



## DISEÑO DE UN SISTEMA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA UN EDIFICIO EN ALTURA

G. Palazzo<sup>(1)</sup>, F. López-Almansa<sup>(2)</sup>, V. Roldan<sup>(3)</sup> y F. Calderon<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Profesor, CeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, [gpalazzo@frm.utn.edu.ar](mailto:gpalazzo@frm.utn.edu.ar)

<sup>(2)</sup> Profesor, Departamento de Estructuras en Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña, España, [francesc.lopez-almansa@upc.edu](mailto:francesc.lopez-almansa@upc.edu)

<sup>(3)</sup> Profesor Asistente, CeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, [victor.roldan@frm.utn.edu.ar](mailto:victor.roldan@frm.utn.edu.ar)

<sup>(4)</sup> Profesor Asistente, CeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, [francisco.calderon@frm.utn.edu.ar](mailto:francisco.calderon@frm.utn.edu.ar)

### Resumen

Se considera en este trabajo un edificio sismorresistente aporricado de hormigón armado, de 21 niveles, diseñado para Guayaquil, Ecuador. El objetivo del estudio es desarrollar un procedimiento de diseño de un sistema de disipación pasiva de energía (barras de pandeo restringido) para mejorar los parámetros de respuesta de la estructura original. Se diseñan los disipadores según el procedimiento que se explicita, y luego se realiza un análisis dinámico de historia en el tiempo para la estructura con / sin disipadores, bajo la excitación de 5 acelerogramas. Los resultados del modelo numérico muestran la eficiencia del sistema de disipación propuesto.

*Palabras Clave: barras de pandeo restringido, diseño de sistemas de disipación de energía*

### Abstract

This paper considers a seismic building with reinforced concrete frames, 21 floor, designed for Guayaquil, Ecuador. The objective is to develop a design procedure of a passive supplemental damping systems (buckling restrained braces) to improve the response parameters of the first structure. The braces are designed according with a methodology that is explained in the paper; then, a dynamic analysis is done for the structure with /without braces, subject to 5 accelerograms. The results of the numerical model show the efficiency of the passive supplemental damping systems proposed.

*Keywords: buckling restrained braces, design of passive supplemental damping systems.*

## 1 Introducción

Este trabajo toma como base de estudio un edificio de hormigón armado (H<sup>º</sup>A<sup>º</sup>) construido en Guayaquil (Ecuador), en una zona de elevada sismicidad. La geometría de un modelo computacional de esta construcción se presenta en la Fig. 1.

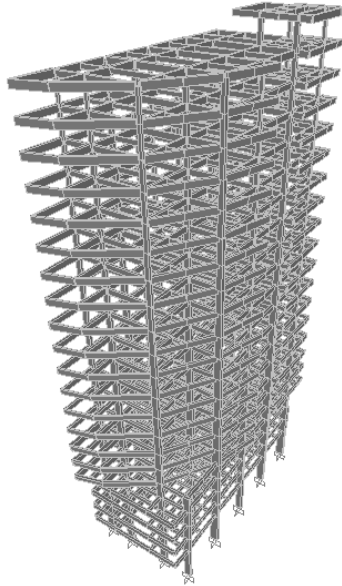


Fig. 1 – Geometría del modelo computacional del edificio en estudio

El estudio de ingeniería de Ecuador que realizó el diseño del edificio, consideró la opción de incorporar en la estructura principal un sistema de disipación pasiva de energía: las barras de pandeo restringido (BPR).

Numerosos estudios experimentales y numéricos han mostrado la eficiencia de los sistemas de disipación pasiva de energía para mejorar la respuesta de construcciones nuevas o existentes ([1], [2] y [3]). También se han reportado gran cantidad de edificaciones que han incorporado estos sistemas [1]. Además, muchos países ya cuentan con prescripciones reglamentarias para la incorporación de dispositivos de disipación de energía [4].

Las BPR, que se muestran en la Fig. 2, son dispositivos de acero que ofrecen resistencia y disipación de energía a través de una plastificación bien distribuida en su volumen (en contraste con las riostras convencionales). Su configuración clásica consiste en un elemento de acero (transmite los esfuerzos axiales), un tubo de acero relleno de hormigón (para impedir el pandeo de la barra central), y una interfase entre la barra central y el hormigón para eliminar las transferencias de corte y la concentración de las deformaciones localizadas, permitiendo además la contracción lateral y la dilatación de la barra central al ser sometida a esfuerzos axiales.

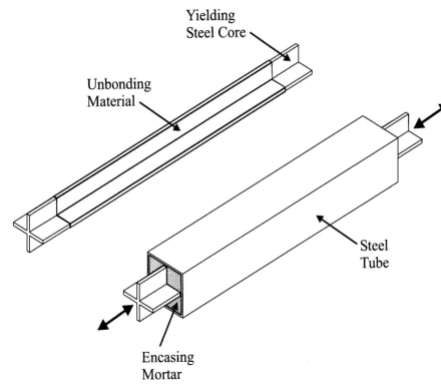


Fig. 2 – Esquema de una BPR

Estos disipadores de energía pueden incorporarse como diagonales en vanos de pórticos tal como se presenta en la Fig. 3.



