



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE INTERACCIÓN EN FLEXO- COMPRESIÓN DEL CÓDIGO ACI318-19

BOLÍVAR ANDRÉS CEDEÑO CAMPOVERDE

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:
MATÍAS HUBE GINESTAR

Santiago de Chile, octubre, 2021.

Para mi familia, amigos y en memoria
de todos aquellos que perdieron la
batalla durante la pandemia del
COVID-19.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no podría haber sido realizado sin el apoyo incondicional de mis familiares, mis padres y mi hermana, que en todo momento estuvieron al pendiente de mí durante mi estancia en Chile y en mi retorno al Ecuador.

Una gratitud hacia mi prima Johanna, quien me ayudó como una hermana durante mi estancia en el extranjero a poder sobrellevar la pandemia, y saber que tenía a alguien en quien contar y confiar.

Un agradecimiento a mis compañeros, especialmente al grupo de extranjeros, con los que formamos un lazo especial que nos motivó a salir adelante y saber que, pese a que estuviésemos todos en un país ajeno, nos teníamos unos a los otros para apoyarnos

Finalmente, un agradecimiento a Chile, a la Pontificia Universidad Católica de Chile, a los docentes y a todos aquellos que conforman el programa del Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica por abrirme las puertas y acogerme como en tierra propia, con una mención especial a mi tutor, PhD. Matías Hube Ginestar, quien me guio en el desarrollo de esta tesis.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE GENERAL.....	4
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
I. Introducción	11
I.1. Contexto	11
I.2. Objetivos	11
I.3. Metodología	12
II. Marco teórico	12
II.1. Curvas de interacción	12
II.2. Resistencia del hormigón	12
II.3. Resistencia del acero	17
II.4. Curvas de interacción nominales.....	18
II.5. Curvas de interacción reducidas.....	23
III. Cálculo de curvas de interacción	24
III.1. MATLAB	24
III.2. Softwares comerciales.....	33
IV. Análisis de curvas de interacción.....	48
IV.1. Columnas.....	48
IV.2. Muros rectangulares	59
IV.3. Muros en T	70

V. Conclusiones.....	74
BIBLIOGRAFIA.....	75
A N E X O S.....	76
Anexo A: Menú inicial de programa desarrollado en MATLAB	77
Anexo B: Interfáz GRÁFICA para columnas	78
Anexo C: Interfáz GRÁFICA para MUROS RECTANGULARES.....	79
Anexo D : Interfáz GRÁFICA para MUROS en t	80

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla II - 1: Valores de β_1 en función de f_c	14
Tabla II - 2: Modelo elasto-plástico perfecto para el acero	17
Tabla II - 3: Factor de reducción de resistencia, Φ , para momento, fuerza axial, y flexo-compresión.	23

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 2 - 1: Bloque de compresión equivalente (Whitney, 1942)	13
Figura 2 - 2: Distribución de esfuerzos en muros T con eje neutro en ala	15
Figura 2 - 3: Distribución de esfuerzos en muros T con eje neutro en el alma	16
Figura 2 - 4: Deformaciones unitarias en una sección de hormigón armado	18
Figura 2 - 5: Fuerzas resistente de los materiales en una sección de hormigón armado	19
Figura 2 - 6: Puntos relevantes en curva de interacción	21
Figura 3 - 1: Curva de interacción de columna rectangular programado con MATLAB	26
Figura 3 - 2: Curva de interacción de muro rectangular programado con MATLAB	29
Figura 3 - 3: Curva de interacción de muro en T programado con MATLAB	32
Figura 3 - 4: Configuración para diseño en concreto reforzado con ACI 318-19 en ETABS	34
Figura 3 - 5: Diseño de columna cuadrada en ETABS	35
Figura 3 - 6: Resultado de curvas de interacción para columnas cuadradas en ETABS	35
Figura 3 - 7: Comparativa para columna con 1% de cuantía y fluencia de 420MPa ..	36
Figura 3 - 8: Comparativa para columna con 3% de cuantía y fluencia de 550MPa ..	36
Figura 3 - 9: Comparativa para columna con 6% de cuantía y fluencia de 690MPa ..	37
Figura 3 - 10: Parámetros de diseño de muro de concreto reforzado ACI 318-19, ETABS	38
Figura 3 - 11: Modelación de muro rectangular de concreto reforzado, ETABS	39
Figura 3 - 12: Curva de interacción para muro rectangular, ETABS	39
Figura 3 - 13: Comparación de muro rectangular con ρ_{min} en borde y fluencia de 420MPa	40
Figura 3 - 14: Comparación de muro rectangular con $3\rho_{min}$ en borde y fluencia de 550MPa	41
Figura 3 - 15: Comparación de muro rectangular con $6\rho_{min}$ en borde y fluencia de 690MPa	41
Figura 3 - 16: Modelación de muro en T de concreto reforzado en ETABS	42
Figura 3 - 17: Curva de interacción para muro en T en ETABS	43
Figura 3 - 18: Parámetros de diseño en concreto reforzado con ACI 318-19 en spColumn	43
Figura 3 - 19: Modelación de muro en T de concreto reforzado en spColumn	44
Figura 3 - 20: Curva de interacción para muro en T en spColumn	44
Figura 3 - 21: Comparativa de curvas nominales para muro en T con $L_f = 0.5L_w$	46
Figura 3 - 22: Comparativa de curvas nominales para muro en T con $L_f = 1L_w$	46
Figura 3 - 23: Comparativa de curvas reducidas para muro en T con $L_f = 0.5L_w$	47
Figura 3 - 24: Comparativa de curvas reducidas para muro en T con $L_f = 1L_w$	47
Figura 4 - 1: Curvas de interacción de columna con $\rho=1\%$ y fluencias varias	49

Figura 4 - 2: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=2\%$ y fluencias varias	50
Figura 4 - 3: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=3\%$ y fluencias varias	51
Figura 4 - 4: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=4\%$ y fluencias varias	52
Figura 4 - 5: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=5\%$ y fluencias varias	53
Figura 4 - 6: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=6\%$ y fluencias varias	54
Figura 4 - 7: Curvas de interacción de columna cuadrada con $f_y=420\text{MPa}$ y cuantías varias	56
Figura 4 - 8: Curvas de interacción de columna cuadrada con $f_y=550\text{MPa}$ y cuantías varias	57
Figura 4 - 9: Curvas de interacción de columna cuadrada con $f_y=690\text{MPa}$ y cuantías varias	58
Figura 4 - 10: Curvas de interacción de muro rectangular con cuantía de 1% y fluencias varias	60
Figura 4 - 11: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=2\%$ y fluencias varias	61
Figura 4 - 12: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=3\%$ y fluencias varias	62
Figura 4 - 13: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=4\%$ y fluencias varias	63
Figura 4 - 14: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=5\%$ y fluencias varias	64
Figura 4 - 15: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=6\%$ y fluencias varias	65
Figura 4 - 16 Curvas de interacción de muro rectangular con $f_y=420\text{MPa}$ y cuantías varias	67
Figura 4 - 17 Curvas de interacción de muro rectangular con $f_y=550\text{MPa}$ y cuantías varias	68
Figura 4 - 18: Curvas de interacción de muro rectangular con $f_y=690\text{MPa}$ y cuantías varias	69
Figura 4 - 19: Curvas de interacción de muros en T con resistencias $f_y = 420 \text{ MPa}$..	71
Figura 4 - 20: Curvas de interacción de muros en T con resistencias $f_y = 550 \text{ MPa}$..	72
Figura 4 - 21: Curvas de interacción de muros en T con resistencias $F_y = 690 \text{ MPa}$..	73

RESUMEN

Esta actividad de graduación está enfocada en analizar las curvas de interacción propuestas en la normativa americana ACI318 en su actualización del año 2019. Debido a la incorporación de aceros de alta resistencia, el factor de reducción de resistencia depende de la deformación de fluencia del acero. En primer lugar, se realizó un estudio bibliográfico respecto a la normativa para calcular curvas de interacción. En segundo lugar, se implementaron rutinas en Matlab para generar curvas de interacción tanto nominales como reducidas. Los casos que se analizan en este trabajo son columnas, muros rectangulares y muros en T. Con las gráficas obtenidas se analizan los efectos del uso de aceros de alta resistencia, el aumento de la cuantía longitudinal y la forma de las curvas de interacción en muros en T.

ABSTRACT

This graduation activity is focused on analyzing the interaction curves proposed in the American standard ACI318 in its update for 2019. Due to the incorporation of high-strength steels, the strength reduction factor depends on the yield stress of the steel. First, a bibliographic study was carried out about the regulations for calculating interaction curves. Second, routines were implemented in MATLAB to generate both nominal and reduced interaction curves. The cases that are analyzed in this work are columns, rectangular walls, and Tee-shaped walls. With the graphs obtained, the effects of the use of high-strength steels, the increase in the longitudinal steel quantity and the shape of the interaction curves in Tee-shaped walls are analyzed.

I. INTRODUCCIÓN

I.1. CONTEXTO

En su reforma del año 2019, la normativa ACI318 (2019) encargada de los requisitos de reglamento para concreto estructural, incorporó para el diseño sismorresistente el uso de aceros de alta resistencia, alcanzando los 690 MPa de fluencia. Al conformar un elemento con refuerzo de acero de alta resistencia, las curvas de interacción de resistencia a la flexo-compresión pueden tomar formas irregulares, especialmente las curvas reducidas por el factor de reducción de resistencia.

Adicionalmente, Lequense y Pincheira (2014) identificaron que las curvas de interacción de secciones de hormigón armado con forma de T o L, calculadas según el ACI318, pueden tener formas irregulares. Por lo tanto, tanto el uso de acero de alta resistencia, como el uso de secciones T o L, pueden tener curvas de interacción irregulares.

I.2. OBJETIVOS

I.2.1. Objetivo principal

Comparar las variaciones producidas en las curvas de interacción nominales y reducidas de columnas y muros de hormigón armado alterando parámetros de cuantía, resistencia y geometría.

I.2.2. Objetivos específicos

- Analizar los efectos de la incorporación de aceros alta resistencia, para los elementos en flexo – compresión, de la normativa ACI318-19.
- Desarrollar un programa en MATLAB que permita al usuario calcular curvas de interacción en función de parámetros variables para elementos de hormigón armado y compararlo con softwares de uso comercial.
- Analizar las formas de las curvas de interacción de los muros en T

I.3. METODOLOGÍA

Esta investigación contiene una recopilación bibliográfica que resume la normativa vigente para el diseño de elementos de hormigón armado sometidos a flexo – compresión. Como parte de este estudio se construyen programas propios en Matlab para el cálculo de curvas de interacción de secciones rectangulares y de muros T. Adicionalmente se utilizan programas comerciales para la corroboración de los resultados obtenidos y hojas de cálculo para comprender la funcionalidad de estos programas. Finalmente se analiza la forma de la curva de interacción de secciones rectangulares y de muros T.

II. MARCO TEÓRICO

Este capítulo describe el procedimiento para la obtención de las curvas de interacción de elementos de hormigón armado sometidos a flexo – compresión, según los requerimientos de la normativa ACI318-19. Los elementos a estudiar serán columnas, muros rectangulares y muros en T.

II.1. CURVAS DE INTERACCIÓN

Las curvas de interacción son formas gráficas de interpretar la resistencia de un elemento sometido a flexo-compresión. Estas curvas muestran todas las combinaciones posibles de carga axial y momento flector que pueden ser aplicadas en una sección para producir una falla.

II.2. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

El hormigón es un material que, en su estado fraguado, adquiere una resistencia a la compresión en base al diseño especificado. La desventaja del hormigón es que tiene una resistencia a la tracción muy baja, por lo que esta resistencia se desprecia en los cálculos de curvas de interacción.

La relación tensión-deformación del hormigón sometido a compresión puede variar en función del tipo de mezcla y del nivel de confinamiento. Sin embargo, el ACI 318 recomienda el método del bloque equivalente de esfuerzos de Whitney (1942) para estimar la resultante de las tensiones de compresión. La Figura 2-1 muestra la simplificación por medio de este último método.

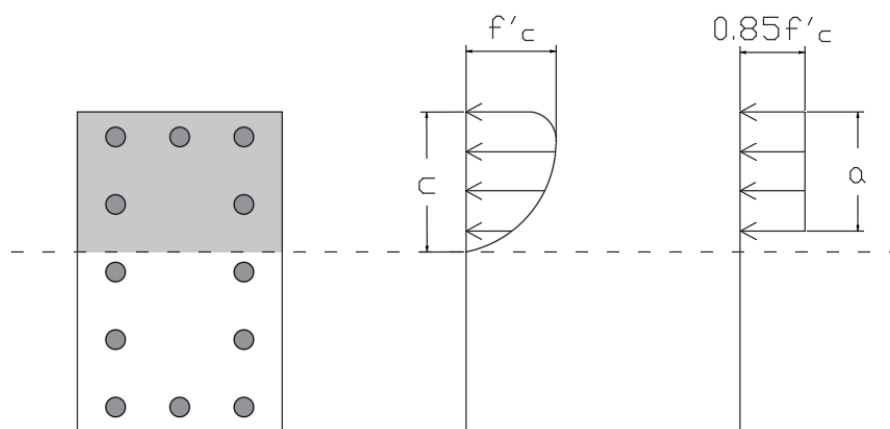


Figura 2 - 1: Bloque de compresión equivalente (Whitney, 1942)

El modelo de Whitney consiste en la simplificación de los modelos tradicionales semiparabólicos en su altura de compresión $[c]$, por uno rectangular en una altura reducida $[a]$. Estas se relacionan por medio de un factor $[\beta_1]$ con la posición del eje neutro c , tal que:

$$a = \beta_1 c$$

La Tabla II-1 presenta los valores del factor β_1 , el cual, está en función de la resistencia a la compresión del hormigón $[f'_c]$ de la siguiente manera (ACI 318, 2019):

Tabla II - 1: Valores de β_1 en función de f'_c

f'_c [MPa]	β_1
$f'_c \leq 28 \text{ MPa}$	0.85
$28 \text{ MPa} < f'_c < 55 \text{ MPa}$	$0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$
$f'_c \geq 55 \text{ MPa}$	0.65

La función rectangular del modelo de Whitney tiene una tensión constante de $0.85 f'_c$. Por lo tanto, la fuerza total del bloque de compresión del hormigón de una sección rectangular de ancho b es:

$$F_c = 0.85 f'_c ab$$

Para el caso de un muro tipo T, donde existe una discontinuidad abrupta del área entre el ala y el alma, es necesario realizar cálculos dependiendo de donde se posicione el eje neutro. En caso de que el eje neutro se encuentre dentro del ala, el área de compresión de hormigón puede hallarse de manera similar a las columnas rectangulares. La figura 2-2 muestra la implementación del bloque de compresión para este último caso planteado en específico.

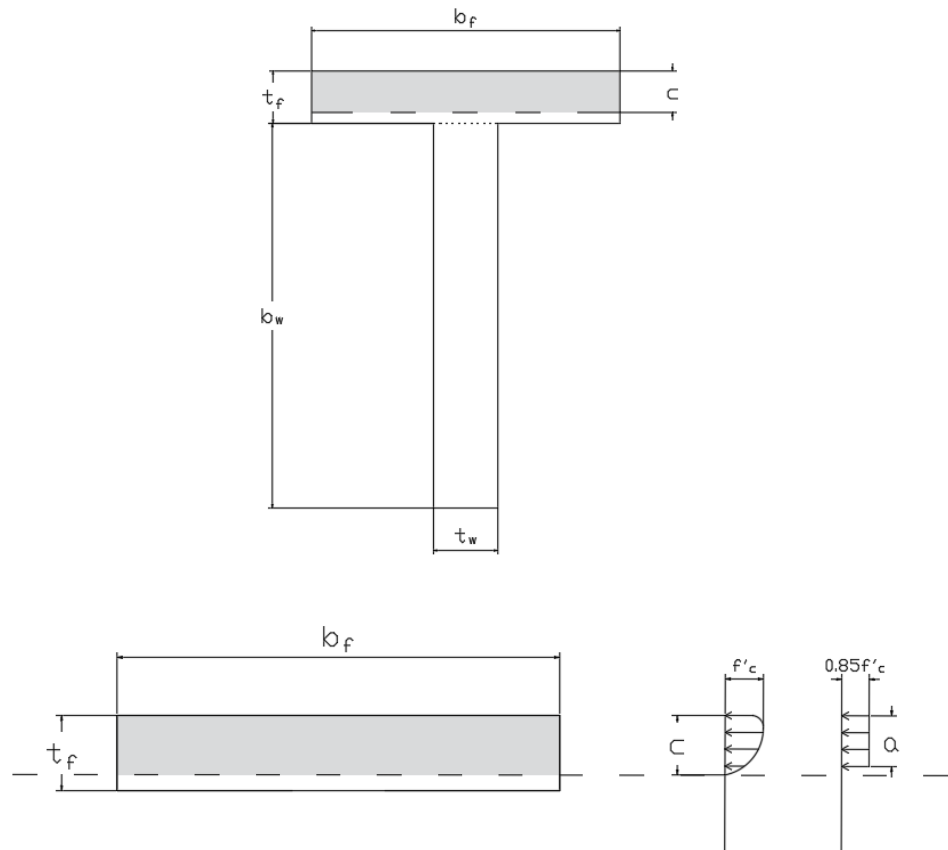


Figura 2 - 2: Distribución de esfuerzos en muros T con eje neutro en ala

Cuando el eje neutro en un muro T se ubica en el alma, el ala se puede particionar en tres, con un segmento central proveniente de una proyección del alma y dos segmentos que se forman a los lados. Para los segmentos laterales del ala, el esfuerzo es constante en su altura, y para el segmento central se considera el bloque equivalente de Whitney. La figura 2-3 muestra los segmentos y el análisis del hormigón en compresión para el muro en T con el eje neutro en el alma.

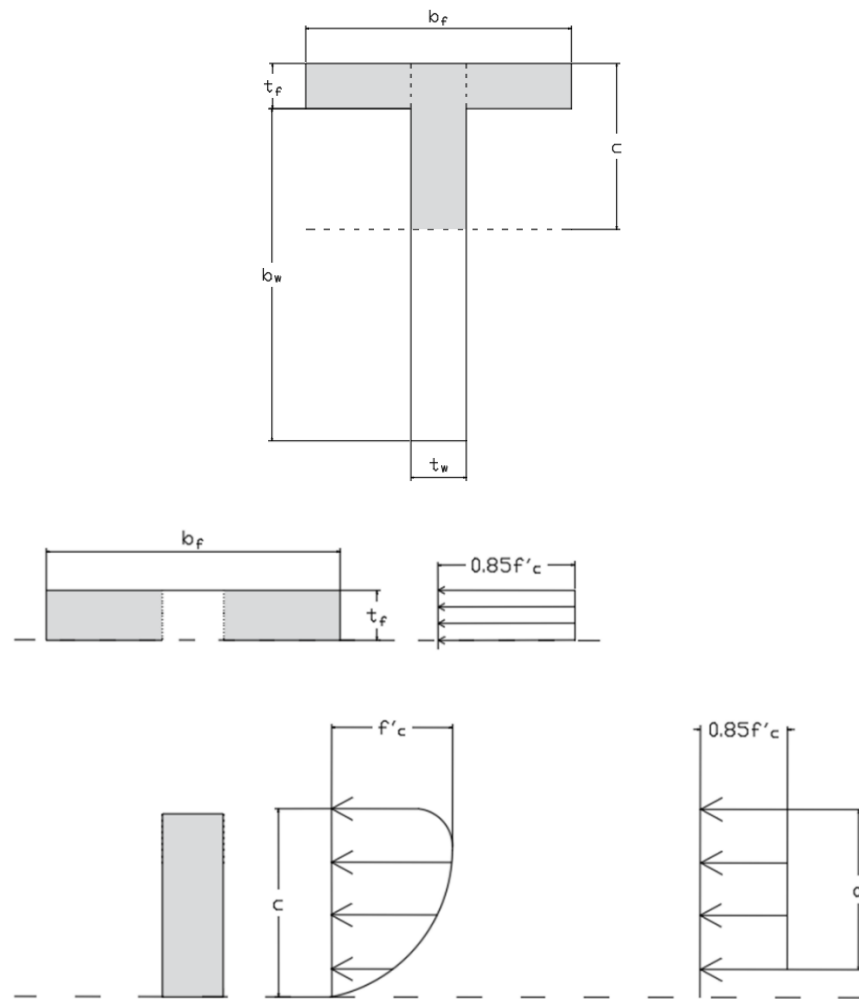


Figura 2 - 3: Distribución de esfuerzos en muros T con eje neutro en el alma

Finalmente, la fuerza total en la zona de compresión del hormigón resulta:

$$F_c = 0.85 f'_c (at_w + (b_f - t_w)t_f)$$

II.3. RESISTENCIA DEL ACERO

El acero es un material que resiste esfuerzos de tracción y compresión., El ACI 318 permite considerar un comportamiento elasto – plástico perfecto para el acero. Por lo tanto, para deformaciones unitarias mayores a la deformación de la fluencia, la tensión es constante independientemente del nivel de deformación unitaria. La Tabla 2-2 muestra la relación constitutiva para un acero elato – plástico perfecto.

Tabla II - 2: Modelo elasto-plástico perfecto para el acero

ε_s	f_s
$\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$	$E_s \varepsilon_s$
$\varepsilon_s > \varepsilon_y$	f_y

Por lo tanto, la fuerza que aplica la sección de acero será en función de su nivel de deformación. La fuerza de cada barras se calcula como:

$$F_s = A_s f_s$$

Donde A_s representa el área de la barra.

En el año 2019 el ACI318 incorporó el uso de acero de refuerzo de alta resistencia para diseñar algunos elementos. La norma permite aceros con tensiones de fluencia de 420, 550 y 690 MPa.

El inciso 20.2.2.4 del ACI 318 (2019), regula la resistencia máxima permitida en función del uso, aplicación y consideraciones respecto a la demanda sísmica. Estas limitaciones son fundamentales, especialmente al momento de utilizar softwares comerciales de análisis y diseño estructural.

El módulo de elasticidad del acero, tomando como referencia en el inciso 20.2.2.2 del ACI 318 (2019), se puede asumir como 200,000 MPa. Este módulo de elasticidad se utiliza en este estudio para los tres tipos de resistencia considerados.

II.4. CURVAS DE INTERACCIÓN NOMINALES

Debido a la aplicación de cargas, los elementos de hormigón armado se deforman en flexo-compresión. Para analizar secciones en flexo-compresión, típicamente se considera la hipótesis de Bernoulli, que asume que las secciones planas permanecen planas. Esto permite estimar la deformación unitaria de cada punto de la sección a partir de la curvatura. En el eje neutro la deformación unitaria es cero y este eje se ubica a una distancia $[c]$ desde la fibra superior de la sección de hormigón. La figura 2-4 muestra el diagrama de deformaciones unitarias para una sección de hormigón armado.

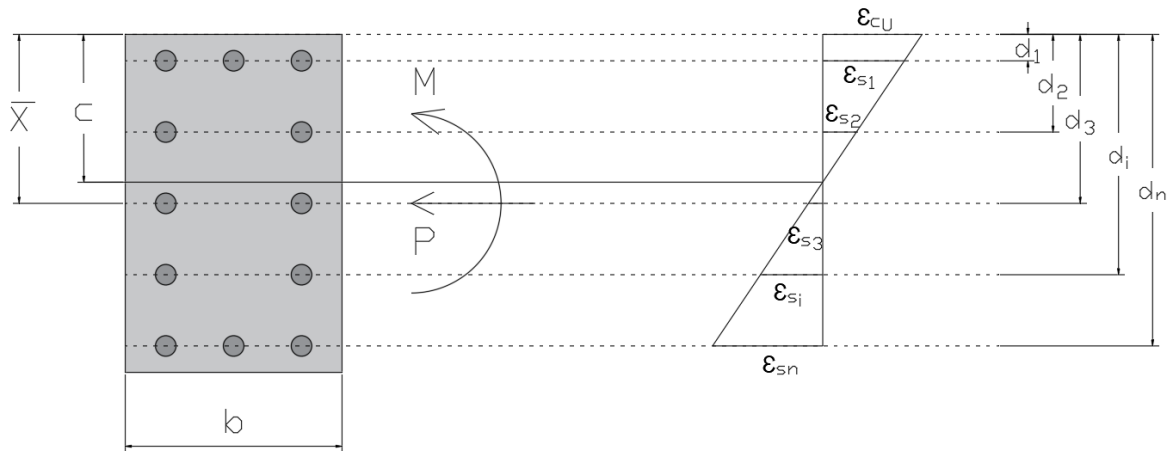


Figura 2 - 4: Deformaciones unitarias en una sección de hormigón armado

Si se discretiza la sección transversal del elemento de hormigón en fibras, la deformación unitaria de la i -ésima fibra de la sección, se calcula con:

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} (d_i - c)$$

Donde d_i es la distancia entre la fibra superior y el centro de la i -ésima varilla en análisis.

