



EVALUACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO OBJETIVO PARA ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON CRP CONSIDERANDO RIGIDEZ POSTFLUENCIA DIFERENTE DE CERO

Juan Carlos López Ceseña¹, Fernando Cueto Jiménez², Héctor Guerrero Bobadilla³, José Ernesto García Mora Pinto⁴ y César Viramontes Heredia⁵

RESUMEN

Se presentan los resultados de una metodología basada en desempeño para diseñar estructuras equipadas con CRP, las cuales pueden desarrollar comportamiento inelástico con una rigidez post elástica diferente de cero. La ductilidad y la rigidez post fluencia de una estructura se pueden estimar con relativa facilidad usando análisis estático no lineal, por lo que los resultados mostrados aquí resultan prácticos para los diseñadores. Lo anterior motivaba el uso de análisis basado en desempeño, debido a la manera simple de estimar las demandas sísmicas de una estructura dada.

ABSTRACT

The results of a performance-based methodology to design BRB-equipped structures, which can develop inelastic behavior with non-zero post-elastic stiffness, are presented. The ductility and post-yield stiffness of a structure can be estimated relatively easily using nonlinear static analysis, so the results shown here are practical for designers. This motivates the use of performance-based analysis, due to the simple way of estimating the seismic demands of a structure.

Ingeniero de Proyecto, Dampo Systems S.A. de C.V., Av. Copilco 76, Col. Copilco el Bajo, C.P.: 04340 México, D.F. Teléfono, 55-44-86-44-84; juan.lopez@dampo.com.mx

² Gerente de Proyectos, Dampo Systems S.A. de C.V., Av. Copilco 76, Col. Copilco el Bajo, C.P.: 04340 México, D.F. Teléfono, 55-44-86-44-84; fernando.cueto@dampo.com.mx

³ Profesor e investigador, Universidad Nacional Autónoma de México, CCoyoacán, Col. Ciudad Universitaria, C.P.: 04510, México, D.F. hguerrerob@iingen.unam.mx

⁴ Ingeniero de Proyecto, Dampo Systems S.A. de C.V., Av. Copilco 76, Col. Copilco el Bajo, C.P.: 04340 México, D.F. Teléfono, 55-44-86-44-84; ernesto.garcia@dampo.com.mx

⁵ Gerente de Proyectos, Dampo Systems S.A. de C.V., Av. Copilco 76, Col. Copilco el Bajo, C.P.: 04340 México, D.F. Teléfono, 55-44-86-44-84; cesar.viramontes@dampo.com.mx

INTRODUCCIÓN

El comportamiento esperado de las estructuras diseñadas conforme a la normativa sísmica actual es de prevención de colapso, por lo que se espera tener un comportamiento en el cual no ocurran pérdidas de vida, sin embargo, se podrían esperar daños que lleguen a afectar el funcionamiento de las estructuras o requieran una intervención importante (NTC – DS 2020). El comportamiento descrito anteriormente no cumple con requisitos demandados por la sociedad, ya que se busca que además de salvaguardar la vida, sus inmuebles puedan ser ocupados después de un sismo o que sus reparaciones sean mínimas, evitando así pérdidas económicas significativas.

Uno de los factores que causa daño a las estructuras durante los sismos es la demanda de desplazamientos laterales, por lo que, a un mayor desplazamiento, se tendrá un mayor daño. El controlar los desplazamientos laterales en una estructura permite controlar a su vez el daño que pueda ocurrir. Por lo anterior, el uso de diseño basado en control de desplazamientos ayuda a entender y estimar un mejor desempeño en las estructuras.

Los sistemas de protección sísmica ayudan a controlar las demandas de desplazamiento, velocidad o aceleración generados por los sismos, aportando rigidez, amortiguamiento o ductilidad. Éstos se clasifican como activos o pasivos, dependiendo la forma en la que se activan. Los contravientos restringidos al pandeo (CRP o BRB por sus siglas en inglés) son un sistema de disipación de energía clasificados como pasivos. Es decir, el sistema se activa automáticamente con la excitación de la estructura sin intervención de otro sistema, en este caso, ante deformaciones laterales.

Para el control de desplazamientos, se han realizado diversas metodologías basadas en desempeño. En este documento, se hace uso de la metodología basada en control de desplazamiento para diseño por desempeño de un sistema de contravientos descrita en Terán y Virto (2009) y Teran y Coeto (2011) y se estudia el efecto de considerar una rigidez post fluencia distinta de cero para el cálculo de desplazamientos objetivo.

CONTRAVIENTOS RESTRINGIDOS AL PANDEO (CRP)

Los contravientos restringidos al pandeo (CRP) son un sistema de disipación de energía clasificados como pasivos. Esta tecnología se desarrolló en los años 80 en Japón (Hussain, 2006), y se ha popularizado desde entonces en el resto del mundo, siendo una opción económica, segura y que mejora el comportamiento de la estructura ante eventos sísmicos.

Los CRP aportan a la estructura tres principales propiedades: rigidez, resistencia y capacidad de disipar energía (ductilidad). Los CRP funcionan como fusibles estructurales, ya que son reemplazables en caso de tener daño y, al mismo tiempo, mantienen a la estructura principal (marcos) con daño menor ante eventos sísmicos severos, por lo cual pueden ser una opción viable, segura y económica para implementar en estructuras nuevas o reforzamiento/rehabilitación de estructuras existentes/dañadas.

Los CRP muestran un comportamiento superior a los contravientos convencionales. La diferencia es que los CRP pueden trabajar a compresión sin presentar pandeo por los efectos de esbeltez, disipando energía de manera estable ante deformaciones cíclicas reversibles. En un CRP los esfuerzos de fluencia a compresión y tensión son parecidos. En Figura 1 se muestra la comparación del comportamiento histerético típico entre un contraviento convencional y un CRP. En dicha figura se muestra en el eje de las abscisas el desplazamiento y el de las ordenadas la fuerza. Se puede apreciar que los CRP (Figura 1a) presentan ciclos histeréticos amplios, estables y simétricos, a diferencia de un contraviento convencional, donde, ante carga de compresión, se pandea y pierde estabilidad.

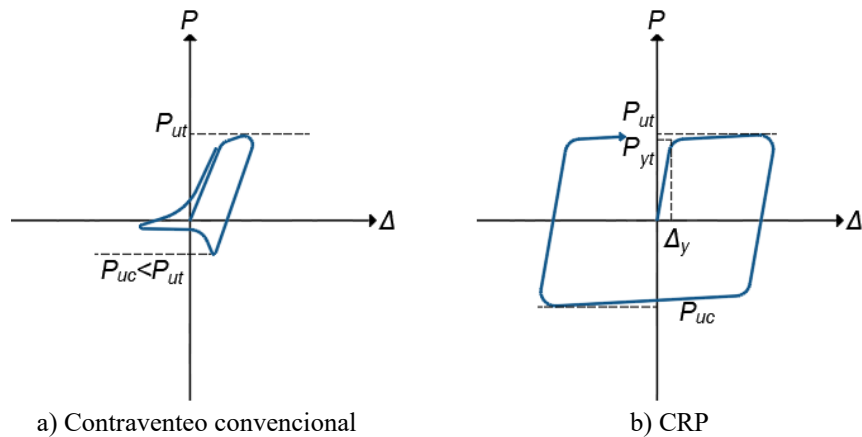


Figura 1 Comportamiento histerético de un contraventeo convencional y un CRP

En las ecuaciones 1 a 5 se muestran parámetros de interés que definen la curva de comportamiento histerético de un CRP.

$$P_{yt} = R_y F_y A_n \quad \text{Ec. 1}$$

$$P_{ut} = \omega R_y F_y A_n \quad \text{Ec. 2}$$

$$\Delta_y = \frac{P_{yt}}{K_{CRP}} \quad \text{Ec. 3}$$

$$P_{uc} = \beta \omega R_y F_y A_n \quad \text{Ec. 4}$$

$$K_{CRP} = \frac{E}{\frac{2L_{cx}}{A_{cx}} + \frac{L_n}{A_n}} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- P_{yt} = Fuerza de fluencia a tensión esperada en el CRP
- P_{ut} = Fuerza a tensión última esperada en el CRP
- Δ_y = Desplazamiento de fluencia del CRP
- P_{uc} = Fuerza de compresión última esperada en el CRP
- K_{CRP} = Rigidez lineal del CRP
- E = Módulo de elasticidad del núcleo de acero (Figura 2d)
- A_n = Área transversal del núcleo de la placa de acero (Figura 2e)
- A_{cx} = Área transversal de conexión del CRP (Figura 2e)
- L_n = Longitud del núcleo de la placa de acero mostrada en la Figura 2d
- L_{cx} = Longitud del extremo del CRP (Figura 2e)
- R_y = Cociente entre el esfuerzo de fluencia esperado entre el mínimo especificado (NTC – DEC – 2017 Tabla 12.1.2)
- β = Factor de ajuste de la resistencia en compresión, mayor o igual a 1
- ω = Factor de ajuste de endurecimiento por deformación, mayor o igual a 1

En la Figura 2, se muestran esquemáticamente un CRP, el cual se encuentra formado por:

- Un núcleo de acero con dos áreas, una central y otras de los extremos. Ambas contribuyen a la rigidez axial del CRP. El área central es la encargada de disipar la energía ya que la fluencia se presenta en esta zona. El acero estructural suele ser ASTM A36.
- Un material confinante, el cual suele ser mortero o concreto. Tiene la finalidad de restringir el pandeo que se puede generar en el núcleo de acero.

