

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“ANÁLISIS DE LAS RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO  
PARA EL CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA  
DE ESTRUCTURAS”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL.

ELABORADO POR

VIVIAN DAYANA QUISPE CERNA

ID: 0009-0000-3478-0656

ASESOR

Dr. HUGO VÍCTOR LUIS SCALETTI FARINA

ID: 0000-0001-6479-1508

LIMA- PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”**

Quispe Cerna, Vivian Dayana

vivian.quispe.c@uni.pe

936 334 451

## **DEDICATORIA**

*A mi padre, Germán Quispe,*

*a mi madre, Loira Cerna,*

*a mis hermanas, Viviana y Gemma.*

*Para ellos todo mi esfuerzo y dedicación.*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería por permitirme convertirme en la profesional de la carrera que tanto me apasiona.

Agradezco a cada uno de los maestros que fueron parte de mi formación académica en el colegio, la academia y la universidad.

Agradezco a mi asesor el Dr. Hugo Scaletti por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su experiencia y conocimientos, y por su paciencia al haberme guiado en la elaboración de la presente tesis.

Agradezco el infinito apoyo de mis padres, Germán Quispe y Loira Cerna, por haberme guiado en este largo y maravilloso camino que seguiré recorriendo.

Para finalizar, agradezco a cada uno de mis compañeros de clase por permitirme aprender de ellos.

## ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Prólogo</b> .....	<b>6</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>7</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>8</b>
<b>Lista de símbolos y siglas</b> .....	<b>11</b>
<b>Capítulo I: Introducción</b> .....	<b>16</b>
1.1. Generalidades .....	16
1.2. Descripción del problema de investigación.....	17
1.3. Objetivos generales y específicos .....	17
1.3.1. Objetivo general .....	17
1.3.2. Objetivos específicos .....	18
1.4. Hipótesis.....	18
1.5. Antecedentes investigativos.....	18
<b>Capítulo II: Marco teórico y conceptual</b> .....	<b>23</b>
2.1. Filosofía de diseño .....	23
2.2. Sistemas de protección sísmica pasivos .....	23
2.3. Balance de energía .....	25
2.4. Riostras de pandeo restringido .....	26
2.4.1. Componentes de las riostras de pandeo restringido.....	27
2.4.2. Comportamiento estructural de las riostras de pandeo restringido .....	29

2.4.3. Ventajas y desventajas del uso de riostras de pandeo restringido .....	31
2.4.4. Riostras de pandeo restringido usadas en el análisis .....	32
<b>Capítulo III: Caracterización de las riostras de pandeo restringido .....</b>	<b>36</b>
3.1. Configuraciones de riostras de pandeo restringido utilizadas.....	36
3.2. Evaluaciones experimentales .....	38
3.2.1. Protocolos de carga .....	38
3.2.2. Ensayos experimentales .....	41
3.2.3. Resultados experimentales.....	43
<b>Capítulo IV: Procedimientos de análisis estructural.....</b>	<b>44</b>
4.1. Disposiciones de códigos de diseño.....	44
4.1.1. Norma peruana E.030.....	44
4.1.2. ASCE/SEI 7-22.....	45
4.1.3. ATC-40.....	47
4.2. Procedimientos de análisis.....	47
4.2.1. Análisis estático con fuerzas laterales cíclicas.....	47
4.2.2. Análisis no-lineal rápido (FNA) .....	49
4.2.3. Análisis no-lineal estático (pushover) .....	54
4.3. Características de estructuras analizadas.....	63
4.4. Principales modos de vibración de las estructuras analizadas.....	65
4.5. Modificación del período fundamental y factores de participación.....	67
4.6. Registros sísmicos considerados para el análisis tiempo-historia .....	68
4.6.1. Registros sísmicos .....	68
4.6.2. Registros sísmicos ajustados al espectro de la Norma E.030.....	70
4.7. Comentarios finales.....	72

<b>Capítulo V: Estudio de la eficiencia de las riostras de pandeo restringido .....</b>	<b>74</b>
5.1. Análisis con cargas estáticas cíclicas en una estructura de un piso.....	74
5.2. Análisis tiempo-historia con cargas dinámicas en una estructura rígida .....	78
5.3. Análisis tiempo-historia con cargas dinámicas en estructuras flexibles .....	80
5.3.1. Estructura de 5 pisos.....	80
5.3.2. Estructura de 10 pisos.....	85
5.3.3. Estructura de 15 pisos.....	88
5.4. Análisis Pushover .....	93
5.5. Predimensionamiento de riostras de pandeo restringido .....	96
5.6. Comentarios finales.....	98
<b>Conclusiones .....</b>	<b>99</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>101</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>102</b>

## RESUMEN

El objetivo de esta tesis es estudiar la eficiencia de las riostras de pandeo restringido (BRB) para mejorar la respuesta sísmica en edificaciones. En el primer y segundo capítulo se presenta información acerca del comportamiento estructural de las riostras, sus componentes, así como las ventajas y desventajas de su uso.

En el tercer capítulo se presenta información acerca de diferentes configuraciones de las BRB, así como los ensayos experimentales que deben llevarse a cabo para diseñar una estructura con BRB bajo protocolos de carga establecidos.

En el cuarto capítulo se presentan las características físicas y geométricas de sistemas aporticados estudiados, de baja y de mediana altura, con BRB. Además, se explican los códigos de diseño relacionados a su modelamiento y los procedimientos de análisis estructural empleados.

En el quinto capítulo se estudia la respuesta sísmica de las estructuras propuestas con BRB de distintas características. Estas fueron analizadas con el software ETABS mediante el análisis tiempo-historia, con registros sísmicos reales y modificados, y el análisis no lineal estático (pushover).

Finalmente, se obtienen resultados de las fuerzas cortantes en columnas, los desplazamientos por piso y el comportamiento histerético de las riostras. En conclusión, su implementación demuestra un mejor comportamiento en estructuras flexibles y una reducción significativa en las acciones aplicadas sobre la estructura. Además, su similar resistencia a la tracción y a la compresión permite soportar sucesivos ciclos de carga y descarga, manteniendo los otros elementos estructurales en el rango lineal.

Palabras clave: Riostras de pandeo restringido, protocolos de carga, análisis estructural, comportamiento histerético.

## ABSTRACT

The purpose of this research is to study the efficiency of buckling restrained braces (BRB) to improve the seismic response of buildings. In the first and the second chapter, information is made available about the structural behavior of the braces, their components, as well as advantages and disadvantages of their use.

In the third chapter, information about possible configurations of the BRB is presented, as well as the experimental tests that must be carried out to design a structure with BRB under established loading protocols.

The fourth chapter presents the physical and geometric characteristics of low and medium height framed systems studied with BRB. Additionally, the design codes related to their modeling and the applied methods of structural analysis are explained.

In the fifth chapter, the seismic response of the structures with different buckling restrained braces is studied. They were analyzed with the software ETABS using time-history analysis, with real and modified matched seismic records, and nonlinear static (pushover) analysis. Finally, results of the shear forces in columns, the story drifts and the hysteretic behavior of the braces are obtained. In conclusion, their implementation shows a better behavior in flexible structures, and a reduction in the actions applied to the structure. Their similar tensile and compression resistance allows them to withstand several loading and unloading cycles while maintaining the other structural elements in the linear range.

Key words: Buckling restrained braces, loading protocols, structural analysis, hysteretic behavior.

## PRÓLOGO

El Perú es un país altamente sísmico, por su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde se libera la mayor cantidad de energía acumulada en el interior de la Tierra. A pesar de ello, existe una cantidad significativa de edificaciones que no cumplen los requerimientos actuales de diseño sísmico, por lo que se requieren elementos de reforzamiento estructural.

La presente tesis hace referencia al análisis de riostras de pandeo restringido (BRB) colocadas en una estructura. Estos elementos se definen como dispositivos histeréticos de control pasivo que permiten mejorar el desempeño sísmico de una estructura al disipar las fuerzas externas aplicadas.

El uso de las BRB aún no ha sido muy difundido en el Perú, por lo que la presente tesis tiene como objetivos recopilar información disponible sobre el tema, revisar resultados experimentales de su aplicación, y determinar la eficiencia de su uso en sistemas aporticados con distintas características.

Esta información servirá a los ingenieros para poder incluir esta alternativa como posible solución de protección sísmica.

ASESOR

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Clasificación de los sistemas de protección sísmica pasiva.....	24
<b>Tabla 2</b>	Clasificación de los sistemas de protección sísmica pasiva.....	34
<b>Tabla 3</b>	Fuerza axial vs deformación de las BRB usadas.....	34
<b>Tabla 4</b>	Características de los registros sísmicos considerados.....	70
<b>Tabla 5</b>	Resultados del punto de desempeño para la estructura de 5 pisos con riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7.....	95
<b>Tabla 6</b>	Resultados del punto de desempeño para la estructura de 10 pisos con riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7.....	95
<b>Tabla 7</b>	Resultados del punto de desempeño para la estructura de 15 pisos con riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7.....	96

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Balance de energía durante un evento sísmico.....	26
<b>Figura 2</b>	Aplicación de BRB en edificación de Japón, Sankyo New Tokyo Headquarter.....	27
<b>Figura 3</b>	Riostra de pandeo restringido usado en una estructura de acero.....	27
<b>Figura 4</b>	Principales componentes de una BRB.....	28
<b>Figura 5</b>	Secciones transversales típicas de una BRB.....	28
<b>Figura 6</b>	Comparación entre riostras de pandeo restringido y riostras convencionales.....	30
<b>Figura 7</b>	Principales componentes de la riostra de pandeo restringido.....	31
<b>Figura 8</b>	Curvas de histéresis.....	33
<b>Figura 9</b>	Curva bilineal de fuerza-deformación.....	34
<b>Figura 10</b>	Curvas bilineales de fuerza- deformación de las BRB usadas.....	35
<b>Figura 11</b>	Tipos de configuración de arriostamiento en pórticos.....	36
<b>Figura 12</b>	Deformación del pórtico (con uniones no resistentes a momentos) con BRB en configuración de V-invertida.....	37
<b>Figura 13</b>	Configuración de arriostamiento en K.....	38
<b>Figura 14</b>	Espectro de diseño en base a la norma peruana E.030.....	45
<b>Figura 15</b>	Procedimiento de un análisis incremental e iterativo.....	48
<b>Figura 16</b>	Conversión de la curva de capacidad en un espectro de capacidad.....	55
<b>Figura 17</b>	Conversión del espectro de demanda sísmica $S_a$ Vs $T$ a $S_a$ Vs $S_d$ .....	56
<b>Figura 18</b>	Energía disipada por amortiguamiento.....	57
<b>Figura 19</b>	Punto de desempeño de acuerdo con el procedimiento del ATC-40.....	59
<b>Figura 20</b>	Representación bilineal del espectro de capacidad.....	60

<b>Figura 21</b>	Espectro de respuesta de aceleración-desplazamiento modificado para uso con período secante $T_{sec}$ .....	62
<b>Figura 22</b>	Lugar geométrico de posibles puntos de desempeño del espectro de respuesta de aceleración-desplazamiento modificado.....	62
<b>Figura 23</b>	Estructuras de 1, 5, 10 y 15 pisos modeladas en ETABS.....	64
<b>Figura 24</b>	1 <sup>er</sup> y 2 <sup>do</sup> modo de vibración de las estructuras de 5, 10 y 15 pisos.....	66
<b>Figura 25</b>	Factor de participación del 1 <sup>er</sup> modo de vibración en estructuras de 5, 10 y 15 pisos.....	68
<b>Figura 26</b>	Periodo fundamental de las estructuras de 5, 10 y 15 pisos.....	67
<b>Figura 27</b>	Acelerograma del sismo ocurrido en Lima en 1966.....	69
<b>Figura 28</b>	Acelerograma del sismo ocurrido en Maule en 2010.....	69
<b>Figura 29</b>	Aceleración espectral del sismo ocurrido en la ciudad de Lima.....	71
<b>Figura 30</b>	Aceleración espectral del sismo ocurrido en la región de Maule.....	71
<b>Figura 31</b>	Registro sísmico de Lima de 1966 ajustado al espectro de la norma E.030.....	72
<b>Figura 32</b>	Registro sísmico de Maule de 2010 ajustado al espectro de la norma E.030.....	72
<b>Figura 33</b>	Ciclos de carga y descarga aplicados al pórtico de un piso.....	74
<b>Figura 34</b>	Fuerza horizontal en BRB 1 y fuerza cortante en columnas ante una fuerza horizontal aplicada de factor uno.....	75
<b>Figura 35</b>	Fuerza axial vs la deformación axial de BRB 1.....	76
<b>Figura 36</b>	Fuerza horizontal en BRB 4.5 y fuerza cortante en columnas ante una fuerza horizontal de factor uno.....	77
<b>Figura 37</b>	Fuerza axial vs la deformación axial de la BRB 4.5.....	77
<b>Figura 38</b>	Fuerza axial vs deformación axial de la BRB 1 y BRB 2 en la estructura de 1 piso.....	78

<b>Figura 39</b>	Desplazamiento de la estructura de 5 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados a un espectro de la norma E.030.....	81
<b>Figura 40</b>	Fuerza cortante en columnas de la estructura de 5 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados al espectro de la norma E.030.....	83
<b>Figura 41</b>	Fuerza axial de la BRB 3 en la estructura de 5 pisos frente a los registros sísmicos aplicados de Lima y de Maule.....	84
<b>Figura 42</b>	Desplazamiento de la estructura de 10 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados a un espectro de la norma E.030.....	86
<b>Figura 43</b>	Fuerza cortante en columnas de la estructura de 10 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados al espectro de la norma E.030.....	87
<b>Figura 44</b>	Desplazamiento de la estructura de 15 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados a un espectro de la norma E.030.....	89
<b>Figura 45</b>	Fuerza cortante en columnas de la estructura de 15 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados al espectro de la norma E.030.....	91
<b>Figura 46</b>	Fuerza cortante de columnas pertenecientes a la estructura de 15 pisos sin riostras ante el registro sísmico de Maule.....	92
<b>Figura 47</b>	Gráfica de aceleración espectral vs desplazamiento espectral en estructura de 5 pisos de acuerdo con FEMA 440.....	93
<b>Figura 48</b>	Curva de capacidad de la estructura de 5 pisos.....	94
<b>Figura 49</b>	Diagrama de flujo sobre el predimensionamiento de BRB.....	97