Fig. 3 – Sistema de BPR en estructura aporcionada

Las barras de pandeo restringido ([5], [6] y [7]), como un sistema de disipación pasiva histerético, también han sido ampliamente estudiadas; y se han implementado en varias construcciones.

Pero en el proyecto original de Ecuador no se logró un diseño de BPR que mejorara significativamente la respuesta de la estructura sin estos dispositivos. Por ello, el objetivo de este trabajo es presentar una metodología de diseño de BPR con la que pueda alcanzarse el objetivo buscado.

La metodología de trabajo consiste en relevar parámetros de respuesta del modelo computacional de la estructura original, para luego (mediante un procedimiento iterativo) aplicar una metodología de diseño de BPR que permita mejorar la respuesta del edificio. El estudio numérico se realiza tomando como base el modelo computacional del edificio, desarrollado por el estudio de Ecuador; y considerando análisis dinámicos de historia en el tiempo, con acelerogramas escalados al espectro de Guayaquil. En el diseño con BPR se consideró la limitación de ubicar disipadores de energía solo en los planos estructurales que habían dispuesto los ingenieros ecuatorianos.

En la sección 2 de este trabajo se presentan las características generales del edificio y del modelo computacional desarrollado por los ingenieros ecuatorianos; en la sección 3 se describen las BPR a considerar, y se desarrolla el procedimiento de diseño propuesto por los autores del trabajo; en la sección 4 se estudian y comparan los resultados numéricos de la estructura con / sin BPR; y en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2 Caracterización del edificio de Guayaquil

### 2.1. Parámetros geométricos generales

El edificio cuya geometría general se mostró en la Fig. 1, tiene una estructura compuesta por pórticos sismorresistentes de H<sup>9</sup>A<sup>9</sup> en las 2 direcciones principales. Posee 21 niveles más un cuerpo emergente, con una altura total de 78,95 m. Cada nivel tiene, en general, un ancho de 16,10 m y un largo de 35,40 m; con una superficie por planta de 570,00 m<sup>2</sup>, y una superficie cubierta total de 12000.00 m<sup>2</sup>. Las plantas típicas se muestran en la Fig. 4; mientras que en las Figura 5 y 6 se presentan vistas 2D en altura (en estas figuras la leyenda “plano” hace referencia a la denominación dada a cada plano estructural en la Fig. 4 – a).