- Un material desadherente que logra separar el núcleo de acero y el material confinante. Sin adherencia entre materiales, se desacopla la resistencia del núcleo con material confinante.
- Por último, un perfil de acero utilizado como funda para proteger y confinar el material confinante.

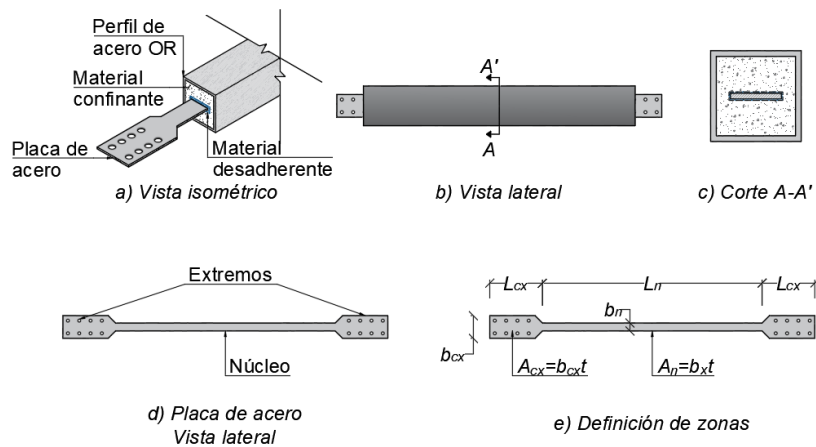


Figura 2 Vista esquemática de un CRP (Adaptada de Terán y Virto, 2009)

METODOLOGÍA BASADA EN EL CONTROL DE DESPLAZAMIENTO PARA DISEÑO POR DESEMPEÑO

La metodología descrita está basada en el artículo de (Terán y Virto, 2009), con una diferencia: se estima una rigidez post-fluencia para elaborar los espectros de respuesta inelásticos. Los desplazamientos objetivos obtenidos con la rigidez post fluencia diferente de cero, presentan una mayor aproximación al compararse con los resultados del análisis no lineal paso a paso.

La rigidez post fluencia se puede estimar con relativa facilidad en estructuras equipadas con CRP, gracias a que el sistema se considera dual (los marcos resisten la carga gravitacional y los dispositivos CRP la carga lateral). La ductilidad global se puede estimar mediante la metodología descrita por Terán y Virto (2009), y la rigidez post fluencia se obtiene con el periodo original de la estructura y su periodo objetivo. Los dos parámetros anteriores se pueden evaluar y obtener con un análisis de estático no lineal incremental (Pushover).

El concepto de la metodología se basa en estimar el comportamiento de la estructura en función de la distorsión máxima de entrepiso (γ_{max}). Esta distorsión se puede estimar a partir del desplazamiento objetivo de un oscilador de un grado de libertad equivalente (IGDL) aplicando dos factores; un coeficiente de distorsión (COD) que contempla que la distorsión no es constante en la altura de todos los entrepisos y factor (α) que relaciona el desplazamiento de un oscilador de un grado de libertad con los desplazamientos de un oscilador de varios grados de libertad.

Los espectros de respuesta utilizados para obtener el periodo objetivo a partir del desplazamiento objetivo deben realizarse con los siguientes parámetros.

1. Comportamiento inelástico con una ductilidad máxima (μ_{max}) calculada en función de la geometría de la estructura. La ductilidad máxima de la estructura (μ_{max}) se puede estimar a partir de la ductilidad del CRP (μ_{CRP}). La ductilidad del CRP se calcula como la relación entre el desplazamiento máximo del CRP (δ_{CRP}) y su desplazamiento de fluencia (δ_{YCRP})

Debido a que se está realizando un diseño por desplazamiento, se tiene una distorsión de entrepiso máxima (γ_{max}), por lo que se puede conocer el desplazamiento máximo de un entrepiso (δ_{max}) y de esta manera el desplazamiento máximo que tendrá el CRP (δ_{CRP}) como se muestra en la Figura 3. El desplazamiento de fluencia del CRP está en función de las propiedades del acero estructural y la geometría del núcleo.

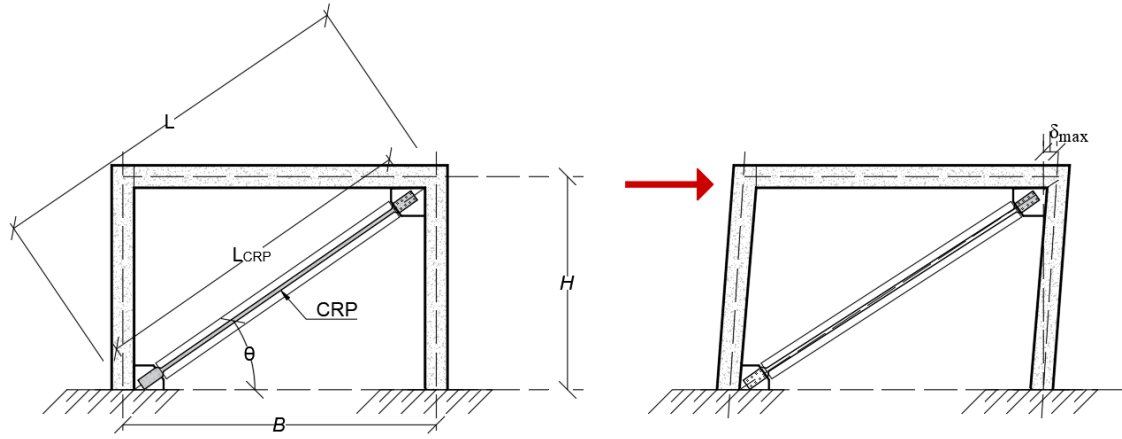


Figura 3 Desplazamiento de crujía con CRP

$$\delta_{max} = \gamma_{max} H \quad \text{Ec. 6}$$

$$\delta_{CRP} = \delta_{max} \cos \theta \quad \text{Ec. 7}$$

$$\delta_{yCRP} = L_{CRP} \epsilon \quad \text{Ec. 8}$$

$$L_{CRP} \approx 0.8L \quad \text{Ec. 8}$$

$$\epsilon = \frac{F_{ye}}{E} \quad \text{Ec. 9}$$

$$\mu_{CRP} = \frac{\delta_{CRP}}{\delta_{yCRP}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- δ_{max} = Desplazamiento máximo de entrepiso
- δ_{CRP} = Desplazamiento máximo del CRP
- δ_{yCRP} = Desplazamiento de fluencia del CRP
- L_{CRP} = Longitud del CRP
- ϵ = Deformación unitaria de fluencia del acero utilizado en el CRP
- F_{ye} = Esfuerzo de fluencia esperado del acero utilizado en el CRP
- E = Modulo de elasticidad del acero utilizado en el CRP

La ductilidad máxima de la estructura (μ_{max}) se puede calcular con la Ecuación 11, donde β es un factor que relaciona la ductilidad entre el CRP y la estructura (Nassar & LKrawinkler, 1991; Bertero & Bertero, 1992; Chopra, 2001) mostrado en la Tabla 1, el cual está en función del número de pisos y la ductilidad del CRP.

$$\mu_{max} = \frac{\mu_{CRP}}{\beta} \quad \text{Ec. 11}$$

Tabla 1 Factor β

Número de pisos	β	
	$\mu_{CRP} = 2$	$\mu_{CRP} = 6 +$
5	1.0	1.1
10	1.0	1.1
20	1.1	1.2
30	1.2	1.3
40+	1.3	1.4

2. Pendiente de la rigidez post-fluencia (r) diferente de cero, debido a que al colocar los CPR en un sistema estructural a base de marcos se forma un sistema dual, en el cual, la pendiente post-fluencia es relativamente sencilla de calcular. Por una parte, se tiene el sistema de marcos (Figura 4b), que es el encargado de resistir las acciones gravitacionales. Por otra parte, los CPR (Figura 4c) se encargan de resistir las acciones laterales y disipar la mayor cantidad de energía sísmica posible. La curva de capacidad idealizada de este sistema se presenta en la Figura 4d, donde en el eje de las abscisas se muestra el desplazamiento y en el eje de las ordenadas el cortante.

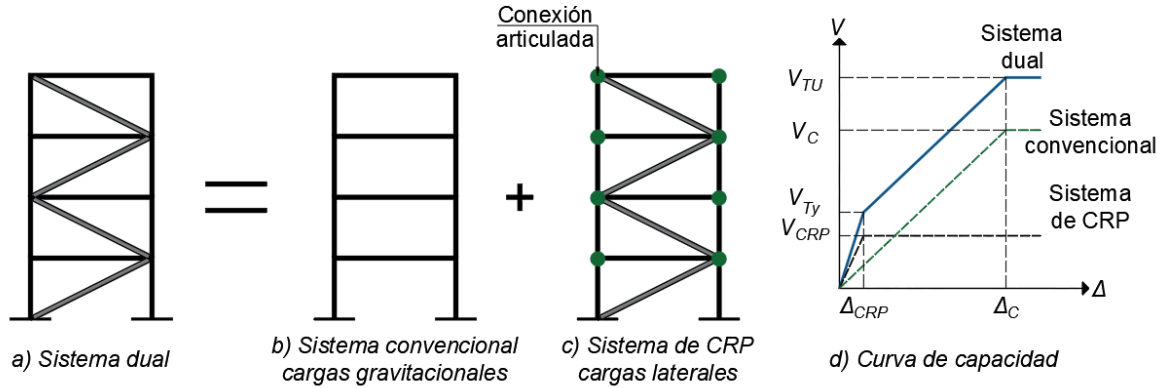


Figura 4 Curva de capacidad idealizada del sistema dual (Adaptada de Guerrero, 2016)

La rigidez total (k_{total}) del sistema dual corresponde a la suma de las rigideces del sistema de marcos y del sistema con CPR ($k_m + k_{CPR}$). El cociente de rigideces, post-fluencia elástica, r , se calcula según la Ecuación 12. Recordando que la rigidez es inversamente proporcional al cuadrado del periodo, la Ecuación 13 permite calcular r en términos de periodos, donde T_{Total} es el periodo de la estructura dual y T_m es el periodo de la estructura convencional (es decir, a base de marcos sin CPR). De esta manera, se puede obtener la pendiente de la rigidez post-fluencia conociendo únicamente el periodo de la estructura antes de colocar los CPR y el periodo total de la estructura dual.