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### Símbolos:

- $a_{eff}$  : Aceleración efectiva
- $a_{i,1}$  : Amplitud en el  $i$ -ésimo piso de la estructura del 1<sup>er</sup> modo de vibración
- $a_{max}$  : Aceleración máxima
- $a_{pi}$  : Ordenada de aceleración espectral en el  $i$ -ésimo punto
- $a_{u,1}$  : Amplitud del modo 1 en el último piso
- $a_{i,1}$  : Amplitud del modo 1 en el piso  $i$
- $a_y$  : Ordenada de aceleración espectral en el punto de fluencia
- $\alpha$  : Rigidez post elástica
- $\alpha_1$  : Masa efectiva del 1<sup>er</sup> modo de vibración expresada como fracción de la masa total
- $A_s$  : Área de la sección transversal de una riostra de pandeo restringido
- $\beta_e$  : Amortiguamiento intrínseco de la estructura
- $\beta_{eff}$  : Amortiguamiento efectivo
- $\beta_{eq}$  : Amortiguamiento equivalente en el rango inelástico
- $\beta_h$  : Amortiguamiento histerético
- $B$  : Factor de reducción de la curva espectral
- $C$  : Matriz de amortiguamiento viscoso equivalente
- $\Gamma$  : Vector de participación modal
- $d_{pi}$  : Desplazamiento espectral en el  $i$ -ésimo punto
- $d_y$  : Desplazamiento espectral en el punto de fluencia

- $\Delta b$  : Deformación axial aplicada.
- $\Delta b_m$  : Deriva de entrepiso, no menos del 1% de la altura del piso.
- $\Delta b_y$  : Deformación de primera fluencia.
- $\Delta \mathbf{f}_n$  : Incremento de fuerzas de la etapa  $n$  a la etapa  $n + 1$
- $\Delta \mathbf{u}_n$  : Incremento de desplazamientos de la etapa  $n$  a la etapa  $n + 1$
- $\Delta_u$  : Desplazamiento en el nivel superior de la estructura
- $E_D$  : Energía disipada por amortiguamiento
- $E_{So}$  : Máxima energía de deformación
- $f$  : Componente horizontal de la fuerza axial de una BRB
- $f'$  : Resistencia preliminar de una riostra de pandeo restringido
- $f_n$  : Fuerza en la etapa  $n$
- $f_{n+1}$  : Fuerza en la etapa  $n + 1$
- $f_y$  : Esfuerzo de fluencia del acero en las riostras de pandeo restringido
- $\zeta_i$  : Fracción del amortiguamiento crítico
- $\Phi$  : Matriz rectangular, cada una de cuyas columnas corresponde a un modo de vibración
- $g$  : Aceleración de la gravedad
- $I$  : Matriz identidad
- $\mathbf{1}$  : Matriz columna constante, con coeficientes 1 para los grados de libertad traslacionales en la dirección de análisis y 0 para los restantes grados de libertad
- $K$  : Matriz de rigidez
- $K_f$  : Rigidez post-pandeo de la riostra de pandeo restringido
- $\mathbf{K}_{lineal}$  : Matriz de rigidez lineal

- $\mathbf{K}_{no-linear}$  : Corrección de la matriz de rigidez por la no linealidad
- $K_o$  : Rigidez inicial de la riostra de pandeo restringido
- $\mathbf{K}_T$  : Matriz de rigidez tangente
- $\Lambda$  : Matriz diagonal cuyos coeficientes significativos son de la forma  $2\zeta_i\omega_i$
- $u_n$  : Desplazamiento en la etapa  $n$
- $u_{n+1}$  : Desplazamiento en la etapa  $n + 1$
- $\mu$  : Ductilidad
- $M$  : Factor de modificación de la curva espectral
- $\mathbf{M}$  : Matriz de masas
- $PF_1$  : Factor de participación modal del 1<sup>er</sup> modo de vibración
- $\mathbf{r}$  : Matriz de fuerzas desequilibradas
- $S_a$  : Pseudoaceleración espectral
- $S_d$  : Desplazamiento espectral
- $(S_a)_\beta$  : Espectro de pseudoaceleración con amortiguamiento efectivo
- $T$  : Periodo fundamental de vibración
- $T_{eff}$  : Periodo efectivo
- $T_{sec}$  : Periodo secante
- $\ddot{u}_s(t)$  : Aceleración del terreno en la dirección de análisis
- $\mathbf{u}(t)$  : Vector de desplazamiento en función del tiempo
- $\dot{\mathbf{u}}(t)$  : Vector de velocidad en función del tiempo
- $\ddot{\mathbf{u}}(t)$  : Vector de aceleración en función del tiempo
- $V$  : Fuerza cortante basal de la estructura
- $w_i / g$  : Masa del  $i$ -ésimo piso de la estructura

- $\omega_i$  : Frecuencia angular del  $i$ -ésimo modo de vibración
- $\mathbf{\Omega}^2$  : Matriz diagonal cuyos términos son  $\omega_i^2$
- $W$  : Peso total, incluye la carga muerta y una fracción de la carga viva
- $\mathbf{y}(t)$  : Vector que contiene las componentes de  $\mathbf{u}(t)$

**Siglas:**

ADRS	: Acceleration – displacement response spectra (Espectro de respuesta en el formato aceleración - desplazamiento)
AISC	: American Institute of Steel Construction (Instituto Americano de Construcción en Acero)
BRB	: Buckling restrained braces (Riostras de pandeo restringido)
BCJ	: Building Center of Japan (Centro de Construcción de Japón)
FEMA	: Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal de Gestión de Emergencias)
CSA	: Canadian Standards Association (Asociación Canadiense de Normas)
NBCC	: National Building Code of Canada (Código Nacional de Construcción de Canadá)
ASCE	: American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales)
SEAOC	: Structural Engineers Association of California (Asociación de Ingenieros Estructurales de California)
JIS	: Japanese Industrial Standard (Estándar Industrial Japonés)
E.030	: Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”
ATC	: Applied Technology Council (Consejo de Tecnología Aplicada)
FNA	: Fast Non-Linear Analysis (Análisis No-Lineal Rápido)
CISMID	: Centro Peruano - Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
RENADIC	: Red Nacional de Acelerógrafos

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades

En el Perú, los eventos sísmicos son frecuentes y como consecuencia han generado no solo daños materiales y económicos, sino pérdidas humanas. Las estructuras más afectadas durante un evento sísmico son las edificaciones, por lo que requieren de un buen diseño y construcción que garantice su estabilidad y brinde seguridad a quienes acogen en su interior o se encuentren en sus inmediaciones. Actualmente, en el Perú se está considerando la inclusión de dispositivos de protección sísmica que contribuyan a mitigar el impacto que generaría un evento sísmico de gran magnitud.

Algunos elementos de protección sísmica, como aisladores sísmicos o disipadores viscosos, pueden ser costosos y requieren de un tiempo considerable para su fabricación e instalación en la construcción, por lo que se busca dar a conocer y brindar más información acerca de otros dispositivos de control sísmico que sean, por el contrario, menos costosos, de fácil y rápida instalación en las estructuras, y con una mayor capacidad de disipación de energía, evitando que otros elementos estructurales sufran daños considerables.

Las riostras de pandeo restringido, conocidas como “Buckling Restrained Braces” (en adelante llamadas BRB) son un tipo de dispositivo disipador de energía sísmica muy usado en países como Japón y EE. UU. Estos dispositivos histeréticos de control pasivo mejoran el desempeño sísmico de una estructura, aportando mayor capacidad de disipación de energía proveniente de fuerzas externas dinámicas. Las riostras de pandeo restringido pueden ser consideradas para un diseño estructural inicial o como parte del reforzamiento de una estructura ya existente.

Esta tesis tiene como objetivo principal el estudio de la eficiencia de las riostras de pandeo restringido en pórticos estructurales de diferentes características dinámicas,

mediante la aplicación de un modelamiento numérico, obteniendo así la respuesta estructural frente a un evento sísmico. Esta información permitirá a los ingenieros incluir esta alternativa como posible solución de protección sísmica.

## **1.2. Descripción del problema de investigación**

En los últimos 500 años, la zona costera ha sido sacudida con altos niveles de intensidad con la ocurrencia de más de 35 sismos con magnitudes iguales o mayores a M 7.5, que generaron diversidad de escenarios de destrucción y muerte en cada una de las 10 regiones distribuidas a lo largo de la costa. Ahora con la moderna Red Sísmica Nacional, el IGP reporta cada año la ocurrencia de cerca de 1000 sismos cuyos sacudimientos de suelo fueron percibidos en superficie por la población (Tavera, 2021).

En adición a ello, en el Perú existe una cantidad significativa de edificaciones que no cumplen los requerimientos actuales de diseño sísmico, por lo que requerirán de elementos de reforzamiento estructural.

Los dispositivos de control pasivo de tipo riostras de pandeo restringido pueden mejorar la respuesta de una estructura ante las acciones sísmicas. En consecuencia, resulta importante realizar un análisis de este tipo de dispositivos en estructuras de diferentes alturas y tipos de configuración que permita a los ingenieros su inclusión como posible solución de protección sísmica.

## **1.3. Objetivos generales y específicos**

### ***1.3.1. Objetivo general***

Estudiar la eficiencia de las riostras de pandeo restringido para mejorar la respuesta sísmica de las edificaciones.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Revisar la información disponible, los resultados experimentales y los modelos numéricos de las riostras de pandeo restringido.
- Reducir el daño de los elementos estructurales pertenecientes a un sistema aporticado con riostras de pandeo restringido.
- Determinar la eficiencia de las riostras de pandeo restringido en estructuras aporticadas con distintas características.

### **1.4. Hipótesis**

Es posible proponer un procedimiento de análisis que permita conocer la eficiencia de las riostras de pandeo restringido en estructuras aporticadas. Esta información servirá a los ingenieros para poder incluir esta alternativa como posible solución de protección sísmica.

### **1.5. Antecedentes investigativos**

Para la presente tesis se ha considerado la información encontrada en las siguientes investigaciones:

En la publicación "Experimental study on the elasto-plastic behaviour of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading" (Wakabayashi et al., 1973) se realiza por primera vez una propuesta para restringir el pandeo de las riostras. Consiste en un estudio experimental de pletinas de acero que se encuentran insertadas entre paneles de hormigón prefabricado y como resultado el comportamiento previsto demuestra ductilidad y gran disipación de energía.

En el trabajo "Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes" (Kimura et al., 1976) se reportó la primera prueba con riostras encerradas en tubos de acero rellenos con mortero, sin el agente antiadherente (para permitir un movimiento relativo entre el refuerzo de acero y el mortero), con el fin de que únicamente el núcleo de acero sea el que resista la carga axial, mientras que el hormigón sirva para prevenir el pandeo. Como

resultado de ello, las BRB se convirtieron en el tipo de amortiguador más ampliamente utilizado en edificios de gran altura construidos en Japón.

En el informe “Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces™” (Black et al., 2002) se tuvo como objetivo verificar los resultados de las predicciones teóricas sobre la estabilidad estructural de las riostras no adheridas, validar la capacidad inelástica de las riostras en condiciones severas de demandas de terremotos y calibrar un modelo histerético macroscópico para predecir el comportamiento fuerza-desplazamiento de la riostra (modelo de Bouc-Wen). Este informe presentó los resultados de un programa experimental de dos fases bajo los protocolos SAC y OSHPD, y mediante pruebas cíclicas se midieron las fuerzas aplicadas y desplazamientos generados de diferentes muestras. Se concluye que las riostras no adheridas son una alternativa confiable y práctica frente a los sistemas de armazón convencionales para mejorar la resistencia a los terremotos de las estructuras nuevas y existentes. Además, son capaces de proporcionar tanto la rigidez necesaria para satisfacer los límites de deriva estructural como una estabilidad y capacidad de disipación de energía.

El artículo “Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces” (Sabelli et al., 2002) tiene como objetivo conocer la respuesta sísmica de pórticos arriostrados concéntricamente que utilizan riostras de pandeo restringido, con la intención de comprender las características estructurales y de movimiento del suelo que controlan el comportamiento. Se empleó el procedimiento de fuerza lateral estática equivalente con las recomendaciones de la NEHRP, “National Earthquake Hazards Reduction Program”, para edificios nuevos y otras estructuras (FEMA 302/303). El comportamiento previsto muestra ventajas significativas en las capacidades de deformación inelástica (ductilidad) en relación con los pórticos arriostrados convencionales y los pórticos resistentes a momento.

En el artículo científico, “Seismic retrofitting with buckling restrained braces: Application to an existing non-ductile RC framed building” (Di Sarno & Manfredi, 2010) se tuvo como objetivo comparar el comportamiento de una estructura sin BRB y luego, con BRB, para lo cual se realizó un análisis integral no lineal estático (pushover) y un análisis dinámico. El análisis estático no lineal muestra que el periodo correspondiente al punto de desempeño de la estructura con BRB disminuye en un 35% respecto a la estructura sin riostras. Además, el análisis dinámico no lineal mostró que más del 60% de la energía sísmica de entrada es disipada por las BRB en los estados límite últimos.

En la tesis de maestría “Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostamiento de pandeo restringido. Parte 1” (Cancelado, 2012) se tiene como objetivo estudiar el comportamiento estructural de las BRB, para lo cual se presentan las bases conceptuales de los diferentes tipos de dispositivos de control sísmico, resaltando los pórticos con arriostamiento de pandeo restringido. Se diseñaron cuatro riostras de pandeo restringido; posteriormente se fabricaron y realizaron pruebas experimentales. Como resultado se muestra que la deformación axial inelástica acumulada de las cuatro riostras es 500 veces la deformación de fluencia, la cual supera al límite recomendado de 200. Las pruebas experimentales en las cuatro probetas presentaron un aumento en la rigidez en las curvas de histéresis de las gráficas fuerza-desplazamiento.

En el libro, “Diseño sismorresistente de construcciones de acero” (Crisafulli, 2014) se tuvo como objetivo presentar las bases conceptuales y métodos de diseño para los sistemas estructurales de acero más utilizados, así como también de algunos que aún no han sido ampliamente aplicados, como es el caso de los pórticos con BRB, de los cuales se describió su comportamiento estructural, su diseño, la disposición de las riostras, el análisis estructural y una aplicación.