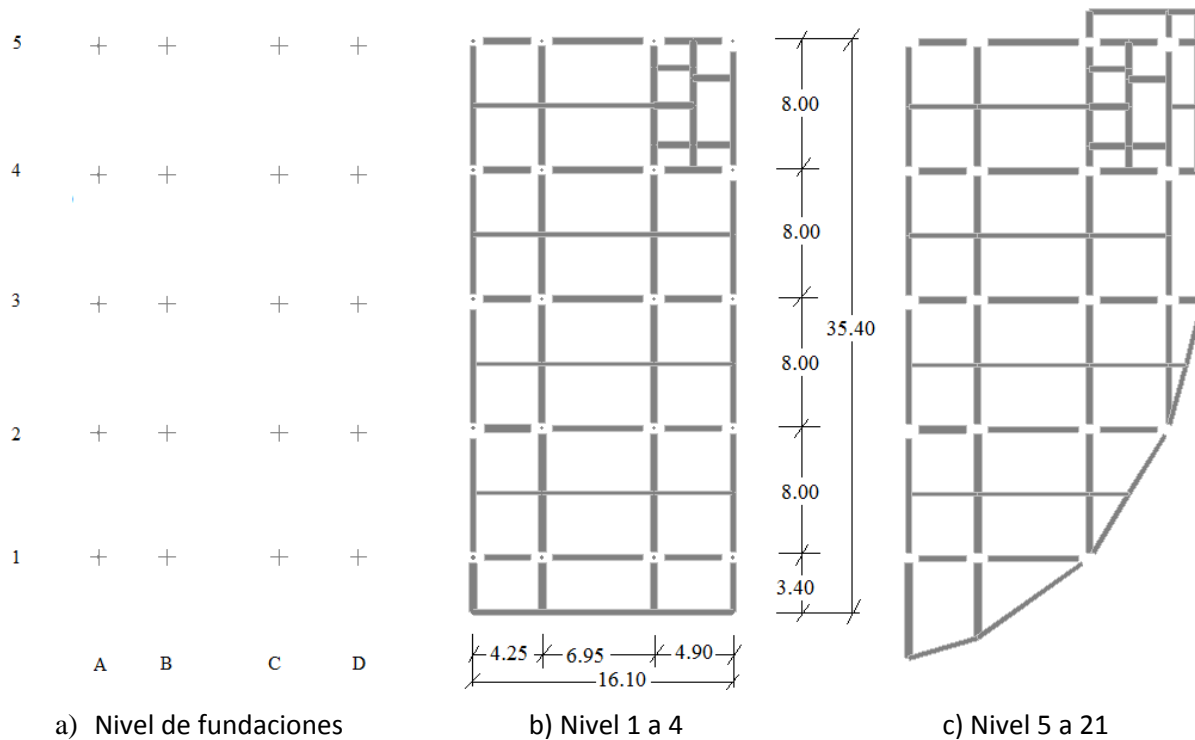


Fig. 4 – Plantas típicas del edificio

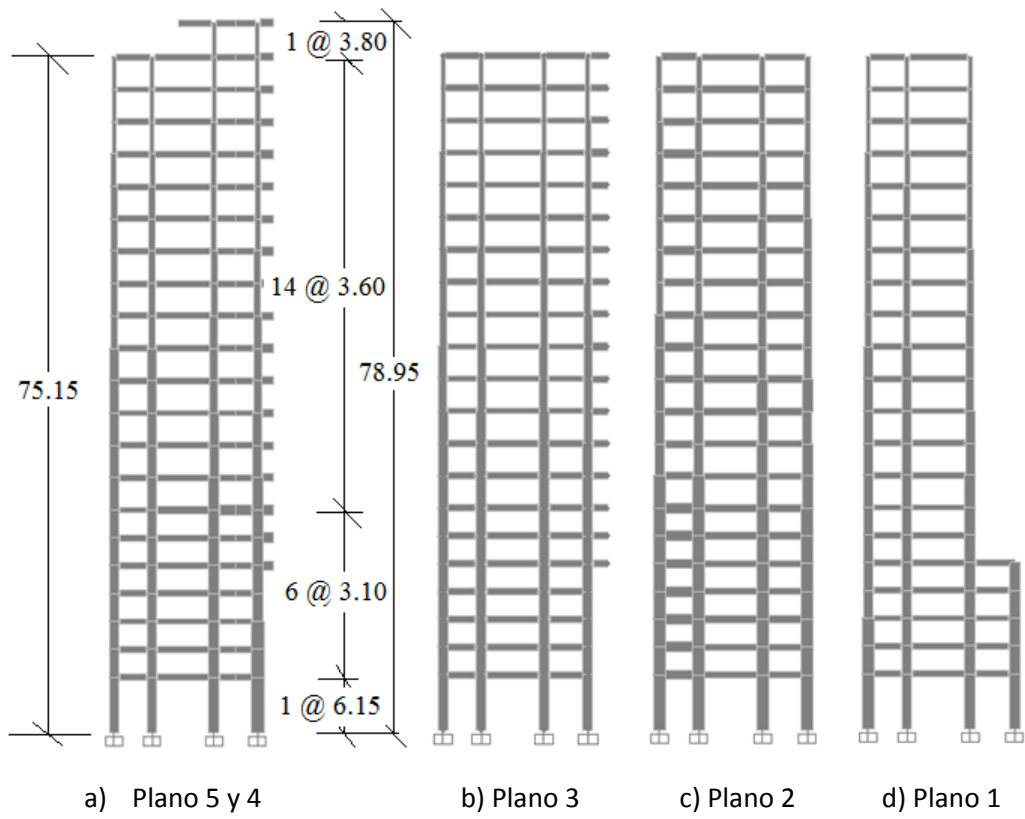


Fig. 5 – Vistas en altura (dirección transversal)