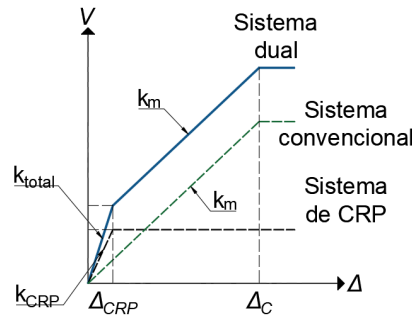


Figura 5 Pendiente de la rigidez post-fluencia de un sistema dual

$$r = \frac{k_m}{k_{total}} \tag{Ec. 12}$$

$$r = \frac{T_{Total}^2}{T_m^2} \tag{Ec. 13}$$

3. Amortiguamiento del 2.5%, debido a que la norma actual solicita que, para un análisis no lineal paso a paso, se considere un amortiguamiento con la matriz de Rayleigh del 2.5%

A continuación, se describe paso a paso la metodología empleada.

1. Diseño gravitacional

Se realiza el diseño gravitacional del sistema convencional, es decir, los marcos. Los marcos se diseñan para soportar únicamente las cargas gravitacionales, por lo que se revisarán condiciones de servicio (deformaciones, vibraciones, agrietamientos, etc.) y de resistencia para sus respectivas combinaciones de diseño. El detallado de estas estructuras debe satisfacer al menos los requisitos vigentes de la norma para estructuras de ductilidad baja (Comportamiento sísmico $Q=2$). Se obtiene mediante un análisis modal el periodo de la estructura sin CRP (T_m).

2. Obtención del desplazamiento objetivo

Se debe establecer una distorsión máxima (γ_{max}) en función del desempeño deseado (FEMA 356; ASCE/SEI 41; Reyes, 1999). El desplazamiento de azotea (δ_{Az}) se calcula con la Ecuación 14,

$$\delta_{Az} = \frac{\gamma_{max} H}{COD} \tag{Ec. 14}$$

Donde H es la altura del edificio partir del nivel del suelo, y COD es un coeficiente que contempla que la distorsión no es constante en la altura de todos los entrepisos (Terán & Virto, 2009) mostrado en la Tabla 2 y representado en la Figura 6, el cual se encuentra en función de la ductilidad (μ_{max}), regularidad de la estructura y disposición de los CRP en función del cortante sísmico.

Tabla 2 Coeficiente COD

μ_{max}	El área de CRP sigue la distribución de cortante		El área de CRP no sigue la distribución de cortante	
	Regular	Irregular	Regular	Irregular
1	1.2	1.5	1.2	1.5
2	1.2	1.5	1.5	2.0

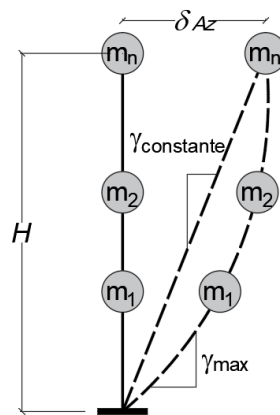


Figura 6 Relación entre distorsión constante y distorsión máxima

A partir del desplazamiento de azotea, podemos calcular el desplazamiento objetivo en un oscilador de un grado de libertad mediante la Ecuación 15.

$$\delta_{Obj} = \frac{\delta_{Az}}{\alpha} \tag{Ec. 15}$$

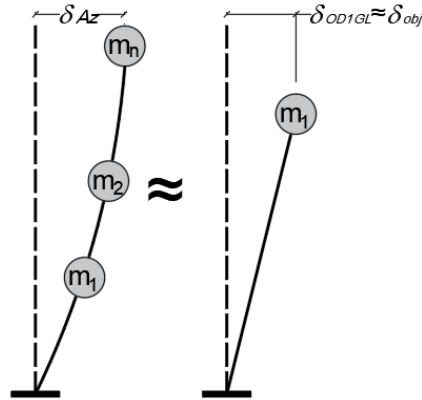


Figura 7 Relación desplazamientos de varios grados de libertad y un grado de libertad

El factor α relaciona los desplazamientos entre un oscilador de un grado de libertad con el de un oscilador de múltiples grados de libertad, tal como se muestra en la Figura 7. Este factor es mayor a 1 y contempla el caso de estructuras regulares que exhiben un comportamiento global del tipo viga a cortante (FEMA 306, Teran, 2004). Los valores de α se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Factor α

Número de pisos	α	
	$\mu_{max} = 1$	$\mu_{max} = 2 +$
1	1.0	1.0
2	1.2	1.1
3	1.3	1.2
5+	1.4	1.2

3. Obtención del periodo objetivo

El periodo objetivo se obtendrá por iteraciones a partir de los espectros de desplazamiento. Para ello, se requiere un conjunto de acelerogramas, como lo menciona la norma para los análisis no lineales paso a paso (NTC – DS, 2020). El espectro con el cual se comparará será el promedio de los espectros de respuesta considerados.

Primera iteración: Se obtienen los espectros de respuesta de un oscilador de 1 grado de libertad con una ductilidad constante igual a μ_{max} y una rigidez post-fluencia igual a cero. El periodo objetivo T_{obj} será el menor relacionado al desplazamiento objetivo δ_{obj} .

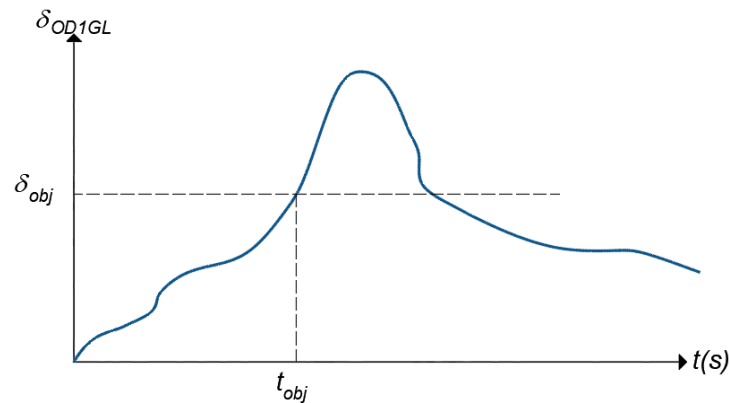


Figura 8 Espectro de respuesta promedio, intersección entre desplazamiento y periodo objetivo



Segunda y tercera iteración: Se obtienen los espectros de respuesta de un oscilador de 1 grado de libertad con una ductilidad constante igual a μ_{max} y una rigidez post-fluencia igual a r (Ecuación 13)

El periodo objetivo T_{obj2} será el menor relacionado al desplazamiento objetivo δ_{obj} . Si la diferencia entre el periodo objetivo 1 y 2 es $\pm 10\%$, se acepta el periodo objetivo 2, como el periodo objetivo final (T_{obj}). En caso de que la diferencia sea mayor, se requiere una tercera iteración donde se calcule nuevamente los espectros de respuesta para un oscilador de 1 grado de libertad, pero con rigidez post-fluencia en función del periodo objetivo 2.

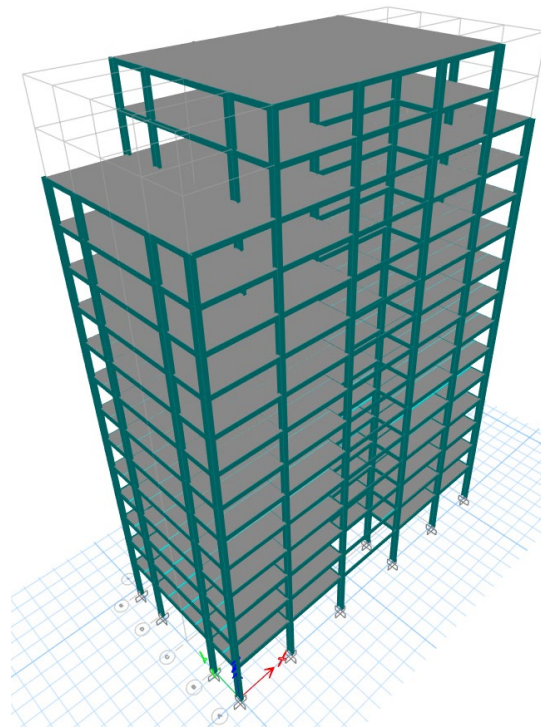
Una vez obtenido el periodo objetivo (T_{obj}) se deberá implementar a la estructura los CRP de tal manera que se llegue a dicho valor. Los CRP deberán cumplir los requisitos de la norma y ubicarse de manera simétrica en planta y altura.

Por último, se deberá evaluar el desempeño de la estructura equipada con los CRP mediante un análisis no lineal paso a paso, y verificar si las distorsiones obtenidas sean similares a las esperadas de la metodología.