La tesis de pregrado: “Diseño y estudio numérico del desempeño sísmico de pórticos con riostras de pandeo restringido” (Canales, 2016) tiene como objetivo evaluar la eficiencia de las BRB, el efecto de la altura del edificio sobre el desempeño de los pórticos arriostrados y criterios de falla estructural a considerar en el diseño de tres edificios de oficinas de 4, 9 y 15 pisos, mediante la norma chilena NCh433 de diseño sísmico de edificios, la AISC 341-10 y un estudio numérico propuesto por el tesista. De acuerdo con los resultados del análisis, las tres estructuras propuestas se comportan de manera similar y no existen grandes diferencias más allá de una mayor incursión en rangos inelásticos en algunos pisos. En adición a ello, cuando se alcanzan los valores de diseño no se llega a incursionar en el rango inelástico en los dos edificios de mayor altura, lo que indica que los límites de corte basal mínimo y máximos desplazamientos generan que la respuesta final sea prácticamente elástica. De acuerdo con esto, se podría decir que la NCh433 corresponde a un límite elástico para edificios de mediana a gran altura. Sólo en la estructura de 4 pisos (que no debió ser sobredimensionada) se alcanza a ver fluencia en la mayoría de sus pisos.

En el folleto informativo, “Unbonded Brace UBB” (Nippon Steel & Sumikin Engineering, 2017) se tiene como objetivo presentar el producto de las riostras de pandeo restringido y sus respectivas características. El informe muestra la definición, componentes, funciones y configuración de las BRB, además de los resultados de algunos ensayos realizados.

En la tesis “Design and sensitivity of buckling restrained braces” (Jones, 2020), se tiene como objetivo recopilar los recursos disponibles para el diseño de riostras de pandeo restringido, permitiendo diseñar especímenes y evaluar su desempeño. La investigación se evalúa mediante pruebas experimentales con un protocolo básico de carga basado en dos especificaciones: AISC 341-10 y FEMA 450-1, mediante el modelado numérico, el análisis de elementos finitos y el desarrollo de un modelo teórico para proporcionar límites

de capacidad al diseñar BRB. Se concluye que pueden utilizarse métodos semi-empíricos; sin embargo, se requieren ensayos experimentales para calibrar los dispositivos.

En el folleto informativo, “Línea de Protección Sísmica de Estructuras: Riostras de Pandeo Restringido (BRB)” (efe-prima-ce, 2020) se tiene como objetivo presentar un portafolio de dispositivos de protección sísmica para ser considerados como una alternativa de reforzamiento estructural. Se presenta información acerca de los conceptos generales de las BRB, las ventajas en su aplicación, su comportamiento y propiedades estructurales; en adición a ello, una breve guía de diseño preliminar de edificaciones implementadas con BRB.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En el presente capítulo se darán a conocer las características físicas de los dispositivos de control sísmico, su comportamiento estructural, sus principales componentes y las ventajas y desventajas de su implementación.

### 2.1. Filosofía de diseño

En el diseño sismorresistente convencional, para controlar la respuesta sísmica de una estructura se debe tomar en cuenta su capacidad para disipar energía en el rango inelástico, considerando para ello su ductilidad. Oviedo y Duque (2006) afirman lo siguiente:

En estructuras de hormigón armado y otros materiales convencionales, estos métodos exigen una cuidadosa disposición del refuerzo, de la configuración estructural, de los tipos de conexiones y otros, presentando el inconveniente que la estructura, por su mismo trabajo inelástico, sufra daños permanentes, muchas veces sin posibilidad de reparación.

Las técnicas convencionales de disipación de energía se han complementado con sistemas adicionales a los componentes estructurales de la edificación, los cuales modifican las características dinámicas de la estructura, controlando o disipando parte de la energía impuesta por el sismo. El uso de estas técnicas de control de respuesta sísmica tiene como objetivo reducir la demanda sísmica de la propia estructura controlando su deformación y, por lo tanto, su daño (p.106).

### 2.2. Sistemas de protección sísmica pasivos

Es un tipo de sistema que se encarga de absorber parte de la energía de entrada y no es receptor de información sobre las características de la excitación, sino que más

bien el propio sistema es reactivo al movimiento de la estructura, y así empiezan a actuar los dispositivos de protección sísmica.

Los japoneses y estadounidenses clasifican de dos maneras a los métodos de control sísmico que pueden ser aplicados a una estructura. Los japoneses los catalogan en cuatro categorías: sistemas aislados en la base, sistemas de efecto de masa, sistemas de absorción de energía, y sistemas de control activo (Haruyuki et al., 1991, como se citó en Oviedo & Duque, 2006). Los estadounidenses, por otro lado, los catalogan en tres categorías: sistemas de control activo, sistemas de disipación pasiva de energía y sistemas aislados (Dargush et al., 2015, como se citó en Oviedo & Duque, 2006).

**Tabla 1**

*Clasificación de los sistemas de protección sísmica pasiva.*

Sistema de Control	Tipo	Tipo	Dispositivo	
Control pasivo	Aislamiento sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de rodillos	
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante	
			Capa deslizante	
			Otros	
		Elemento flexible	Elastómero de multicapas	
			Dispositivo flexible	
	Otros			
	Disipación de energía	De tipo histerético	Acero	
			Plomo	
			Otros	
		De tipo friccionante		
		De tipo fluido	Hidráulico	
			Viscoso	
Otros				
De tipo viscoelástico				
Efecto de masa adicional	De masa y resorte			
	De tipo pendular			
	Vibración de líquido			
	Otros			
Otro				
Control semiactivo	Control de amortiguamiento	Sistema de amortiguamiento variable	De tipo hidráulico	
			Otro	
	Control de rigidez	Sistemas de rigidez variable	Riostra	
			Otro	
Otro				
Control activo e híbrido	Efecto de masa	Amortiguamiento activo de masa		
		Amortiguamiento híbrido de masa		
	Control de fuerza	Tendón activo		
		Otro		
	Otro			

*Nota.* Extraído de *Response control and seismic isolation of buildings*, por Higashino et al., 2006.

Entre los sistemas de protección sísmica mostrados en la Tabla 1 se encuentran los sistemas de protección sísmica pasivos, establecidos de acuerdo con la clasificación internacional.

De acuerdo a la clasificación mostrada, la presente tesis analiza la eficiencia de un sistema de control pasivo de disipación de energía de tipo histerético en estructuras de acero.

### 2.3. Balance de energía

La energía liberada por un sismo se convierte en la energía de entrada inducida sobre una estructura, la cual se transforma en energía cinética, energía elástica y energía disipada. Este balance de energía se expresa de la siguiente manera:

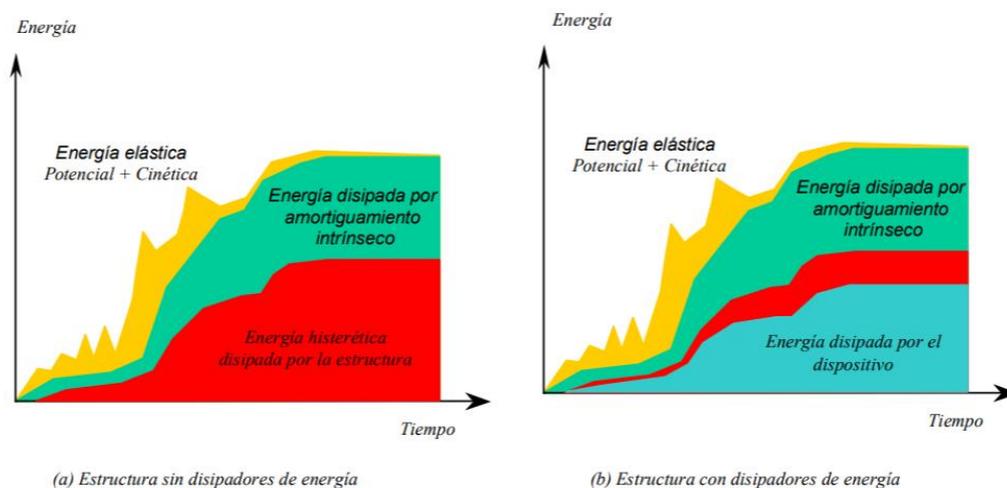
$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{cinética}} + E_{\text{elástica}} + E_{\text{disipada}} \quad (1)$$

Para mejorar la capacidad de una estructura se deberá aumentar su resistencia; sin embargo, como se puede apreciar en la Ecuación (1) existe otra alternativa, la cual es mediante el aumento de la energía disipada.

La Figura 1 (a) muestra que, la energía de entrada proveniente de un sismo es balanceada por la energía elástica, la energía disipada por amortiguamiento intrínseco y la energía histerética disipada por la estructura. La Figura 1 (b) muestra el mismo balance de energía en la estructura, pero esta vez con el uso de disipadores histeréticos, los cuales absorben la energía de entrada proveniente del sismo, generando así una reducción en la energía histerética que tendría que disipar la estructura.

## Figura 1

### Balance de energía durante un evento sísmico



Nota. Adaptado de *Respuesta experimental de edificios a escala con disipadores de energía* (p. 1-11), por Toro G., 2004, Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes.

La disminución de la energía de entrada se puede obtener mediante el aislamiento sísmico; por otro lado, el aumento de la capacidad de disipar energía en la estructura se puede obtener mediante el uso de los dispositivos de disipación de energía (Toro G., 2004).

## 2.4. Riostras de pandeo restringido

El sistema de disipación de energía tiene como objetivo limitar las deformaciones inelásticas de los elementos estructurales y trasladar aquellas deformaciones a elementos diseñados para disipar la energía proveniente del sismo minimizando los daños en la estructura (Figura 2). Un tipo de sistema de disipación de energía son las riostras de pandeo restringido, las cuales son consideradas como disipadores de energía histéricos que tienen la función de absorber la energía de entrada proveniente del sismo, actuando como un elemento de “sacrificio”. De esta forma la estructura se libera de tener que absorber mayor cantidad de energía, reduciendo así el daño estructural (efe-prima-ce, 2020).

## Figura 2

Aplicación de BRB en edificación de Japón, Sankyo New Tokyo Headquarter



Nota. Extraído de *Diseño sismorresistente de construcciones de acero* (p.113), por Crisafulli, 2014, Asociación Latinoamericana del Acero.

### 2.4.1. Componentes de las riostras de pandeo restringido.

La Figura 3 muestra un tipo de BRB colocada en una estructura de acero con sus principales componentes, las cuales se presentan con mayor detalle y de forma más esquemática en la Figura 4.

## Figura 3

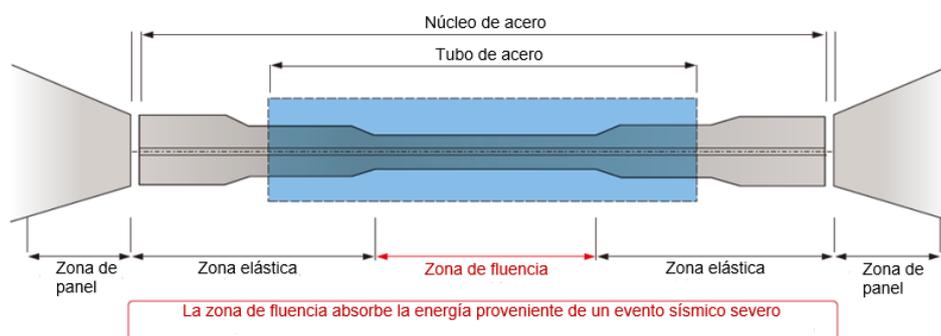
Riostra de pandeo restringido usado en una estructura de acero



Nota. Adaptado de *SME Steel*, por Corporate Headquarters en West Jordan en Utah, 2023, (<https://smesteel.com/products/sme-steel-corporate-headquarters-west-jordan-utah>).

## Figura 4

### Principales componentes de una BRB



Nota. Adaptado de *Unbonded Brace*, por Nippon Steel & Sumikin Engineering, 2017, ([https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/response\\_control\\_and\\_seismic\\_isolation\\_devices/ubb/](https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/response_control_and_seismic_isolation_devices/ubb/)).

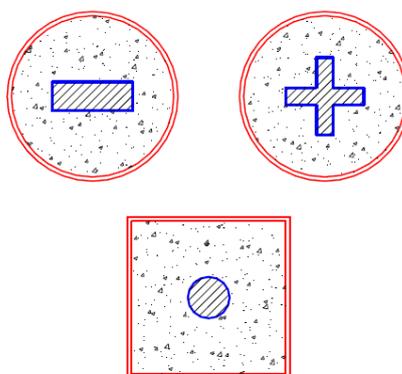
#### a) Núcleo de acero - Zona de fluencia

Componente de la BRB que está diseñada para que pueda fluir bajo cargas cíclicas, por lo que el material estructural del cual está hecha debería ser un acero con alta ductilidad (Cancelado, 2012).

Existen muchas configuraciones para el núcleo de acero de una BRB; sin embargo, las más utilizadas son las de núcleo circular, rectangular o cruciforme (Crisafulli, 2014), tal y como se aprecia en la Figura 5.

## Figura 5

### Secciones transversales típicas de una BRB



Nota. Extraído de *Diseño sismorresistente de construcciones de acero* (p.112), por Crisafulli, 2014, Asociación Latinoamericana del Acero.

### **b) Núcleo de acero - Zona elástica**

Una parte de este elemento se encuentra dentro del tubo de acero, la cual es una extensión del núcleo de acero en zona de fluencia, donde existe un aumento gradual de la sección para no generar concentración de esfuerzos en esa zona. La otra parte se encuentra fuera del tubo de acero y sirve para poder conectar el núcleo de acero con el pórtico viga-columna (Cancelado, 2012).

### **c) Sistema que restringe el pandeo**

Está conformado por el tubo de acero y el material de relleno. La camisa de acero es un componente que no debería resistir cargas axiales, y que generalmente tiene forma circular o rectangular. El material de relleno es el mortero, el cual se encuentra entre el núcleo y el tubo de acero, y permite resistir las cargas de compresión (Cancelado, 2012).

### **d) Material antiadherente**

Material que se encuentra entre el núcleo de acero y el relleno de mortero, el cual tiene la función de disminuir la transferencia de esfuerzos cortantes del núcleo al tubo de acero y de esta forma, procurar que el núcleo sea receptor de las fuerzas axiales (Crisafulli, 2014).