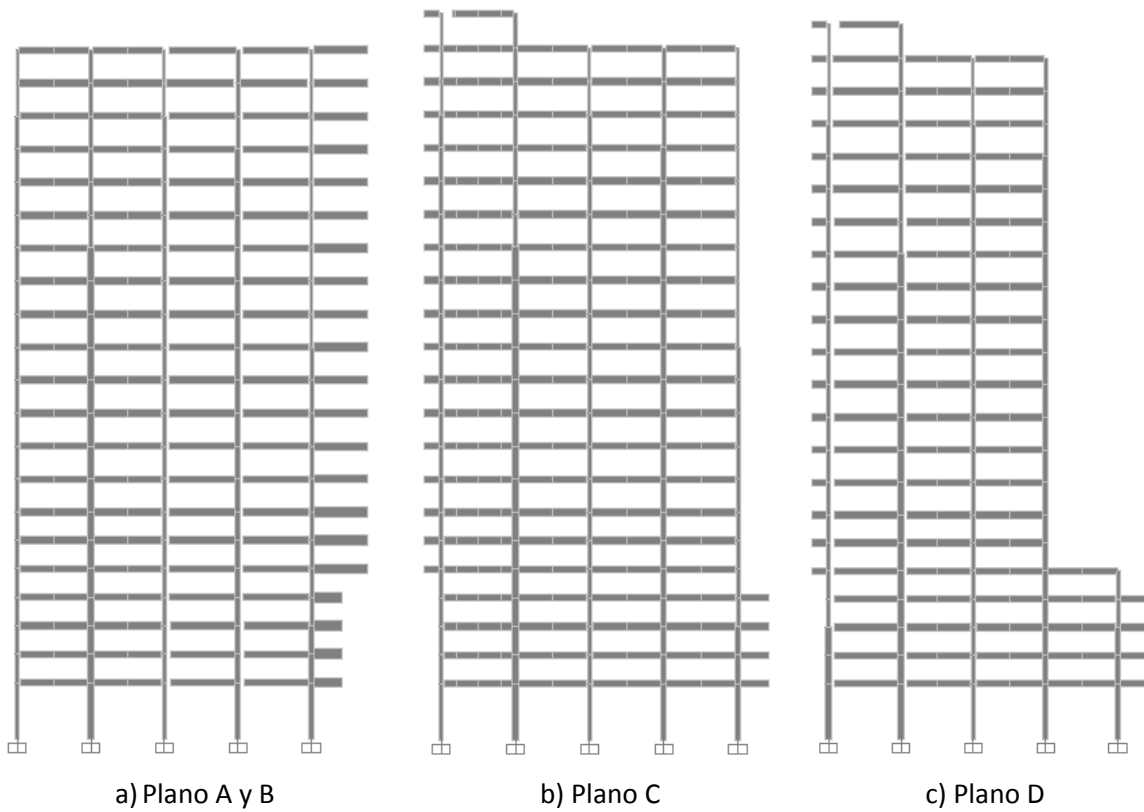


Fig. 6 – Vistas en altura (dirección longitudinal)

Las dimensiones de las columnas de planta baja y del último nivel se presentan en la Tabla 1. Las vigas principales en planta baja tienen un ancho \* alto (en [cm]) de 40 \* 70 y de 40 \* 80; mientras que las del último nivel de 30 \* 70 y de 30 \* 80.

Tabla 1 (a) – Dimensiones de columnas (ancho \* alto) en primer nivel, en [cm]

| Plano | A        | B y C    | D        |
|-------|----------|----------|----------|
| 1     | 65 * 140 | 50 * 110 | 50 * 110 |
| 2     | 65 * 130 | 65 * 130 | 65 * 130 |
| 3     | 50 * 110 | 50 * 110 | 50 * 110 |
| 4     | 65 * 130 | 65 * 130 | 65 * 130 |
| 5     | 50 * 110 | 50 * 110 | 65 * 140 |

Tabla 1 (b) – Dimensiones de columnas (ancho \* alto) en último nivel, en [cm]

| Plano | A a D   |
|-------|---------|
| 1     | 30 * 45 |
| 2     | 50 * 60 |
| 3     | 30 * 45 |
| 4     | 50 * 60 |
| 5     | 30 * 45 |

## 2.2. Modelo computacional del edificio

Como se indicara en la Introducción, para este trabajo se tomó como base el modelo estructural desarrollado por el estudio de ingeniería de Ecuador, cuya geometría general puede observarse en Fig. 1, y en particular en las Figs. 4, 5 y 6. Este modelo fue generado en un programa comercial de elementos finitos [8].

Para el HºAº de la estructura aperticada se consideró un material elástico lineal con un módulo de elasticidad longitudinal de 24821 MPa, que corresponde a un hormigón con resistencia característica  $f'c$  de aprox. 28,00 MPa.

Para modelar vigas y columnas se dispusieron elementos *frames*; considerando para estas últimas empotramiento en sus bases. Las losas no fueron modeladas, pero se consideraron *constraints* para los nodos de un mismos nivel.

Se mantuvieron las cargas muertas y vivas del modelo Ecuador, que arrojan un peso total de la construcción de aprox. 149113,00 kN, que corresponde a una carga unitaria de aprox. 12,40 kN/m<sup>2</sup>.

Los períodos flexionales de los primeros 2 modos en las direcciones principales se muestran en la Tabla 2. No se encontraron períodos torsionales o flexo-torsionales en los primeros 12 modos calculados con el software de elementos finitos.

Tabla 2 – Períodos flexionales del modelo, en [s], para los primeros modos

| Modo | Dirección    |             |
|------|--------------|-------------|
|      | Longitudinal | Transversal |
| 1    | 3,86         | 3,17        |
| 2    | 1,48         | 1,20        |

### 2.3. Excitación en la base

Cinco acelerogramas fueron considerados para el análisis dinámico de historia en el tiempo de la estructura con / sin BPR. Las principales características de estos registros se mencionan en la Tabla 3.

Tabla 3 – Características de los acelerogramas considerados en el estudio numérico.

| Denom. | Sismo         | Fecha      | Magnitud | Distancia a epicentro [km] | Componente | PGA [g] |
|--------|---------------|------------|----------|----------------------------|------------|---------|
| 7036   | Huacho - Perú | 16/10/1966 | 8,1      | 150                        | -          | 0,25    |
| 7038   | Perú          | 31/05/1970 | 7,9      | 400                        | 1          | 0,10    |
| 7039   | Perú          | 31/05/1970 | 7,9      | 400                        | 2          | 0,09    |
| 7050   | Perú          | 1974       | -        | 250                        | 1          | 0,18    |
| 7051   | Perú          | 1974       | -        | 250                        | 2          | 0,16    |

Los acelerogramas mencionados fueron escalados mediante un programa computacional [9] al espectro de diseño de la norma ecuatoriana [10]. El resultado de ese escalamiento se muestra en la Fig. 7. Con el software empleado, los espectros escalados para los períodos fundamentales en las direcciones transversal y longitudinal, caen por debajo del espectro de diseño. Pero considerando el objetivo principal de lograr un diseño con BPR más eficiente que para el caso de la estructura libre, no se realizó un nuevo escalamiento.