El hormigón se considera únicamente en la zona en que se encuentre en compresión, mientras que, el acero siempre se considera, independiente si la varilla se encuentra por sobre o bajo el eje neutro. Para estimar la fuerza axial y el momento nominal de la sección se realiza una sumatoria de fuerzas y momentos respecto al centroide de la sección. La figura 2-5 muestra las fuerzas resistentes asociadas a las deformaciones unitarias de los materiales.

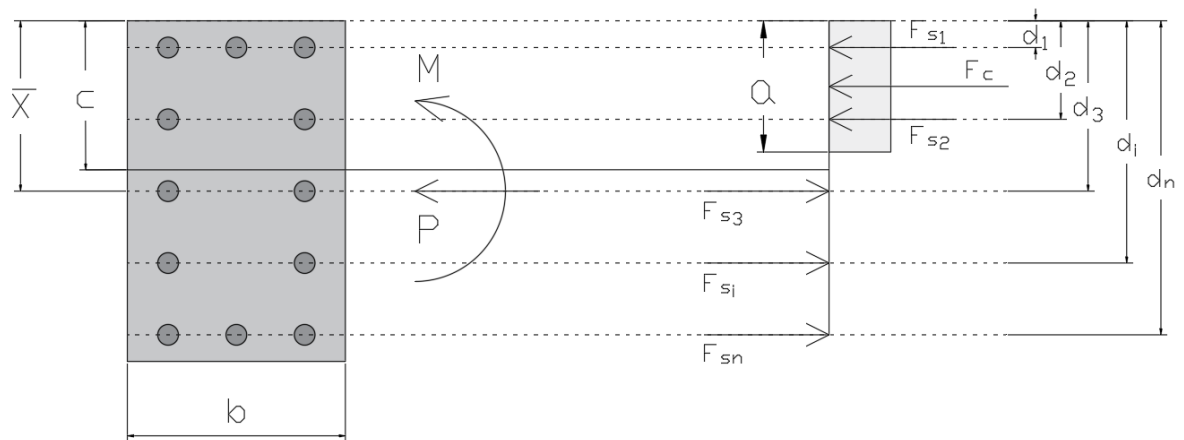


Figura 2 - 5: Fuerzas resistente de los materiales en una sección de hormigón armado

Las siguientes ecuaciones permiten calcular la fuerza axial y el momento de la sección.:

$$P = F_c + \sum_{i=1}^n A_{si} f_s(\epsilon_{si})$$

$$M = F_c \left(\bar{x} - \frac{a}{2} \right) + \sum_{i=1}^n A_{si} f_s(\epsilon_{si}) [\bar{x} - d_i]$$

Donde F_c representa la fuerza equivalente de compresión del hormigón y $\bar{x}$ es la distancia al centroide de la sección, medido desde la fibra superior.

El planteo de la curva de interacción de una sección de hormigón armado se realiza asumiendo que la fibra superior de la sección tiene una deformación unitaria de compresión

igual a $\epsilon_{cu} = 0.003$., Los puntos de la curva de interacción se obtienen variando la deformación unitaria del acero. Los puntos más destacados en la curva de interacción son: tracción pura, compresión pura, flexión pura y punto de balance.

En la figura 2-6 se pueden identificar los puntos más relevantes, tales que:

- 1.- Tracción pura: El eje neutro se encuentra en la fibra superior, por lo que, toda la sección se encuentra en tracción, en el caso de distribuciones simétricas, las fuerzas en torno al centroide se equilibran generando momento nulo.
- 2.- Flexión pura: El eje neutro se encuentra en una altura determinada, existen fibras en la sección que se encuentran tanto en tracción, como en compresión y su sumatoria se anula, mas no, la sumatoria de momentos.
- 3.- Punto de balance: Las fibras en la sección tienen una distribución, tal que, se produce la falla en la fibra superior del hormigón [$\epsilon_{cu} \approx 0.003$] al mismo tiempo que se genera la fluencia en el acero de la fibra más extrema con refuerzo [$\epsilon_s = \epsilon_y$], los valores de momento (M_b) y fuerza axial de balance (P_b) se determinan a partir del estado tensional resultante de dichas deformaciones.
- 4.- Compresión pura: Todas las fibras en la sección se encuentran en compresión, matemáticamente, esto se consigue llevando el eje neutro a un valor infinito, por lo que, todas las fibras se contraen, el momento respecto al eje neutro es exactamente cero en caso de secciones simétricas.

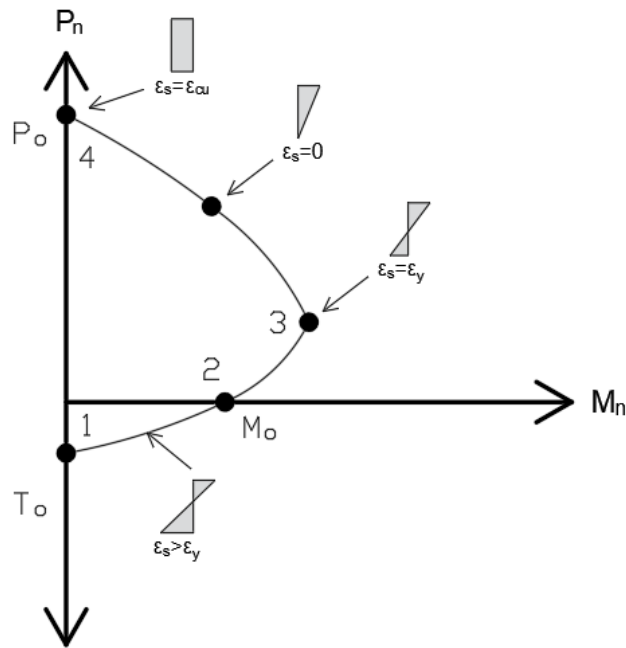


Figura 2 - 6: Puntos relevantes en curva de interacción

Un método general para el cálculo de los puntos de la curva de interacción consiste en establecer estableciendo valores para el eje neutro, variando desde cero hasta la altura de la sección, luego el punto restante de compresión pura se determina como:

$$P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y$$

En la sección 22.4.2.1 del ACI318-19, se indica que la tensión de fluencia del acero no puede superar los 550 MPa para el cálculo de la resistencia nominal máxima.

En esta misma sección del ACI 318 se limita el valor de la compresión hasta un porcentaje del valor de compresión pura. Para el caso de elementos no preesforzados con estribos, el límite de la fuerza de compresión es:

$$P_{n,max} = 0.80P_0$$

Para un fin investigativo, las curvas de interacción son normalizadas en base a una parametrización. Esta parametrización permite que las curvas puedan ser utilizadas por cualquier usuario, independientemente de las unidades.

La normalización de la carga axial y el momento flector se realiza en este estudio por medio de:

$$\text{Carga axial: } \frac{P}{f'_c A_g}$$

$$\text{Momento flector: } \frac{M}{f'_c A_g H}$$

Para diseño, es necesario cumplir con una cuantía mínima para el acero de refuerzo, la cual, es distinta para los diferentes elementos estructurales a analizar. Según la sección 18.7.4.1 del ACI318-19, las columnas no presforzadas pertenecientes a un marco especial resistente a momento deben cumplir con un refuerzo mínimo del 1% del área gruesa de concreto y un máximo de 6%. Para muros estructurales, tanto rectangulares como en T, se menciona en la sección 11.6.2, que el alma debe cumplir con un mínimo del 0.25%. Adicionalmente, la sección 18.10.2.4 establece que los elementos de borde deben cumplir con al menos el siguiente refuerzo mínimo, el cual depende de la tensión de fluencia del acero y la resistencia a la compresión del hormigón:

$$\rho_{min,b} = 0.5 \frac{\sqrt{f'_c \text{ (MPa)}}}{f_y \text{ (MPa)}}$$

II.5. CURVAS DE INTERACCIÓN REDUCIDAS

Las curvas de interacción de resistencia nominal deben ser aminoradas por el factor de reducción de resistencia para el diseño. El factor de reducción de resistencia $[\Phi]$ depende de la deformación unitaria en la última fibra de acero de refuerzo. Cuando esta deformación es menor que la de fluencia del material, se considera que la sección está controlada por compresión y se asigna un factor de reducción bajo ($\Phi=0.65$) puesto que, estos casos son menos dúctiles y más sensibles a variaciones en la resistencia del concreto. La Tabla II-3 muestra la relación entre el factor de reducción de resistencia y la deformación unitaria.

Tabla II - 3: Factor de reducción de resistencia, Φ , para momento, fuerza axial, y flexo-compresión.

Deformación unitaria neta a tracción, ϵ_{sn}	Clasificación	Φ
$\epsilon_{sn} \leq \epsilon_y$	Controlada por compresión	0.65
$\epsilon_y < \epsilon_{sn} < \epsilon_y + 0.003$	Transición	$0.65 + 0.25 \frac{\epsilon_t - \epsilon_y}{0.003}$
$\epsilon_{sn} \geq \epsilon_y + 0.003$	Controlada por tracción	0.90

III. CÁLCULO DE CURVAS DE INTERACCIÓN

En este capítulo se describen las funciones creadas en Matlab para calcular curvas de interacción para columnas, muros rectangulares y muros T. Adicionalmente, en este capítulo se comparan las curvas de interacción calculadas en este trabajo, con las calculadas utilizando los programas SAP2000 y spColumn.

III.1. MATLAB

Para el desarrollo automatizado de los diagramas de interacción, por medio del programa MATLAB se creó una serie de interfaces gráficas interactivas. Utilizando estas interfaces el usuario pueda escoger el tipo de elemento a analizar, ingresar la información respectiva, y finalmente obtener las curvas nominales y reducidas. En el Anexo A se muestra la interfaz gráfica de inicio del programa creado en Matlab, que muestra el menú principal donde el usuario elige el tipo de elemento, entre las opciones, columna, muro rectangular o muro en T.

III.1.1. Columnas

Como parte de este trabajo se creó una función en MATLAB que calcula curvas de interacción de columnas considerando distintas de cuantías y resistencia del acero. Adicionalmente, se creó una función que permite graficar las curvas específicas de interés del usuario. Estas funciones son llamadas a través de una interfaz gráfica que se muestra en el Anexo B. Esta interfaz pide al usuario el ingreso de las variables de diseño del elemento, que posteriormente son utilizadas por las funciones desarrolladas.

La función que se creó para calcular las curvas de interacción de columnas tiene la siguiente sintaxis.

[] = Curva_Columna_Rect(H, b, rec, nx, ny, fpc, rho, fy, fijo)

Los parámetros de entrada a la función son:

H	Altura de la columna (cm)
b	Base de la columna (cm)
rec	Recubrimiento de hormigón hasta borde externo de varillas longitudinales (cm)
nx	Número de varillas en X.
ny	Número de varillas en Y.
fpc	Resistencia de diseño a la compresión del hormigón (MPa)
rho	Cuantía de acero de refuerzo (%)
fy	Límite de fluencia en la resistencia del acero.
fijo	Parámetro que permite, en caso de elegir múltiples valores de resistencia y cuantía, establecer la propiedad fija, y la restante como variable.

La sintaxis de la función de gráficas de las curvas de interacción es la siguiente:

[] = Grafica_Col_Rect(AMnlim, AOMnlim, APnlim, AOPnlim, rho, fy, fijo, Anh, An, ApTC, ApCC)

AMnlim	Vector con los valores de momento nominal para cada combinación
AOMnlin	Vector con los valores de momento reducido para cada combinación
APnlim	Vector con los valores de carga axial nominal para cada combinación
AOPnlim	Vector con los valores de carga axial reducida para cada combinación
Anh	Valor de normalización para el momento.
An	Valor de normalización para la carga axial.
ApTC	Vector con los índices del punto de control por tracción para cada combinación.
ApCC	Vector con los índices del punto de control por compresión para cada combinación.
fijo	Parámetro que permite, en caso de elegir múltiples valores de resistencia y cuantía, establecer la propiedad fija, y la restante como variable.

En este documento se trabaja con una columna de 70cm x 70cm, con recubrimiento al borde de las varillas longitudinales de 3.5cm con un total de 16 varillas distribuidas en la sección (5 en cada borde), y un hormigón con resistencia a la compresión de 35MPa. La figura 3-1 muestra la curva de interacción nominal y reducida para una configuración de armado con 3% de cuantía y resistencia del acero de 690 MPa. Para esta sección el punto de inicio de control por tracción se obtiene para una fuerza axial nominal cercana a cero.

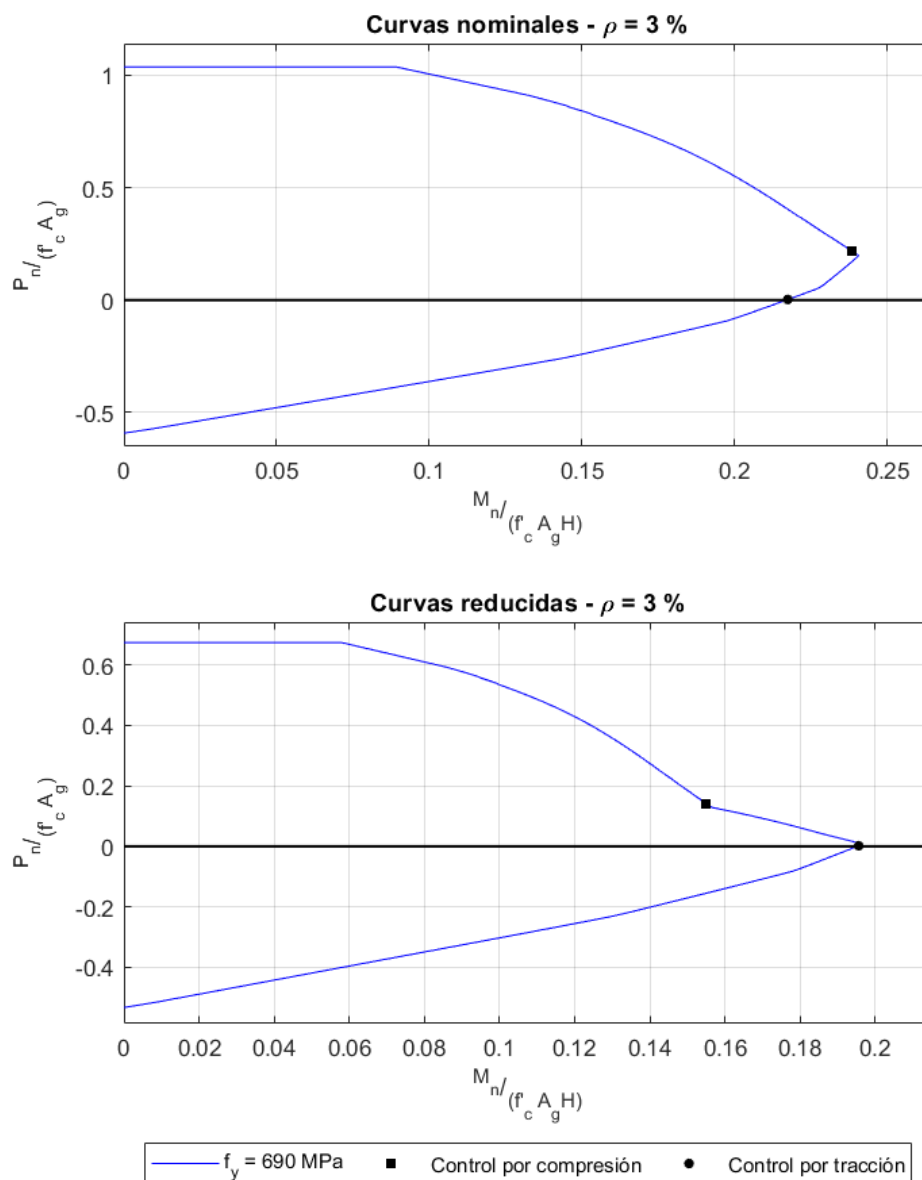


Figura 3 - 1: Curva de interacción de columna rectangular programado con MATLAB

III.1.2. Muros rectangulares

Para el estudio de muros rectangulares también se generaron funciones en MATLAB que permitan generar y graficar las curvas de interacción. Las funciones permiten considerar muros simétricos con elementos de borde. Adicionalmente, se generó una interfaz gráfica que permite al usuario el ingreso de toda la información necesaria respecto a la geometría y armado del muro, como se muestra en el anexo C.

La interfaz con los parámetros de ingreso llama a la función de cálculo de curvas de interacción de muros rectangulares que tiene la siguiente sintaxis:

`[] = Curva_Muro_Rectangular(Ht,Hb,ba,bb,nxa,nxb,nya,nyb,fpc,rec,rhoa,rhob,fy,fijo)`

Los parámetros de entrada a la función son:

Ht:	Longitud total del muro (cm)
Hb:	Longitud del elemento de borde (cm)
ba:	Ancho del alma (cm)
bb:	Ancho del elemento de borde (cm)
nxa:	Número de varillas en X del alma.
nxb:	Número de varillas en X del elemento de borde
nya:	Número de varillas en Y del alma
nyb:	Número de varillas en Y del elemento de borde
fpc:	Resistencia de diseño a la compresión del hormigón. (MPa)
rec:	Recubrimiento de hormigón hasta borde externo de varillas longitudinales (cm)
rhoa:	Cuantía de acero de refuerzo del alma.
rhob:	Cuantía de acero de refuerzo del elemento de borde (%)
fy:	Límite de fluencia en la resistencia del acero (MPa)
fijo:	Parámetro que permite, en caso de elegir múltiples valores de resistencia y cuantía, establecer la propiedad fija, y la restante como variable.

La sintaxis de la función de gráficas de las curvas de interacción es la siguiente:

[] = Grafica_Muro_Rect(AMnlim, AOMnlim, APnlim, AOPnlim, rho, fy, fijo, Anh, An, ApTC, ApCC)

AMnlim:	Vector con los valores de momento nominal para cada combinación
AOMnlin:	Vector con los valores de momento reducido para cada combinación
APnlim:	Vector con los valores de carga axial nominal para cada combinación
AOPnlim:	Vector con los valores de carga axial reducida para cada combinación
Anh:	Valor de normalización para el momento.
An:	Valor de normalización para la carga axial.
ApTC:	Vector con los índices del punto de control por tracción para cada combinación.
ApCC:	Vector con los índices del punto de control por compresión para cada combinación.
fijo:	Parámetro que permite, en caso de elegir múltiples valores de resistencia y cuantía, establecer la propiedad fija, y la restante como variable.

Como ejemplo práctico, en este documento se analiza el caso de un muro rectangular simétrico, con elementos de borde, 445cm de longitud y 30 cm de ancho. Los elementos de borde tienen una longitud de 52.2cm. El muro se analiza con una cuantía fija de 0.35% en la zona del alma. La figura 3-2 muestra la curva de interacción nominal y la reducida para el muro cuya armadura de borde es igual a 4 veces la cuantía mínima y la resistencia del acero es 550 MPa:

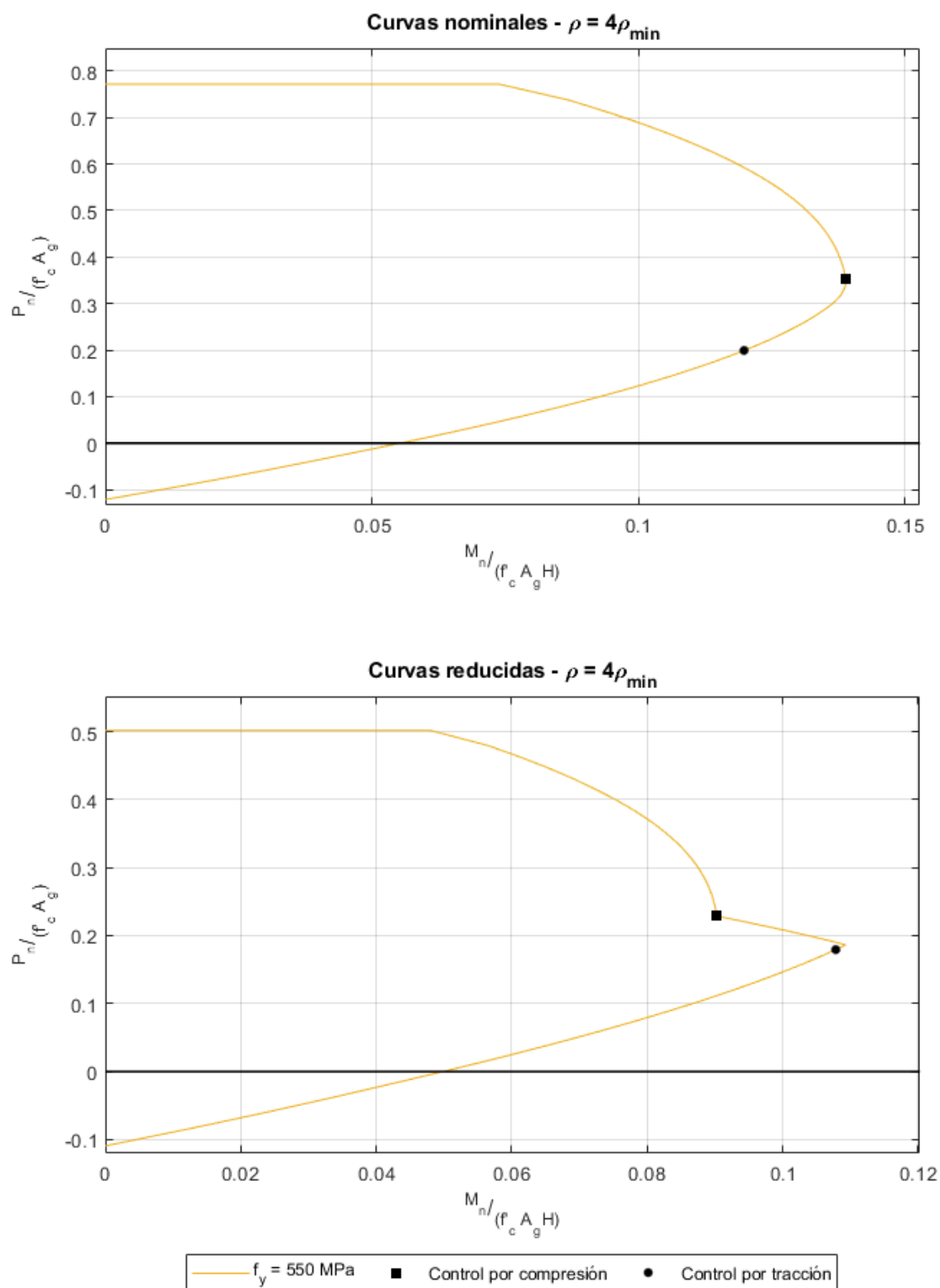


Figura 3 - 2: Curva de interacción de muro rectangular programado con MATLAB

III.1.3. Muros en T

Para muros en T también se crearon funciones en MATLAB que calculan y grafican las curvas de interacción nominales y reducidas. De similar manera, se creó una interfaz gráfica con la que el usuario ingrese la información solicitada para la configuración y propiedades de materiales del muro (ver anexo D). Esta interfaz da la posibilidad de ingresar elementos de borde simétricos en el ala y alma.

La función para el cálculo de las curvas de interacción para muros T tiene la sintaxis mostrada a continuación:

`[] = Curva_Muro_T(Lw,tw,Sw,rhow,Lf,Sf,rhof,Lb,Sb,rhob,fpc,rec,fy)`

Los parámetros de entrada a la función son:

Lw:	Longitud total del muro (cm)
tw:	Ancho del alma (cm)
Sw:	Separación máxima de varillas en el alma (cm)
rhow:	Cuantía de refuerzo en el alma (%)
Lf:	Longitud total del ala (cm)
Sf:	Separación máxima de varillas en el ala (cm)
rhof:	Cuantía de refuerzo en el ala (%)
Lb:	Longitud total del elemento de borde (cm)
Sb:	Separación máxima de varillas en elemento de borde (cm)
rhob:	Cuantía de refuerzo en el elemento de borde (%)
fpc:	Resistencia de diseño a la compresión del hormigón (MPa)
rec:	Recubrimiento de hormigón hasta borde externo de varillas longitudinales (cm)
fy:	Límite de fluencia en la resistencia del acero (MPa)

La sintaxis de la función de gráficas de las curvas de interacción es la siguiente:

[] = Grafica_Muro_T(AMnlim, AOMnlim, APnlim, AOPnlim, Lf, Anh, An,
ApTC, ApCC, fy)

AMnlim:	Vector con los valores de momento nominal para cada combinación
AOMnlin:	Vector con los valores de momento reducido para cada combinación
APnlim:	Vector con los valores de carga axial nominal para cada combinación
AOPnlim:	Vector con los valores de carga axial reducida para cada combinación
Anh:	Valor de normalización para el momento.
An:	Valor de normalización para la carga axial.
ApTC:	Vector con los índices del punto de control por tracción para cada combinación.
ApCC:	Vector con los índices del punto de control por tracción para cada combinación.