## **2.4.2. Comportamiento estructural de las riostras de pandeo restringido**

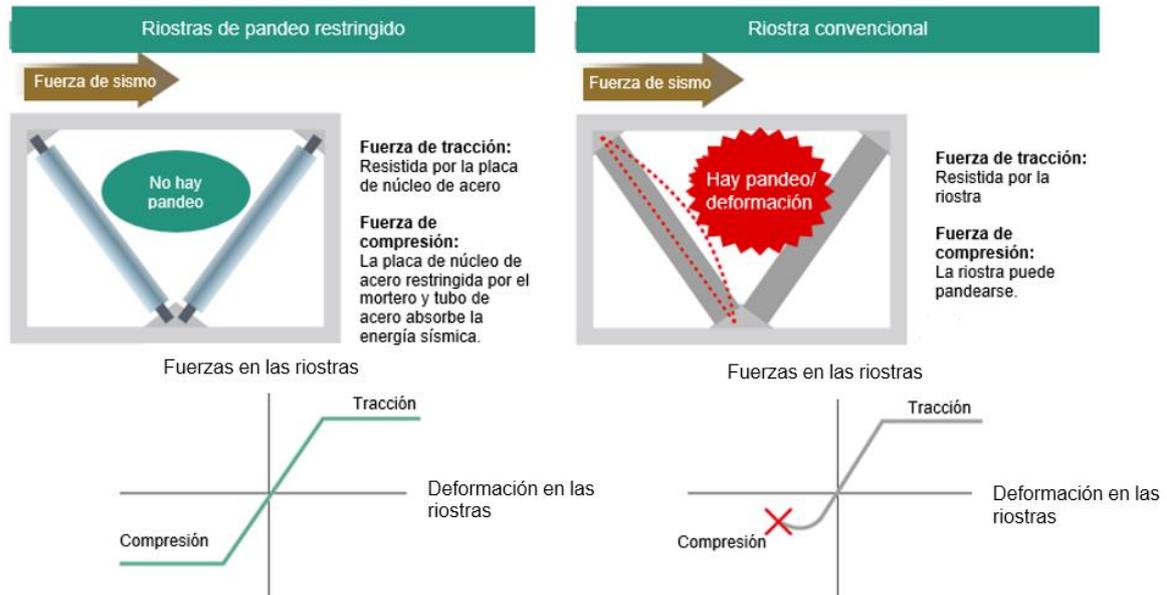
A diferencia de las riostras convencionales, las riostras de pandeo restringido tienen capacidad para soportar cargas a compresión y tracción con un pandeo elástico límite.

En la Figura 6 se muestra una comparación entre las BRB y las riostras convencionales. La imagen de la izquierda muestra que ante una fuerza sísmica las fuerzas de tracción en las BRB son resistidas por el núcleo de acero, mientras que las fuerzas de compresión son resistidas por el núcleo de acero restringido por el mortero y el tubo de acero, todo en conjunto. Por otro lado, las fuerzas de tracción actuantes en las riostras

convencionales son resistidas por la propia riostra, la cual también resiste cargas a compresión, y es aquí donde se genera el problema, ya que esto produciría el pandeo de la riostra, reduciendo así su capacidad de disipar energía.

### Figura 6

Comparación entre riostras de pandeo restringido y riostras convencionales



Nota. Adaptado de *Unbonded Brace*, por Nippon Steel & Sumikin Engineering, 2017, ([https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/response\\_control\\_and\\_seismic\\_isolation\\_devices/ubb/](https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/response_control_and_seismic_isolation_devices/ubb/)).

Las BRB están formadas por un elemento central que se encuentra encerrado en un tubo de acero relleno con mortero, lo que permitirá que la riostra trabaje tanto a tracción como a compresión (Figura 7).

El material antiadherente que existe entre el mortero y el núcleo de acero asegura que la fuerza axial no se transfiera al tubo de acero ni al mortero, solo a su núcleo (Nippon Steel & Sumikin Engineering, 2017).

**Figura 7**

*Principales componentes de la riostra de pandeo restringido.*



*Nota.* Adaptado de *Unbonded Brace*, por Nippon Steel & Sumikin Engineering, 2017, ([https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/response\\_control\\_and\\_seismic\\_isolation\\_devices/ubb/](https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/response_control_and_seismic_isolation_devices/ubb/)).

### **2.4.3. Ventajas y desventajas del uso de riostras de pandeo restringido**

A continuación, se presentan las ventajas que se podrían obtener al usar riostras de pandeo restringido:

- El uso de riostras en los pórticos de una estructura aporta un aumento de rigidez lateral, generándose así un mejor control del límite de derivas establecidas en los respectivos códigos de diseño.
- Los pórticos con riostras de pandeo restringido permiten disipar la energía proveniente de fuerzas externas aplicadas, permitiendo así que los demás elementos estructurales se mantengan en el rango elástico y no sufran daño alguno.
- En comparación a las riostras convencionales, el uso de las riostras de pandeo restringido permite reducir la cantidad de pórticos arriostrados en una estructura, lo que posibilita mayor libertad en su arquitectura.

- Los componentes estructurales que conforman a las riostras de pandeo restringido aportan resistencia y ductilidad a compresión y a tracción; además, el mortero como relleno de la riostra permite evitar el pandeo por compresión.
- El uso de riostras de pandeo restringido en los pórticos de una estructura permite diseñar las columnas y vigas que no pertenecen a esos pórticos arriostrados con menores dimensiones.
- La composición de materiales de las riostras de pandeo restringido permite una instalación más simple en sistemas aperticados, y por ende una instalación en menor tiempo en obra.
- El uso de riostras de pandeo restringido en los pórticos de una estructura debe pasar por ensayos de laboratorio, lo que permitirá conocer mejor el comportamiento de las riostras antes de su aplicación.

Algunas de las desventajas que presentan estos dispositivos histeréticos son:

- Las deformaciones generadas después de un sismo se van acumulando internamente, volviéndose permanentes con el tiempo. Ello podría generar que se deba reemplazar el arriostramiento más perjudicado en un futuro.
- La mayoría de las riostras de pandeo restringido se encuentran patentadas.

#### **2.4.4. Riostras de pandeo restringido usadas en el análisis**

Existen secciones de riostras ya diseñadas que se encuentran disponibles en programas de cómputo como ETABS, las cuales se caracterizan por tener curvas de respuesta histerética y cuyo comportamiento obedece a las reglas de Masing, una extensión estipulada por Jayakumar (1987), la cual establece dos reglas generales de histéresis:

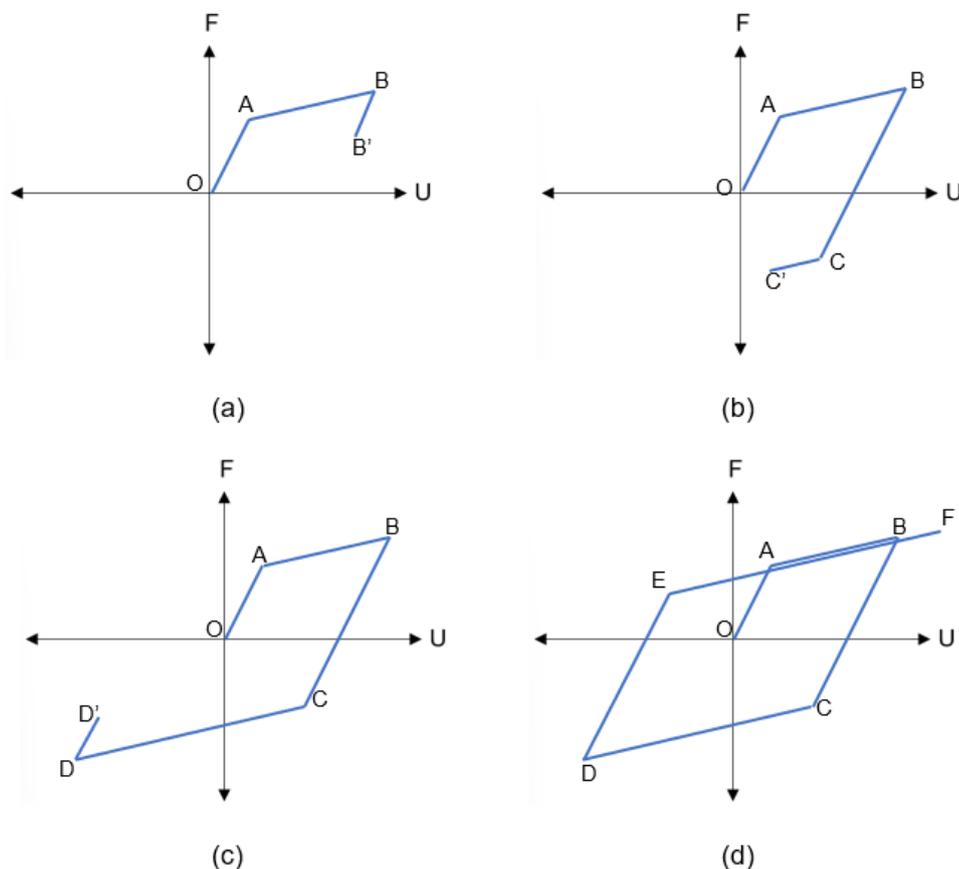
La primera regla establece que, desde el punto de inversión de carga, las curvas de respuesta histerética son geoméricamente similares a la curva de carga inicial (Figura 8).

La segunda regla establece que, bajo ciclos de carga y descarga continua, la curva de fuerza-deformación sigue la del ciclo anterior.

En la Figura 8 (a) y en la Figura 8 (b) se observa la curva bilineal de carga inicial OAB y la línea de descarga BB', la cual es continua a la línea de carga inicial, tal y como lo indica la segunda regla de Masing. En la Figura 8 (c) y la Figura 8 (d), la línea de descarga BCD se recarga como la curva bilineal DEF, la cual es geoméricamente similar a la curva de carga inicial, como se indica en la primera regla de Masing.

### Figura 8

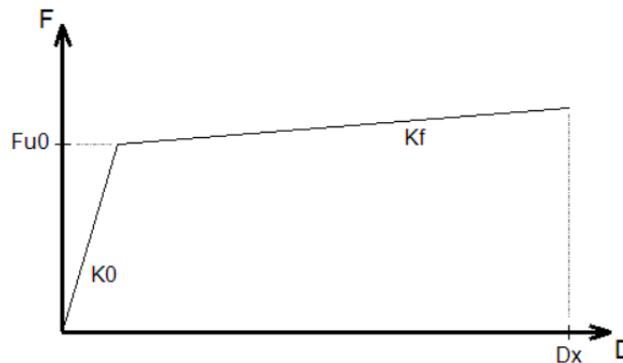
Curvas de histéresis



Cada sección BRB tiene una rigidez inicial ( $K_0$ ) y una rigidez post-pandeo ( $K_f$ ). Para la presente tesis se usaron las secciones: BRB 1, BRB 2, BRB 3, BRB 4.5, BRB 5 y BRB 7, cuya información se muestra en la Tabla 2 y gráficamente en la Figura 9.

**Figura 9**

*Curva bilineal de fuerza-deformación.*



**Tabla 2**

*Clasificación de los sistemas de protección sísmica pasiva*

	BRB 1	BRB 2	BRB 3	BRB 4.5	BRB 5	BRB 7
$K_0$ (t/cm)	31.75	63.50	95.25	142.88	158.75	222.25
$K_f$ (t/cm)	0.54	1.08	1.62	2.43	2.70	3.78

Cada riostra está definida por una curva bilineal de fuerza axial-deformación axial que se muestra en la Tabla 3 y gráficamente en la Figura 10.

**Tabla 3**

*Fuerza axial vs deformación de las BRB usadas*

BRB 1		BRB 2	
Deformación (cm)	Fuerza (t)	Deformación (cm)	Fuerza (t)
-17.07	-26.02	-17.07	-52.04
-0.54	-17.10	-0.54	-34.21
0	0	0	0
0.54	17.27	0.54	34.53
17.07	26.19	17.07	52.37

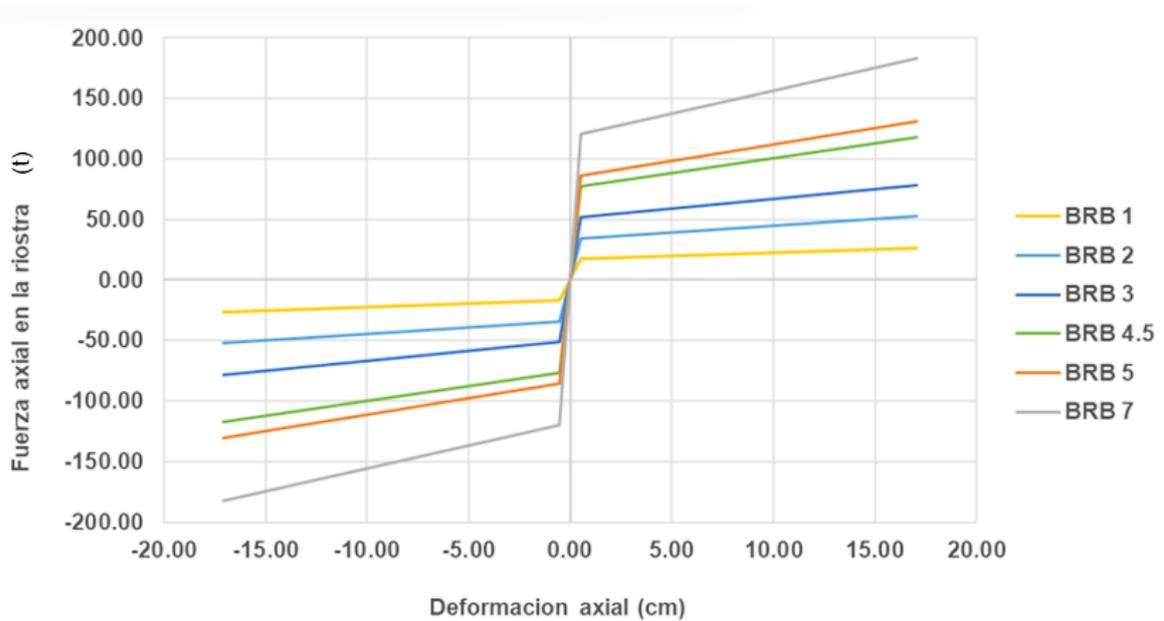
BRB 3		BRB 4.5	
Deformación (cm)	Fuerza (t)	Deformación (cm)	Fuerza (t)
-17.07	-78.07	-17.07	-117.10
-0.54	-51.31	-0.54	-76.96
0	0	0	0
0.54	51.80	0.54	77.70
17.07	78.56	17.07	117.84