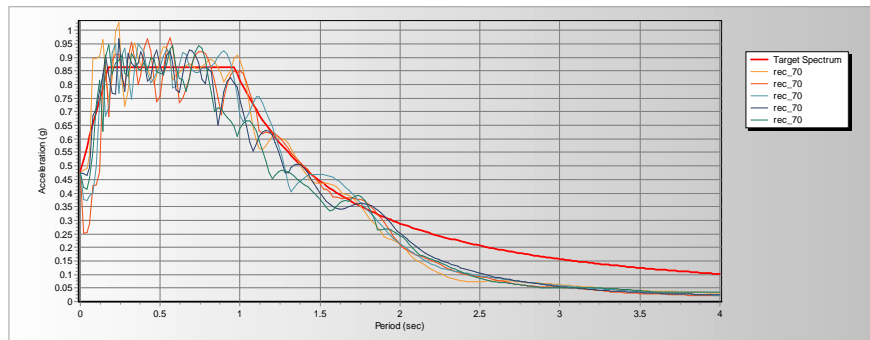


Fig. 7 – Espectro de diseño de la norma ecuatoriana vs. espectros de acelerogramas escalados

### 2.4. Procedimiento de análisis

Para el modelo de la estructura sin BPR se realizó con el programa [8] un análisis lineal de historia en el tiempo, considerando un amortiguamiento modal del 5% para todos los modos.

## 3 Caracterización de las BPR

### 3.1. BPR seleccionadas

Las BPR adoptadas para el edificio Guayaquil están conformadas por una barra central de acero liso de sección circular, AL 220 (disponible en el mercado argentino), teflonadas y envueltas en una lámina de goma. El pandeo de la barra es evitado por un tubo de acero relleno con mortero. Uno de esos especímenes, desarrollado y ensayado por los autores [11], se muestra en la Fig. 8.



Fig. 8 – BPR propuesta por los autores

### 3.2. Disposición de las BPR en el edificio

Como se explicara en la introducción, solo fue posible disponer BPR en los planos estructurales seleccionados inicialmente por los proyectistas de Ecuador. En la Fig. 9 se muestra la disposición de BPR en altura, tanto en la dirección transversal como en la dirección longitudinal. Se indica también en esa Figura el diámetro de la barra central de la BPR para cada nivel, cuyo cálculo se explica en la sección 3.4. Se recuerda que la leyenda “plano” mencionada en Fig. 9 hace referencia a la denominación dada a cada plano estructural según la Fig. 4 – a.

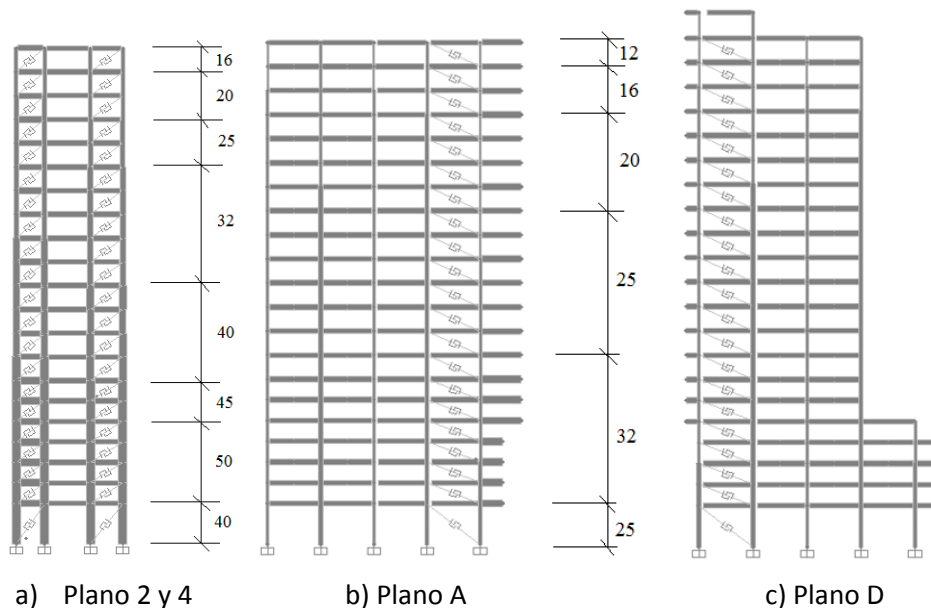


Fig. 9 – Disposición de BPR en altura, y diámetros de las barras centrales consideradas (en [mm]).

