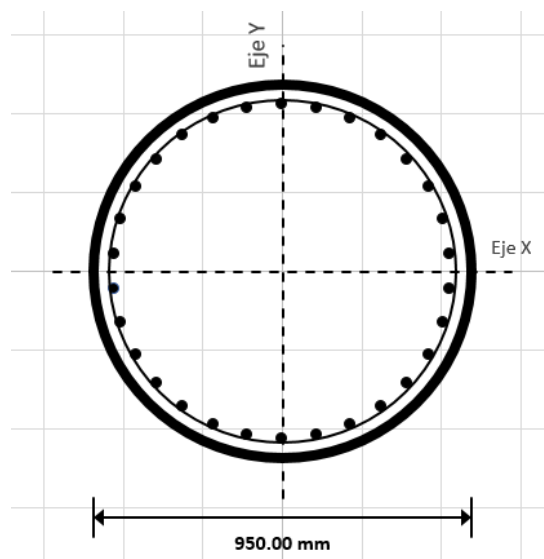


Figura 4.13 Vista esquemática de la sección. (Fuente autoría propia, 2019)

a) Columna de esquina

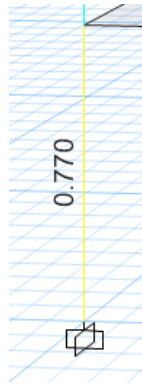


Figura 4.14 Eficiencia ETABS

Max Ratio	0.754
Min Ratio	0.073

Figura 4.15 Eficiencia DIIN

Se tiene una diferencia de 0.016 o 1.6% entre ETABS 17 y el software DIIN. Lo cual resulta insignificante, además tomando en cuenta que la precisión de ETABS 17 es de 24 curvas de interacción y el software DIIN al realizar una combinación de excentricidades llega el resultado exacto.

b) Columna de lindero



Figura 4.16 Eficiencia ETABS

Max Ratio	0.471
Min Ratio	0.037

Figura 4.17 Eficiencia DIIN

En este caso se presenta una diferencia de 0.009 o 0.9% por lo que se considera el software validado y da excelentes resultados en columnas circulares sometidos a flexión biaxial.

CONCLUSIONES

Se ha concluido que el software DIIN es una herramienta didáctica de gran utilidad para la implementación de la educación basada en competencias y el mejoramiento de la calidad educativa.

La versatilidad del software permite que pueda ser utilizado en varias partes del mundo porque el usuario puede modificar el sistema de unidades en el que trabajará y también editar los factores de resistencia que exija el código vigente del país.

Se ha verificado que con el software DIIN se reducen significativamente el tiempo de diseño de las columnas para las clases de diseño de elementos de concreto, permitiendo que en clases se enfoque a realizar más ejercicios con diversas configuraciones de columnas y comparaciones entre las normativas más utilizadas en el país que lleven a nuevo conocimiento a través de la reflexión de los resultados obtenidos.

El software DIIN no tiene intenciones de competir con los paquetes de software comerciales, y por ello se han utilizado algunos de ellos para el proceso de validación, sin embargo, el ingeniero de la práctica puede utilizar sin problemas el software DIIN y así realizar diseños de columnas de concreto reforzado.

Los diagramas de interacción del DIIN tienen suficiente precisión como los generados por softwares comerciales como SAP2000 y ETABS.

DIIN V 3.0 brindará apoyo a los docentes sobre las estrategias de mejora continua en la enseñanza de este tema a nivel de licenciatura y maestría.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI. (Septiembre de 2014). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14). Farmington Hill, Michigan, Estados Unidos: American Concrete Institute.
- ACI. (2015). The Reinforced Concrete Design Handbook Column Interaction Diagram Spreadsheet.
- ACI. (Junio de 2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). Farmington Hill, Michigan, Estados Unidos: American Concrete Institute.
- Bresler, B. (1961). *Design Criteria for Reinforced Columns under Axial Load and Biaxial Bending*. Detroit: American Concrete Institute.
- Carillo, M., & Serrano, R. (2004). Programa interactivo para el dimensionamiento de columnas de concreto reforzado. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 17.
- Castillo, M. (29 de Mayo de 2019). Diseño de columnas de concreto reforzado con DIIN V 1.0. Puebla, Puebla, México.
- Delgado, S., & Barboza, E. (2014). *Concreto armado temas especiales*. Maracaibo: Astro Data S.A.
- Federal, D. (2004). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. *Gaceta oficial del Distrito Federal*, 101.
- Furlong, R., Thomas, C.-T., & Mirza, A. (2004). Analysis and Design of Concrete Columns for Biaxial Bending. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, 11.
- González, O. (2017). DID. Ciudad de México.
- Gonzalez, O., & Robles, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. Distrito Federal: Limusa.
- Harmsen, T. (2002). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica de Perú.
- López, N., Ugel, R., & Reyes, I. (2017). ANÁLISIS NO LINEAL DE UNA JUNTA EXPERIMENTAL DE COLUMNA Y VIGAS DE CONCRETO ARMADO-COLUMNA DE ACERO PARA PÓRTICOS. *Gaceta Técnica*, 41.
- Mc Cormac, J., & Brown, R. (2011). *Diseño de Concreto Reforzado*. D.F.: Alfaomega.
- México, G. d. (2017). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. *Gaceta oficial de la Ciudad de México*, 195.
- Miramontes, D., Garamendi, J. A., Márquez, G., Ávalos, A., & Pimentel, G. (2004). NTC Y AYUDAS DE DISEÑO DIGITALIZADAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 11.
- Nawy, E. (2005). *REINFORCED CONCRETE: A Fundamental Approach*. New Jersey: Pearson.
- Nilson, A., & Darwin, D. (1999). *Diseño de estructuras de concreto*. Bogotá: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.

- Ortega, J. (2014). *Diseño de estructuras de concreto armado. Tomo I*. Lima: Macro.
- Park, R., & Paulay, T. (1988). *Estructuras de concreto reforzado*. Distrito Federal: Limusa.
- Parker, H., & James, A. (2008). *Diseño simplificado de concreto reforzado*. México, D.F.: LIMUSA.
- Ramírez, S. T., Mendoza, M., Alejandro, H., & Valdés, J. (2012). DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN PARA COLUMNAS DE SECCIÓN COMPUESTAS. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 13.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- CSI. (2019). *COMPUTERS & STRUCTURES SPAIN*. Obtenido de <https://www.csiespana.com/software-features/9/csicol#>
- CSI. (2019). *COMPUTERS & STRUCTURES SPAIN*. Obtenido de <https://www.csiespana.com/software-features/2/sap2000#sidenav-item-1>
- StructurePoint. (2019). *Structure Point*. Obtenido de <https://structurepoint.org/frequently-asked-question.asp?productName=spColumn>
- StructurePoint. (2019). *StructurePoint*. Obtenido de https://structurepoint.org/spcolumn-online-manual/spColumn/Chapter_3/spColumn_Interface.htm