Tabla 3 (continuación)

BRB 5		BRB 7	
Deformación (cm)	Fuerza (t)	Deformación (cm)	Fuerza (t)
-17.07	-130.11	-17.07	-182.16
-0.54	-85.51	-0.54	-119.72
0	0	0	0
0.54	86.34	0.54	120.87
17.07	130.93	17.07	183.31

Figura 10

Curvas bilineales de fuerza- deformación de las BRB usadas



## CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE LAS RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO

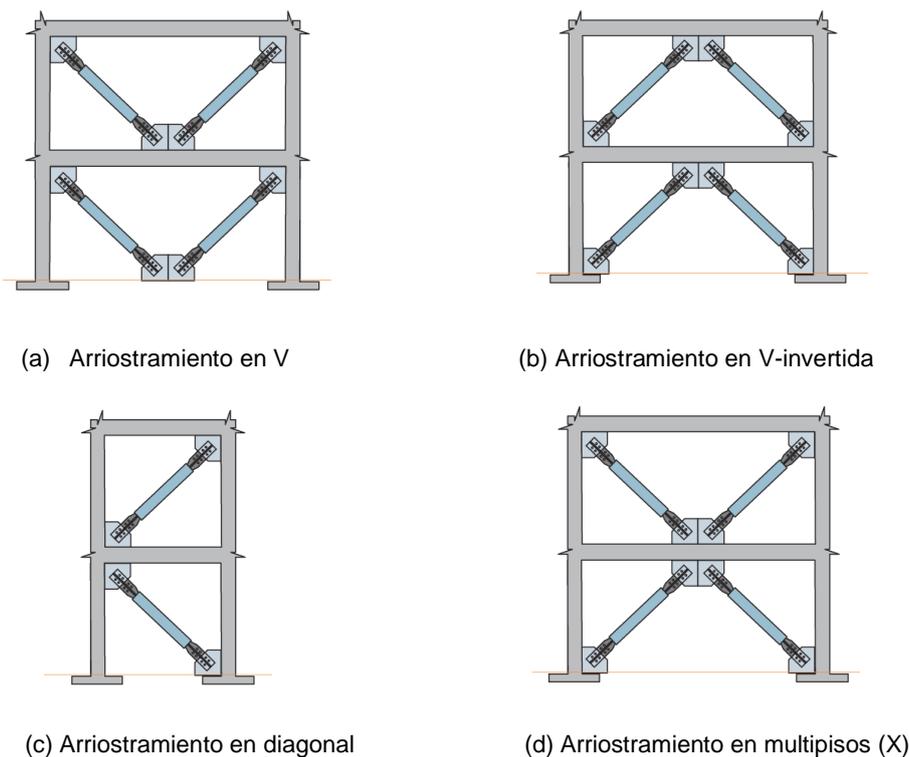
En el presente capítulo se muestran las posibles configuraciones de riostras de pandeo restringido en una estructura, así como los resultados obtenidos ante evaluaciones experimentales bajo protocolos de carga ya establecidos en la AISC 341-16, FEMA 450-1 y BCJ.

### 3.1. Configuraciones de riostras de pandeo restringido utilizadas

Los pórticos con BRB pueden usar diversas configuraciones de arriostramiento, como las mostradas en la Figura 11.

**Figura 11**

*Tipos de configuración de arriostramiento en pórticos.*

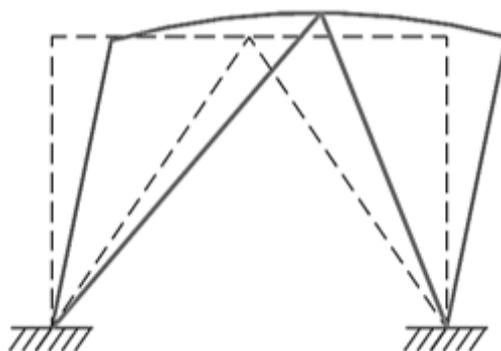


*Nota.* Adaptado de "Manual técnico y de usuario - software de cálculo riostras F'C-BRB" (p. 3), 2020, *efe-Prima-ce*.

Las configuraciones en V y en V invertida deben cumplir con ciertos requerimientos, debido a que, cuando las BRB se encuentran en el rango elástico, la disminución de la longitud de una riostra por la compresión equivale al alargamiento de la otra riostra que se encuentra en tracción, tal y como se muestra en la Figura 12. Cuando las riostras fluyen prevalece la resistencia a la compresión sobre la de tracción. Ello genera esfuerzos locales en la viga del pórtico y deformaciones adicionales (Crisafulli, 2014).

### Figura 12

*Deformación del pórtico (con uniones no resistentes a momentos) con BRB en configuración de V-invertida*



*Nota.* Extraído de *Diseño sismorresistente de construcciones de acero* (p.116), por Crisafulli, 2014, Asociación Latinoamericana del Acero.

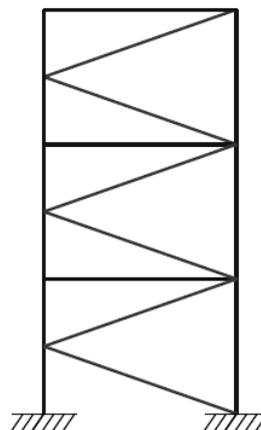
El AISC Committee on Specifications (2010) afirma lo siguiente:

La resistencia requerida de las vigas que son interceptadas por las riostras y sus conexiones debe determinarse a partir de las combinaciones de carga reglamentarias, suponiendo que las riostras no resisten cargas muertas ni cargas vivas. Además, las vigas deben ser continuas entre las columnas del pórtico y deben arriostrarse lateralmente según los requerimientos exigidos a estructuras de ductilidad moderada. Como mínimo, se requiere arriostramiento lateral en el punto de intersección de las riostras con la viga, a menos que esta tenga suficiente resistencia y rigidez fuera del plano para asegurar la estabilidad (p. 67).

En las especificaciones técnicas de la ANSI/AISC 341-10, el arriostramiento de BRB con configuración en K no es recomendado ni está permitido para ser usado, ya que podría generar grandes demandas inelásticas en las columnas de los pórticos y comprometer a toda la estructura.

### Figura 13

Configuración de arriostramiento en K.



Para la presente tesis se ha usado la configuración de arriostramiento en diagonal mostrada en la Figura 11 (c).

## 3.2. Evaluaciones experimentales

### 3.2.1. Protocolos de carga

El protocolo de carga se puede entender como una secuencia de aplicación de cargas representadas por ciclos de cargas o desplazamientos alternados con límites de deformación específicos (Cancelado, 2012).

El primer organismo en implementar especificaciones para el diseño de BRB fue el Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC). Esta información se ubica en los capítulos F4 y K3 de ANSI/AISC 341-16.

La guía normativa del AISC 341-16 incluye como requerimiento de diseño realizar un ensayo experimental cíclico de una BRB, con el objetivo de verificar el esfuerzo requerido de la riostra y la deformación inelástica esperada.

A continuación, se muestra el protocolo de carga mínimo para una BRB según el AISC 341-16. Cabe mencionar que, un ciclo considera la carga completa de tracción y compresión.

- 2 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = \Delta b_y$
- 2 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = 0.5 \Delta b_m$
- 2 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = 1.0 \Delta b_m$
- 2 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = 1.5 \Delta b_m$
- 2 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = 2.0 \Delta b_m$
- Ciclos de carga adicionales correspondientes a la deformación:  
 $\Delta b = 1.5 \Delta b_m$ , de tal forma que alcance una deformación axial inelástica acumulada de por lo menos 200 veces la deformación de fluencia.

Donde:

$\Delta b$ : Deformación axial aplicada.

$\Delta b_m$ : Deriva de entrepiso, no menos del 1% de la altura del piso.

$\Delta b_y$ : Deformación de primera fluencia.

El AISC 341-16 permite la interpolación de resultados, de modo que cada diseño no requiere verificación experimental; sin embargo, es importante mencionar que la resistencia de diseño no debe ser inferior a 0.5 ni superior a 1.2 veces la ensayada con materiales y sección transversal similares (Jones, 2020).

La Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA) implementó un protocolo de carga mínimo para una BRB, el cual se encuentra en FEMA 450-1. Cabe mencionar que, un ciclo considera la carga completa de tracción y compresión.

- 6 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = \Delta b_y$
- 4 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = 0.5 \Delta b_m$
- 4 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = 1.0 \Delta b_m$
- 2 ciclos de carga correspondientes a la deformación:  $\Delta b = 1.5 \Delta b_m$

- Ciclos de carga adicionales correspondientes a la deformación:

$\Delta b = 1.0 \Delta b_m$ , de tal forma que alcance una deformación axial inelástica acumulada de por lo menos 140 veces la deformación de fluencia.

Para el presente protocolo de carga la deriva de entrepiso no debe ser menos del 1% de la altura del piso y no mayor a  $5\Delta b_y$ .

La diferencia entre ambos protocolos americanos consiste en el mayor número de ciclos que requiere FEMA 450-1 para alcanzar las deformaciones indicadas anteriormente. Además de presentar un límite mínimo de deformación axial inelástica acumulada menor al indicado por el AISC 341 - 16.

Existe otro protocolo de carga, el cual fue desarrollado en Japón, donde el organismo encargado de aprobar una BRB, de acuerdo con los requisitos establecidos a continuación, es el Centro de Construcción de Japón (BCJ). El protocolo de carga establece 3 ensayos:

- Ensayo 1:

3 ciclos de carga correspondientes a la deformación plástica longitudinal:  $\Delta b_y$

3 ciclos de carga correspondientes a la deformación plástica longitudinal: 0.5%

3 ciclos de carga correspondientes a la deformación plástica longitudinal: 1.0%

3 ciclos de carga correspondientes a la deformación plástica longitudinal: 2.0%

3 ciclos de carga correspondientes a la deformación plástica longitudinal: 3.0%

- Ensayo 2: Carga cíclica con deriva inicial fuera del plano

- Ensayo 3: Carga cíclica, amplitud constante

La amplitud objetivo del AISC-341 depende de la deriva del piso de diseño, mientras que BCJ se basa en la deformación axial del núcleo. Los protocolos también difieren en la ductilidad inelástica acumulada que produce aproximadamente un 47% de deformación plástica para el AISC 341-16, mientras que el protocolo de carga BCJ produce un 66% de deformación plástica (Takeuchi & Wada, 2017).

La Asociación Canadiense de Normas (CSA) mencionó por primera vez las riostras de pandeo restringido en CSA-S16-09. Las BRB también se mencionan en el Código Nacional de Construcción de Canadá (NBCC) como un sistema resistente a la fuerza lateral (Jones, 2020).

AISC y CSA consideran los mismos protocolos de carga para la verificación experimental de una BRB. BCJ incluye un protocolo de carga más riguroso en comparación a las mencionadas anteriormente.

### **3.2.2. Ensayos experimentales**

Existe una variedad de investigaciones que mediante ensayos experimentales han obtenido más información acerca del comportamiento estructural de las BRB. A continuación, se presentan los trabajos de investigación de los siguientes autores.

Cancelado (2012) describe una prueba experimental de cuatro modelos de BRB a escala 1:4 realizada en Colombia. La prueba se realizó con un actuador dinámico bajo el protocolo de carga del AISC 341-16, mencionado en el acápite 3.2.1. Los modelos ensayados se dividen en dos grupos; cada grupo estuvo conformado por modelos que tenían la misma área de núcleo de acero, pero con una configuración de tubo de confinamiento diferente (cuadrada o circular). Cabe mencionar que, el núcleo de acero de las probetas ensayadas se fabricó con acero ASTM A-36 y el tubo de confinamiento se fabricó con acero ASTM A-50.

Los disipadores tienen la misma longitud total, aproximadamente 1.25 m. El primer grupo y el segundo grupo tienen una pletina central de acero con un área de sección transversal de 2.4 cm<sup>2</sup> y 4.5 cm<sup>2</sup>, respectivamente.

Cancelado (2012) obtuvo los siguientes resultados:

- Las probetas del primer grupo alcanzaron una carga máxima a compresión mayor en un 18% respecto a la carga máxima en tracción, mientras que las

probetas del segundo grupo alcanzaron una carga máxima a compresión mayor en un 25% respecto a la carga máxima en tracción (p.118).

- Se registraron valores medios de resistencia a tracción y compresión de 1.5 y 1.9 veces la fuerza de fluencia, respectivamente (p.118).
- No pareció existir una diferencia marcada en las BRB con camisa de confinamiento cuadrada y circular. Los valores de amortiguamiento y deformación final fueron muy similares para ambos tipos de configuración (p.119).
- Las pendientes en el rango inelástico en tracción y compresión fueron muy similares, mientras que las pendientes en el rango elástico mantienen la relación 2 a 1, debido a la relación que existe entre las áreas de los núcleos de acero del primer grupo y el segundo grupo (p.93).
- La deformación axial inelástica acumulada para todas las probetas fue de 500 veces la deformación de fluencia, la cual es superior al límite recomendado de 200 veces la deformación de fluencia (p.118).

Black et al. (2002) describieron una prueba experimental de cinco modelos de BRB a escala real realizada en la Universidad de California en Berkeley en el año 2002. El primer grupo estuvo conformado por tres probetas, las cuales se ensayaron bajo el protocolo de carga recomendado por SEAOC (Asociación de Ingenieros Estructurales de California). Los disipadores tenían la misma longitud total, aproximadamente 14,75 pies, pero cada uno tenía una pletina central de acero con un área de sección transversal diferente, de 4.5 pulg<sup>2</sup>, 6.0 pulg<sup>2</sup> y 8.0 pulg<sup>2</sup>, con fuerzas de fluencia de aproximadamente 270 kips, 360 kips y 470 kips, respectivamente.

Los dos primeros especímenes tenían una sección de núcleo rectangular (-) y el tercer espécimen tenía una sección transversal cruciforme (+). La pletina central y las de

empalme de la conexión final se fabricaron con acero SM490A de grado JIS (estándar industrial japonés), equivalente a ASTM A913.