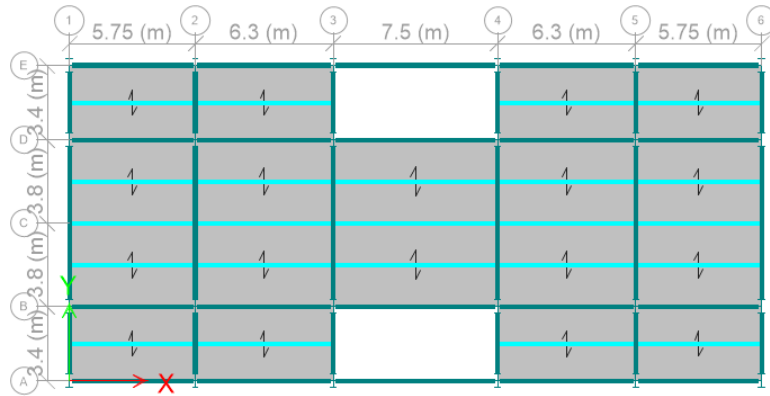
EJEMPLO DE APLICACIÓN

Descripción del proyecto

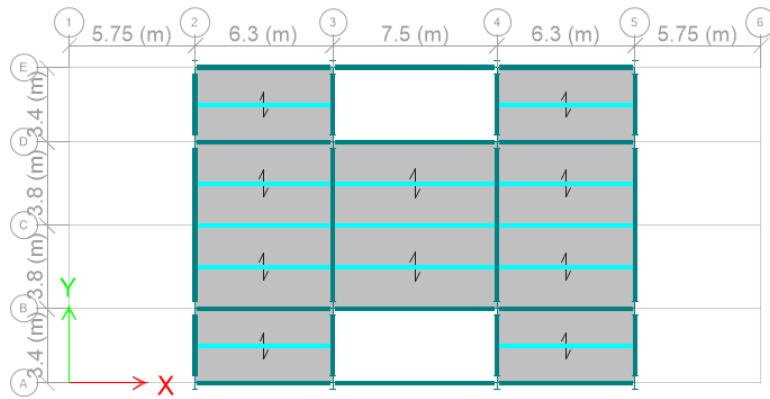
El edificio de estudio cuenta con una estructura de acero de 15 niveles ubicado en Av. Chapultepec, Roma, Norte, Cuauhtémoc, C.P. 06600, Ciudad de México, con coordenadas: 19.421852, -99.172836. Las columnas y vigas del proyecto son elementos perfiles tipo IR, el sistema de losa es de losacero. La estructura se clasifica dentro del Grupo B con uso habitacional. Las alturas de entrepiso, geometría y alzados se muestran en la Figura 9.



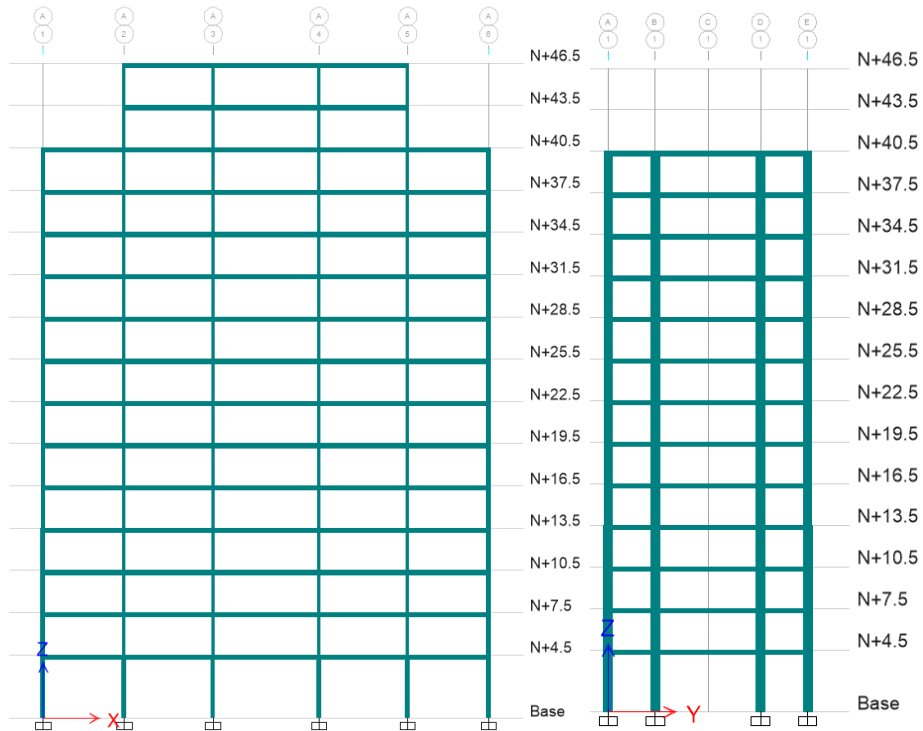
a) Vista extruida en 3D



b) Vista en planta tipo



c) Vista en planta de nivel 14 y azotea



d) Alzado eje A

e) Alzado eje 1

Figura 9 Geometría de la estructura



Las secciones utilizadas se describen en la Tabla 4.

Tabla 4 Secciones utilizadas

Elemento	Sección	Ubicación
Viga	W8x24	Vigas secundarias
Viga	W12x30	Vigas principales
Viga	W14x30	Vigas principales del eje 3 y 4
Columna	W24x84	Centrales
Columna	W24x104	Planta Baja linderos y N+13.5 – N+40.50 eje 1 y 6
Columna	W24x117	Planta Baja Linderos eje 1 y 3
Columna	W24x131	N+0.00 – N+19.5 Centrales
Columna	W24x176	N+0.00 – N+13.5 Esquinas

Las propiedades dinámicas de la estructura se describen en la Tabla 5.

Tabla 5 Propiedades dinámicas de la estructura sin CRP

Modo	Periodo (s)	Dirección
1	4.28	Traslacional X
2	2.97	Traslacional Y
3	2.59	Rotacional (z)
4	1.46	Traslacional X
5	0.93	Traslacional Y
6	0.89	Rotacional (z)

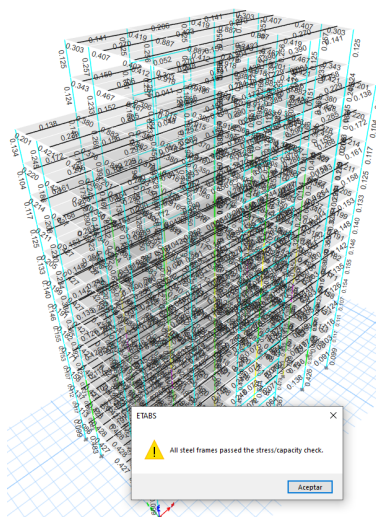
Por lo anterior, el periodo de la estructura sin los CRP en cada dirección es

$$T_{mX} = 4.28 \text{ s}$$

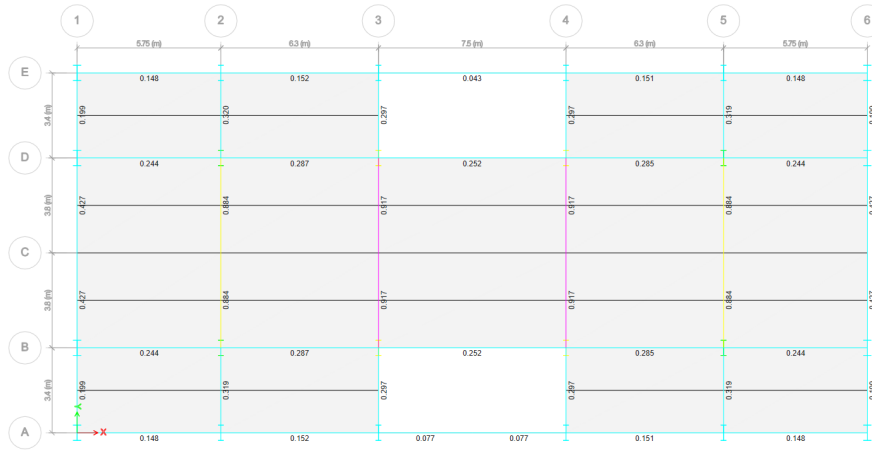
$$T_{mY} = 2.97 \text{ s}$$

Aplicación de metodología

En la Figura 9 se muestra la revisión ante cargas gravitacionales obtenida del programa ETABS (ETABS, 2022), se observa que los elementos estructurales tienen una relación demanda/capacidad menor a la unidad, por lo que se cumple con la primera revisión.