La Figura 3-3 muestra una curva de interacción nominal y reducida para un muro T. El muro T tiene el alma con la misma dimensión del muro rectangular del punto anterior y tiene un ala con las mismas dimensiones que el alma. El muro no tiene el elemento de borde superior y tiene dos elementos de borde en el ala, con las mismas dimensiones de la del elemento de borde del muro rectangular. La Figura 3-3 presenta una punta en el lado derecho, es decir, cuando se ejerce compresión hacia el ala, que asemeja una superficie cóncava.

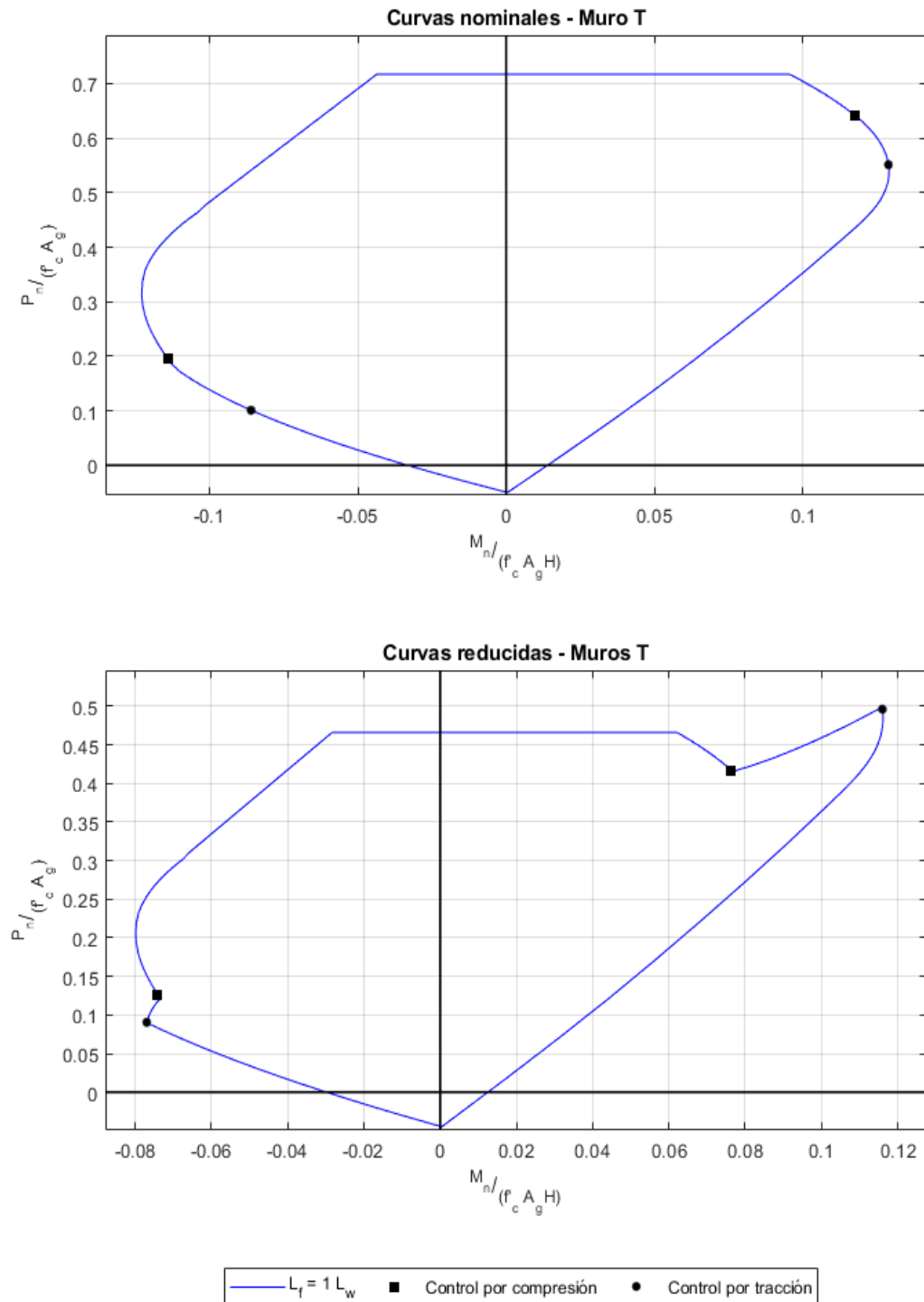


Figura 3 - 3: Curva de interacción de muro en T programado con MATLAB

III.2. SOFTWARES COMERCIALES

Para las comprobaciones de los cálculos de las curvas de interacción desarrolladas en este trabajo se utilizan los programas ETABS y spColumn. El programa ETABS (versión 19.1.0) se utiliza en todos los casos, el programa spColumn (versión 7.0) se utiliza adicionalmente para los muros T. Estos programas por defecto toman consideraciones distintas a las establecidas en el cálculo de las curvas realizadas anteriormente, debido a limitaciones en la resistencia. Adicionalmente, estos programas usan la normativa del año 2014 como predeterminada, por lo que, deben ser modificados manualmente al año 2019, previo al análisis.

Para validar las curvas de interacción elaboradas con Matlab, se escogen diversos casos con variaciones de las dimensiones, resistencia y cuantía.

III.2.1. Columnas

La comparación de las curvas de interacción de columnas se realiza con las siguientes cuantías y resistencia del acero:

- i.* $\rho = 1\%, f_y = 420 \text{ MPa}$
- ii.* $\rho = 3\%, f_y = 550 \text{ MPa}$
- iii.* $\rho = 6\%, f_y = 690 \text{ MPa}$

En preferencias de diseño del programa ETABS, se selecciona la categoría de diseño sísmico a tipo A, el código de diseño ACI318-19, y se incrementa el número de puntos a una cantidad lo suficientemente grande para obtener una buena discretización de la curva. El programa exige un número primo, el número de curvas se indica al mínimo por simplicidad. La Figura 3-4 muestra los parámetros modificados manualmente.

E Concrete Frame Design Preferences for ACI 318-19

Item	Value
01 Design Code	ACI 318-19
02 Multi-Response Case Design	Step-by-Step - All
03 Number of Interaction Curves	4
04 Number of Interaction Points	101
05 Consider Minimum Eccentricity?	Yes
06 Design for B/C Capacity Ratio?	Yes
07 Seismic Design Category	A
08 Design System Omega0	2
09 Design System Rho	1
10 Design System Sds	0.5
11 Phi (Tension Controlled)	0.9
12 Phi (Compression Controlled Tied)	0.65
13 Phi (Compression Controlled Spiral)	0.75
14 Phi (Shear and/or Torsion)	0.75
15 Phi (Shear Seismic)	0.6
16 Phi (Joint Shear)	0.85
17 User Defined Allowable PT Stresses?	No
18 Concrete Strength Ratio at Transfer f'_{ci} / f'_c	0.8

Item Description
The selected design code. Subsequent design is based on this selected code.

Explanation of Color Coding for Values
Blue: Default Value
Black: Not a Default Value
Red: Value that has changed during the current session

Set To Default Values

Reset To Previous Values

Figura 3 - 4: Configuración para diseño en concreto reforzado con ACI 318-19 en ETABS

Se crean curvas de interacción con los tres tipos de configuraciones de columnas planteadas (combinaciones de cuantía y resistencia). Para todos los casos se mantiene la altura, el ancho y el recubrimiento. Luego, se ejecuta en la opción de diseño en concreto, para obtener la curva de interacción respectiva. La Figura 3-5 muestra el modelado de la columna y sus propiedades en ETABS y la Figura 3-6 muestra las curvas de interacción calculadas por el programa.

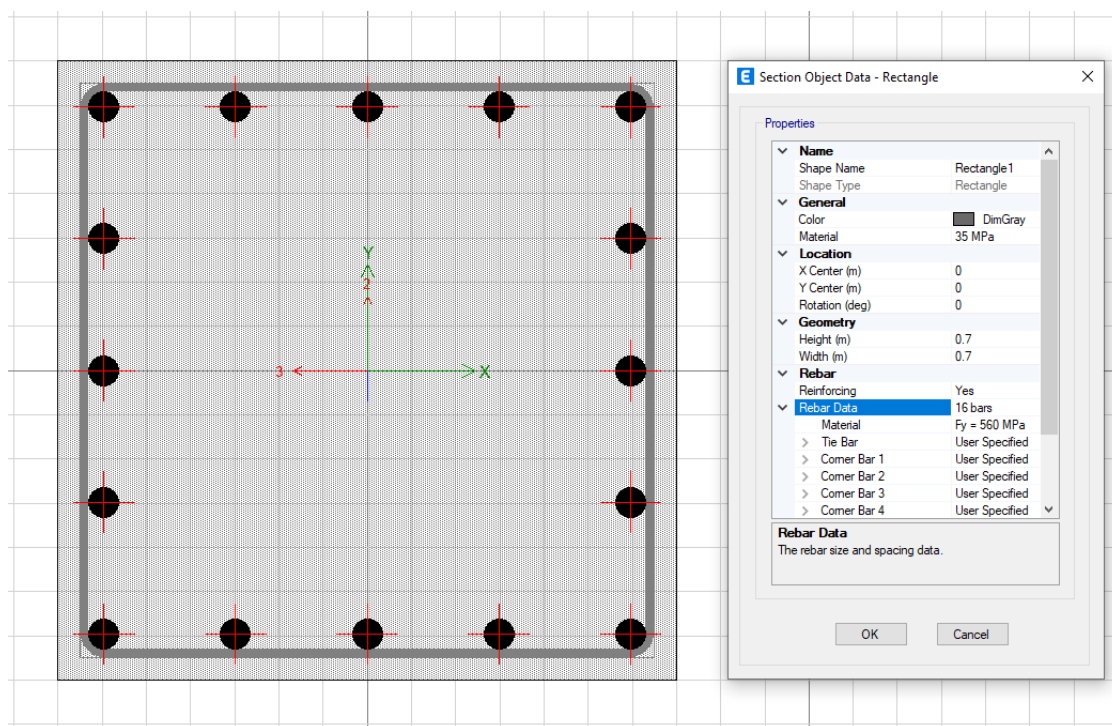


Figura 3 - 5: Diseño de columna cuadrada en ETABS

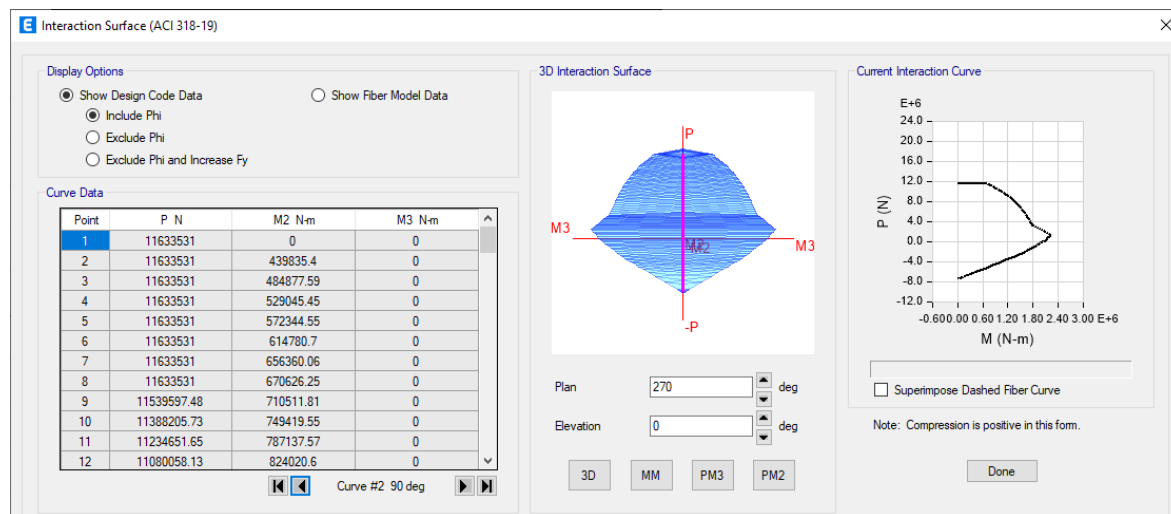


Figura 3 - 6: Resultado de curvas de interacción para columnas cuadradas en ETABS

Los datos de la curva de interacción obtenidos de ETABS fueron exportados hacia Excel para poder compararlos con los obtenidos desde MATLAB por medio de superposición de

gráficas. Las Figura 3-7, 3-8 y 3-9 muestran las comparaciones entre ETABS y MATLAB con las tres configuraciones establecidas previamente. Las figuras muestran que las curvas de interacción de ETABS y MATLAB son prácticamente coincidentes, y por lo tanto se válida la programación realizada en MATLAB

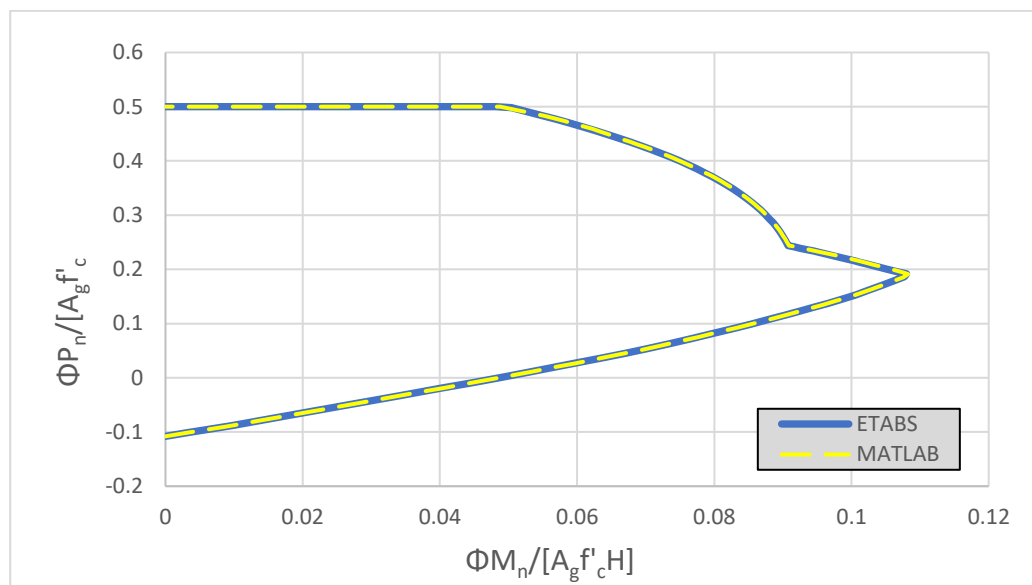


Figura 3 - 7: Comparativa para columna con 1% de cuantía y fluencia de 420MPa

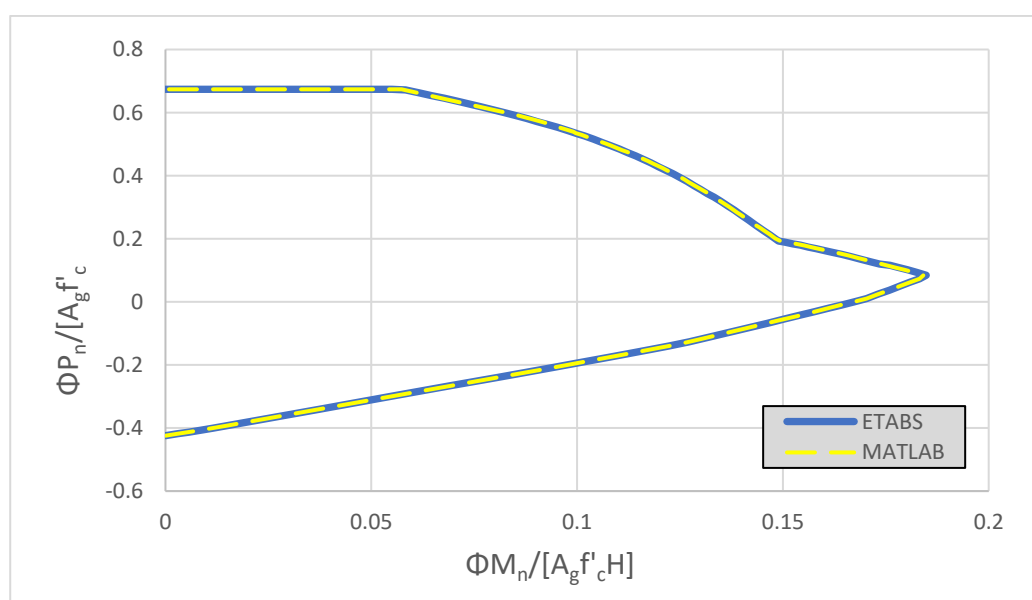


Figura 3 - 8: Comparativa para columna con 3% de cuantía y fluencia de 550MPa

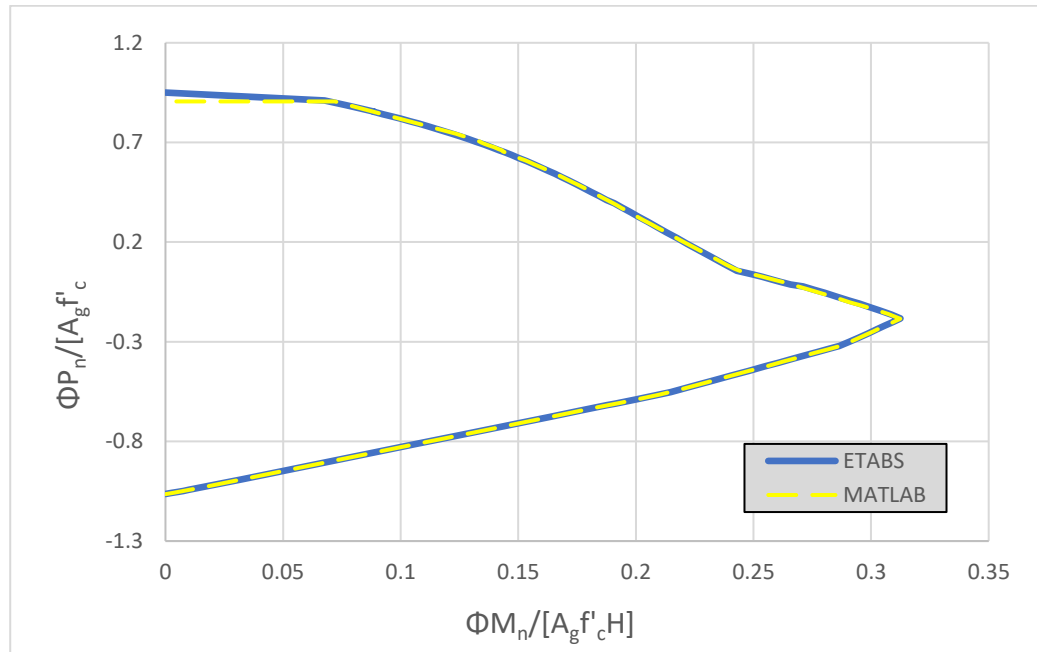


Figura 3 - 9: Comparativa para columna con 6% de cuantía y fluencia de 690MPa

III.2.2. Muros rectangulares

La comparación de las curvas de interacción de muros rectangulares se realiza con las siguientes cuantías y resistencia del acero:

- i. $\rho_b = \rho_{min}, f_y = 420 \text{ MPa}$
- ii. $\rho_b = 3\rho_{min}, f_y = 550 \text{ MPa}$
- iii. $\rho_b = 6\rho_{min}, f_y = 690 \text{ MPa}$

En preferencias de diseño de muros de corte del programa ETABS se selecciona el código de diseño ACI318-19, y se selecciona la cantidad de puntos necesaria para la discretización de las curvas. La Figura 3-10 muestra los cambios manuales realizados en las preferencias.

E Shear Wall Design Preferences for ACI 318-19

	Item	Value
01	Design Code	ACI 318-19
02	Multi-Response Case Design	Step-by-Step - All
03	Rebar Material	Fy = 690 MPa
04	Rebar Shear Material	Fy = 690 MPa
05	Design System Rho	1
06	Design System Sds	0.5
07	Importance Factor	1
08	System Cd	5.5
09	Wall Ductility Type	Special Structural Wall
10	Phi (Tension Controlled)	0.9
11	Phi (Compression Controlled)	0.65
12	Phi (Shear and/or Torsion)	0.75
13	Phi (Shear Seismic)	0.6
14	Pmax Factor	0.8
15	Number of Curves	4
16	Number of Points	101
17	Edge Design PT-Max	0.06
18	Edge Design PC-Max	0.04

Item Description
The selected design code. Subsequent design is based on this selected code.

Explanation of Color Coding for Values
Blue: Default Value
Black: Not a Default Value
Red: Value that has changed during the current session

Set To Default Values

Reset To Previous Values

Figura 3 - 10: Parámetros de diseño de muro de concreto reforzado ACI 318-19, ETABS

Se crean curvas de interacción con los tres tipos de configuraciones de muros rectangulares planteados (combinaciones de cuantía y resistencia). Para todos los casos se mantiene la altura, el ancho y el recubrimiento. Luego, se ejecuta en la opción de diseño en concreto, para obtener la curva de interacción respectiva. La Figura 3-11 muestra la modelación del muro rectangular en ETABS y la Figura 3-12 muestra el resultado de las curvas calculadas por el programa.

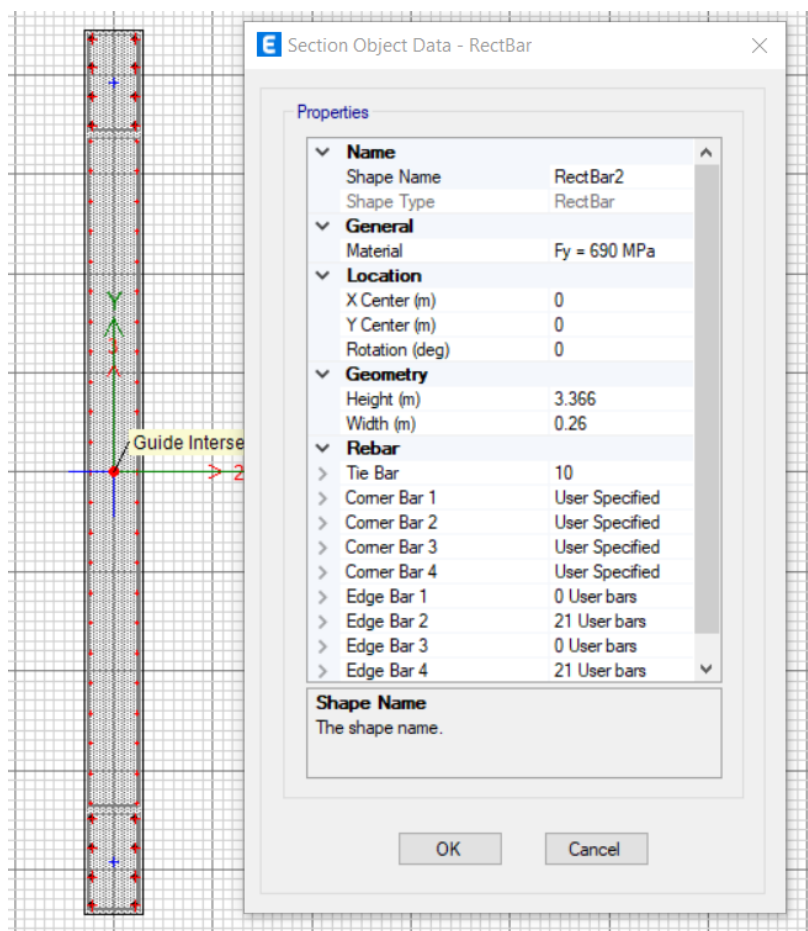


Figura 3 - 11: Modelación de muro rectangular de concreto reforzado, ETABS

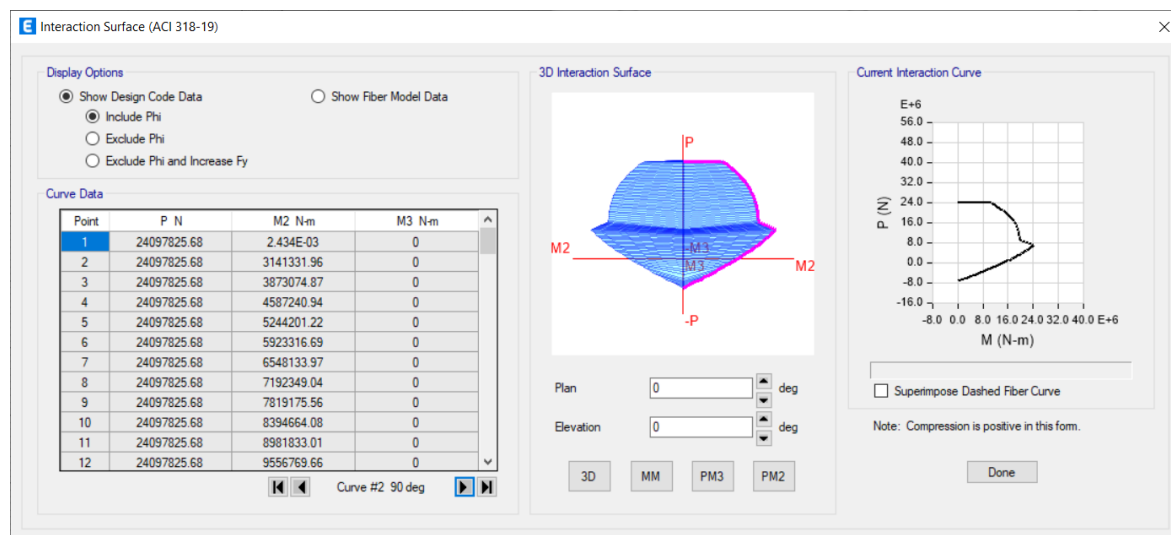


Figura 3 - 12: Curva de interacción para muro rectangular, ETABS

Los datos de la curva de interacción obtenidos de ETABS fueron exportados hacia Excel para poder compararlos con los obtenidos desde MATLAB por medio de superposición de gráficas. Las Figura 3-13, 3-14 y 3-15 muestran las comparaciones entre ETABS y MATLAB con las tres configuraciones establecidas previamente. Las figuras muestran que las curvas de interacción de ETABS y MATLAB son prácticamente coincidentes, y por lo tanto se válida la programación realizada en MATLAB.