Black et al. (2002) obtuvieron los siguientes resultados:

- Las probetas ensayadas alcanzaron una resistencia máxima a compresión mayor respecto a la resistencia máxima en tracción; esta diferencia varió entre 7.3% y 9.5%.
- Se registraron valores medios de resistencia a tracción de 1.14 a 1.18 veces la fuerza de fluencia y a compresión de 1.23 a 1.29 veces la fuerza de fluencia.
- Las rigideces en el rango inelástico en tracción y compresión fueron muy similares, mientras que en el rango elástico mantienen la relación que existe entre las áreas de los núcleos de acero.

### **3.2.3. Resultados experimentales**

De acuerdo con las investigaciones mencionadas, el comportamiento estructural de las BRB expresa lo siguiente:

- La resistencia por compresión de las riostras es ligeramente mayor aproximadamente en un 10% a un 20% respecto a la resistencia por tracción.
- No hay una diferencia significativa entre usar riostras con una camisa de confinamiento cuadrada o con una de forma circular.
- Las rigideces en el rango inelástico en tracción y compresión fueron muy similares, mientras que en el rango elástico mantienen la relación que existe entre las áreas de los núcleos de acero.

## CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el presente capítulo se muestran las características de estructuras propuestas de baja y de mediana altura que serán analizadas con riostras de pandeo restringido. Además, se explican los códigos de diseño que se relacionan con su modelamiento y el tipo de análisis estructural aplicado; ello comprende a la norma peruana E.030, la ASCE/SEI 7-22 y el ATC-40.

Se usó un modelo computacional en ETABS donde las riostras son modeladas como elementos tipo Link con un comportamiento histerético propio de los dispositivos y cuyo análisis corresponde al tiempo-historia con cargas dinámicas, para lo cual se usaron dos registros sísmicos, uno correspondiente al evento ocurrido en la ciudad de Lima en 1966; y el otro al evento ocurrido en la región de Maule en 2010.

### 4.1. Disposiciones de códigos de diseño

#### 4.1.1. Norma peruana E.030

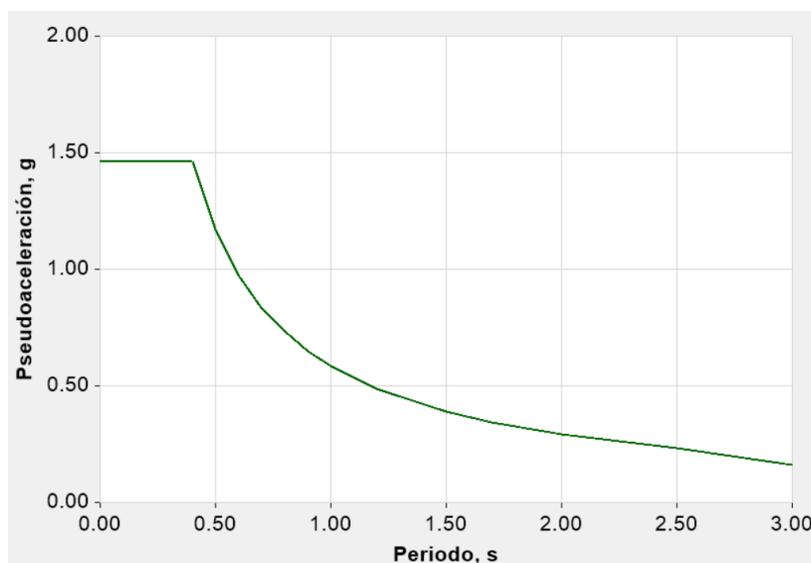
El artículo 23 de la norma peruana E.030 (2018) de diseño sismorresistente, menciona el uso de sistemas de disipación de energía en edificaciones, siempre y cuando se cumplan las disposiciones del capítulo II de esa norma, titulado: "Peligro sísmico", el cual describe las consideraciones de sismicidad y geotecnia; y en la medida en que sean aplicables los requisitos del ASCE/SEI 7-22 (Instituto de Ingeniería Estructural de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles) en "Cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras".

- **Espectro de diseño**

Con el objetivo de definir el espectro de diseño, se consideró que las estructuras analizadas corresponden a una zona sísmica 4, pertenecen a la categoría de edificación "importante", se ubican en un suelo tipo S1 y no presentan irregularidades. En base a ello se obtuvo el espectro de diseño mostrado en la Figura 14.

**Figura 14**

*Espectro de diseño en base a la norma peruana E.030.*



*Nota:* Se muestra el espectro de diseño con un factor (R) de modificación de respuesta igual a 1, y cuyo valor máximo de pseudoaceleración es 1.4625 g. Para un factor (R) de modificación de respuesta igual a 1.5, que se usará más adelante, es 0.975 g, donde g es la aceleración de la gravedad.

- **Distribución de la fuerza sísmica en altura**

Las fuerzas horizontales, equivalentes a una fuerza sísmica, se concentran a nivel de piso y se aplican en la dirección de análisis. Aquellas fuerzas son proporcionales al producto del peso por la altura del piso y elevada a la potencia  $k$ , la cual depende del periodo fundamental de vibración ( $T$ ).

Si  $T$  es menor o igual a 0.5 s, entonces  $k=1.0$ ; mas si  $T$  es mayor que 0.5 s,  $k = (0.75 + 0.5 T) \leq 2.0$ .

#### **4.1.2. ASCE/SEI 7-22**

En el capítulo 16 de este documento, titulado: “Análisis no-lineal tiempo-historia”, se menciona que para la determinación de la respuesta se seleccionarán no menos de once movimientos sísmicos, los cuales estarán compuestos por un par de componentes horizontales ortogonales. Para el caso en el que no se tenga tal cantidad de información,

está permitido utilizar movimientos sísmicos simulados que deberán ser consistentes con las magnitudes del sismo, características del suelo y condiciones de sitio.

La presente tesis no tiene como objetivo diseñar riostras de pandeo restringido, sino más bien conocer su comportamiento estructural bajo la aplicación de cargas dinámicas, por lo que, como ya se ha mencionado, solo se usaron dos registros sísmicos, uno correspondiente al evento ocurrido en la ciudad de Lima en 1966; y otro, al evento ocurrido en la región de Maule en 2010.

De acuerdo con el ASCE/SEI 7-22, el registro sísmico puede ser escalado para un rango de periodos de vibración que contribuya significativamente a la respuesta estructural dinámica. El rango de periodos tiene un límite superior mayor o igual a dos veces el periodo más largo del primer modo de vibración en las direcciones horizontales principales de respuesta, aunque el límite superior puede reducirse a 1.5 veces el periodo fundamental más largo si se justifica mediante el análisis dinámico. El rango de periodos debe incluir por lo menos el número de modos elásticos necesarios para alcanzar el 90% de la masa efectiva en cada dirección horizontal. El límite inferior del rango no excederá el 20% del periodo más pequeño del primer modo de vibración para las dos direcciones horizontales principales de respuesta.

A partir de las dos componentes horizontales ortogonales se debe construir un espectro de respuesta. Cada componente debe escalarse de modo que el promedio de los espectros de dirección máxima de todos los movimientos del suelo coincida o exceda el espectro de respuesta objetivo en el rango de períodos antes indicado.

En el capítulo 18 del ASCE/SEI 7-22, titulado: "Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con sistemas de amortiguamiento", se menciona que el análisis no lineal tiempo-historia deberá usar un modelo matemático del sistema de resistencia a la fuerza sísmica y el sistema de amortiguamiento. Se deberá tomar en cuenta el comportamiento histerético de todos los dispositivos de amortiguamiento y conexiones con comportamiento

inelástico de acuerdo con los resultados experimentales, y así dimensionarse para resistir las fuerzas, los desplazamientos y las velocidades de los movimientos del terreno del máximo sismo considerado.

#### **4.1.3. ATC-40**

El Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) de la Comisión de Seguridad Sísmica de California publicó en 1996 un reporte, titulado: “Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Edificios de Concreto” que explica el método del espectro de capacidad utilizado para determinar el punto de desempeño, el cual puede suponerse representativo de la situación donde la capacidad de la estructura es igual a la demanda sísmica.

Para obtener la respuesta máxima estructural se aplicó el método mencionado en la publicación “FEMA 440 Mejora de los Procedimientos de Análisis Sísmico Estático No-Linear”, la cual evalúa el método de capacidad espectral propuesto por el ATC, introduciendo un procedimiento de linealización equivalente. Ello se presenta en el acápite 4.2.3.

## **4.2. Procedimientos de análisis**

### **4.2.1. Análisis estático con fuerzas laterales cíclicas**

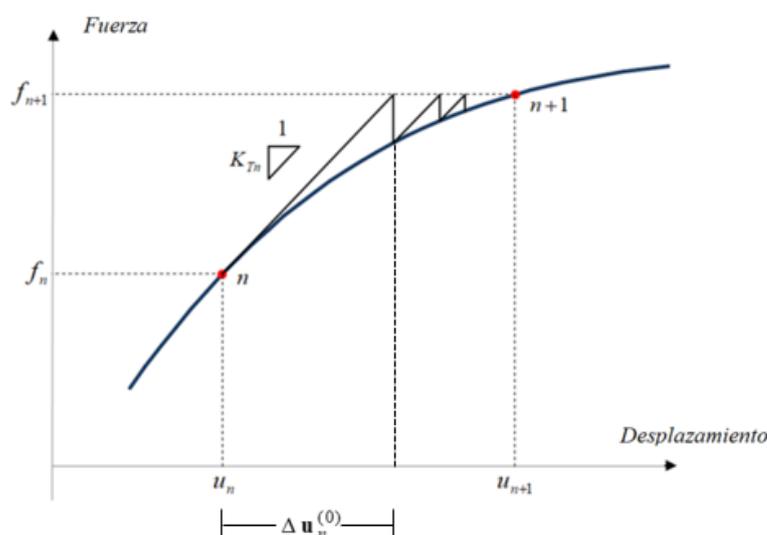
En el acápite 5.1 se presentan resultados del análisis de pórticos de un piso sometidos a fuerzas estáticas cíclicas. Para el análisis se supone que las riostras tienen un comportamiento no-lineal determinado por las curvas bilineales de fuerza-deformación mostradas en la Figura 10, cuyas sucesivas cargas y descargas consideran las reglas de Masing. Para los restantes elementos se supuso un comportamiento lineal.

En el proceso de análisis estático y no-lineal, que en el programa de cómputo empleado (Etabs) se denomina análisis tiempo-historia, se consideran rigideces tangentes dependientes del estado de deformación y de la historia pasada. El proceso podría plantearse como la solución de ecuaciones diferenciales de la forma  $\mathbf{K}_T d\mathbf{u} = d\mathbf{f}$ , donde

la matriz de rigidez tangente  $\mathbf{K}_T$  se obtendría ensamblando rigideces de vigas y columnas en la forma convencional con los aportes variables de las riostras. Sin embargo, resulta más práctico desarrollar un proceso incremental e iterativo, como se muestra esquemáticamente (para un sistema de un grado de libertad) en la Figura 15.

**Figura 15**

*Procedimiento de un análisis incremental e iterativo*



Las fuerzas se suponen aplicadas con incrementos (positivos o negativos) en sucesivas etapas:

$$\mathbf{f}_{n+1} = \mathbf{f}_n + \Delta \mathbf{f}_n \quad (2)$$

Con lo que se tienen incrementos de desplazamientos (y de las correspondientes deformaciones y esfuerzos):

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta \mathbf{u}_n \quad (3)$$

Suponiendo que se ha obtenido la solución (es decir los desplazamientos, las deformaciones y los esfuerzos en los elementos) al finalizar la etapa  $n$ , se podría obtener una primera aproximación de los incrementos de desplazamientos mediante:

$$\mathbf{K}_{Tn} \Delta \mathbf{u}_n^{(0)} = \Delta \mathbf{f}_n \quad (4)$$

Donde  $\mathbf{K}_{Tn}$  es la matriz de rigidez tangente correspondiente a las condiciones al inicio de la etapa de carga. Con esta primera corrección de los desplazamientos, se calculan deformaciones y esfuerzos en los elementos, encontrándose fuerzas desequilibradas,  $\mathbf{r}^{(0)}$ , lo que se explica por haberse considerado la matriz de rigidez tangente como si fuerza constante en todo el incremento de carga. Para corregir tales fuerzas desequilibradas se requiere iterar:

$$\mathbf{K}_{Tn} \Delta \mathbf{u}_n^{(k+1)} = \mathbf{r}^{(k)} \quad (5)$$

Hasta que las fuerzas desequilibradas resultan suficientemente pequeñas.

Cabe anotar que lo habitual es modificar la matriz de rigidez tangente sólo en cada incremento de carga, pero no en las iteraciones que se realizan para reducir las fuerzas desequilibradas.

#### **4.2.2. Análisis no-lineal rápido (FNA)**

Al aplicar el método Fast Non-Linear Analysis (conocido como FNA) en un análisis dinámico no lineal, el modelo deberá ser principalmente lineal elástico y tener un número limitado de elementos no lineales predefinidos (por ejemplo, como los elementos tipo Link, que deberán ser definidos mediante una curva de fuerza vs deformación). Cabe mencionar que los elementos tipo Link pueden representar dispositivos de amortiguamiento, aislamiento o de disipación de energía. Es por ese motivo que, para la presente tesis los dispositivos de disipación de energía (BRB) se modelaron como elementos tipo Link en Etabs, cuyas características se muestran en el acápite 2.4.4.

Entre las situaciones consideradas para estudiar la eficiencia de las riostras de pandeo restringido, tiene particular importancia el análisis dinámico de estructuras sometidas a aceleraciones en la base. Al considerar solo una componente de la acción sísmica, las ecuaciones diferenciales de equilibrio a resolver tienen la forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_s \quad (6)$$

Donde  $\mathbf{u}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{u}}(t)$  y  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$  son matrices columna que agrupan los desplazamientos de cada grado de libertad relativos al desplazamiento del terreno y las correspondientes velocidades y aceleraciones, respectivamente.  $u_s(t)$  es la aceleración del terreno (en la dirección de análisis).  $\mathbf{1}$  es una matriz columna constante, con coeficientes 1 para los grados de libertad traslacionales en la dirección de análisis y 0 para los restantes grados de libertad.  $\mathbf{M}$  es una matriz de masas, que para los análisis realizados se ha supuesto diagonal. En el programa de cómputo empleado sólo se consideran masas concentradas en los grados de libertad traslacionales.  $\mathbf{C}$  es una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente para representar diversas formas de disipación no modeladas directamente. En este caso, no ha sido necesario formar esta matriz, dado el procedimiento que se describe más adelante.  $\mathbf{K}$  es la matriz de rigidez obtenida al ensamblar los aportes de vigas y columnas, que se han supuesto con comportamiento lineal, y de las riostras, cuyo comportamiento no lineal ha sido descrito en el capítulo III.