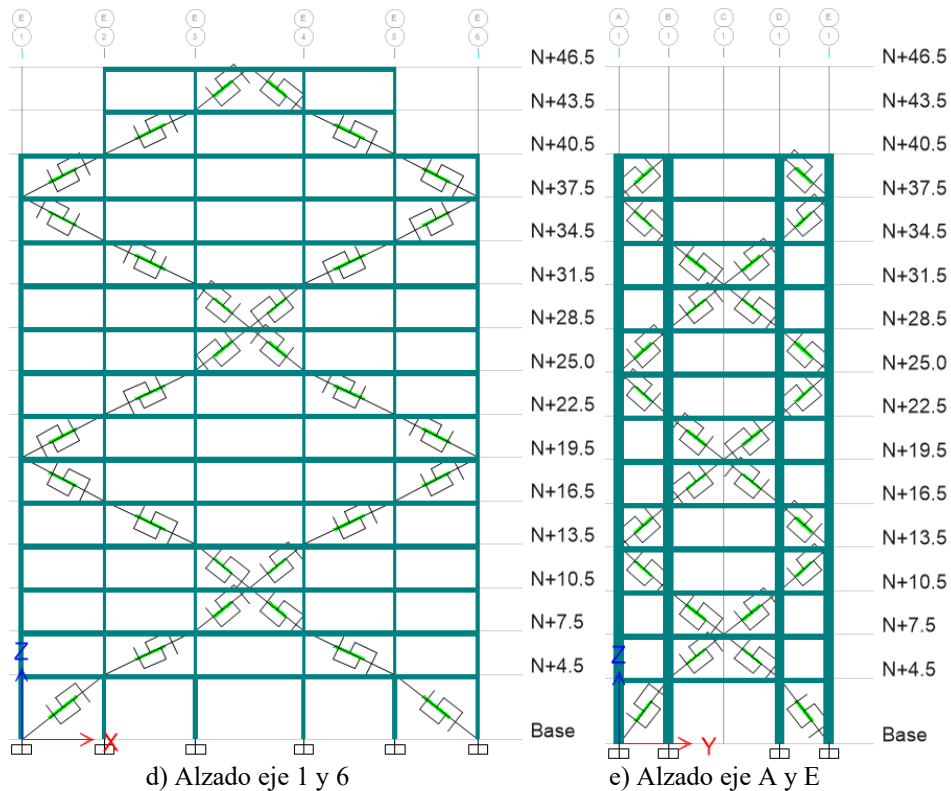
a) Vista en 3D de la relación demanda/capacidad



b) Vista en planta de la relación demanda/capacidad
Figura 9 Relación Demanda/Capacidad para combinación gravitacional

La distorsión máxima seleccionada (γ_{max}) es del 1%. Para poder determinar el coeficiente COD de la Tabla 2, se debe conocer anteriormente la ductilidad máxima (μ_{max}) para cada dirección, el desarrollo para obtenerlo se muestra a continuación.

Los CRP se colocarán en los ejes extremos de la estructura, en los ejes A y E en dirección X y en los ejes 1 y 6 en dirección Y. La ubicación de los CRP se muestra en la Figura 10. La ductilidad máxima de CRP para cada dirección se calcula con las ecuaciones 6 a 10 y se muestra a continuación. El valor de F_{ye} se tomó de resultados obtenidos de probetas de CRP reales para aceros A36 igual a 3,200 kg/cm². Para dirección X se analizó la crujía entre A-B del N+16.5 a N+19.5 y para dirección Y la crujía entre 1-2 del N+16.5 a N+19.5.



d) Alzado eje 1 y 6
 e) Alzado eje A y E
Figura 10 Ubicación de CRP



$$\delta_{\max_{X,Y}} = 0.01 \cdot 300 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$$

$$\epsilon = \frac{3,200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{2,039,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 0.0015$$

$$\delta_{CRP_X} = 3 \cdot \text{Cos}(25.46^\circ) = 2.70 \text{ cm}$$

$$\delta_{CRP_Y} = 3 \cdot \text{Cos}(41.42^\circ) = 2.24 \text{ cm}$$

$$\delta_{yCRP_X} = 0.8 \cdot 697 \text{ cm} \cdot 0.0015 = 0.83 \text{ cm}$$

$$\delta_{yCRP_Y} = 0.8 \cdot 453 \text{ cm} \cdot 0.0015 = 0.54 \text{ cm}$$

$$\mu_{CRP_X} = \frac{2.7 \text{ cm}}{0.83 \text{ cm}} = 3.25$$

$$\mu_{CRP_Y} = \frac{2.24 \text{ cm}}{0.54 \text{ cm}} = 4.14$$

Para obtener la ductilidad máxima de la estructura a partir de la ductilidad de los CRP se debe obtener el factor β de la Tabla 1. Para dirección X se obtuvo un valor de 1.1 (Para el caso de 20 pisos y $\mu_{CRP}=2$) y para Y un valor de 1.2 (Para el caso de 20 pisos y $\mu_{CRP}=6$).

$$\beta_X = 1.1$$

$$\beta_Y = 1.2$$

La ductilidad máxima por cada dirección se calcula a continuación.

$$\mu_{\max_X} = \frac{3.25}{1.1} = 2.95$$

$$\mu_{\max_Y} = \frac{4.14}{1.2} = 3.45$$

El coeficiente COD se obtiene para cada dirección de la Tabla 2, se consideró la estructura regular y que el área de las diagonales no sigue la distribución a cortante, por lo tanto, COD se tomó de 1.5.

$$COD_{X,Y} = 1.5$$

El desplazamiento de azotea para cada dirección se calcula a continuación

$$\delta_{Az_{X,Y}} = \frac{0.01 \cdot 4,650 \text{ cm}}{1.5} = 31 \text{ cm}$$

El factor α se obtiene de la Tabla 3, para ambas direcciones se toma un valor de 1.2, considerando más de 5 niveles y una ductilidad mayor de 2 para ambos casos.

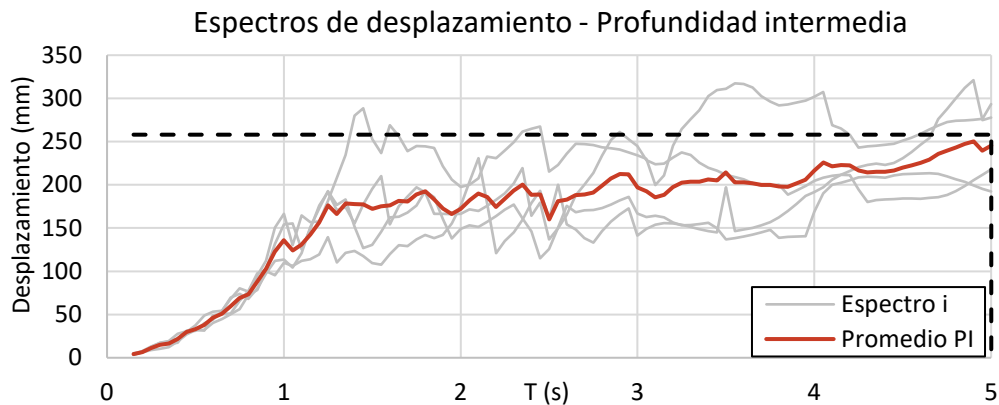
$$\alpha_{X,Y} = 1.2$$

Por lo tanto, el desplazamiento objetivo para ambas direcciones se calcula a continuación:

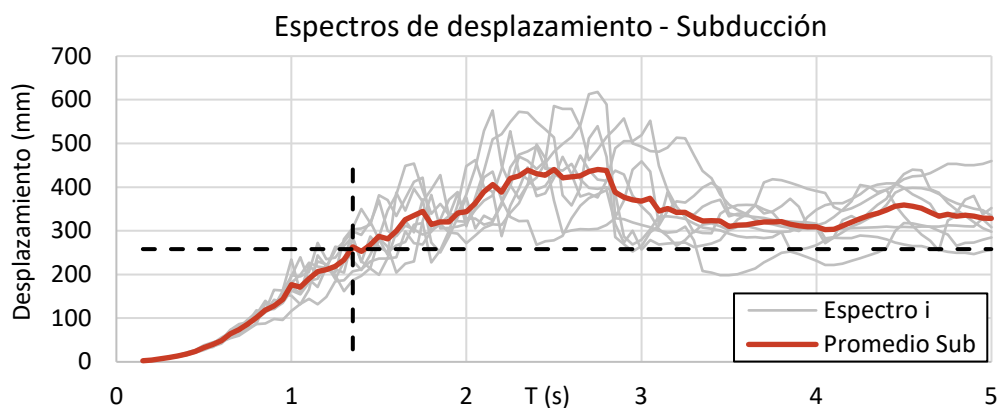
$$\delta_{obj_{X,Y}} = \frac{31 \text{ cm}}{1.2} = 25 \text{ cm}$$

Del desplazamiento objetivo, se obtendrán los periodos objetivos a partir de los acelerogramas sintéticos generados por la aplicación SASID WEB.

A continuación, se muestra en la Figura 11 los espectros de respuesta para un oscilador de 1GDL para la primera iteración de la dirección X, correspondiente a una μ_{maxX} de 2.95 y una rigidez post-fluencia r_x , de 0, de esta primera interacción observa que el periodo objetivo es 1.35 s correspondiente al promedio para los sismos de subducción, por su parte los sismos de profundidad intermedia mostraron que el periodo objetivo es de 5.0 s.



a) Espectros de respuesta para sismos de profundidad intermedia con una ductilidad de 2.95 y rigidez post-fluencia de 0

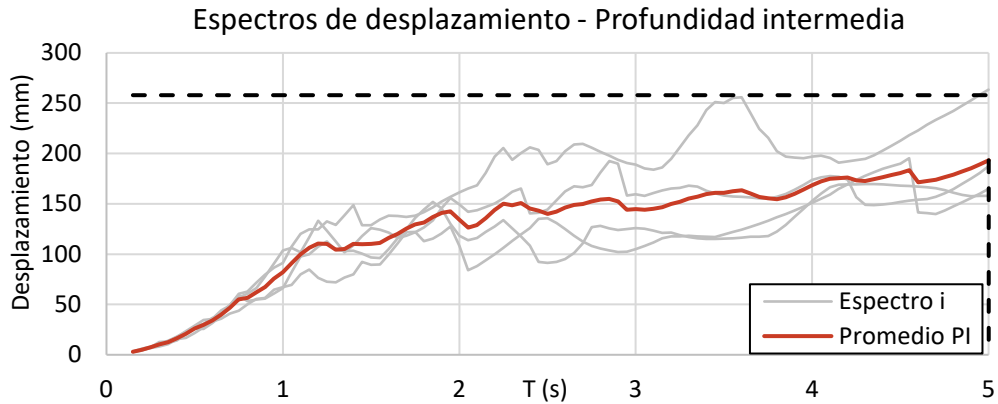


b) Espectros de respuesta para sismos de subducción con una ductilidad de 2.95 y rigidez post-fluencia de 0
Figura 11 Espectro de respuesta para dirección X (primera iteración)