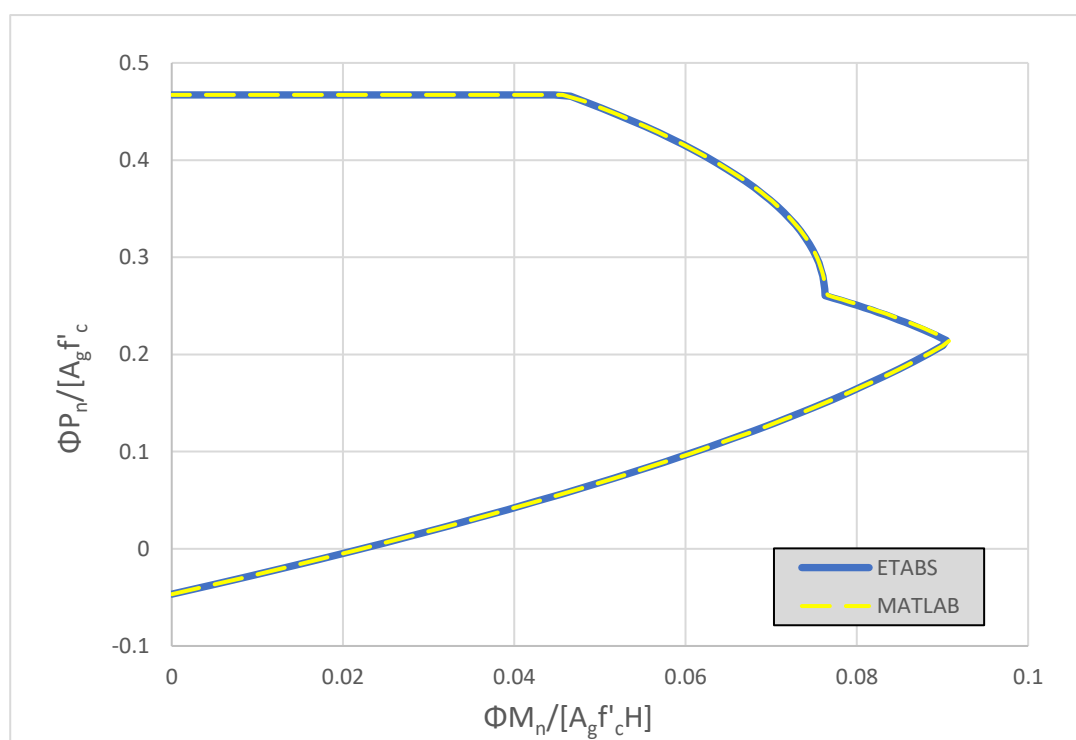


Figura 3 - 13: Comparación de muro rectangular con ρ_{min} en borde y fluencia de 420MPa

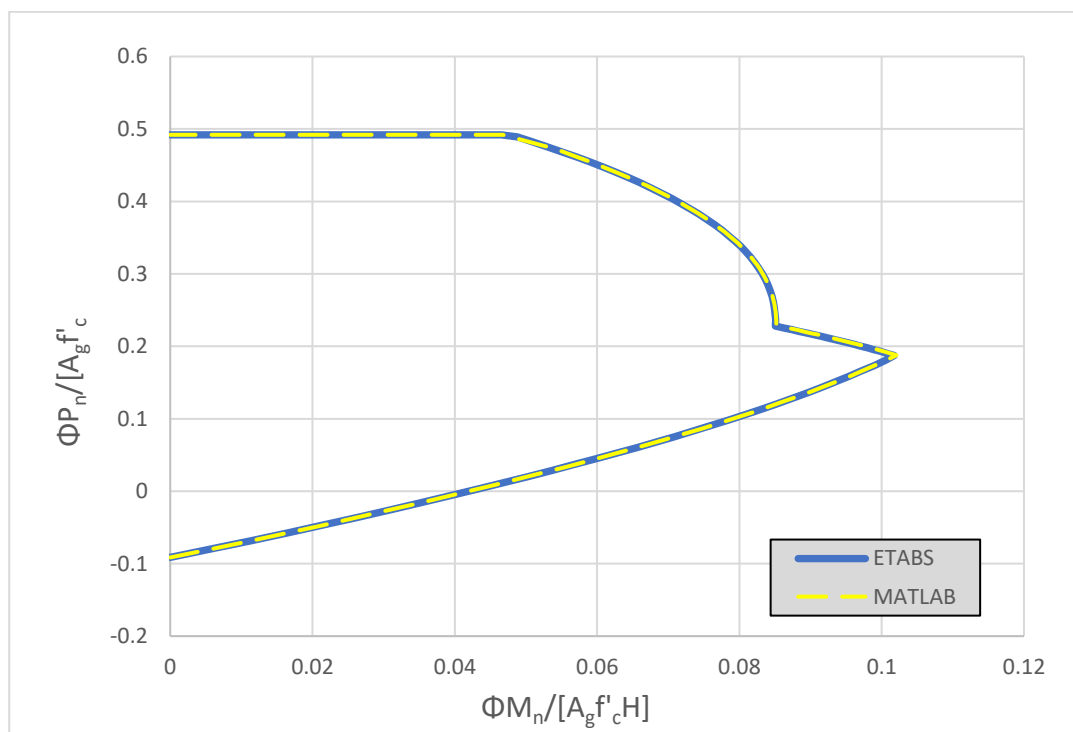


Figura 3 - 14: Comparación de muro rectangular con $3\rho_{\min}$ en borde y fluencia de 550MPa

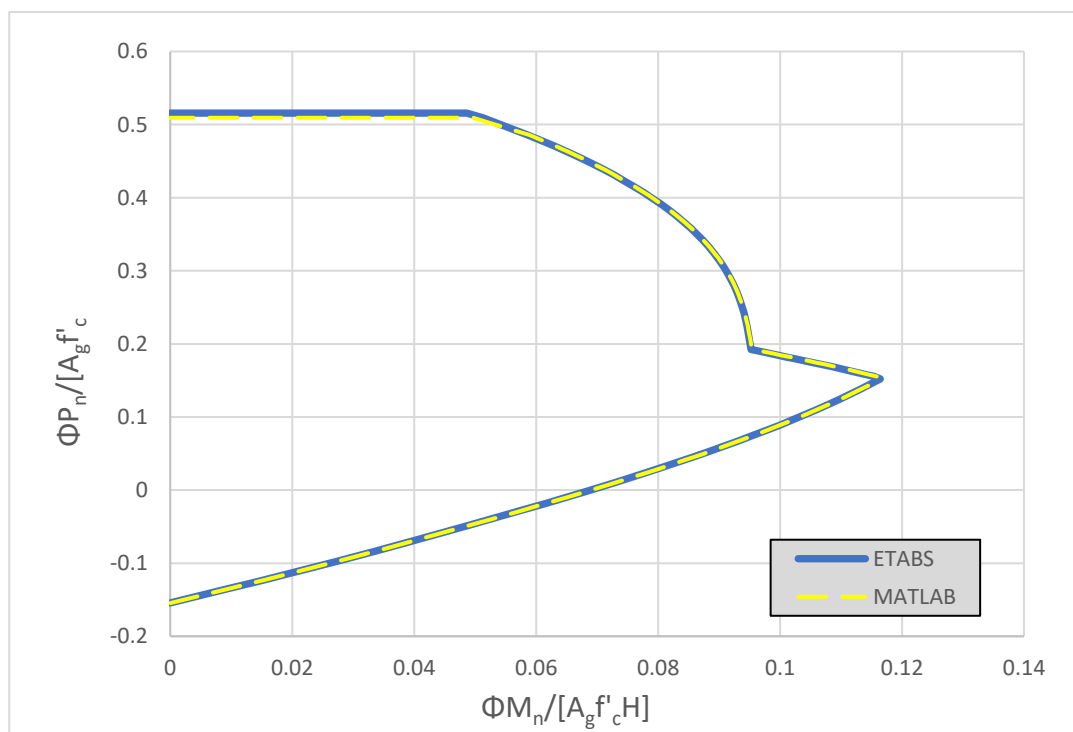


Figura 3 - 15: Comparación de muro rectangular con $6\rho_{\min}$ en borde y fluencia de 690MPa

III.2.3. Muros en T

En los muros en T, las variaciones están en la longitud total del ala, y dado que, estas están en función de la longitud total del alma, se eligen los siguientes dos casos para las comparaciones respectivas:

- i. $L_f = 0.5 L_w, f_y = 420 MPa$
- ii. $L_f = 1.0 L_w, f_y = 420 MPa$

Las configuraciones para el diseño en hormigón armado se mantienen iguales que en el análisis para muros rectangulares. La Figura 3-16 muestra la modelación del muro en T en ETABS para el caso con $L_f=L_w$ y la Figura 3-17 muestra el resultado de las curvas calculadas por el programa.

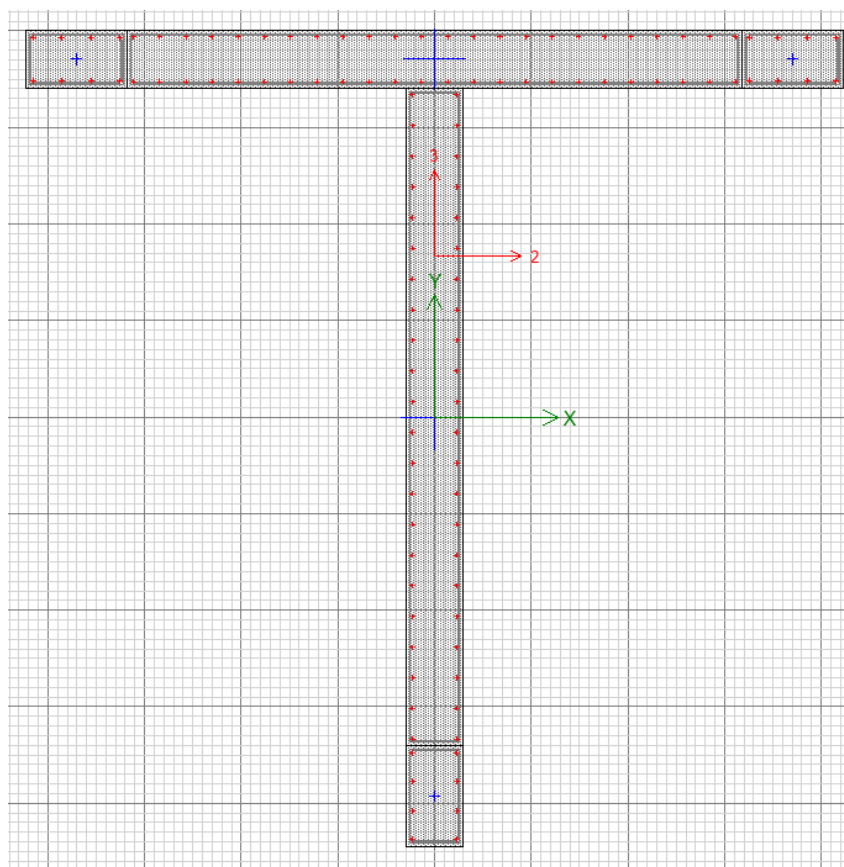


Figura 3 - 16: Modelación de muro en T de concreto reforzado en ETABS

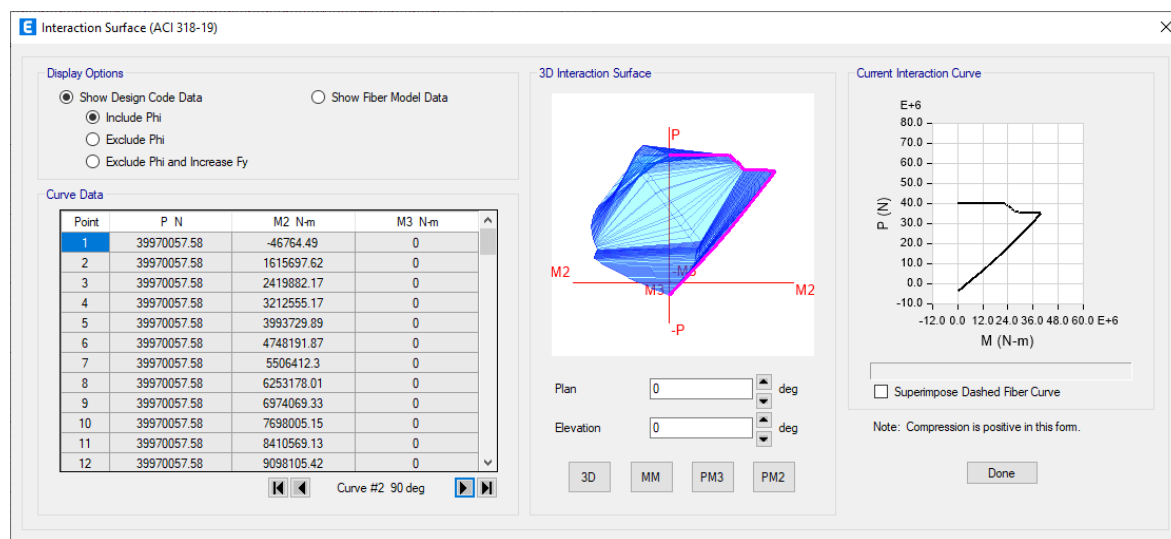


Figura 3 - 17: Curva de interacción para muro en T en ETABS

Para el caso de spColumn, en la opción de parámetros iniciales se eligen los parámetros de diseño respectivos a la norma actual. De similar manera, se crea en spColumn la sección del elemento en T y se obtienen las curvas de interacción. La figura 3-18 muestra la definición del código de diseño al ACI318-19, la figura 3-19 muestra la modelación de la sección y la Figura 3-20 muestra las curvas de interacción calculadas por spColumn.

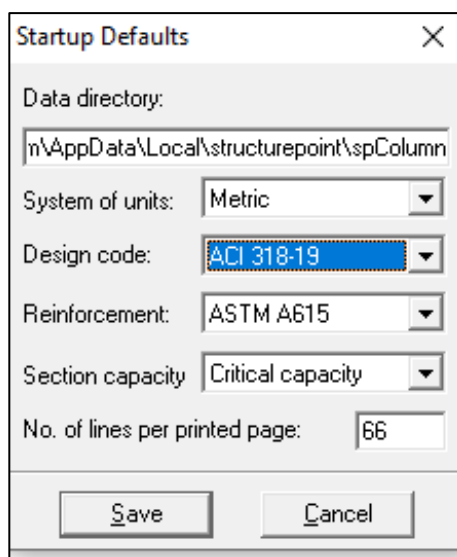


Figura 3 - 18: Parámetros de diseño en concreto reforzado con ACI 318-19 en spColumn

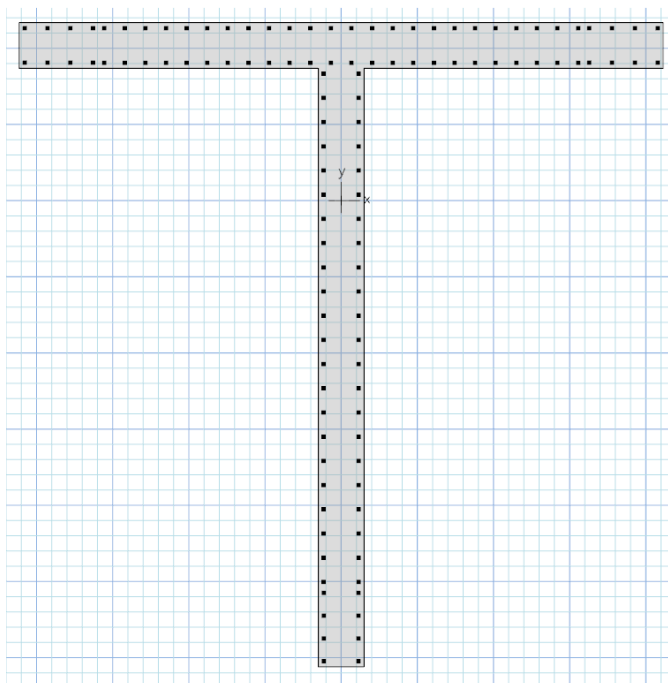


Figura 3 - 19: Modelación de muro en T de concreto reforzado en spColumn

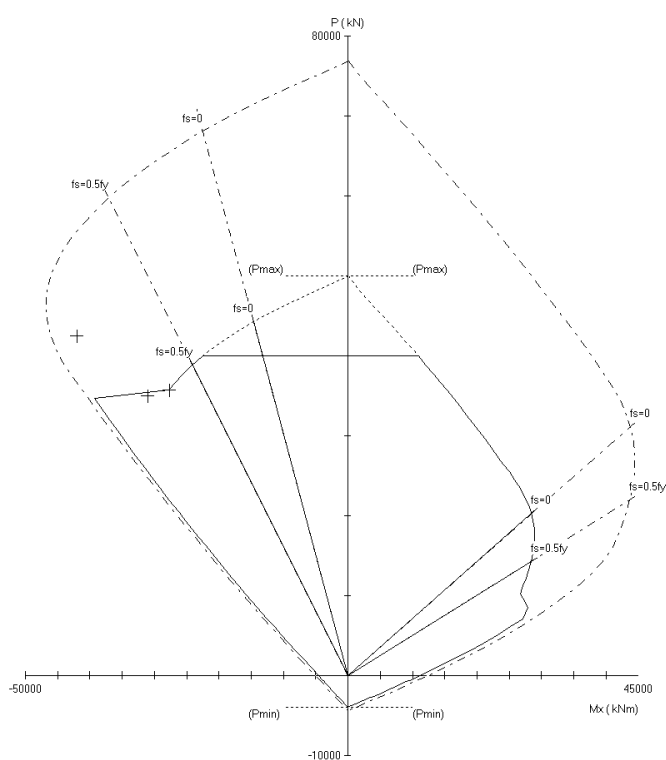


Figura 3 - 20: Curva de interacción para muro en T en spColumn

Las curvas de interacción obtenidas por ETABS y spColumn fueron exportadas a Excel y se realiza la superposición para validar los resultados obtenidos en MATLAB. Las figuras 3-21 y 3-22 comparan las curvas nominales obtenidas entre los tres programas y las figuras 3-23 y 3-24 superponen las curvas reducidas respectivas. Las figuras muestran que las curvas nominales obtenidas con los tres programas coinciden, sin embargo, las curvas reducidas no coinciden. Existe un tramo en la zona de ala comprimida en que las curvas obtenidas con el programa MATLAB desarrollado en este trabajo son distintas a las curvas de los programas comerciales. Debido a esta diferencia, se analiza un posible ajuste a los factores de reducción realizado por parte de los programas ETABS y spColumn. Como los manuales de referencia de estos programas no indican el ajuste realizado en las curvas, el análisis se realiza manualmente.

Utilizando los valores nominales y reducidos del momento obtenidos de los programas ETABS y spColumn es posible determinar, por medio de la división, el factor de reducción para cada punto de la curva de interacción. Con este procedimiento, es posible obtener los valores de carga axial para cuando los límites del factor de reducción de 0.65 y 0.9. Como era previsto por las figuras 3-23 y 3-24, el par ordenado de momento y carga axial cuando el factor es de 0.65 es similar al par obtenido en MATLAB. Sin embargo, cuando se tiene sección controlada por tracción ($\Phi=0.9$), el valor de carga axial no coincide. Se toma el valor de carga axial obtenido correspondiente en ETABS, y de los resultados de MATLAB se determina a qué nivel el eje neutro debe estar ubicado para obtener dicha carga y finalmente obtener la deformación en la fibra extrema de acero.

En el primer caso, cuando se tiene $L_f = 0.5 L_w$, se verifica que, el último valor que posee $\Phi=0.9$, corresponde a una deformación unitaria del acero de 0.0073, mientras que, cuando $L_f = L_w$, se obtiene la deformación de 0.0102, siendo ambos mayores al 0.005 correspondiente al acero con $F_y = 420$ MPa. Básicamente lo que hacen los programas ETABS y spColumn es aplanar la punta de la curva de interacción que se observa en Matlab.