### 3.3. Modelo numérico de las BPR

Para representar el comportamiento no lineal de la barra central de las BPR en el programa [8], se emplearon elementos link según el modelo de plasticidad de Wen (expresado en fuerza – desplazamiento). Las propiedades introducidas en el programa para la dirección axial de cada disipador son: rigidez axial, fuerza en el inicio de la plastificación, relación de rigidez de post fluencia, y exponente de fluencia. Los primeros dos parámetros mencionados se determinan según se explica en la sección 3.4. La relación de rigidez de post fluencia se calculó según la tensión de fluencia del material, resistencia a tracción, deformación para el inicio de la fluencia, y deformación de rotura



(según datos provistos por el proveedor del acero). En el caso del acero AL-220 se obtuvo una relación igual a 0,0033. Para el exponente de fluencia, que influye en la curvatura de la ley constitutiva al pasar del comportamiento elástico al plástico, se mantuvo el valor 2 predeterminado en el programa [8].

Dado que el sistema para evitar el pandeo de la barra central (tubo externo relleno de mortero) se encuentra desvinculado del comportamiento de la misma, no se considera este sistema en la simulación computacional.

### 3.4. Procedimiento de diseño de las BPR

El procedimiento de diseño implica determinar los 2 parámetros principales que definen el modelo de plasticidad de Wen:

a) Rigidez axial de cada BPR ( $k_i$ ): Para cada piso  $i$ , y para cada dirección principal, se calcula la rigidez horizontal que aporta el conjunto de BPR ( $K_{BPRs,i}$ ) en ese nivel y dirección, según la Ec. (1).

$$K_{BPRs,i} = C_1 K_{Piso,i} - K_{Piso,i} \tag{1}$$

A partir de la matriz de rigidez de la estructura sin BPR, puede determinarse la rigidez horizontal de piso  $K_{Piso,i}$ . El coeficiente  $C_1$  está en función del aumento de rigidez que proporcionan los disipadores, con un valor único para todo el edificio. A partir de un proceso iterativo basado en la comparación de resultados de la estructura con BPR, puede determinarse el valor óptimo de este parámetro. Para el edificio en estudio se llegó a  $C_1 = 1,3$ .

En función de la cantidad de PBR a colocar en cada nivel y plano estructural, y del ángulo de inclinación de la BPR respecto a la horizontal, se determina la rigidez que debe tener cada BPR en el nivel  $i$ :  $k_i$ .

b) Fuerza en el inicio de la plastificación de cada BPR ( $F_{P,i}$ ): Esta fuerza se calcula según la Ec. (2).

$$F_{P,i} = f_y A_{y,i} \tag{2}$$

Donde:

.  $f_y$ : Tensión de fluencia del acero que conforma la barra central de la BPR.

.  $A_{y,i}$ : Área de la zona de plastificación de la barra central, que se calcula con la Ec. (5), en función de la de la rigidez axial de esa barra, expresada en las Ecs. (3) y (4).

Así, dado que la rigidez axial  $k$  de una barra está en función del módulo de elasticidad  $E$  del material que la conforma, de su área  $A$  y de su longitud  $L$  ( $k = E A / L$ ), y que la BPR tiene una zona de plastificación de longitud  $L_{y,i}$  (con área  $A_{y,i}$ ), y otra zona de extremos de longitud  $L_{extr,i}$  (con mayor sección  $A_{extr,i}$ ), la rigidez elástica de la BPR  $k_i$  está dada por la Ec. (3).

$$k_i = \frac{1}{\frac{L_{y,i}}{E A_{y,i}} + \frac{(2L_{extr,i})}{E A_{extr,i}}} \tag{3}$$

Suponiendo que  $A_{extr,i} = 1,5 A_{y,i}$ , y dado que  $(2 L_{extr,i}) = (L_i - L_{y,i})$  (con  $L_i$  como longitud total de la BPR, determinada por relación pitagórica en función de la altura del vano donde se instalará, y de la luz del mismo), la expresión anterior se puede escribir según la Ec. (4).

$$k_i = \frac{1}{\frac{L_{y,i}}{E A_{y,i}} + \frac{(L_i - L_{y,i})}{E 1.5 A_{y,i}}} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta el espacio ocupado por las conexiones de las BPR a la estructura principal, puede tomarse como  $L_i$ , un 80% del valor que surge en función de la altura y luz del vano donde se ubica la BPR. Puede ahora determinarse el área buscada, mediante la Ec. (5).

$$A_{y,i} = \frac{k_i (L_i + 0.5 L_{y,i})}{1.5 E} \quad (5)$$

Aparece entonces un segundo parámetro independiente, además de la rigidez axial de la BPR  $k_i$ , que es la longitud de plastificación  $L_{y,i}$ . Para el edificio en estudio, no se tomó como variable este parámetro, sino que se fijó en función del desplazamiento máximo que puede experimentar la barra, según se presenta en las Ecs. (6).

$$L_{y,i} = E \Delta_{y,i} / f_y \leq L_i \quad (6)$$

Donde:

.  $\Delta_{y,i} = C_2 \Delta_i$ : Desplazamiento de inicio de plastificación, que se adopta como el porcentaje  $C_2$  del desplazamiento máximo que puede sufrir la BPR en el nivel  $i$ ,  $\Delta_i$ . (para el edificio Guayaquil  $C_2 = 0,80$ ).