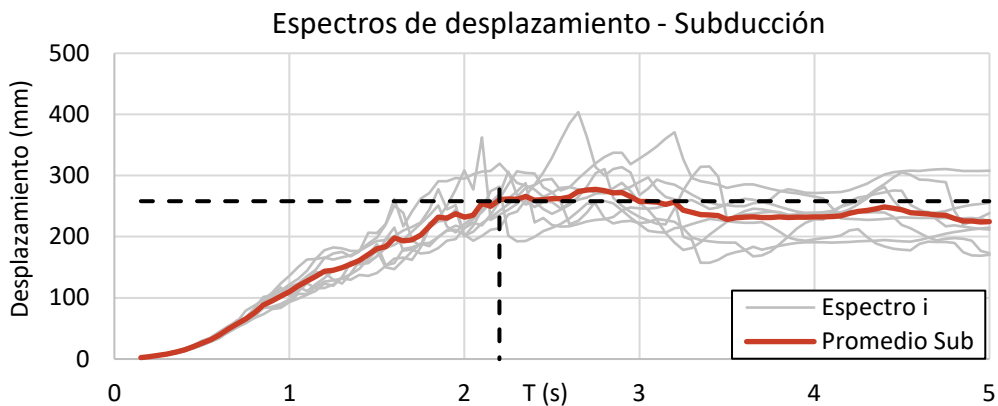
Por lo tanto, la rigidez post-fluencia para la segunda iteración se calcula a continuación con la Ec. 13:

$$r_x = \frac{(1.35 \text{ s})^2}{(4.28 \text{ s})^2} = 0.099$$

En la Figura 12 se muestran los espectros de respuesta para un oscilador de 1GDL para la segunda iteración de la dirección X, correspondiente a una μ_{maxX} de 2.95 y una rigidez post-fluencia r_x , de 0.099, de esta segunda iteración se lee que el periodo objetivo puede ser 2.1 s, valor que es compatible con el desplazamiento objetivo, por lo tanto, este será el periodo objetivo en dirección X.



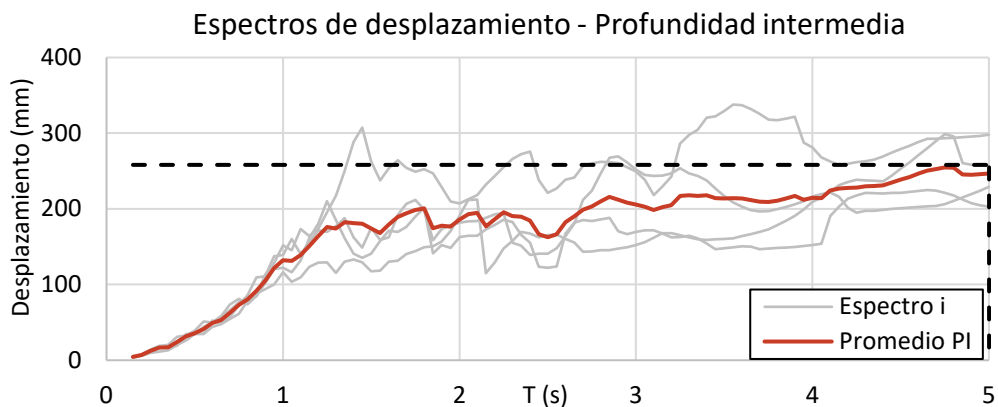
a) Espectros de respuesta para sismos de profundidad intermedia con una ductilidad de 2.95 y rigidez post-fluencia de 0.099



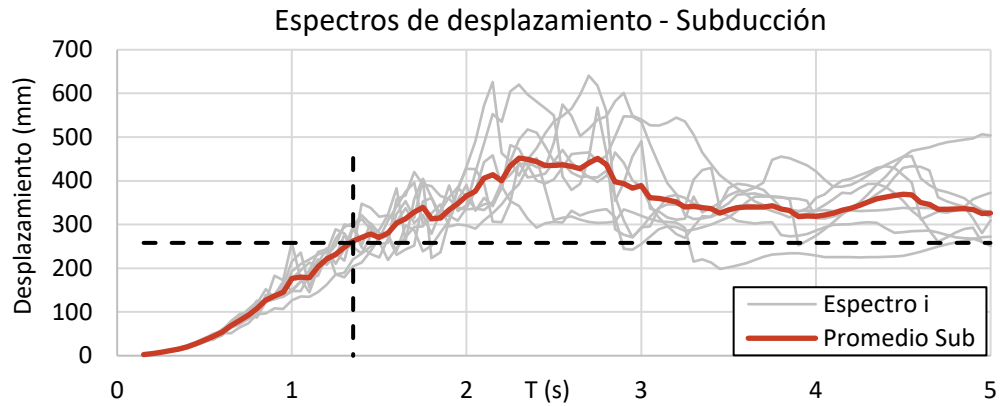
b) Espectros de respuesta para sismos desubducción con una ductilidad de 2.95 y rigidez post-fluencia de 0.099

Figura 12 Espectro de respuesta para dirección X (segunda iteración)

En la Figura 13 se muestran los espectros de respuesta para un oscilador de 1GDL para la primera iteración de la dirección Y, correspondiente a una μ_{maxY} de 3.45 y una rigidez post-fluencia r_Y , de cero, de esta primera iteración se lee que el periodo objetivo es 1.35 s correspondiente al promedio para los sismos de subducción, por su parte los sismos de profundidad intermedia mostraron que el periodo objetivo es de 4.85 s.



a) Espectros de respuesta para sismos de profundidad intermedia con una ductilidad de 3.45 y rigidez post-fluencia de 0

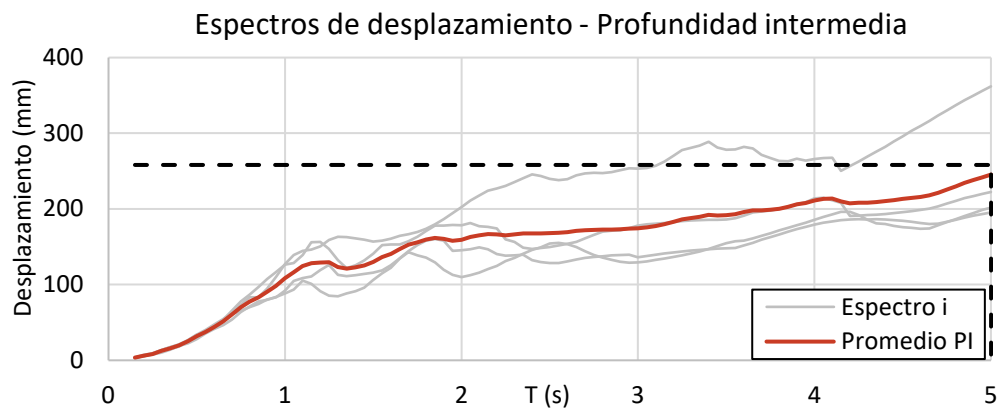


b) Espectros de respuesta para sismos de subducción con una ductilidad de 3.45 y rigidez post-fluencia de 0
Figura 13 Espectro de respuesta para dirección Y (Primera iteración)

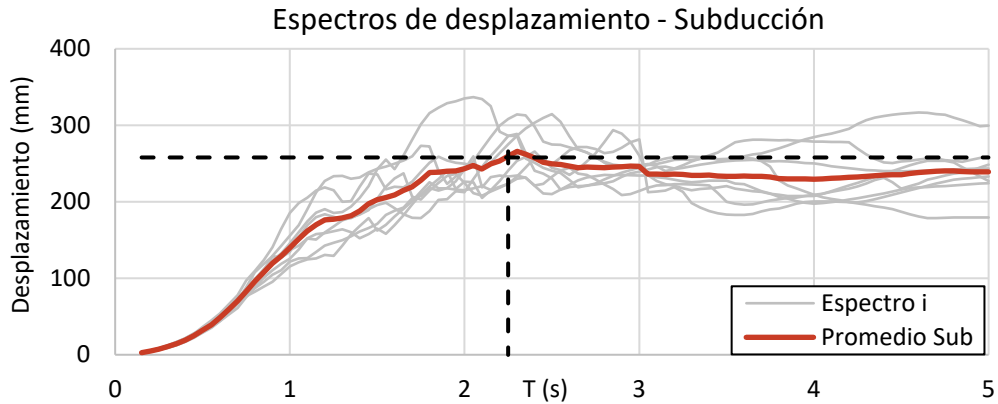
Por lo tanto, la rigidez post-fluencia para la segunda iteración se calcula a continuación con la Ec. 13:

$$r_x = \frac{(1.35 \text{ s})^2}{(2.97 \text{ s})^2} = 0.2066$$

En la Figura 14 se muestran los espectros de respuesta para un oscilador de 1GDL para la segunda iteración de la dirección Y, correspondiente a una μ_{maxY} de 3.45 y una rigidez post-fluencia r_Y , de 0.2066, de esta segunda iteración se lee que el periodo objetivo puede ser 2.2 s, valor que es compatible con el desplazamiento objetivo, por lo tanto, este será el periodo objetivo en dirección Y.



a) Espectros de respuesta para sismos de profundidad intermedia con una ductilidad de 3.45 y rigidez post-fluencia de 0.2066



b) Espectros de respuesta para sismos de subducción con una ductilidad de 3.45 y rigidez post-fluencia de 0.2066

Figura 14 Espectro de respuesta para dirección Y (Segunda iteración)

Resultados

Los periodos objetivos para dirección X y Y serán 2.1 s y 2.2 s respectivamente. En la Figura 15 se muestra la estructura con los CRP en los ejes 1y 6 para dirección X y A y E para dirección Y. Las propiedades de estos CRP se describen en la Tabla 6 y las propiedades dinámicas de la estructura en la Tabla 7, se aprecia que la estructura se encuentra por debajo del periodo objetivo.