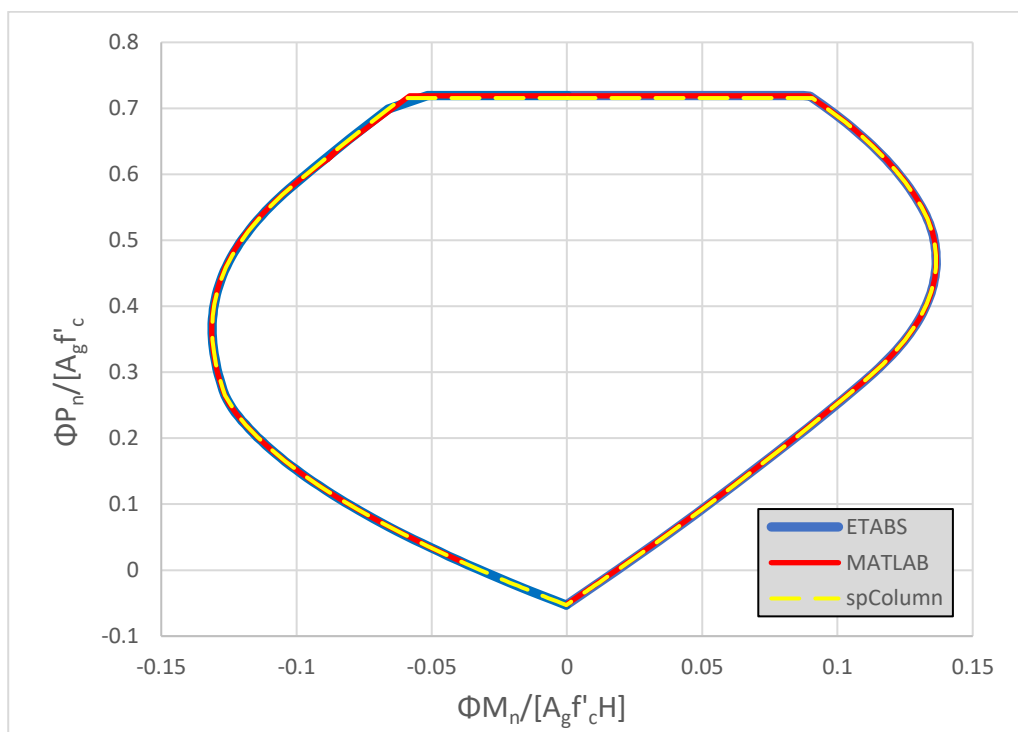


Figura 3 - 21: Comparativa de curvas nominales para muro en T con $L_f = 0.5L_w$

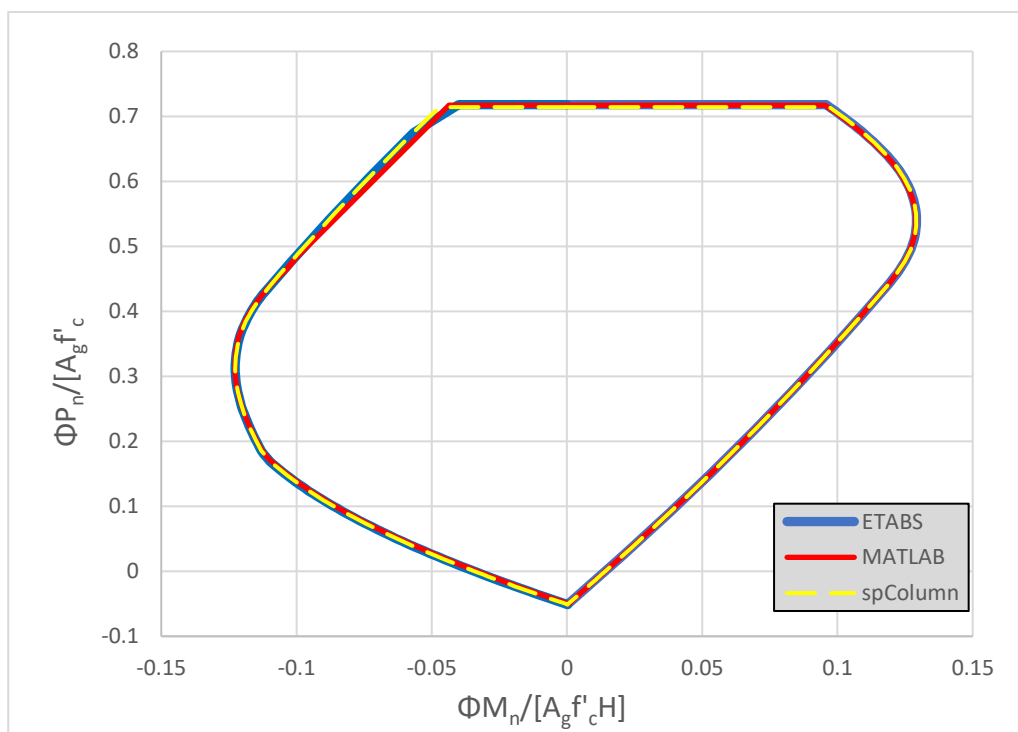


Figura 3 - 22: Comparativa de curvas nominales para muro en T con $L_f = 1L_w$

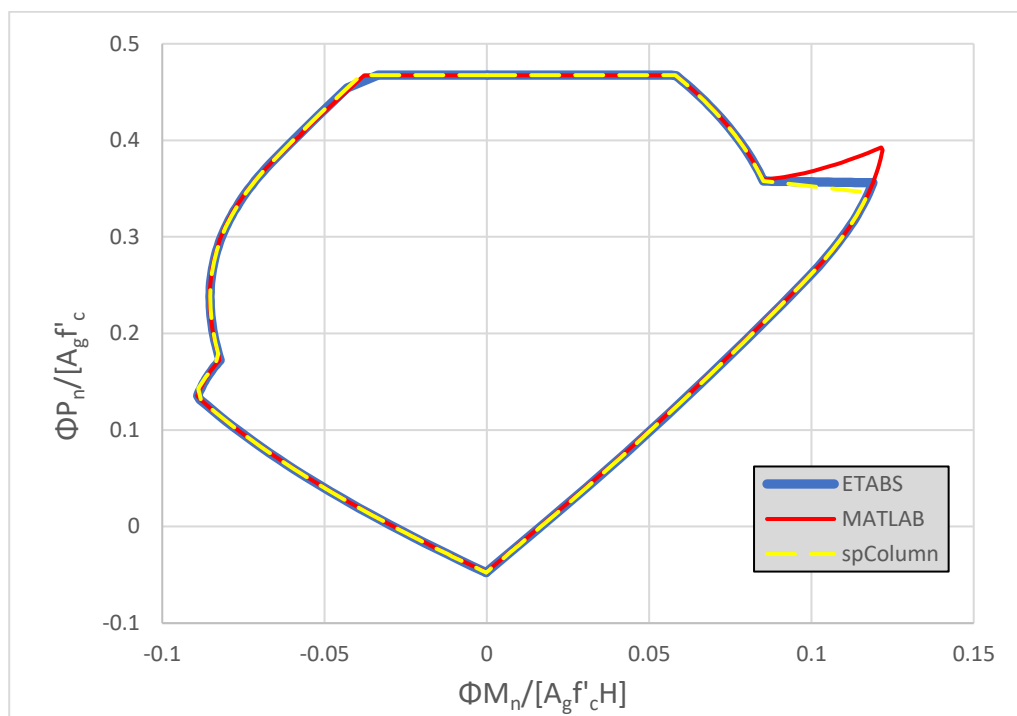


Figura 3 - 23: Comparativa de curvas reducidas para muro en T con $L_f = 0.5L_w$

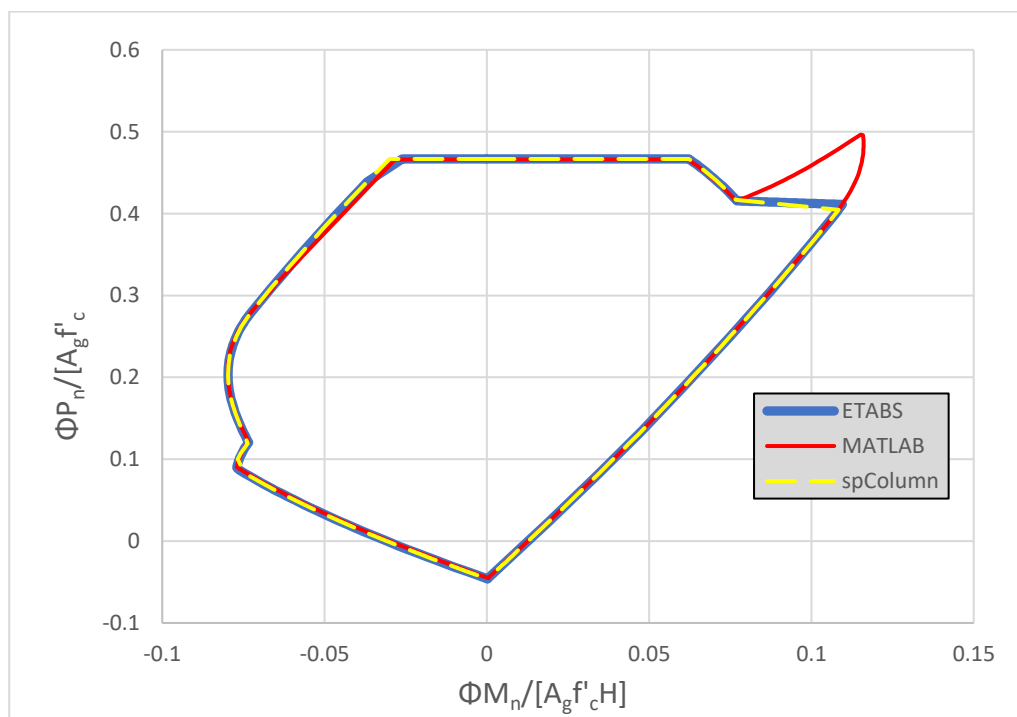


Figura 3 - 24: Comparativa de curvas reducidas para muro en T con $L_f = 1L_w$

IV. ANÁLISIS DE CURVAS DE INTERACCIÓN

En esta sección se presentan todas las gráficas obtenidas del análisis de curvas de interacción para las diferentes configuraciones y tipos de elementos estructurales. Se plantea un análisis y discusión de los puntos relevantes y su variación en función de los parámetros fijos y variables.

IV.1. COLUMNAS

Las figuras 4-1 a 4-6 muestran las curvas nominales y reducidas para columnas con cuantía fija y resistencia de fluencia variable. En todas estas figuras se aprecia que, al incrementar los valores de resistencia del acero, los puntos de control por compresión y tracción siempre toman una tendencia a decrecer en carga axial con el incremento de la resistencia. Esta observación es notoria incluso para las secciones con la mínima cuantía del 1%. En las figuras también se observa que para los aceros de alta resistencia (550 MPa y 690 MPa), las curvas nominales y reducidas que se forman, independientemente del porcentaje de cuantía, son coincidentes desde el punto de control por compresión, hasta la compresión pura.

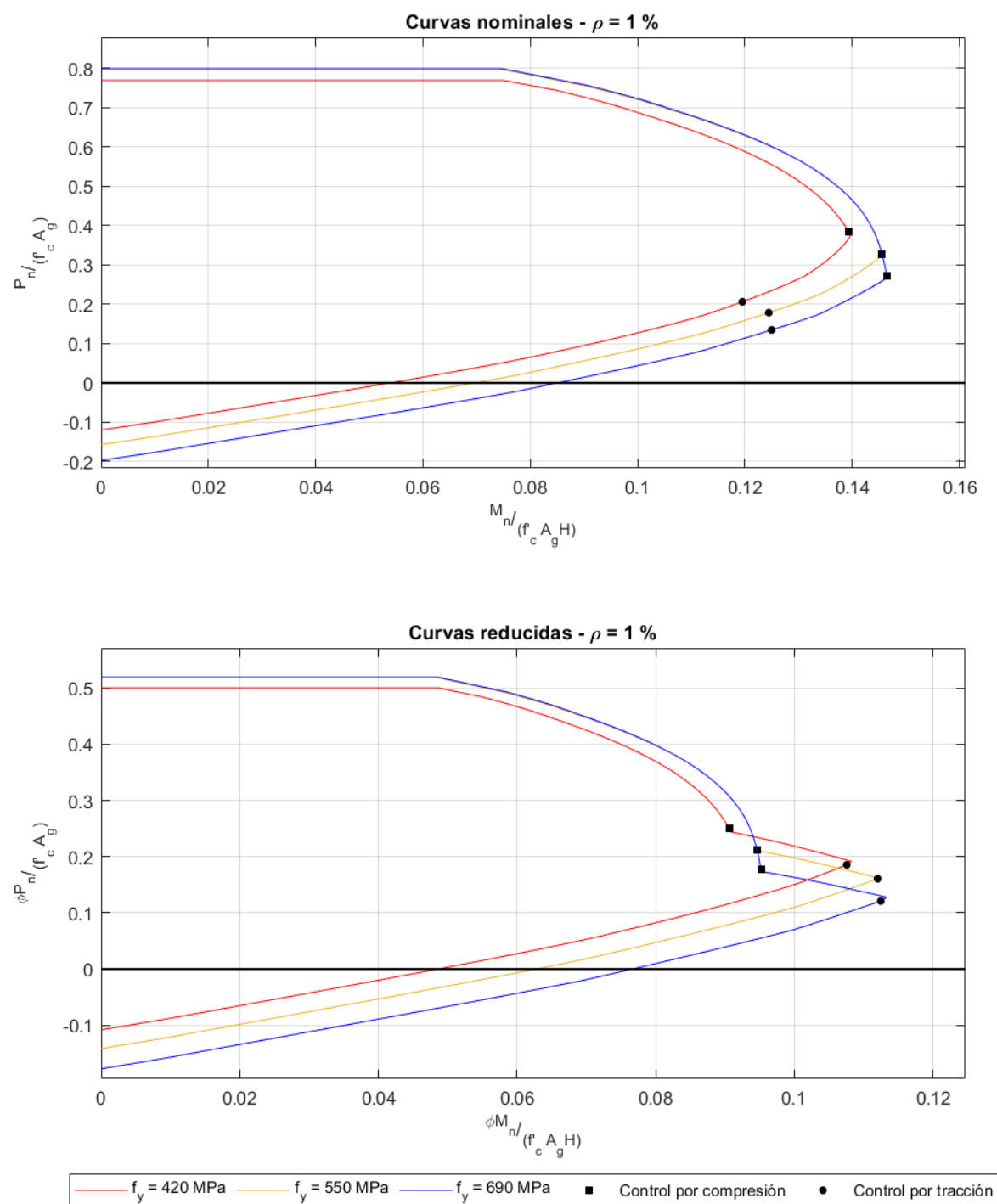


Figura 4 - 1: Curvas de interacción de columna con $\rho=1\%$ y fluencias varias

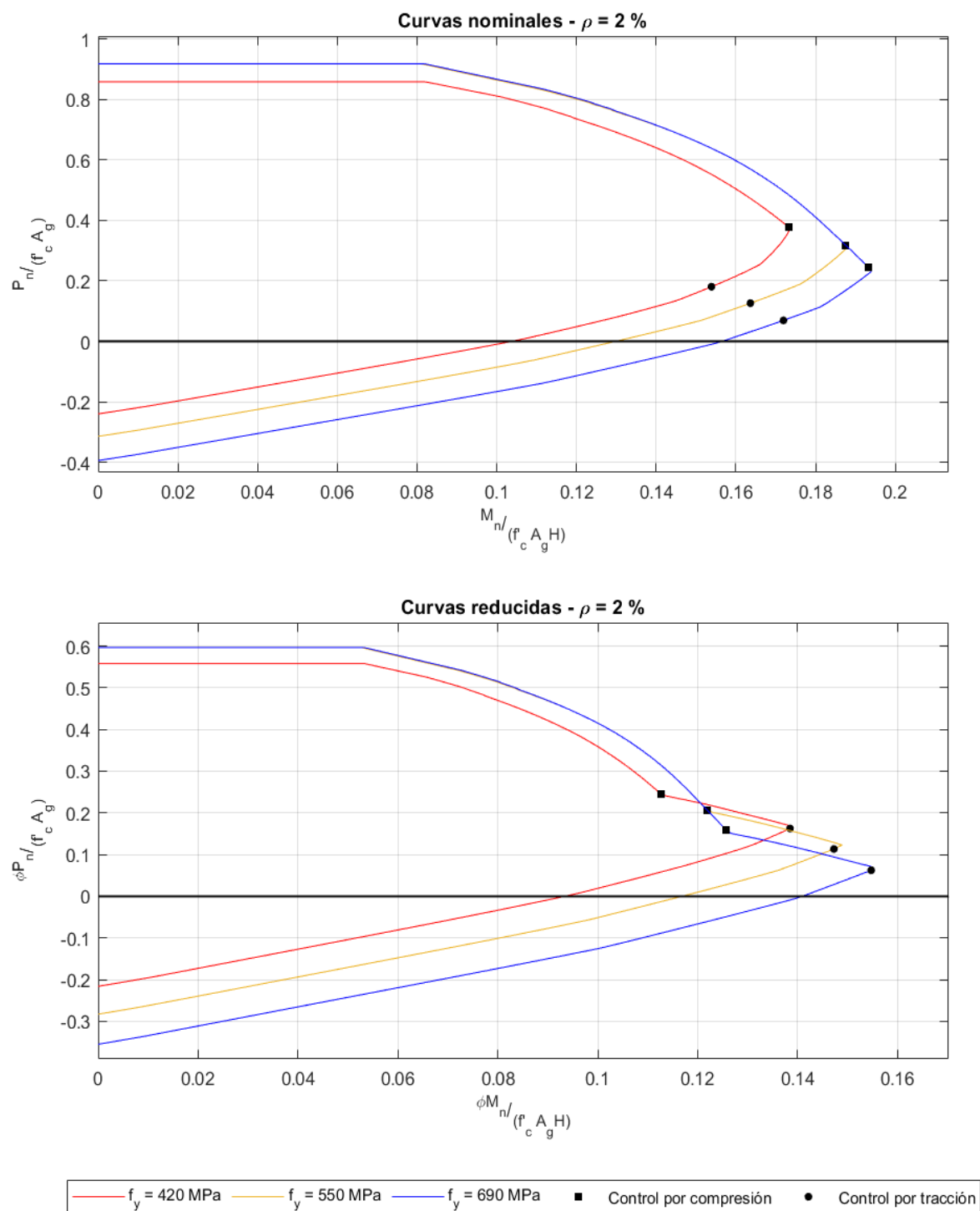


Figura 4 - 2: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=2\%$ y fluencias varias

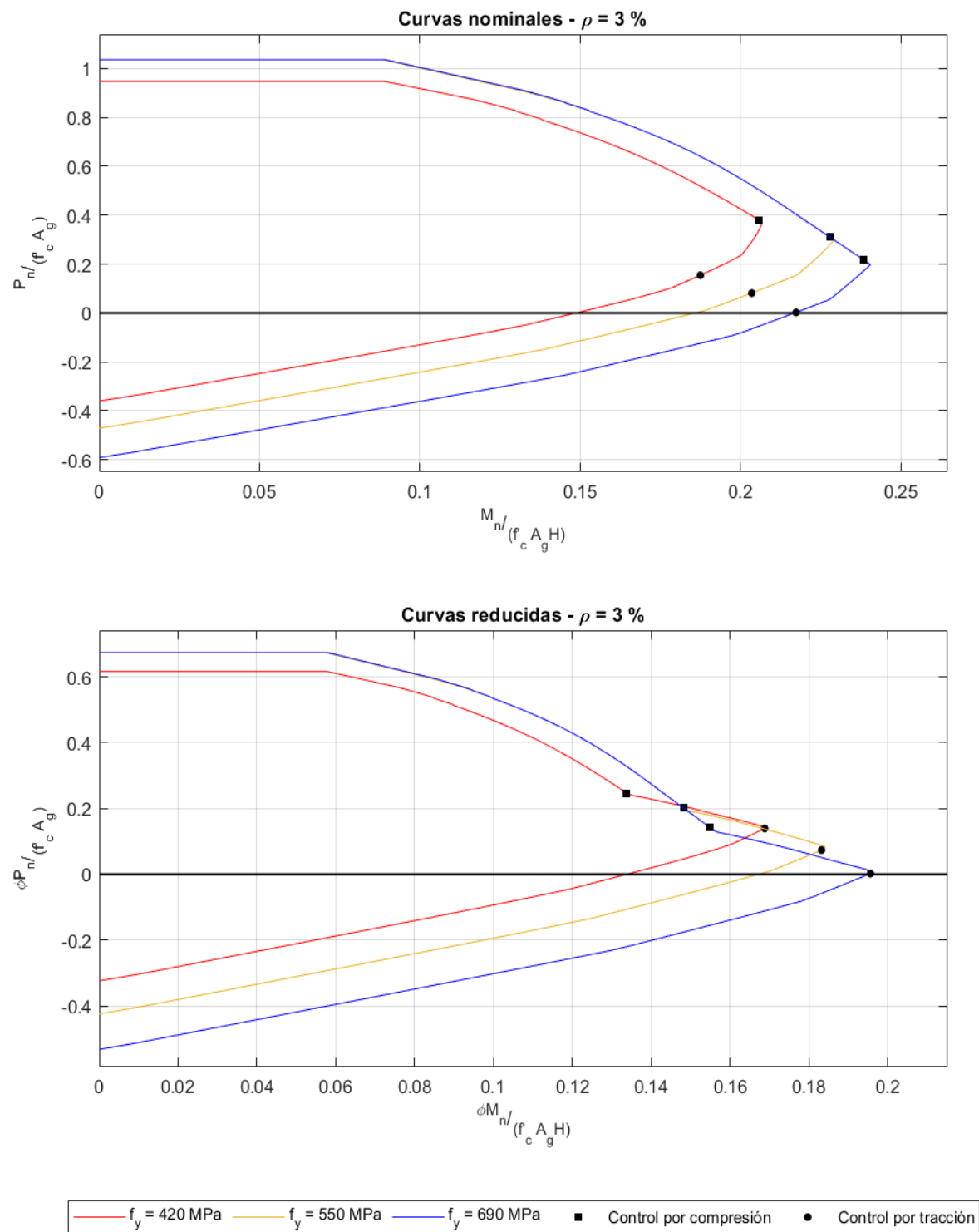


Figura 4 - 3: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=3\%$ y fluencias varias

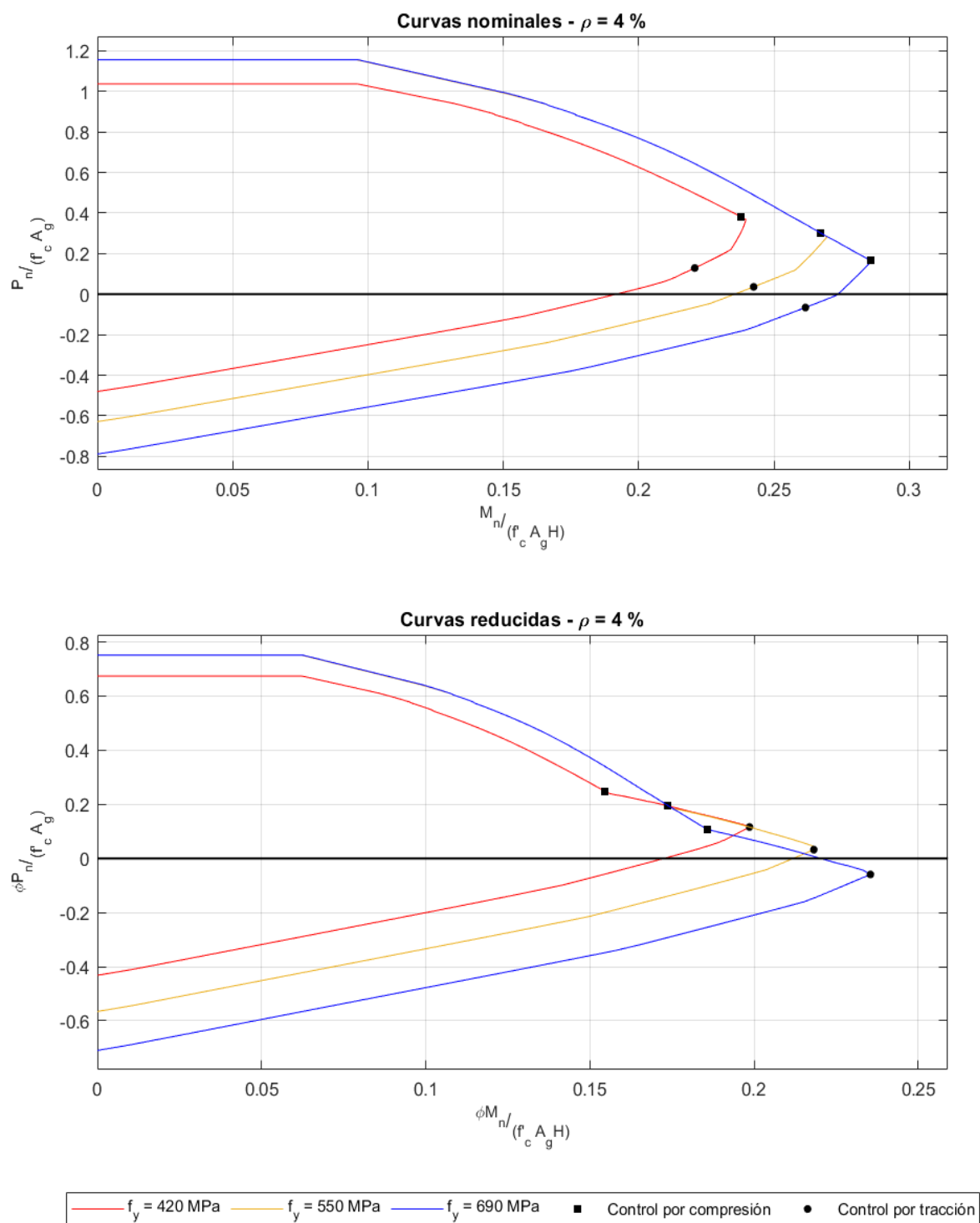


Figura 4 - 4: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=4\%$ y fluencias varias