.  $\Delta_i = L_{máx,i} - L_i$ .

.  $L_{máx,i}$ : Longitud de la BPR para el máximo desplazamiento lateral  $\delta_i$ . Se calcula por relación pitagórica en base a la altura del vano donde se instala la BPR, y (luz de vano +  $\delta_i$ ).

.  $\delta_i$ : Desplazamiento máximo del nivel  $i$ , estimado en el edificio sin BPR y sometido a la fuerza lateral equivalente según el método estático equivalente.

Como antes se indicara, el resultado de este procedimiento de diseño es la definición del diámetro de las barras centrales de las BPR, que tienen una rigidez  $k_i$  y una fuerza de inicio de plastificación  $F_{p,i}$ . En el edificio de Guayaquil, los diámetros obtenidos para cada BPR se muestran en la Fig. 9. El diseño posterior de la capa deslizante y del tubo externo relleno, puede realizarse según el procedimiento que los autores explican en [11].

### 3.5. Análisis del edificio con las BPR

El modelo del edificio descrito en la sección 2, con las BPR consideradas en esta sección, fue sometido a los mismos acelerogramas escalados que se detallaron en la sección 2.3. Para la obtención de los valores de respuesta se realizó con el programa [8] un análisis no lineal de historia en el tiempo, donde la no linealidad solo estaba considerada en los elementos link relativos a las BPR.

### 4 Estudio de resultados

A modo de ejemplo, se muestra en la Fig. 10 la relación fuerza - desplazamiento que se obtienen en algunas BPR, para el edificio sometido al acelerograma 7036. Para las otras BPR, y con la excitación de los otros acelerogramas, se obtienen curvas similares.

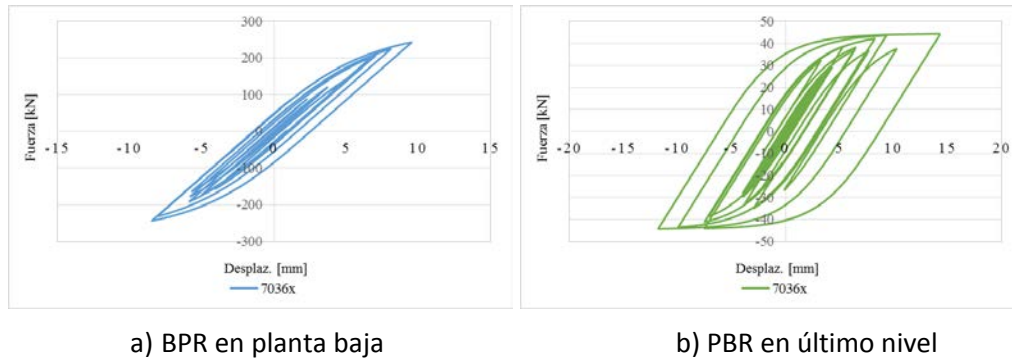


Fig. 10 – Relación fuerza – desplazamiento para BPR en edificio bajo la excitación del acelerograma 7036.

La cantidad de energía disipada en las BPR en función de la energía input, para las dos direcciones principales del edificio se indica en la Tabla 4. Se observa que en la dirección transversal, donde se tienen dos BPR en cada nivel y plano estructural, la energía disipada duplica la energía disipada en la dirección longitudinal, donde se tiene una BPR en cada nivel y plano estructural.

Tabla 4 – Relación energía disipada en las BPRs / energía input, en [%]

| Dirección | Acelerograma |      |      |      |      |
|-----------|--------------|------|------|------|------|
|           | 7036         | 7038 | 7039 | 7050 | 7051 |
| Transv.   | 29,6         | 27,9 | 30,4 | 25,6 | 26,7 |
| Long.     | 12,6         | 12,0 | 11,9 | 9,3  | 11,2 |

La comparación entre los valores máximos promedio de aceleraciones y desplazamientos para la estructura con/sin BPR, excitada según los cinco acelerogramas detallados en Tabla 3, se presenta en las Figs. 11 y 12.