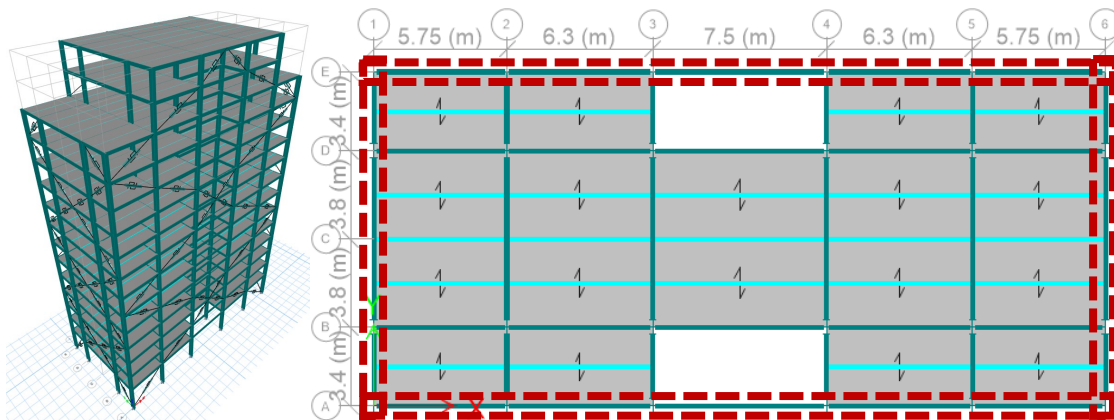


Figura 15 Ubicación de CRP en la estructura

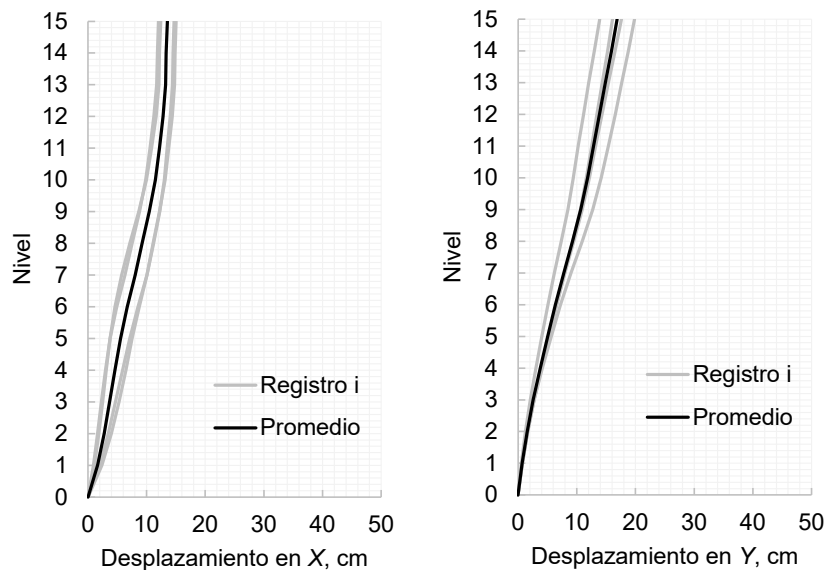
Tabla 6 Propiedades de los CRP

ID	Rigidez (ton/cm)	Carga de fluencia (ton)	Desplazamiento de fluencia (cm)	Desplazamiento último (cm)
CRP 03.50/010_DAMPO	22.7	11	0.5	2.7
CRP 03.50/020_DAMPO	47.4	22	0.4	2.6
CRP 03.50/030_DAMPO	72.9	33	0.4	2.5
CRP 04.00/010_DAMPO	20.7	11	0.5	3.0
CRP 04.00/020_DAMPO	41.8	22	0.5	2.9
CRP 04.50/030_DAMPO	62.9	33	0.5	2.9
CRP 04.50/050_DAMPO	108.4	55	0.5	2.8
CRP 05.50/010_DAMPO	14.9	11	0.7	4.1
CRP 05.50/020_DAMPO	29.8	22	0.7	4.1
CRP 05.50/030_DAMPO	45.5	33	0.7	4.0
CRP 05.50/040_DAMPO	61.7	44	0.7	4.0
CRP 05.50/050_DAMPO	79.4	55	0.6	3.9

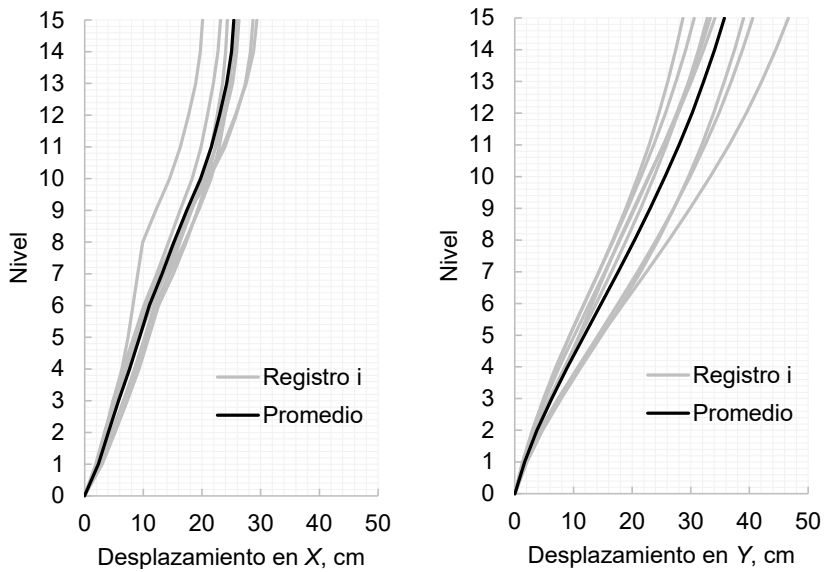
Tabla 7 Propiedades dinámicas de la estructura con CRP

Modo	Periodo (s)	Dirección
1	2.14	Traslacional Y
2	2.09	Traslacional X
3	1.41	Rotacional (z)
4	0.79	Traslacional Y
5	0.74	Traslacional X
6	0.51	Rotacional (z)

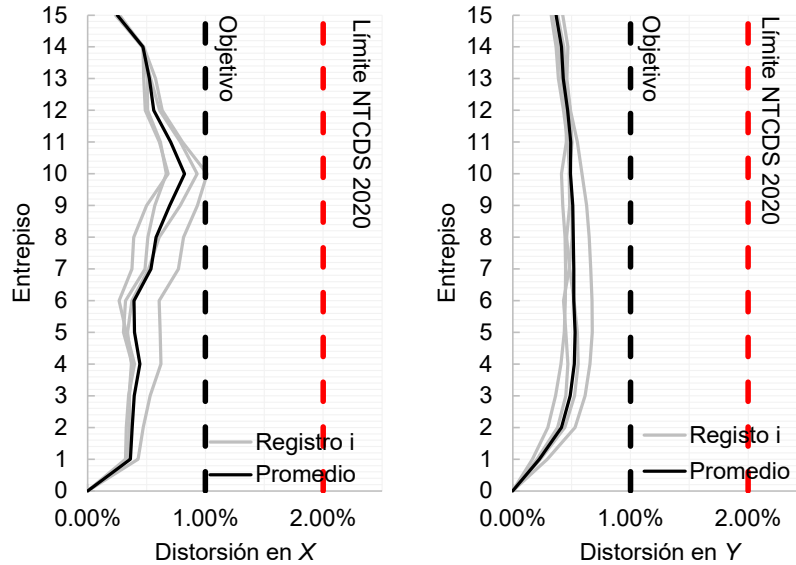
Los resultados de desplazamientos y distorsiones del análisis no lineal paso a paso se presentan en la Figura 16. Se aprecia que la distorsión máxima para los sismos de subducción es del 1% en ambas direcciones, resultados esperados en el procedimiento. Con ello se comprueban los objetivos obtenidos con la metodología, ya que, para un procedimiento simplificado se puede estimar de manera precisa el comportamiento global de la estructura.