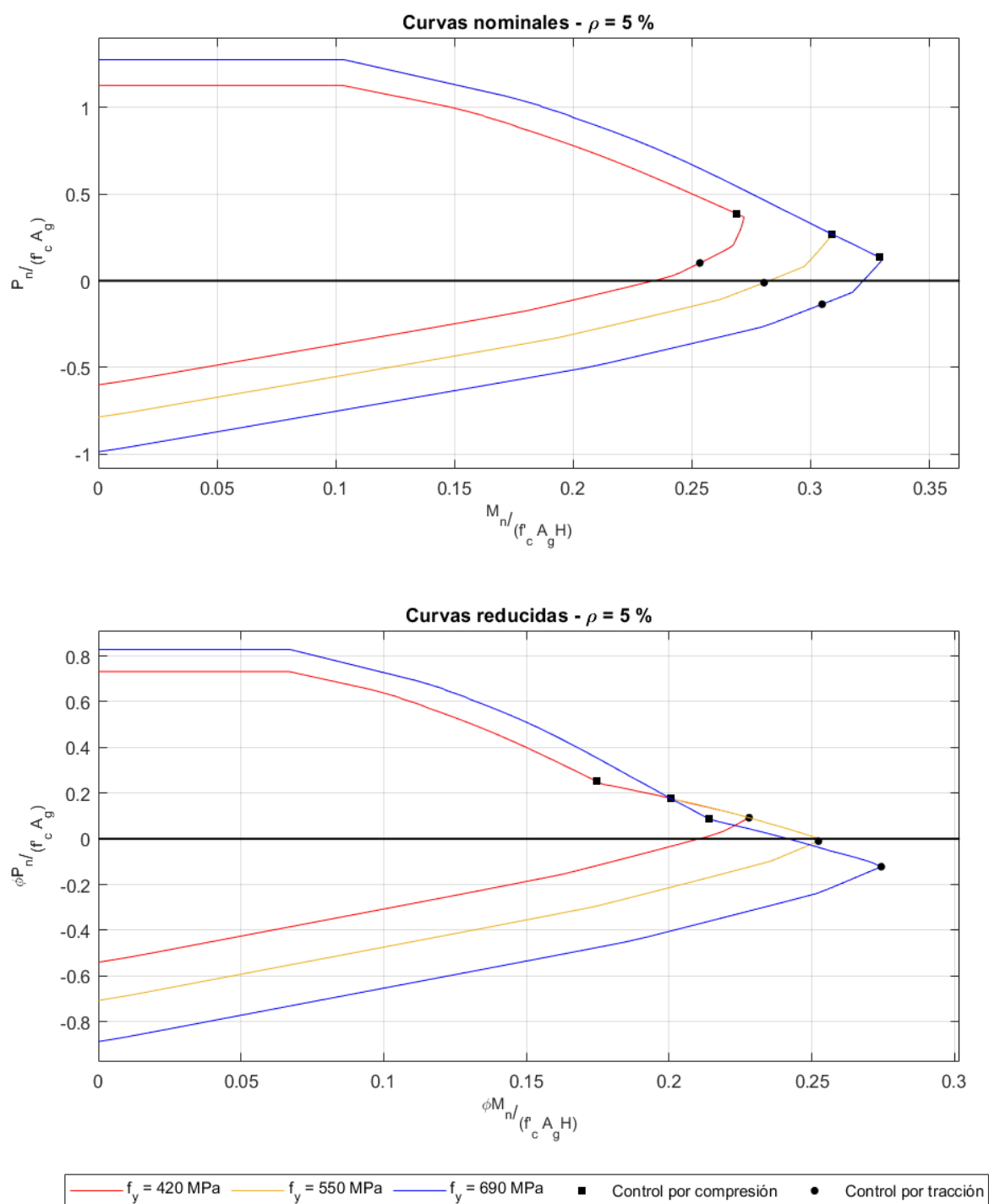


Figura 4 - 5: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=5\%$ y fluencias varias

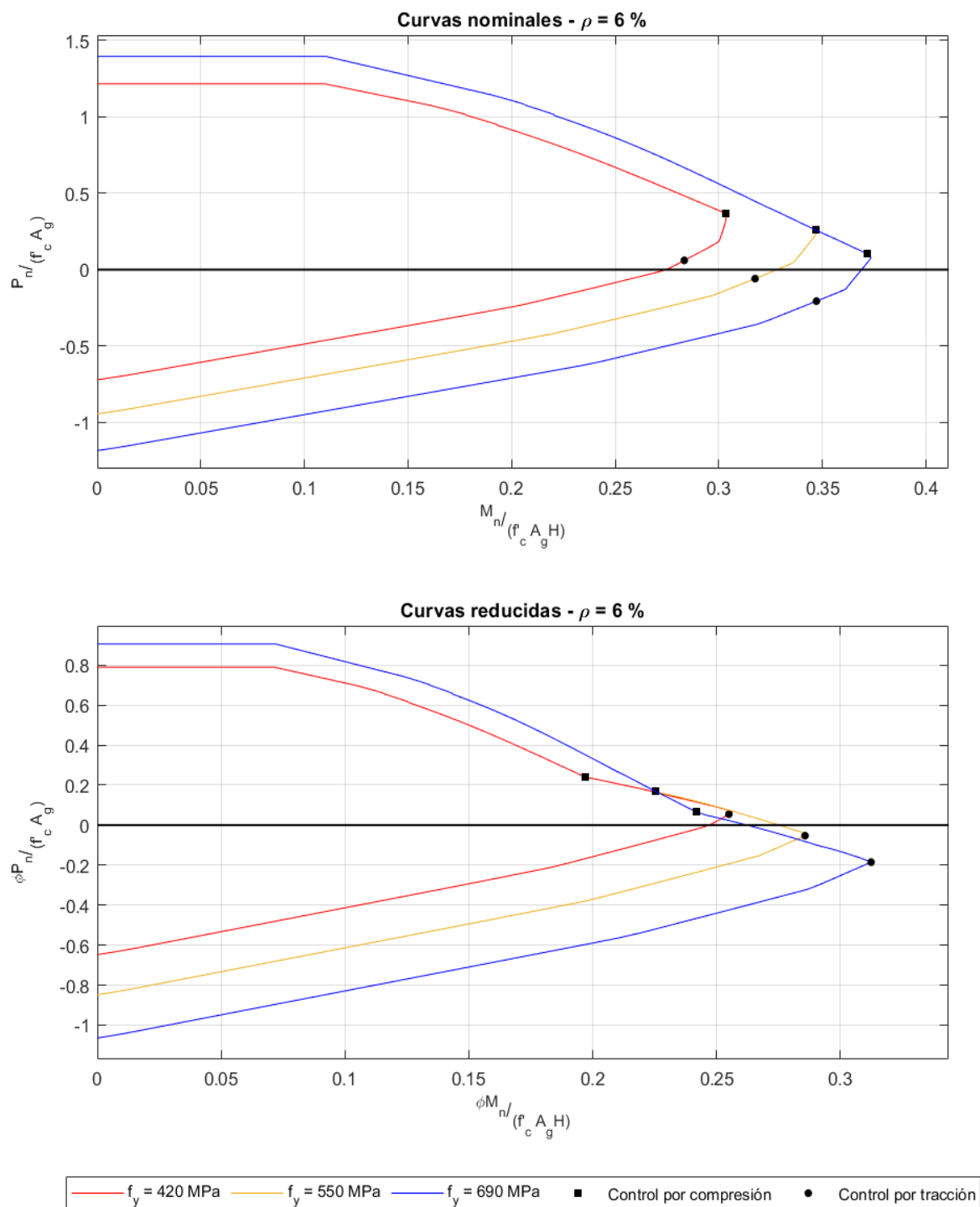


Figura 4 - 6: Curvas de interacción de columna cuadrada con $\rho=6\%$ y fluencias varias

Las figuras 4-7 a 4-9 muestran las curvas nominales y reducidas para columnas con resistencia de fluencia fija y cuantía de refuerzo variable. En las gráficas 4-7 y 4-8, se aprecia que, al mantener un valor de resistencia fija del acero, el valor de la carga axial para el punto de control por compresión se mantiene relativamente constante, independientemente de la cuantía de acero longitudinal, pero al usar acero de alta resistencia, como se observa en la gráfica 4-9, los puntos de control por compresión tienden a decrecer en carga axial al aumentar la cuantía. De la misma forma el punto de control por tracción decrece a medida que aumenta la cuantía para todos los niveles de resistencia del acero. Estos decaimientos repercuten en que eventualmente, se obtengan valores negativos de los puntos de control. También se observa en las figuras que, independientemente del nivel de resistencia establecido, en las curvas reducidas para valores bajos de cuantía de acero se tiende a formar una reducción abrupta de los valores de momento, formando un pico en la gráfica, puesto que, la diferencia relativa entre los valores límite de control por compresión y tracción es menor en comparación a cuando las cuantías incrementan, teniendo que desarrollarse la transición del factor de reducción en un tramo menor, mientras que, al aumentar la cuantía las curvas tienden a ser más rectas en estos tramos.

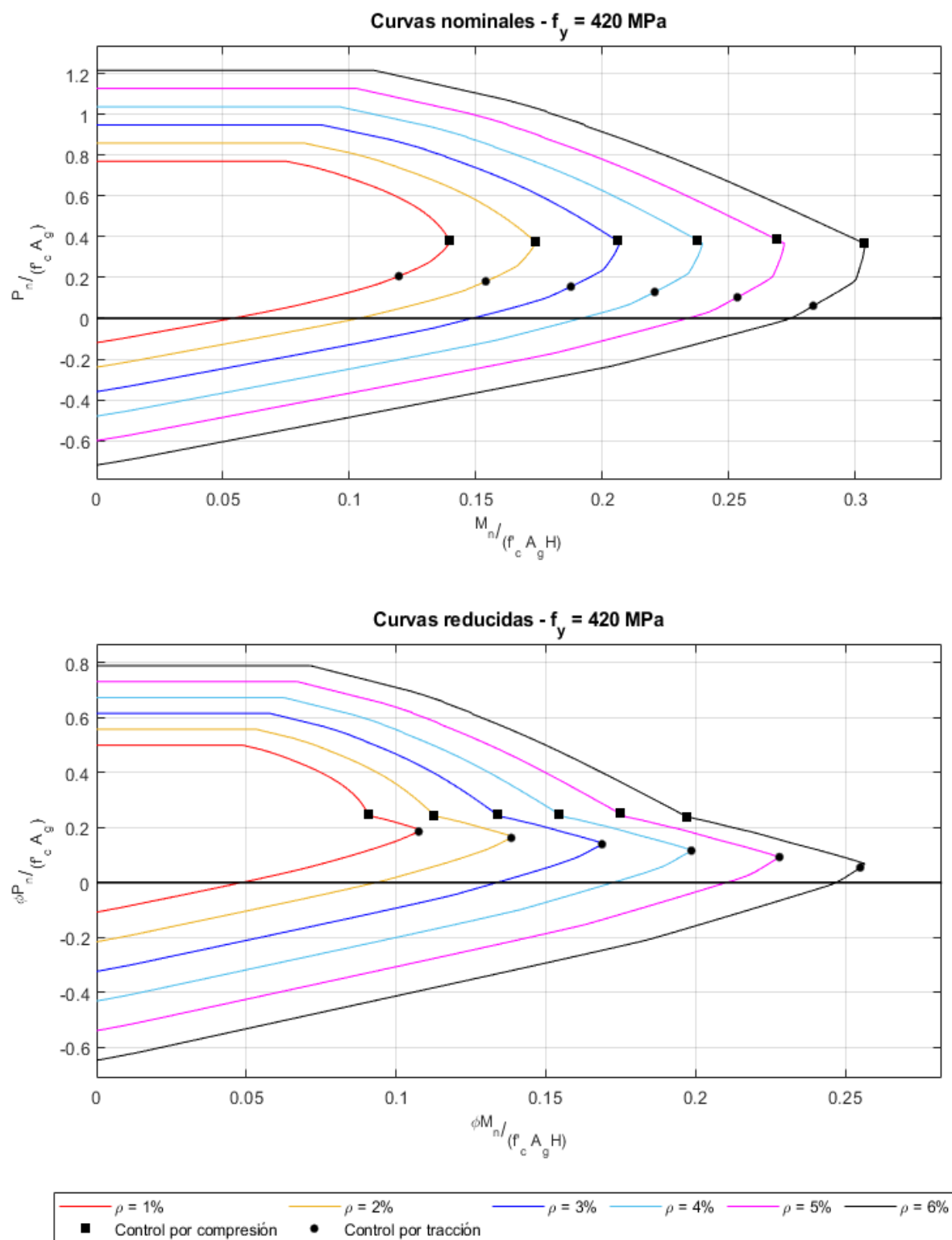


Figura 4 - 7: Curvas de interacción de columna cuadrada con $f_y=420$ MPa y cuantías varias

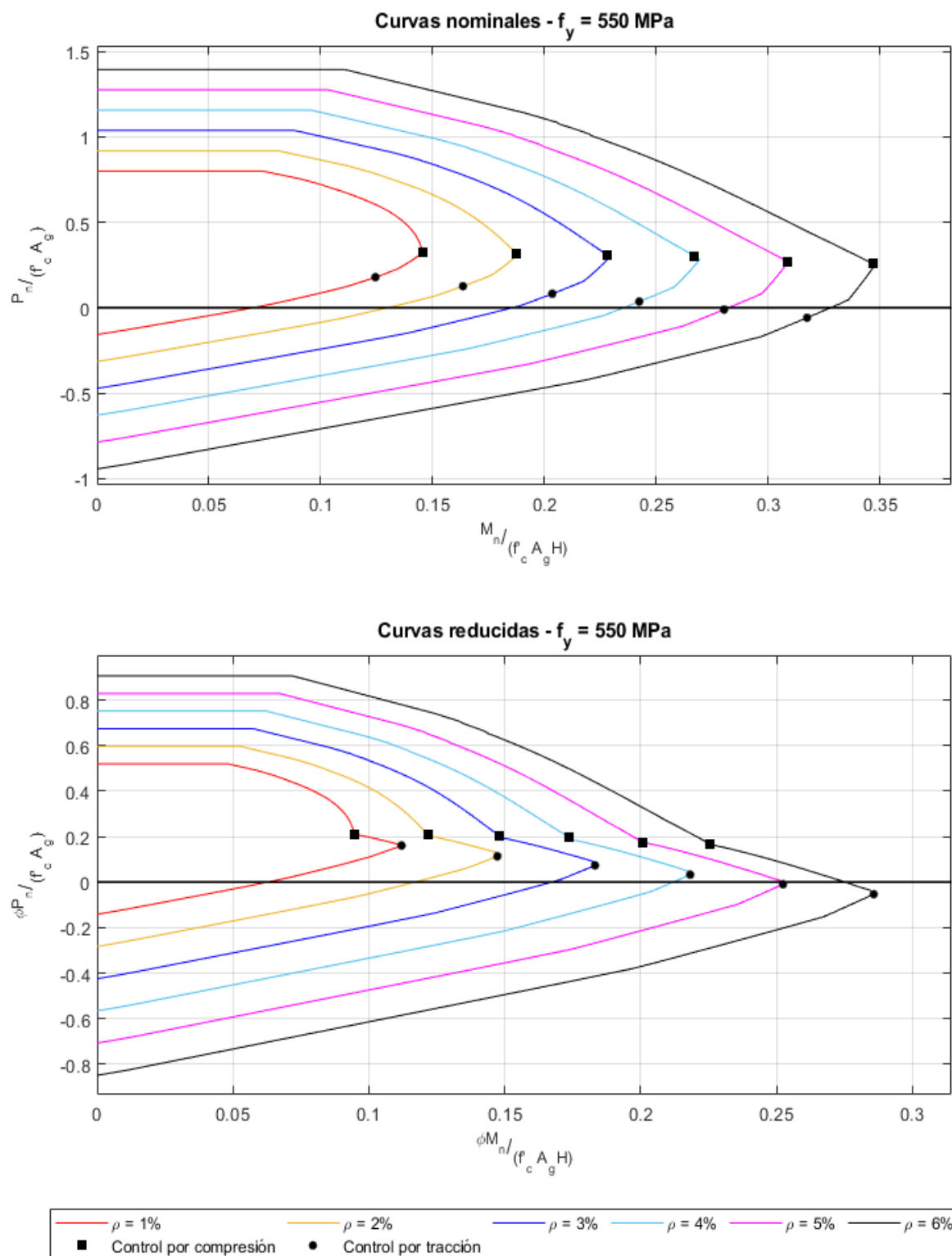


Figura 4 - 8: Curvas de interacción de columna cuadrada con $f_y=550$ MPa y cuantías varias

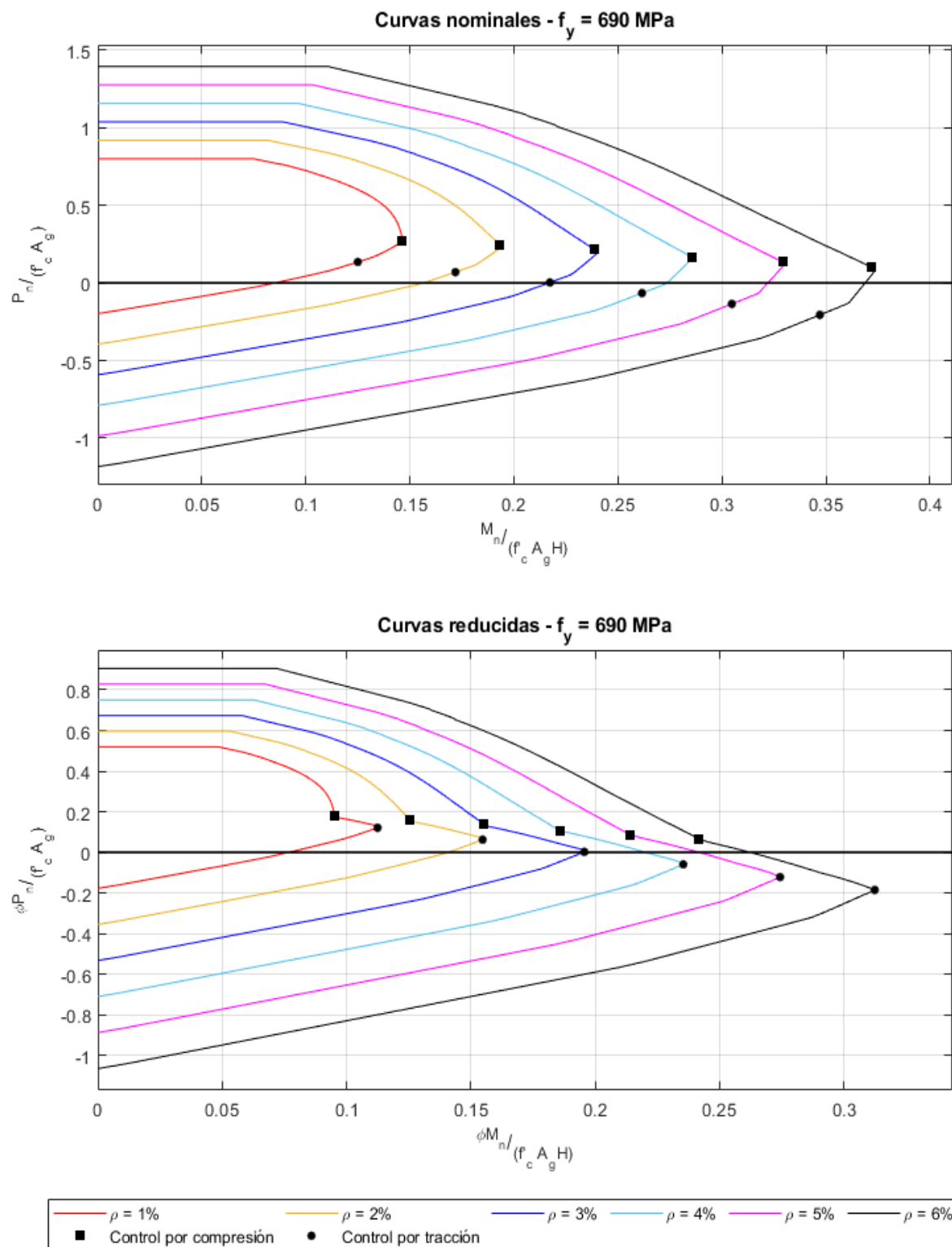


Figura 4 - 9: Curvas de interacción de columna cuadrada con $f_y=690$ MPa y cuantías varias

IV.2. MUROS RECTANGULARES

Las figuras 4-10 a 4-15 muestran las curvas nominales y reducidas para muros rectangulares con cuantía de los elementos de borde fija y resistencia de fluencia variable. En todas estas gráficas se observa que, al fijar una relación de cuantía mínima de refuerzo, las curvas nominales son bastantes similares independientemente del nivel de resistencia. Esto es diferente a lo observado en las curvas de interacción de las columnas, que se asemejaban únicamente en los aceros de 550 MPa y 690 MPa en la zona de control por compresión. Al analizar las curvas nominales y reducidas en las figuras 4-10 a 4-15 se puede observar que contrariamente a lo que se habitúa, las curvas con aceros de menor resistencia de fluencia son más amplias que las curvas con acero de mayor resistencia. Esto se debe a que las curvas se construyeron utilizando la cuantía mínima de refuerzo, la que es inversamente proporcional a la resistencia del acero. Por lo tanto, para aceros de menor resistencia se debe disponer más acero en los elementos de borde, generando una mayor resistencia general.

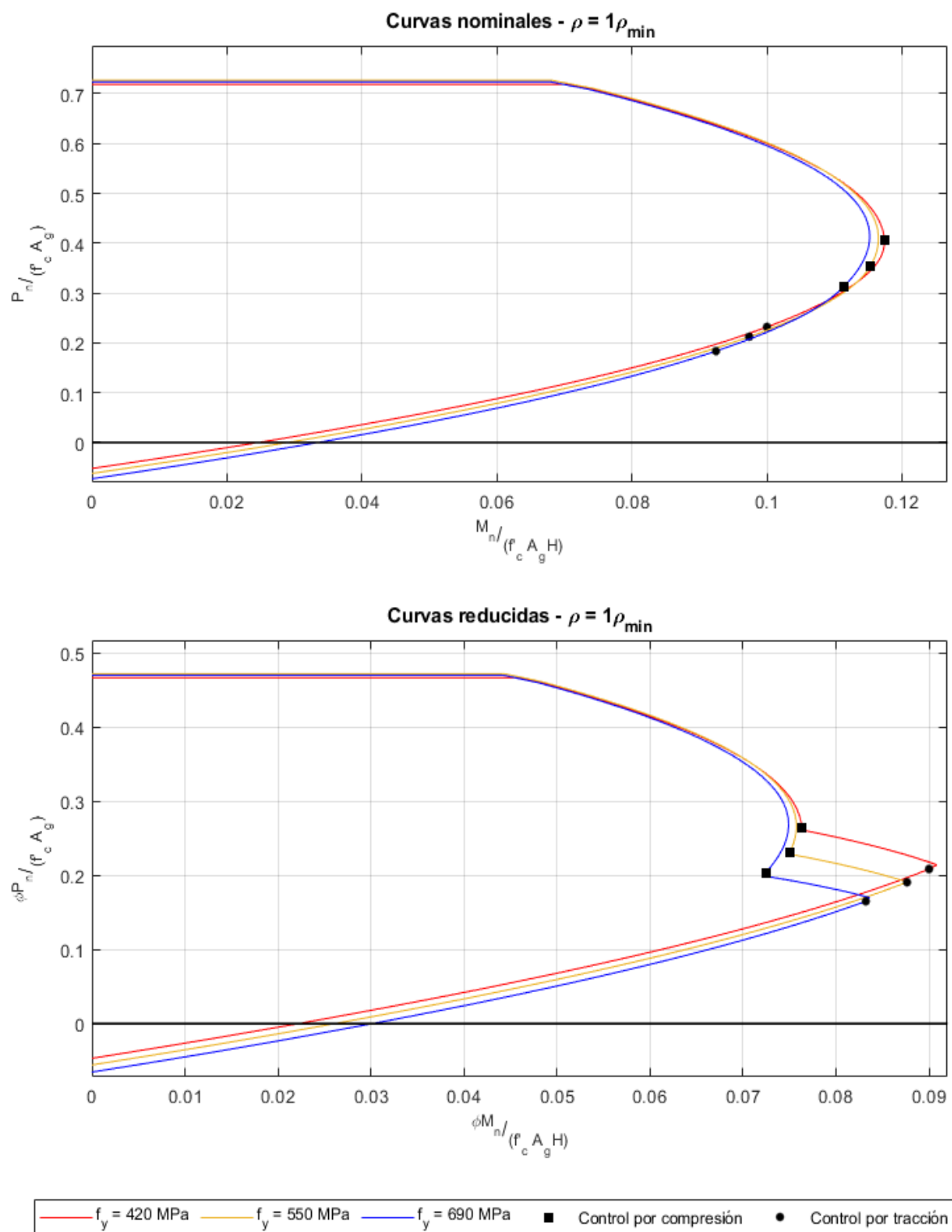


Figura 4 - 10: Curvas de interacción de muro rectangular con cuantía de 1% y fluencias varias