*a) Caso lineal*

Si la matriz  $\mathbf{K}$  fuera constante, el procedimiento de solución más conveniente sería el basado en una descomposición modal. Para ello se resuelve el problema de valores y vectores característicos:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{M}\boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\Omega}^2 \quad (7)$$

En esta expresión  $\boldsymbol{\varphi}$  es una matriz rectangular, cada una de cuyas columnas corresponde a un modo de vibración, y  $\boldsymbol{\Omega}^2$  es una matriz diagonal que contiene las correspondientes frecuencias angulares al cuadrado.

Dado que los modos de vibración constituyen una base completa, la solución  $\mathbf{u}(t)$  puede entonces expresarse como combinación lineal de los mismos:

$$\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{y}(t) \quad (8)$$

En esta expresión  $\mathbf{y}(t)$  agrupa las componentes de  $\mathbf{u}(t)$  en la dirección de cada modo. Suponiendo que los modos de vibración han sido normalizados respecto a la matriz de masas, se hace uso de las condiciones de ortogonalidad:

$$\boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{I} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Omega}^2 \quad (10)$$

Para obtener un conjunto de ecuaciones diferenciales desacopladas:

$$\ddot{\mathbf{y}}(t) + \boldsymbol{\Lambda} \dot{\mathbf{y}}(t) + \boldsymbol{\Omega}^2 \mathbf{y}(t) = -\boldsymbol{\Gamma} \ddot{u}_g(t) \quad (11)$$

Donde se ha supuesto que la matriz  $\mathbf{C}$  satisface relaciones de ortogonalidad análogas a las que se tienen con  $\mathbf{M}$  y con  $\mathbf{K}$ , obteniéndose la matriz diagonal  $\boldsymbol{\Lambda}$ , cuyos coeficientes significativos son de la forma  $2\zeta_i \omega_i$ , siendo  $\omega_i$  la frecuencia angular del modo  $i$  y  $\zeta_i$  la fracción del amortiguamiento crítico. Por otro lado, la matriz columna  $\boldsymbol{\Gamma} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{1}$  agrupa los factores de participación de cada modo.

La solución de las ecuaciones desacopladas puede hacerse en forma prácticamente exacta.

Al respecto, Wilson (2004) afirma que :

Se ha demostrado que los movimientos sísmicos excitan solamente las frecuencias bajas de la estructura. Típicamente, las aceleraciones sísmicas se registran a incrementos de 200 puntos por segundo. Por lo tanto, el registro de aceleraciones no contiene información por encima de 50 ciclos por segundo. De esta manera, la no inclusión de las frecuencias más altas y las formas de modo del sistema asociadas normalmente no introduce errores (p.179)

Al obtener en cada paso del proceso los desplazamientos  $\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\phi} \mathbf{y}(t)$ , se determinan a la par las correspondientes fuerzas en los elementos y resultados globales, tales como las fuerzas cortantes en cada dirección y en cada nivel.

*b) Caso no lineal*

Cuando se considera que las rigideces varían con el estado de deformación, y por tanto las ecuaciones diferenciales de equilibrio son no-lineales, la superposición modal no es aplicable. La solución podría obtenerse por un procedimiento de integración directa explícito, como el método de diferencia central, o implícito, como los métodos de la familia de Newmark.

Newmark (1959) presentó un método de integración aplicado al análisis dinámico de estructuras, donde se usan las siguientes expresiones:

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (13)$$

Los parámetros  $\gamma$  y  $\beta$ , cuyos valores habituales son  $\gamma = 0.5$  y  $\beta = 0.25$ , son parámetros numéricos que controlan la estabilidad del método.

Detalles de esa clase de procedimientos pueden verse, por ejemplo, en Bathe (2014). Sin embargo, la integración directa de las ecuaciones diferenciales requiere un esfuerzo de cómputo muchísimo mayor que el proceso de superposición modal habitual en el análisis lineal. Una alternativa más conveniente, cuando el número de elementos con comportamiento no lineal es relativamente pequeño, es el proceso de análisis no lineal rápido (FNA, del inglés Fast Non-linear Análisis) propuesto por Wilson (2004).

En el método FNA las rigideces de los elementos con comportamiento no lineal (en esta tesis las riostras) se separan de aquellas de los elementos con comportamiento lineal (vigas y columnas), como si las ecuaciones de equilibrio fueran:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + (\mathbf{K}_{lineal} + \mathbf{K}_{no-lineal})\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_s \quad (14)$$

Si  $\mathbf{K}_{no-lineal} \mathbf{u}(t) = \mathbf{r}(t)$ , las ecuaciones pueden ser escritas en la forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{lineal} \mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_s - \mathbf{r}(t) \quad (15)$$

Y el problema puede ser tratado como si fuera lineal, con unas fuerzas apropiadamente modificadas. Para empezar, se determinan los modos de vibración:

$$\mathbf{K}_{lineal} \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{M}\boldsymbol{\varphi} \boldsymbol{\Omega}^2 \quad (16)$$

Esto requiere que con las componentes supuestas como lineales la estructura sea estable. Entonces, análogamente al caso lineal, la solución se expresa como superposición de los modos de vibración:

$$\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\varphi} \mathbf{y}(t) \quad (17)$$

Con lo que se obtienen ecuaciones desacopladas:

$$\ddot{\mathbf{y}} + \boldsymbol{\Lambda} \dot{\mathbf{y}} + \boldsymbol{\Omega}^2 \mathbf{y} = -\boldsymbol{\varphi}^T (\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_s + \mathbf{r}) \quad (18)$$

Sin embargo, en este caso se requiere iterar. El proceso tiene que desarrollarse con pasos relativamente pequeños. Para cada incremento de tiempo, deben integrarse todas las ecuaciones desacopladas para obtener una primera aproximación de los desplazamientos, para luego corregir las fuerzas  $\mathbf{r}(t)$ , repitiendo esta secuencia hasta lograr convergencia (Abell, 2016).

Al aplicar el método FNA en un análisis dinámico no lineal, el modelo deberá ser principalmente lineal y elástico y tener un número limitado de elementos no lineales predefinidos. En tales condiciones, se requiere casi el mismo tiempo de cómputo que para un análisis dinámico lineal de la misma estructura (Wilson, 2004), lo que resulta muy adecuado para el análisis tiempo-historia.

### 4.2.3. Análisis no-lineal estático (pushover)

El análisis pushover es un método de análisis estático no-lineal cuyo procedimiento analiza una estructura con cargas gravitatorias constantes y posteriormente con cargas horizontales de magnitud monotónicamente creciente y cuya distribución en altura obedece a lo estipulado en la norma peruana de sismorresistencia E.030. Para ello se requiere obtener la curva de capacidad que relaciona la fuerza cortante en la base  $V$  con el desplazamiento en el nivel superior de la estructura  $\Delta_u$ , mediante la aplicación de fuerzas laterales incrementadas en forma monotónica. La cual se convierte a coordenadas espectrales, obteniéndose un espectro de capacidad con las siguientes ecuaciones:

$$S_d = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (19)$$

$$S_d = \frac{\Delta_u}{PF_1 a_{u,1}} \quad (20)$$

Donde:

$W$  : Peso total, incluye la carga muerta y una fracción de la carga viva

$a_{u,1}$  : Amplitud del modo 1 en el último piso

$PF_1$  : Factor de participación modal del 1<sup>er</sup> modo de vibración

$\alpha_1$  : Masa efectiva del 1<sup>er</sup> modo de vibración expresada como fracción de la masa total

$PF_1$  y  $\alpha_1$  se obtienen de la siguiente manera:

$$PF_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (w_i a_{i,1}) / g}{\sum_{i=1}^N (w_i a_{i,1}^2) / g} \right] \quad (21)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (w_i a_{i,1}) / g \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N w_i / g \right] \left[ \sum_{i=1}^N (w_i a_{i,1}^2) / g \right]} \quad (22)$$

Donde:

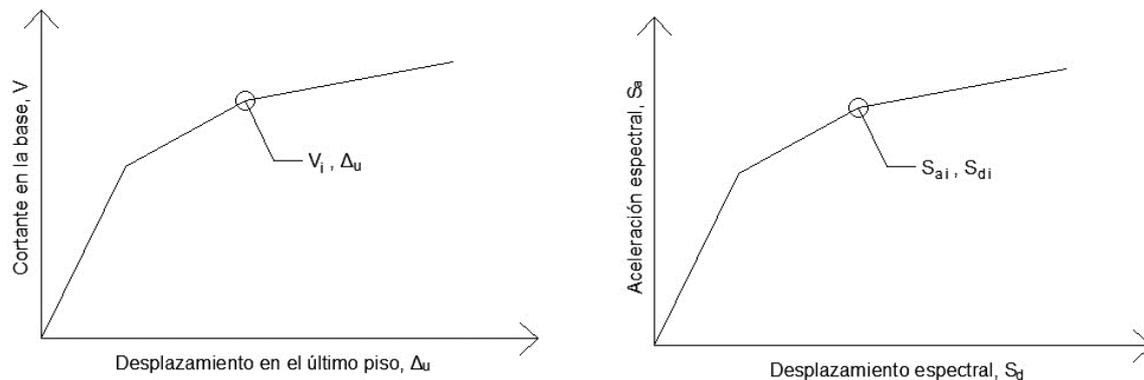
$w_i / g$  : Masa del nivel  $i$

$a_{i,1}$  : Amplitud del modo 1 en el piso  $i$

Gráficamente la conversión de la curva de capacidad en un espectro de capacidad (en formato ADRS) se muestra a continuación:

**Figura 16**

*Conversión de la curva de capacidad en un espectro de capacidad.*



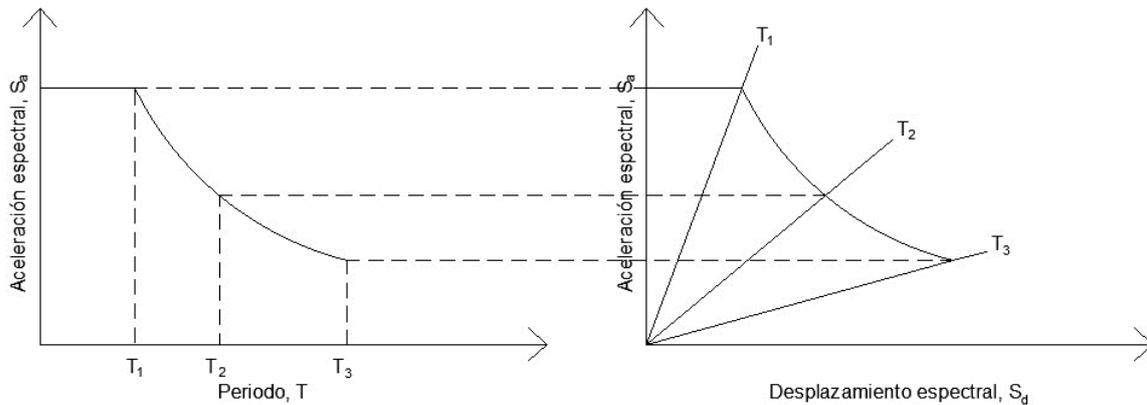
La demanda sísmica, expresada como la pseudoaceleración en función del periodo, para un amortiguamiento del 5%, se convierte también en formato ADRS utilizando la Ecuación (23).

$$S_{dx} = \frac{T_x^2}{4\pi^2} S_{ax} g \quad (23)$$

En la Ecuación (6) el subíndice representa los diferentes puntos de la curva de demanda elástica inicial, obteniendo así periodos de vibración que son representados mediante líneas radiales, como se muestra en la Figura 16.

**Figura 17**

Conversión del espectro de demanda sísmica  $S_a$  Vs  $T$  a  $S_a$  Vs  $S_d$ .



Análogamente se construye una familia de espectros reducidos correspondientes a diferentes valores de amortiguamiento efectivo.

El espectro de capacidad de la estructura debe compararse con el espectro de la demanda sísmica para un amortiguamiento efectivo que requiere determinarse por iteración.

De acuerdo con lo mencionado en el ATC-40, el amortiguamiento equivalente en el rango inelástico  $\beta_{eq}$  es una combinación del amortiguamiento intrínseco de la estructura analizada  $\beta_e$  y el amortiguamiento histerético  $\beta_h$ , lo cual puede representarse mediante la Ecuación (24).

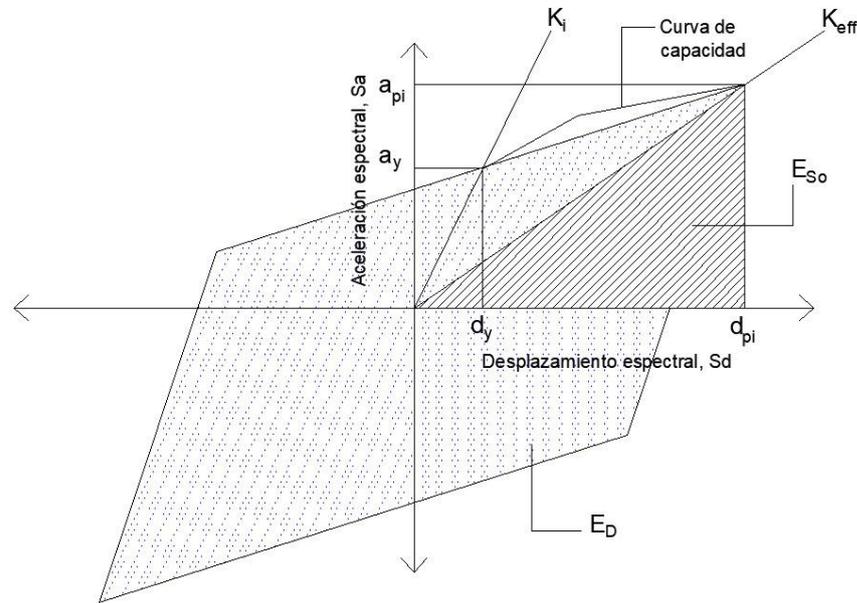
$$\beta_{eq} = \beta_h + \beta_e \tag{24}$$

Donde  $\beta_h$  puede calcularse mediante:

$$\beta_h = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \tag{25}$$

**Figura 18**

*Energía disipada por amortiguamiento.*



Nota. Adaptado de *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (p. 8-14), por el ATC, 1996.