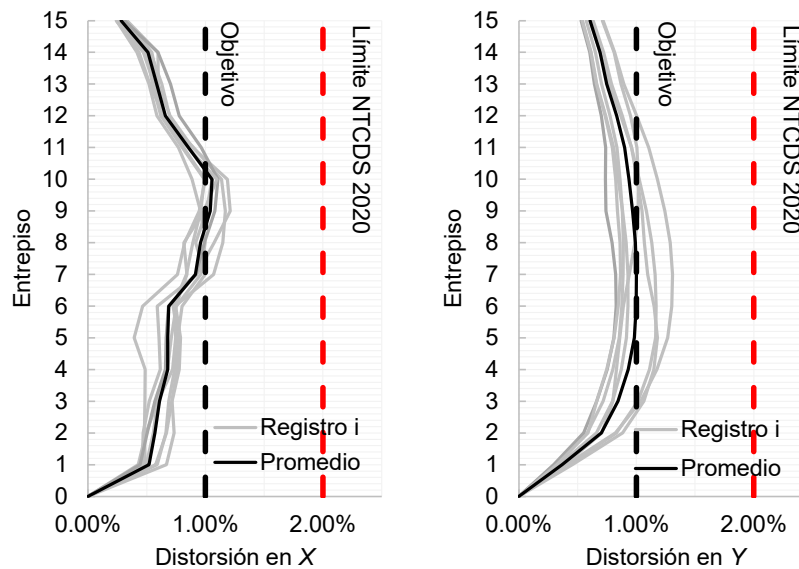
a) Desplazamientos de análisis no lineal para sismos de profundidad intermedia



b) Desplazamientos de análisis no lineal para sismos de subducción



c) Distorsiones de análisis no lineal para sismos de profundidad intermedia



d) Distorsiones de análisis no lineal para sismos de subducción

Figura 16 Desplazamientos y distorsiones para los análisis no lineales paso a paso

En La Figura 17 se muestra el estado final para el movimiento crítico de subducción (aquel que generó mayor desplazamiento). Se observa que ningún elemento alcanza una articulación superior a ocupación inmediata, sin embargo, algunas vigas alcanzaron su fluencia.

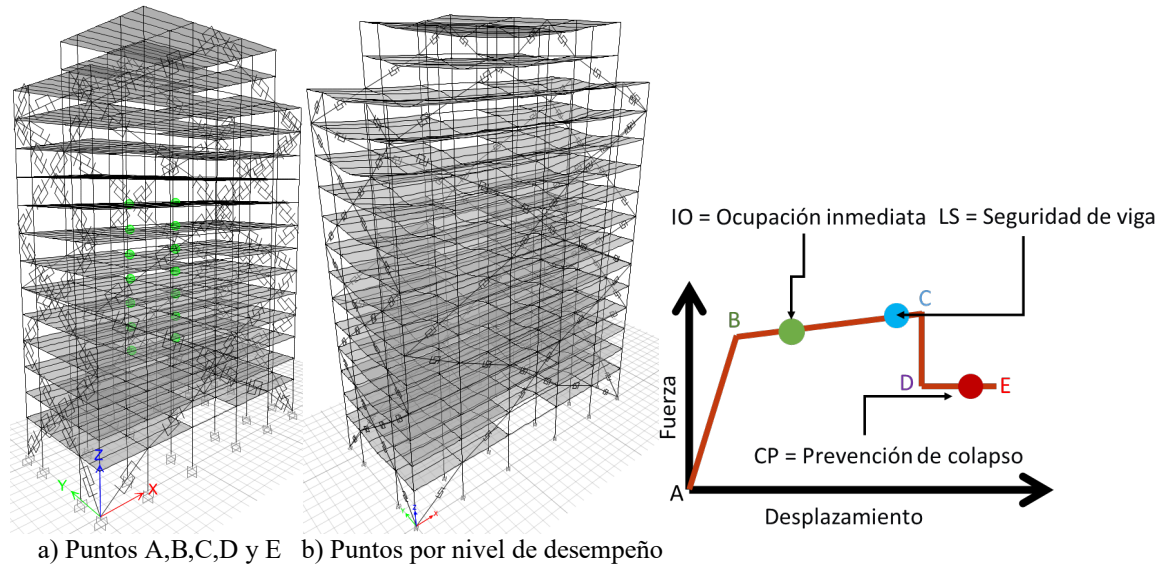


Figura 17 Estado último para Acelerograma crítico

En la Figura 18 se muestra las curvas de histéresis para distintos CRPs, mismos que se ubican en N+13.5 eje E, N+22.5 eje E, N19.5 Eje 6 y N34.5 Eje 6, respectivamente. Se aprecia que incursiona en el intervalo inelástico, disipando energía y ayudando a controlar desplazamientos laterales de la estructura.

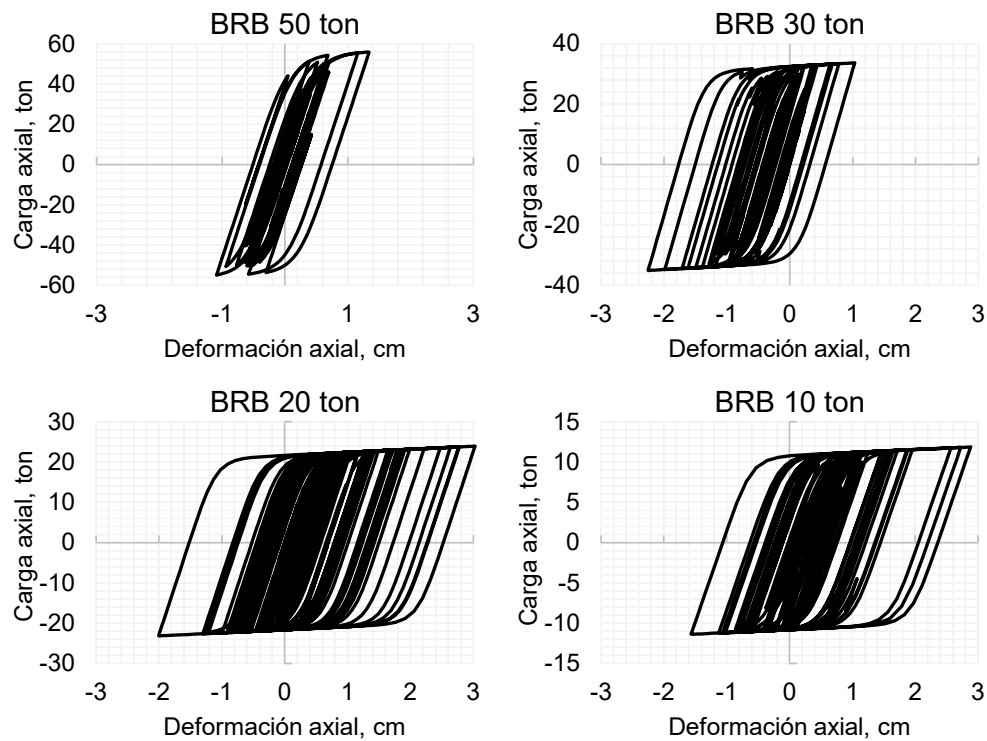


Figura 18 Curvas de histéresis para CRP seleccionados



CONCLUSIONES FINALES

- Existe diferencia entre considerar un espectro con rigidez post-fluencia igual a cero y diferente.
- Las distorsiones obtenidas con la rigidez post fluencia diferente de cero presentan una aproximación mayor al compararse con los resultados del análisis no lineal paso a paso.
- Los resultados obtenidos con los coeficientes y factores empleados en la metodología son satisfactorios ya que se alcanza la distorsión objetivo.
- Los resultados mostrados motivan el uso de análisis basado en desempeño para estructuras equipadas con CRP debido a la manera práctica y sencilla de poder estimar el desplazamiento de la estructura, teniendo un ahorro de tiempo computacional en los análisis paso a paso.
- Debido al buen control de desplazamientos, se puede estimar un comportamiento apropiado de la estructura en función de la distorsión objetivo.
- La estructura presentó no linealidad en algunas vigas, pero no alcanzaron el límite de ocupación inmediata. La disipación de la energía de la estructura se presentó en los CRP como se esperaba.

REFERENCIAS

Aplicación Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México. (2019). Obtenido de <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>

Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H., and Miranda, E., (1991). Design guidelines for ductility and drift limits: review of state-of-the-practice and state-of-the-art in ductility and drift-based earthquake-resistant design of buildings, Report UCB/EERC-91/15, University of California, Berkeley.

Chopra, A. K., (2001). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 2nd Edition, Prentice Hall, New York, 844 pp.

Guerrero Bobadilla, H., Tianjian Ji, Teran Golmore, A., & Alberto Escobar, J. (2016). A method for preliminary seismic desing and assessment of low-rise structures protected with buckling-restrained braces. Engineering Structures, 123, 141-154.

Hussain, S., Benschoten, P. V., Satari, M., & Lin, S. (2006). Buckling Restrained Braced Frame (BRBF) Structures: Analysis, Design and Approvals Issues. Long Beach: Proceedings of the 75th SEAOC Annual Convention.

Nassar, A. A., and Krawinkler, H., (1991). Seismic demands for SDOF and MDOF systems, Report No. 95, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.

NTC – DS. (2017) Normas Técnicas Complementarias para Diseño por sismo. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 220 Bis, 44-83.

Reyes Salinas, C., (1999). El Estado Límite de Servicio en el Diseño Sísmico de Edificios, Ph.D. Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.

Terán Gilmore, A., & Coeto, G. (2011). Displacement-based preliminary design of tall buildings stiffened with a system of buckling-restrained braces. Earthquake Spectra, 27(1), 153-186.

Terán Gilmore, A., & Guillermo Coeto. (2011). Earthquake Spectra, Volume 27, No. 1, pages 153–182, February 2011; VC 2011, Earthquake Engineering Research Institute.

Terán Gilmore, A., & Montiel Ortega, M. A. (2008). Evaluación y comparación de la confiabilidad de edificios de 24 niveles estructurados con contravientos tradicionales y con contravientos restringidos contra pandeo. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Terán Gilmore, A., & Virto Cambray, N. (2009). Preliminary Design of Low-Rise Buildings Stiffened with Buckling-Restrained Braces by a Displacement-Based Approach. *Earthquake Spectra*, 27(1), 158 - 211.