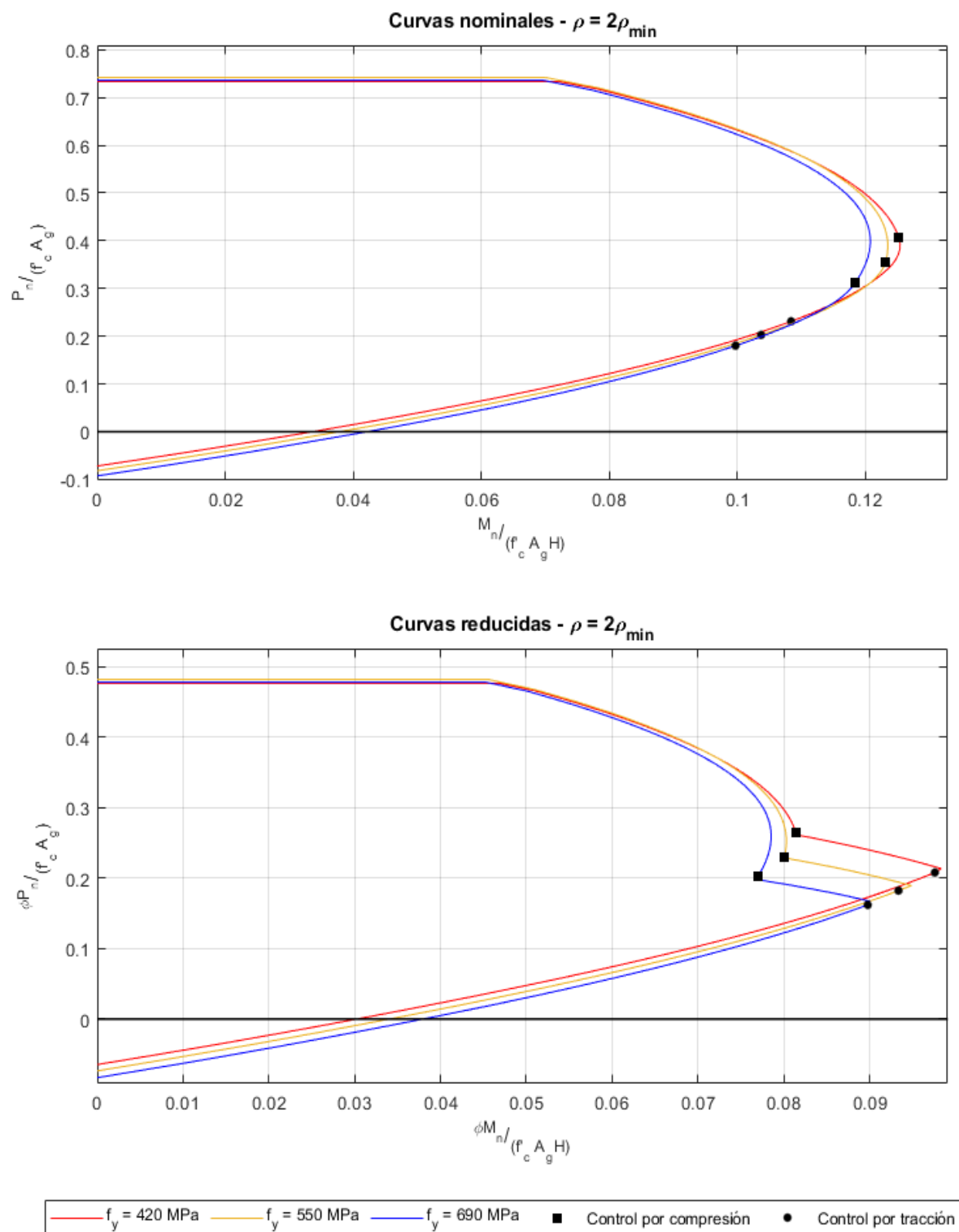


Figura 4 - 11: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=2\%$ y fluencias varias

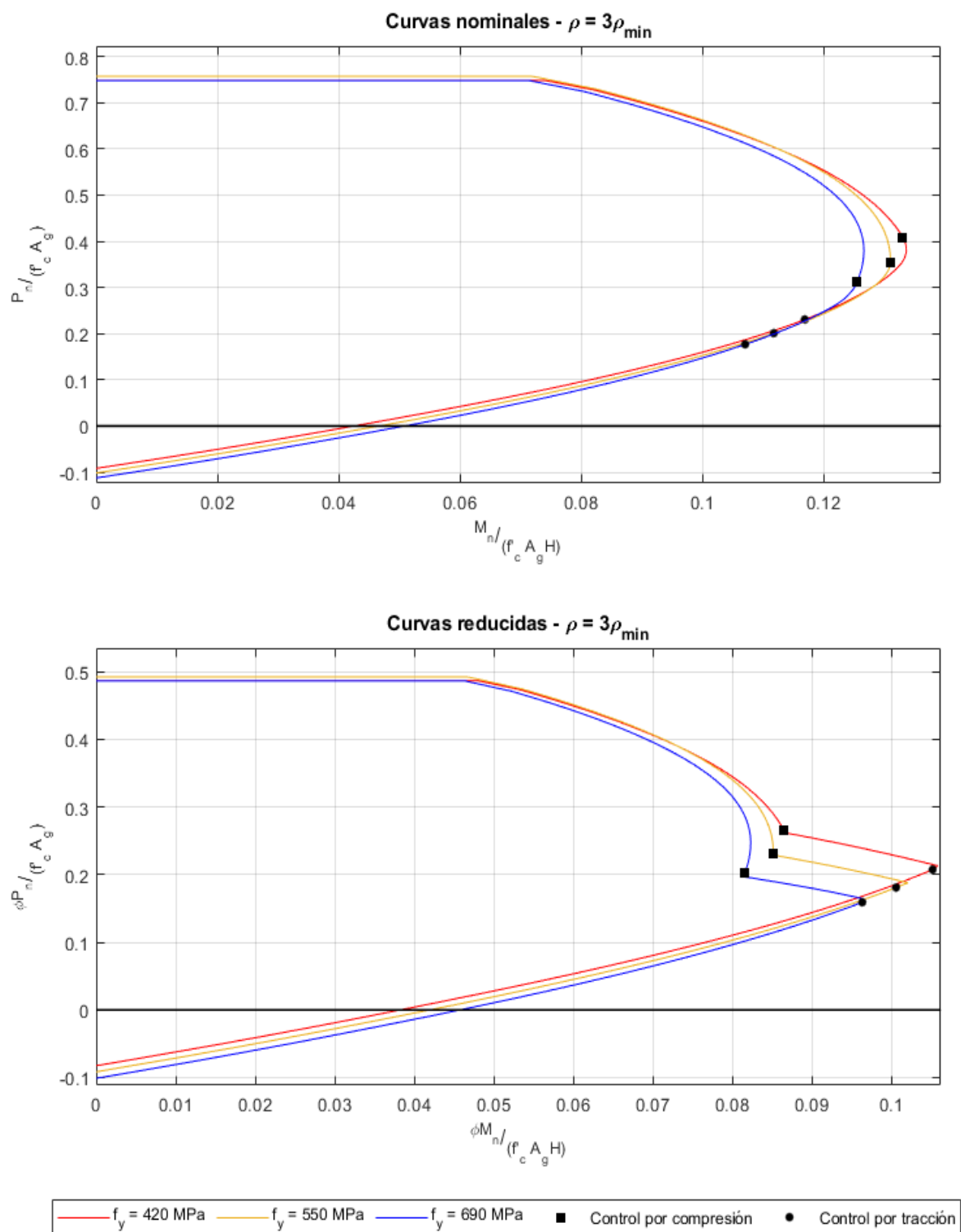


Figura 4 - 12: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=3\%$ y fluencias varias

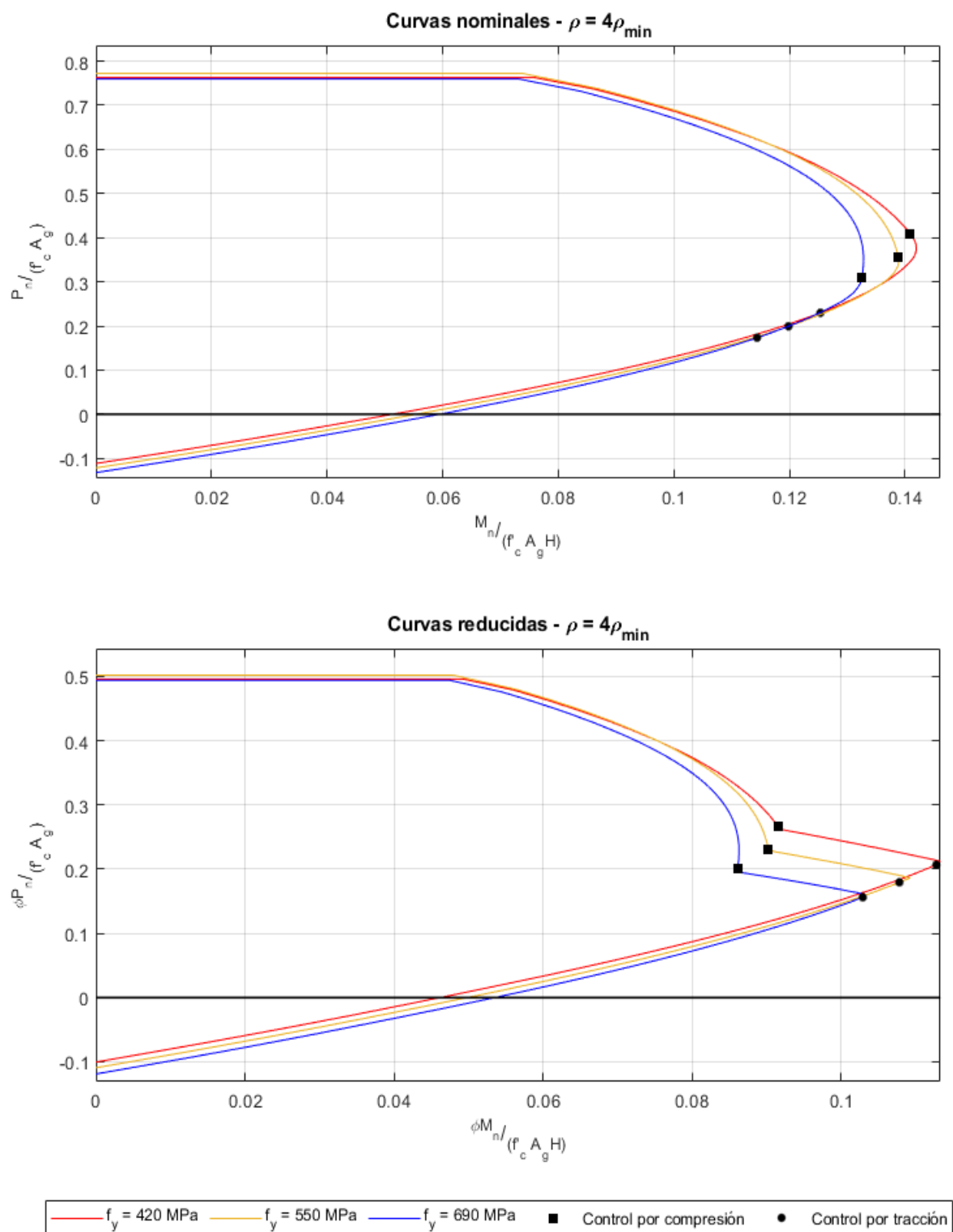


Figura 4 - 13: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=4\%$ y fluencias varias

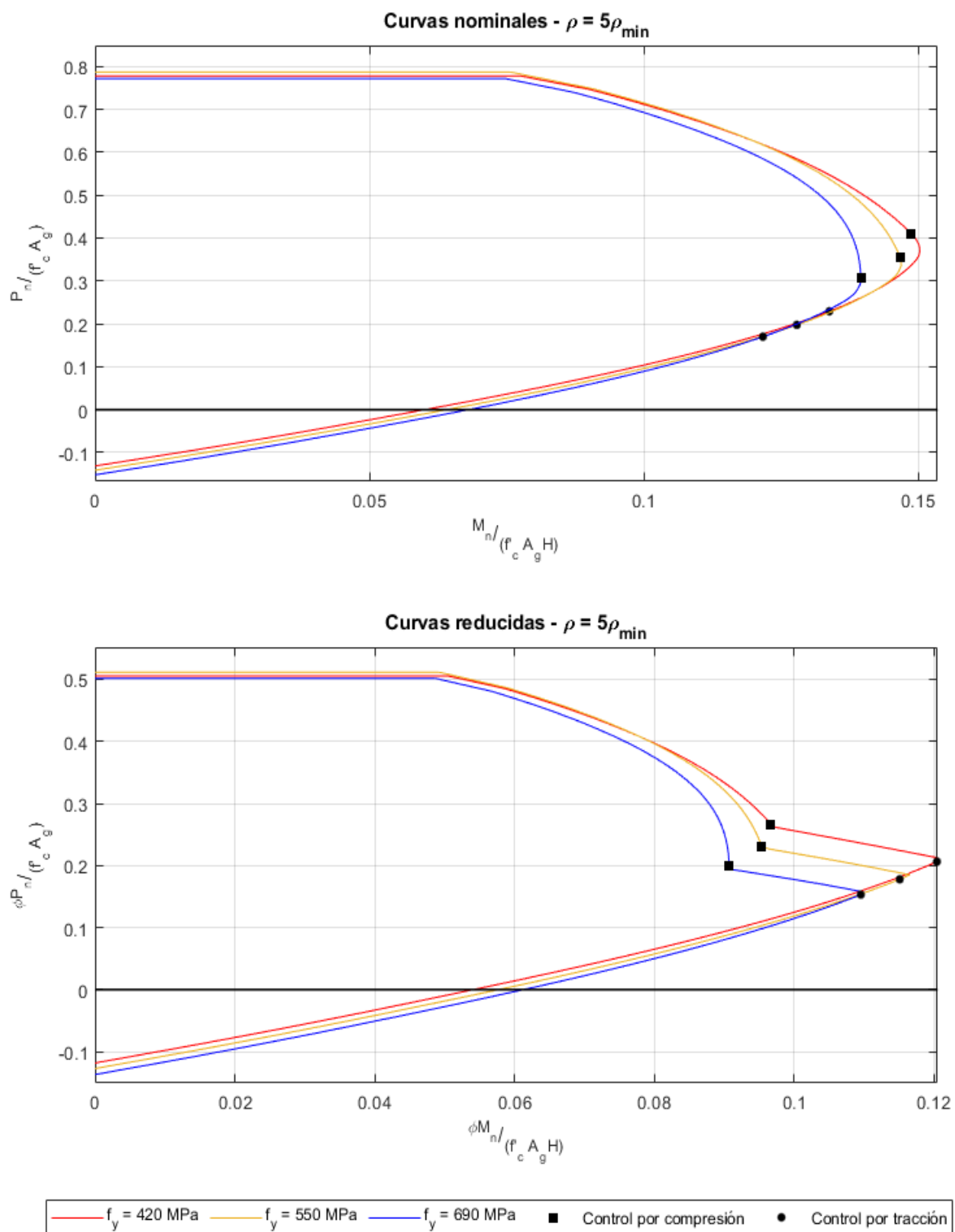


Figura 4 - 14: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=5\%$ y fluencias varias

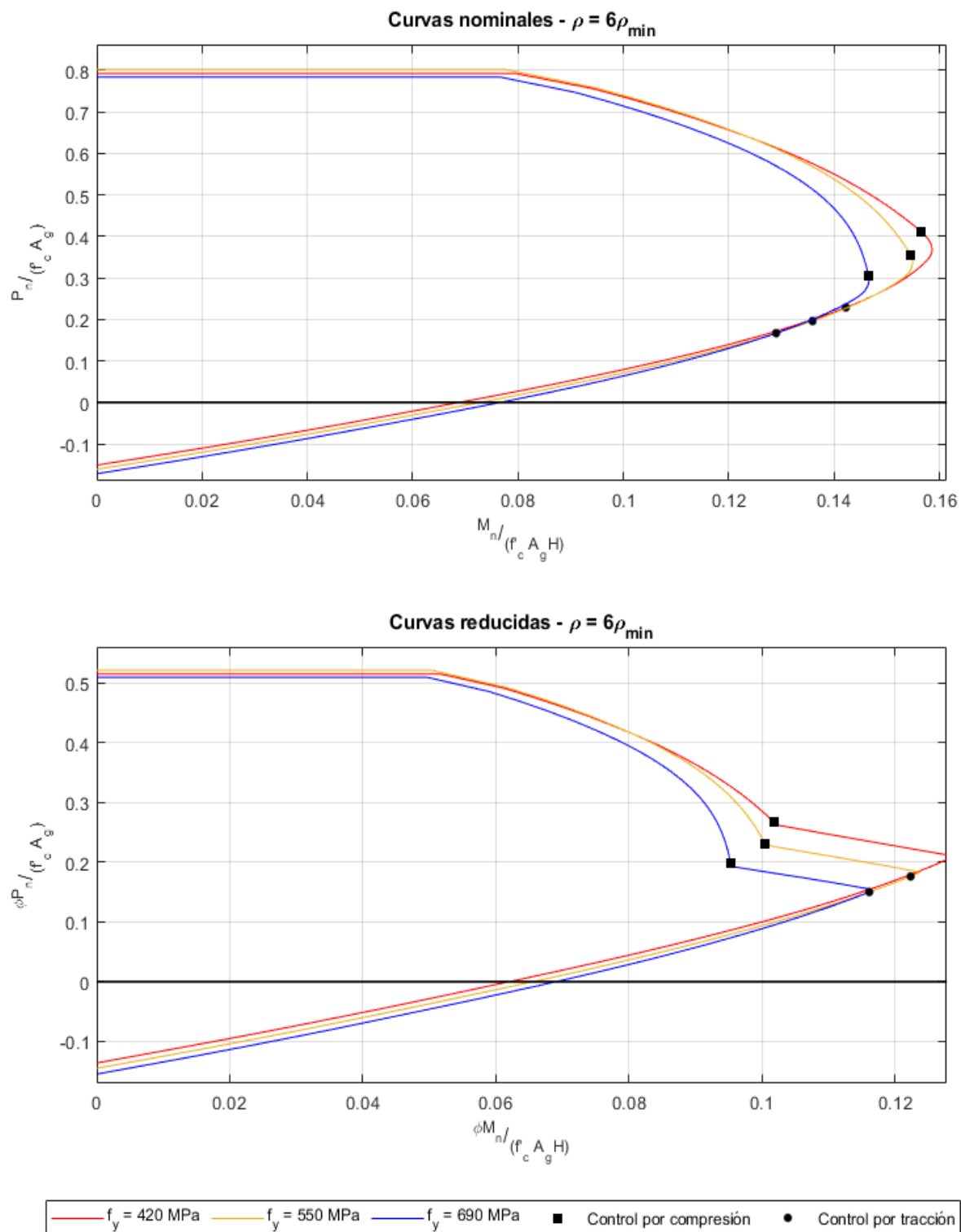


Figura 4 - 15: Curvas de interacción de muro rectangular con $\rho=6\%$ y fluencias varias

Las figuras 4-16 a 4-18 muestran las curvas nominales y reducidas para los muros rectangulares con resistencia de fluencia fija y cuantía de refuerzo de los elementos de borde variable. En estas gráficas para todos los casos de curvas reducidas, indistintamente de las combinaciones de resistencia y cuantía, se puede denotar la reducción abrupta en la zona de transición del factor de reducción. Esto parte del hecho que las curvas nominales tienen sus puntos de control relativamente cercanos por la baja cuantía de acero, generando que, el punto de compresión reducido aminore significativamente respecto al de control por tracción reducido. También se observa en estas figuras que, fijando una resistencia del acero, las curvas tienden a aumentar progresivamente de manera muy proporcional al aumento de la cuantía, manteniendo su forma y sin intersecciones, tanto en las curvas nominales y reducidas. En todas las gráficas se verifica que, los puntos de control por compresión se mantienen prácticamente constantes en carga axial, y los de control por tracción con un decaimiento mínimo, pero siempre con valores positivos.

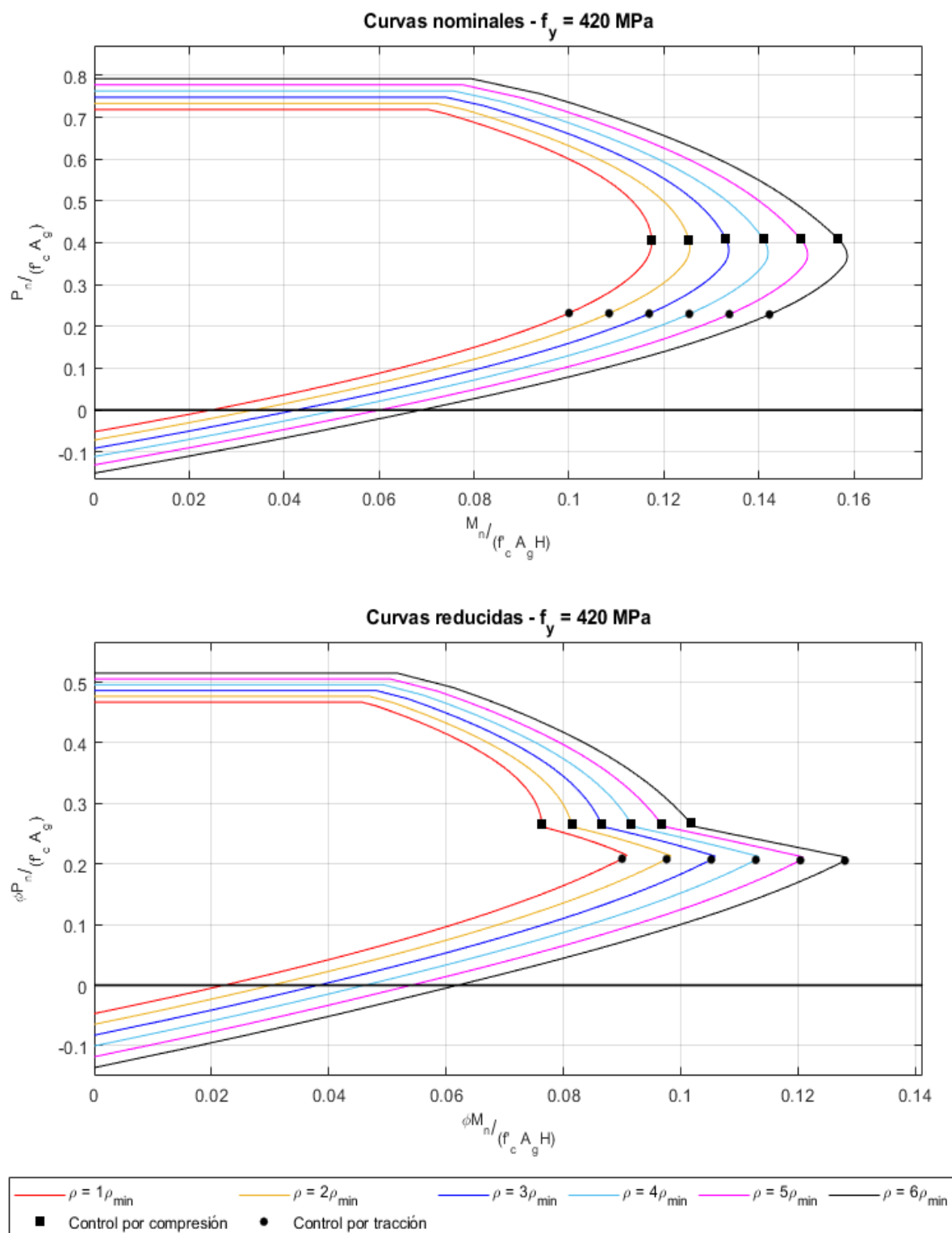


Figura 4 - 16 Curvas de interacción de muro rectangular con $f_y=420$ MPa y cuantías varias