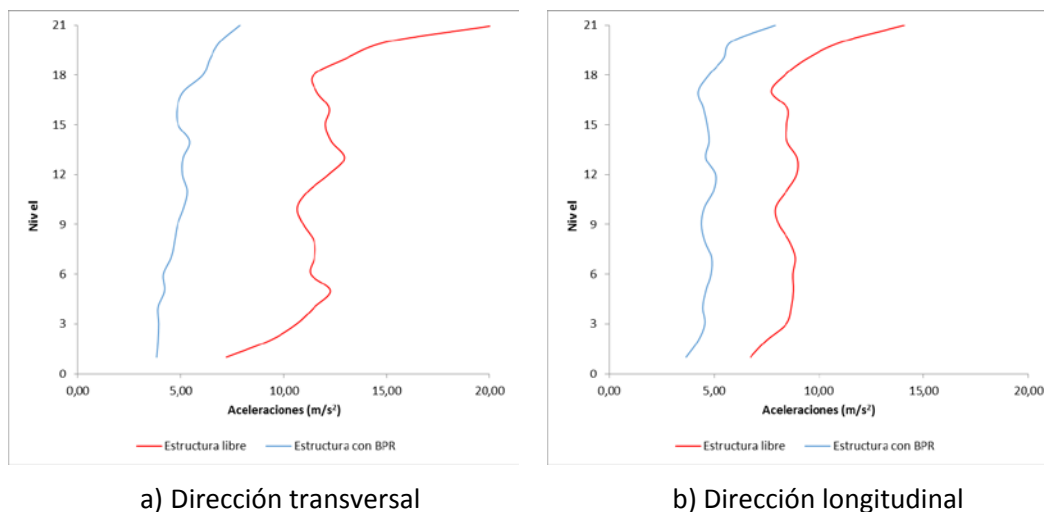


Fig. 11 – Aceleraciones máximas promedio, estructura con/sin BPR, bajo la excitación de 5 acelerogramas.

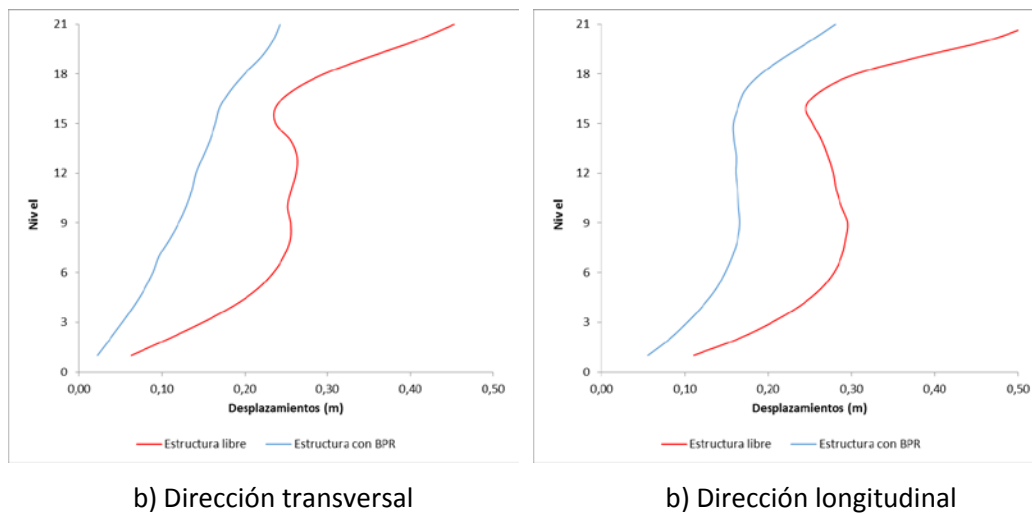


Fig. 12 – Desplazamientos máximos promedio, estructura con/sin BPR, bajo la excitación de 5 acelerogramas.

Para ambos parámetros de respuesta considerados, la reducción que se logra cuando se incorporan BPR en la estructura, es significativa. A pesar que en la dirección transversal la cantidad de energía disipada en las BPR duplica la energía disipada en la dirección longitudinal, no se observa una reducción de ese orden en los parámetros de respuesta evaluados.

## 5 Conclusiones

Se ha considerado en este estudio un edificio aporticado de H<sup>2</sup>A<sup>2</sup> de 21 niveles, sismorresistente, construido en Guayaquil, Ecuador. Mediante un procedimiento racional de diseño, iterativo, se logró alcanzar el objetivo de reducir en forma significativa los parámetros de diseño para la estructura con un sistema de disipación pasiva de energía.

## 6 Referencias

- [1] Christopoulos C and Filiatrault A (2006): *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. IUSS Press.
- [2] Soong T, Dargush G (1997): *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. John Wiley.
- [3] Housner GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF (1997): Structural control: Past, present, and future. *J Eng Mech ASCE*; 123:897\_971.
- [4] ASCE/SEI 7 (2010): *Minimum design loads for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- [5] Black C, Makris N, Aiken L (2002): Component testing, stability analysis characterization of buckling-restrained unbonded braces. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, report PEER 2002/08.
- [6] López WA, Gwie DS, Lauck TW, Saunders M. (2004): Structural design and experimental verification of a buckling-restrained braced frame system. *Eng J*; 41.
- [7] Tremblay R, Bolduc P, Neville R, De Vall R. (2006): Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. *Canad J Civil Eng*; 33:183\_98.
- [8] SAP2000, v.14.2.4 (2010): Structural analysis program. *Computers and Structures, Inc*.
- [9] Seismomatch (2013): It is an application capable of adjusting earthquake accelerograms to match a specific target response spectrum. *Seismosoft Ltd*.
- [10] NEC-11 (2011): *Norma ecuatoriana de la construcción*. Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana de la construcción.
- [11] Palazzo G, López Almansa F, Cahís J, y Crisafulli F (2009): A low-tech dissipative buckling restrained brace. Design, analysis, production and testing. *Engineering Structures*, Vol. 31, Nº 9, 2152-2161.