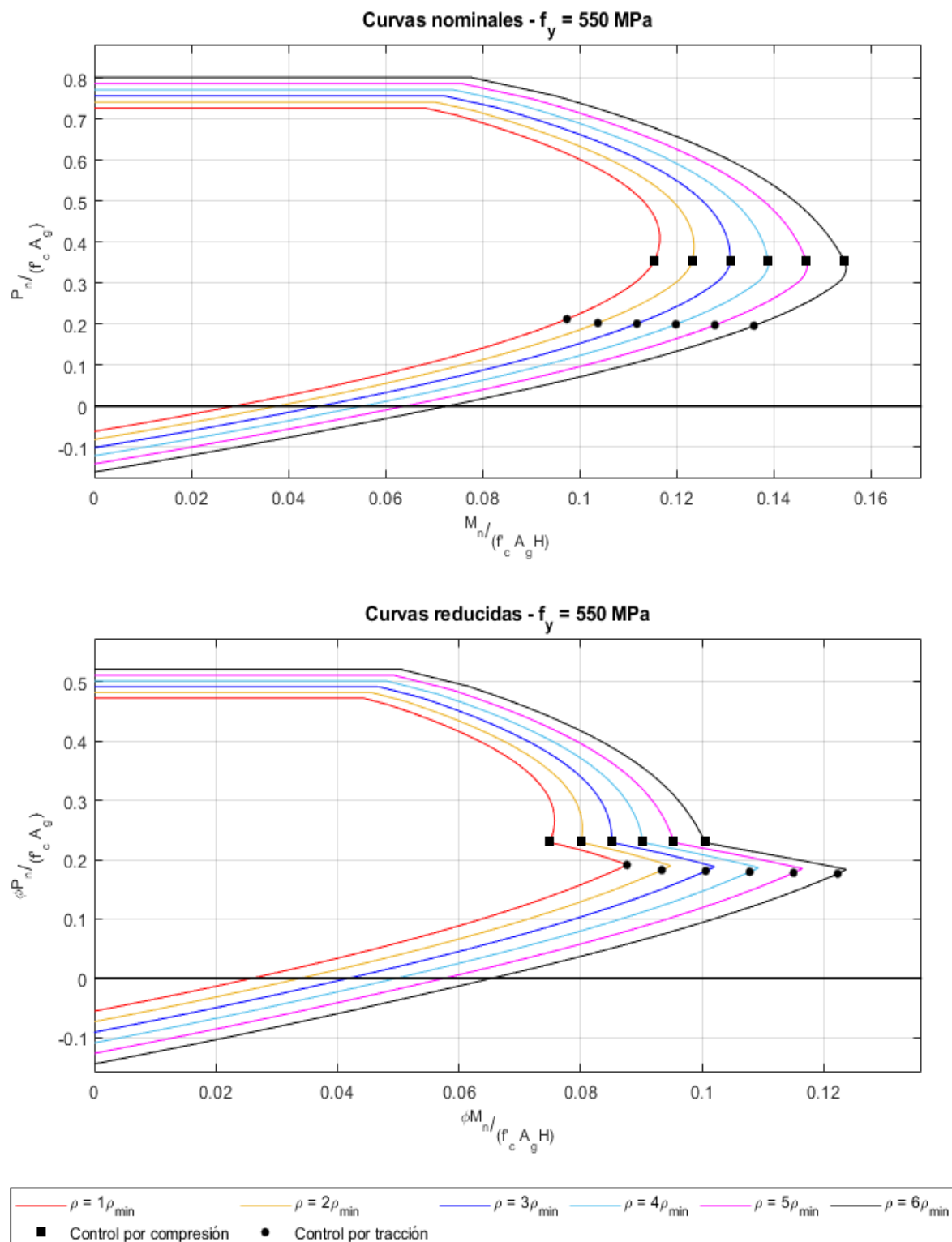


Figura 4 - 17 Curvas de interacción de muro rectangular con $f_y=550$ MPa y cuantías varias

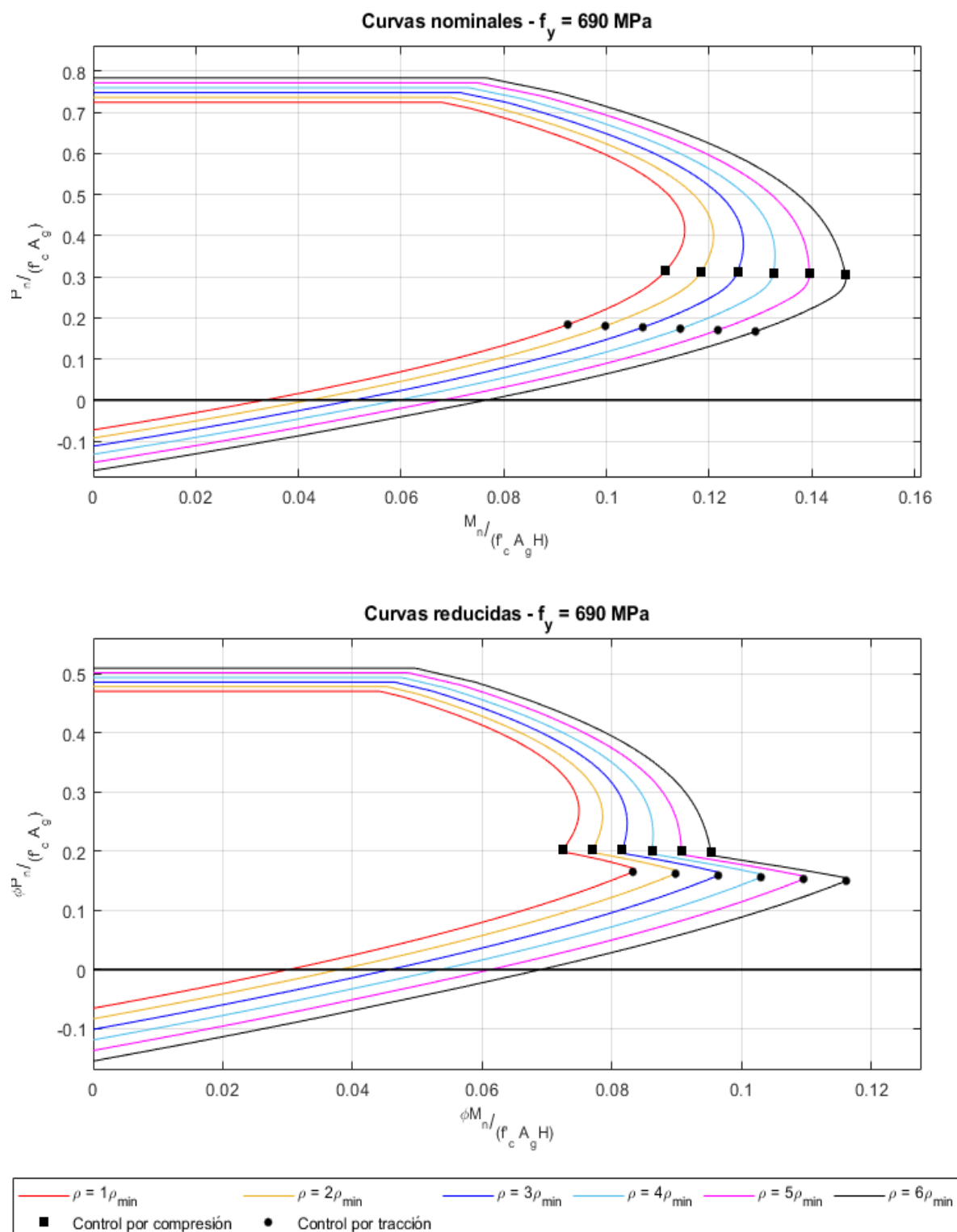


Figura 4 - 18: Curvas de interacción de muro rectangular con $f_y=690$ MPa y cuantías varias

IV.3. MUROS EN T

Las figuras 4-19 a 4-22 muestran las curvas nominales y reducidas para muros en T con resistencia de fluencia fija y tamaños de ala variable, manteniendo las cuantías iguales en todos los casos, así como las dimensiones de los elementos de borde y del alma. En estas gráficas se puede observar que, en las curvas de interacción reducidas en los muros en T, al aumentar el tamaño del ala, el punto de control por tracción resulta de mayor magnitud que el de control por compresión. Esto genera una punta en la gráfica, que en términos prácticos puede resultar despreciable, puesto que, en ocasiones supera el límite de compresión reducido. Al tomar el área encerrada por las curvas, la región formada por este “peak” es mínima comparándola con el total, y las combinaciones de carga y momento localizadas dentro de dicha región pueden considerarse ilógicas. Debido a la poca practicidad que provocan los “peaks” de las curvas reducidas, los softwares comerciales, como un método de simplificación, modifican los factores de reducción al prolongar la zona de transición, estableciendo un mayor valor de deformación de la última fibra con acero de refuerzo para calcular el punto de control por compresión, obteniendo de esta manera, un valor menor al de control por tracción, por ende, una pendiente decreciente sin saltos.

Las curvas graficadas representan los valores de resistencia de momento y carga axial normalizados para su respectiva área gruesa, dicha convención permite que los valores de compresión y tracción pura, para un mismo valor de fluencia del acero de refuerzo, coincidan en las mismas ordenadas. Del lado derecho del eje de ordenadas se encuentran los valores para cuando la compresión es hacia el ala y se observan que las curvas son más empinadas cuando la longitud total del ala es mayor. Por otro lado, al izquierda del eje de las ordenadas se encuentran los valores para compresión hacia el alma del muro, en este sentido las curvas resultan similares a las obtenidas para un muro rectangular, puesto que, en su análisis prácticamente se desprecia el hormigón en la zona del ala, al encontrarse mayormente en tracción.

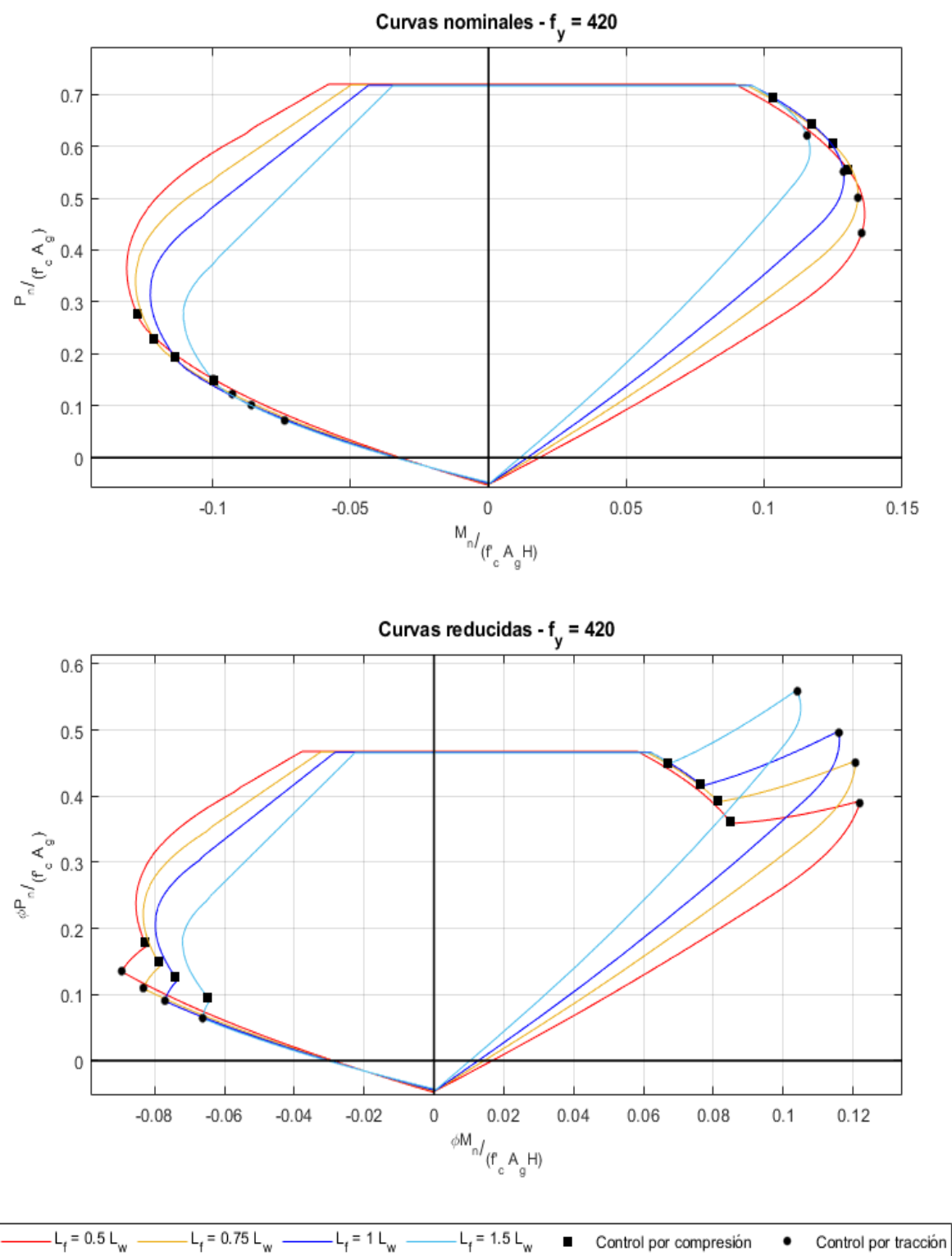


Figura 4 - 19: Curvas de interacción de muros en T con resistencias $f_y = 420$ MPa

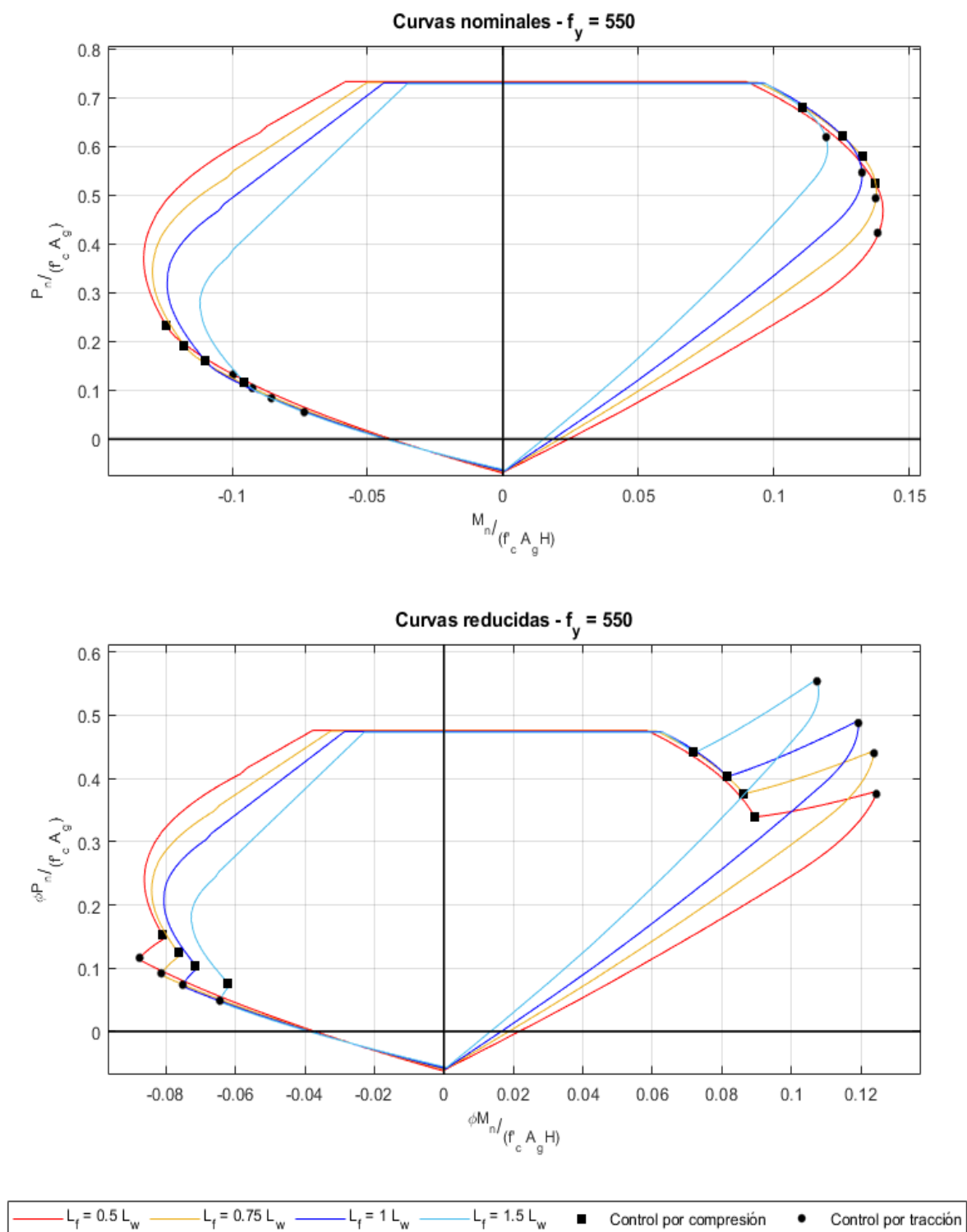


Figura 4 - 20: Curvas de interacción de muros en T con resistencias $f_y = 550$ MPa

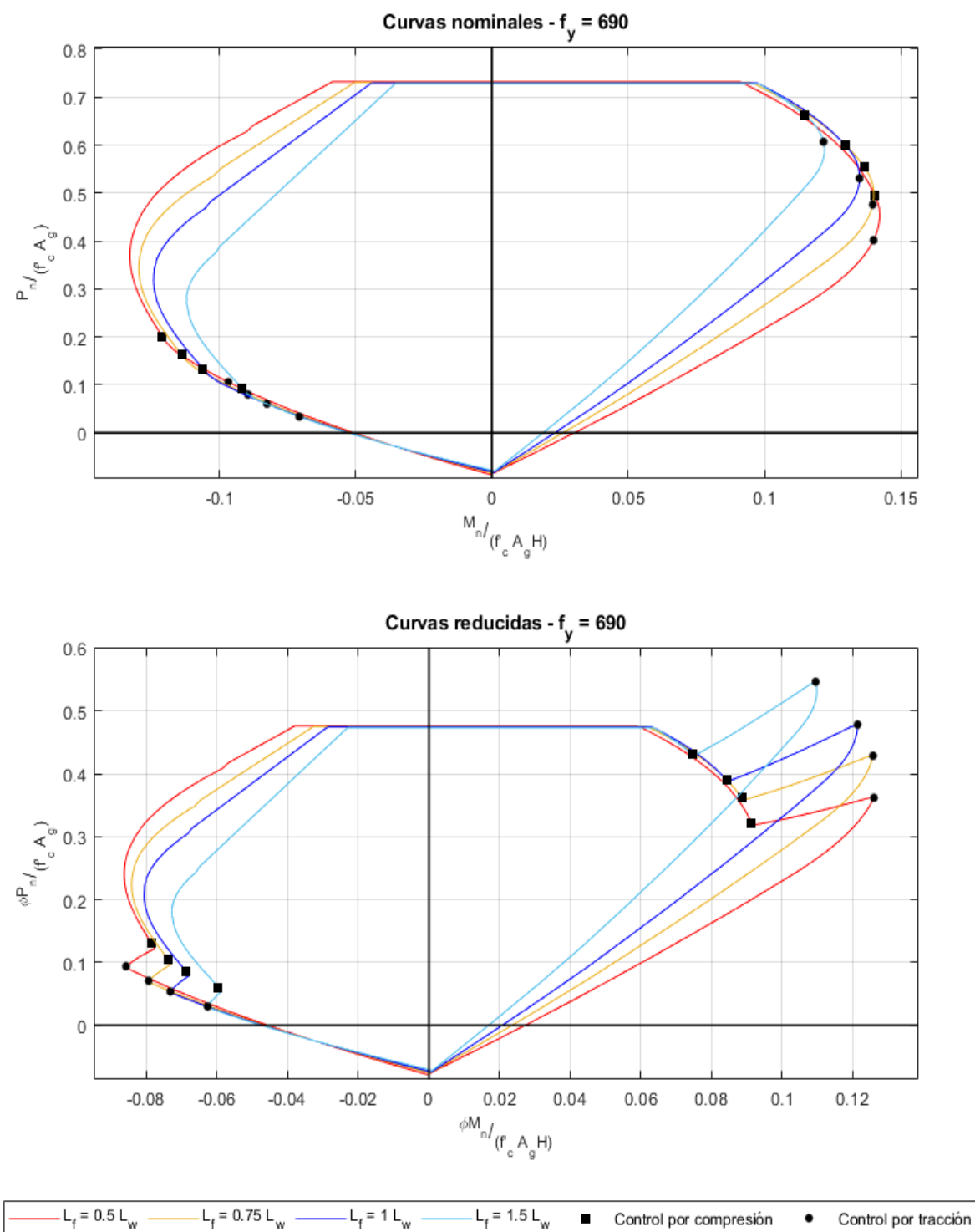


Figura 4 - 21: Curvas de interacción de muros en T con resistencias $f_y = 690$ MPa

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se crearon satisfactoriamente funciones propias que calculan y grafican las curvas de interacción nominales y reducidas según el ACI 318. Las curvas calculadas en este trabajo se validaron con las curvas de programas comerciales.

En columnas cuadradas se pudo conocer que el efecto del acero de alta resistencia repercute en un agrandamiento de las curvas nominales respecto al acero tradicional, siendo esta expansión mayor en las zonas cercanas a la tracción pura y muy baja rondando la compresión pura.

En general, las curvas de mayor resistencia envuelven a las de menor resistencia, sin embargo, al momento de aplicar reducción de resistencia, por cuestión de las deformaciones unitarias a las que están ligadas los factores de reducción, en las zonas de transición las curvas se separan generando combinaciones de resistencia que no envuelven a las de acero tradicional, siendo más evidenciable con cuantías bajas.

El uso de cuantías altas de acero repercute en las columnas, muros rectangulares y los muros en T, a una disminución de los puntos de control, tanto de compresión como de tracción, siendo en los primeros un decaimiento mínimo, y en el segundo mayor. Para columnas con cuantía alta, cercana al 6%, el punto de zona controlada por tracción logra alcanzar valores negativos en carga axial, es decir, fuerzas de tracción.

El cálculo de las curvas de los muros rectangulares fue basado en la cuantía mínima respectiva de los elementos de borde, llegando hasta seis veces el valor mínimo, pero esto sigue siendo menor al 6% utilizado en columnas. Los resultados muestran que las curvas de muros rectangulares tienden a expandirse en forma muy proporcional al aumentar la cuantía mínima de los elementos de borde, pero todas con la reducción abrupta característica de elementos de baja cuantía.

Los muros en T presentan la particularidad de la formación de una punta sobresalida en las curvas reducidas debido a la cercanía de los puntos de control en las curvas nominales. Adicionalmente, se pudo concluir que los programas comerciales suavizan estas puntas al alargar la zona de transición, lo cual es permisible en un análisis práctico ya que no aportan mayor resistencia comparado a la curva completa.

BIBLIOGRAFIA

LEQUESNE, R.D. y PINCHEIRA, J.A. (2014) *Proposed revisions to the strength reduction factor for axially loaded members*. *ACI Concrete International*, Vol. 36, N°9, 43-49.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2014) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2019) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*.

COMPUTERS & STRUCTURES, INC (2020) *Concrete Frame Design Manual: ACI318-19*.

COMPUTERS & STRUCTURES, INC (2020) *Shear Wall Design Manual: ACI318-19*.

ANEXOS

**ANEXO A: MENÚ INICIAL DE PROGRAMA DESARROLLADO EN
MATLAB**



*En caso de elegir una opción con valor específico y otra con "Todas", se tomará por defecto el parámetro específico como fijo.

ANEXO C: INTERFÁZ GRÁFICA PARA MUROS RECTANGULARES

Muro_Rectangular

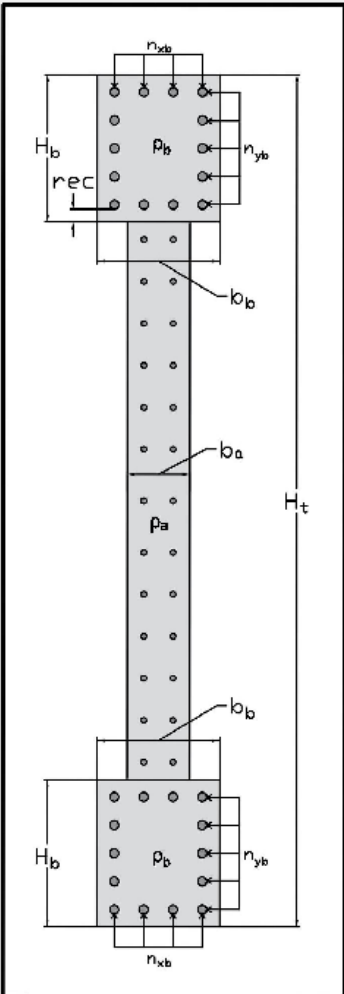
Curvas de interacción - Muros rectangulares

Ingreso

Alma	Bordes
Altura [Ht] cm	Altura [Hb] cm
Ancho [ba] cm	Ancho [bb] cm
Varillas en X [nxa] U	Varillas en X [nxb] U
Varillas en Y [nya] U	Varillas en Y [nyb] U
Cuantía [pa] %	Cuantía [pb] x1 pmin

f'c MPa fy 420 MPa

Recubrimiento [rec] cm Mantener fijo* Cuantía



*En caso de elegir una opción con valor específico y otra con "Todas", se tomará por defecto el parámetro específico como fijo.

ANEXO D : INTERFÁZ GRÁFICA PARA MUROS EN T

[illegible]