El término  $E_D$  hace referencia a la disipación de energía de la estructura por histéresis y  $E_{S_0}$  es la máxima energía de deformación representada por el área sombreada e indicada en la Figura 18.

Con el objetivo de estimar el amortiguamiento efectivo se deberá representar la curva espectral de capacidad como una curva bilineal, para lo cual deberá definirse el punto de fluencia  $a_y$ ,  $d_y$  y estimarse un punto de desempeño inicial  $a_{pi}$  y  $d_{pi}$ . Si la curva de demanda sísmica reducida se interseca con la curva de capacidad espectral en el punto propuesto, entonces se definirá como el punto de desempeño.

De la Figura 17 se puede deducir que:

$$E_D = 4(a_y \times d_{pi} - a_{pi} \times d_y) \quad (26)$$

$$E_{S_0} = \frac{a_{pi} \times d_{pi}}{2} \quad (27)$$

De acuerdo al ATC-40, este amortiguamiento idealiza los lazos de histéresis que varían dependiendo del comportamiento estructural, por lo que se aplicará un factor  $k$ ; así, el término pasa a llamarse amortiguamiento efectivo.

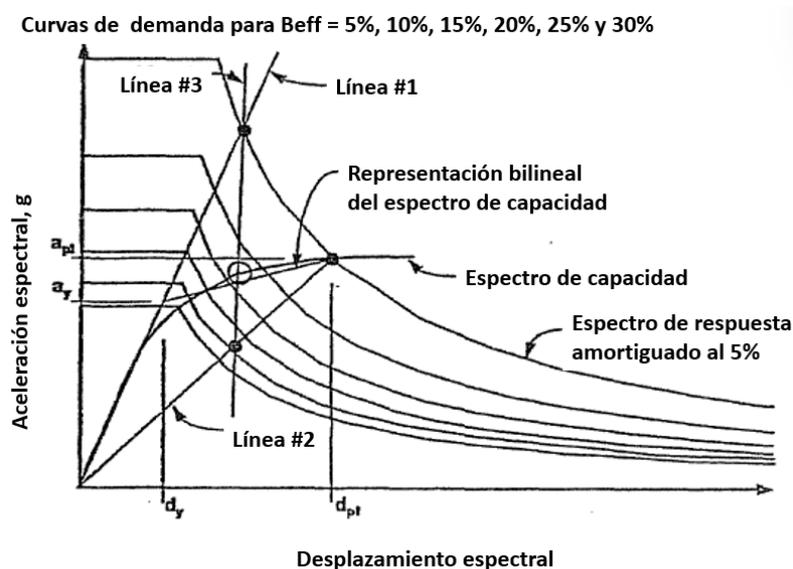
$$\beta_{eff} = k \frac{63.7(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \quad (28)$$

Para calcular el punto de desempeño, como se muestra en la Figura 19, se extiende la línea #1, línea de rigidez inicial, hasta intersectar el espectro de demanda sísmica con amortiguamiento efectivo de 5%. Luego se traza la línea #2 desde el origen hasta el punto  $(a_{pi}, d_{pi})$ . Posteriormente se traza la línea #3 desde el punto de intersección de la línea #1 con la curva de amortiguamiento del 5% hasta la intersección de la línea #2 con el espectro reducido correspondiente al amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  determinado en la Ecuación (28). La intersección de la línea #3 con el espectro de la curva de capacidad representa el punto de desempeño estimado  $(a_{p2}, d_{p2})$ .

Si el desplazamiento  $d_{p2}$  es  $\pm 5\%$  del desplazamiento  $d_{pi}$  supuesto inicialmente,  $(a_{p2}, d_{p2})$  se toma como el punto de desempeño, lo que indicaría que  $d_{p2}$  representa el desplazamiento estructural máximo esperado para el sismo de demanda considerado. En caso contrario, se considera como un nuevo punto de estimación y se recalcula el procedimiento.

**Figura 19**

Punto de desempeño de acuerdo con el procedimiento del ATC-40.



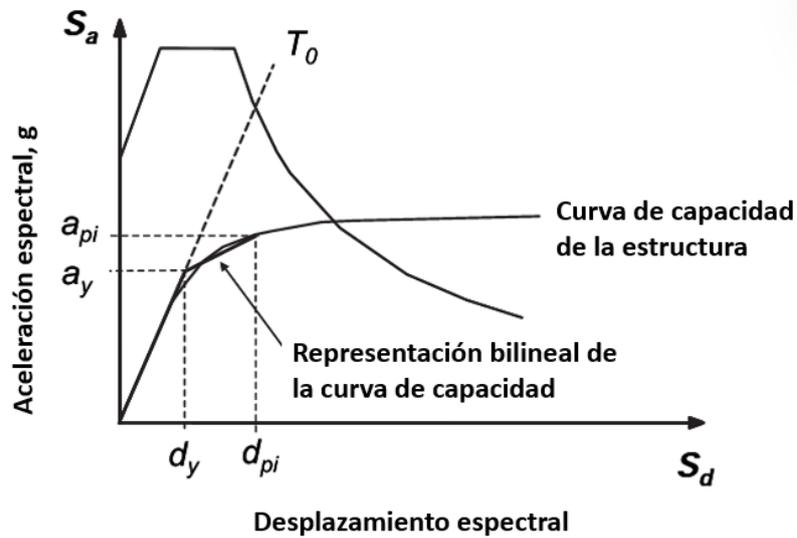
Nota. Adaptado de *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (p. 8-29), por el ATC, 1996.

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) se encarga de fomentar prácticas de diseño y construcción con el objetivo de minimizar los daños generados por terremotos. “FEMA 440 Mejora de los Procedimientos de Análisis Sísmico Estático No-Lineal” es una publicación que evalúa el método de capacidad espectral propuesto por el ATC, introduciendo un procedimiento de linealización equivalente, el cual establece que la respuesta máxima de un sistema inelástico se puede aproximar como la respuesta máxima de un sistema lineal de rigidez reducida y amortiguamiento aumentado con un periodo efectivo y un amortiguamiento efectivo que están en función de la ductilidad de la estructura.

De acuerdo con el procedimiento mencionado por el ATC, se estima un punto de desempeño inicial para representar la curva de capacidad espectral como una curva bilineal (Figura 20), ello permite calcular la rigidez post elástica  $\alpha$  y la ductilidad  $\mu$ .

**Figura 20**

*Representación bilineal del espectro de capacidad.*



Nota. Adaptado de FEMA-440 *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p. 6-7), por ATC, 2005.

$$\alpha = \frac{\left( \frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y} \right)}{\left( \frac{a_y}{d_y} \right)} \quad (29)$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} \quad (30)$$

$\alpha$  y  $\mu$  representan los parámetros que permiten calcular el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  y el periodo efectivo  $T_{eff}$ .

De acuerdo con lo mencionado en FEMA-440, el proceso de linealización equivalente requiere del uso de un factor de reducción  $B$  para ajustar el espectro de respuesta inicial a la demanda con amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ .

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_o}{B(\beta_{eff})} \quad (31)$$

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_{eff}} \quad (32)$$

El uso del periodo efectivo y el amortiguamiento efectivo determina un desplazamiento máximo correspondiente a la intersección del periodo efectivo radial con la curva del espectro de respuesta para el amortiguamiento efectivo (Figura 21), obtenido al aplicar la Ecuación (31) y la Ecuación (32).

Se procede a multiplicar las ordenadas del espectro de aceleración con amortiguamiento efectivo  $(S_a)_\beta$  por el factor de modificación  $M$ , como se muestra en la Ecuación (33), con el fin de obtener el espectro de respuesta aceleración-desplazamiento modificado.

$$M = \frac{a_{max}}{a_{eff}} \quad (33)$$

Donde  $a_{max}$  es la aceleración máxima y  $a_{eff}$  es la aceleración efectiva. Los valores de aceleración están relacionados directamente con los periodos correspondientes:

$$M = \left( \frac{T_{eff}}{T_{sec}} \right)^2 = \left( \frac{T_{eff}}{T_o} \right)^2 \left( \frac{T_o}{T_{sec}} \right)^2 \quad (34)$$

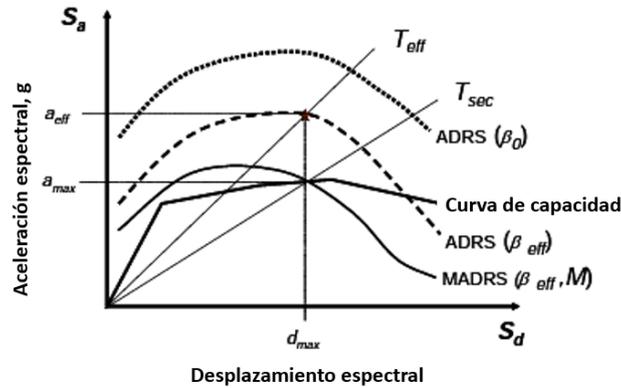
De modo que:

$$\left( \frac{T_o}{T_{sec}} \right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \quad (35)$$

Dado que el período efectivo  $T_{eff}$  y el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  están en función de la ductilidad, el cálculo de un desplazamiento máximo usando linealización equivalente no es directo y requiere un procedimiento de solución iterativo o gráfico.

**Figura 21**

*Espectro de respuesta de aceleración-desplazamiento modificado para uso con período secante  $T_{sec}$ .*

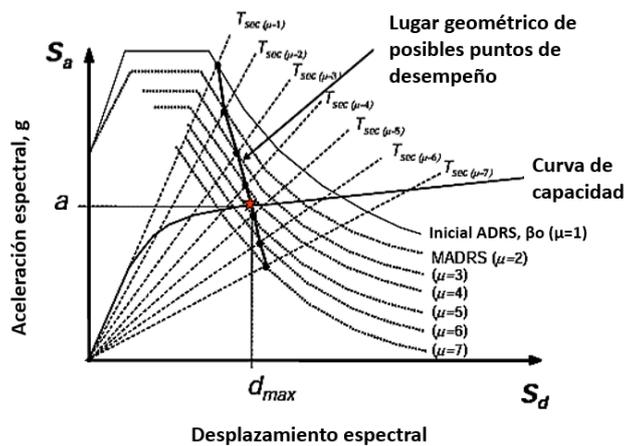


Nota. Adaptado de FEMA-440 *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p. 6-5), por ATC, 2005.

El período secante  $T_{sec}$  es definido como el punto en la curva de capacidad correspondiente al desplazamiento máximo. De la intersección del período secante  $T_{sec}$  con la curva del espectro de respuesta modificado se genera un posible punto de desempeño inicial que se incrementa y disminuye para generar una serie de posibles puntos de desempeño.

**Figura 22**

*Lugar geométrico de posibles puntos de desempeño del espectro de respuesta de aceleración-desplazamiento modificado.*



Nota. Adaptado de FEMA-440 *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p. 6-9), por ATC, 2005.

El punto de desempeño real corresponde a la intersección del lugar geométrico de posibles puntos de desempeño con la curva de capacidad espectral.

#### **4.3. Características de estructuras analizadas**

Se analizaron estructuras flexibles de baja altura, de 1 y 5 pisos; y de mediana altura, de 10 y 15 pisos, cuyas características físicas y geométricas se definieron al considerar el periodo fundamental de vibración como 0.12 multiplicado por el número de pisos. Es así como, se analizaron estructuras de 5, 10 y 15 pisos con periodos fundamentales de vibración de 0.6 s, 1.2 s y 1.8 s, respectivamente. Con el objetivo de obtener lo anteriormente expresado, las estructuras son de acero A36 y están compuestas por pórticos de cuatro vanos de 5 m de luz y 3.5 m de alto en todos los pisos, cuyas secciones de viga y columna son W30X90 y W27X368.

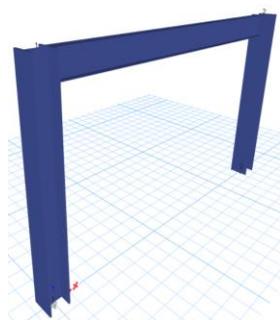
En adición a ello, también se analizó la respuesta de una estructura de 1 piso con la implementación de una riostra de pandeo restringido cuya rigidez es aproximadamente igual a la rigidez lateral del pórtico, y posteriormente con una rigidez tres veces mayor a la rigidez lateral del pórtico. Se considerará la implementación de las riostras BRB 1 y BRB 4.5. A partir de ello se pudo definir las siguientes características del pórtico: La estructura de un piso es de acero A36, compuesta por un pórtico de 6 m de luz y 4 m de alto, cuyas secciones de viga y columna son W18X50 y W14X145, respectivamente. Esta estructura también fue analizada con una rigidez diez veces mayor, con el fin de analizar el comportamiento de las riostras en una estructura más rígida; ello se muestra en el acápite 5.2.

Las estructuras de 5, 10 y 15 pisos fueron analizadas con modelos tridimensionales (Figura 23) cuyo análisis se hizo con fuerzas aplicadas en cada dirección de forma independiente.

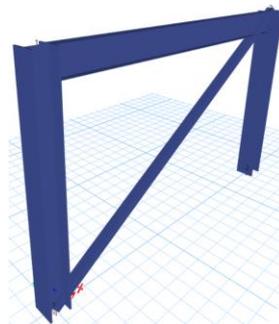
A continuación, se presentan gráficas representativas de las estructuras estudiadas. Las imágenes de la izquierda muestran las estructuras estudiadas sin BRB y las imágenes de la derecha muestran las mismas estructuras con BRB.

**Figura 23**

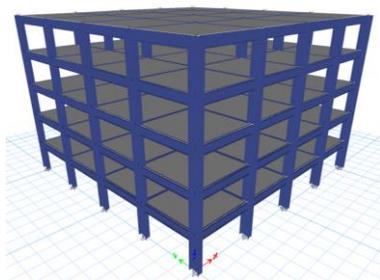
*Estructuras de 1, 5, 10 y 15 pisos modeladas en ETABS.*



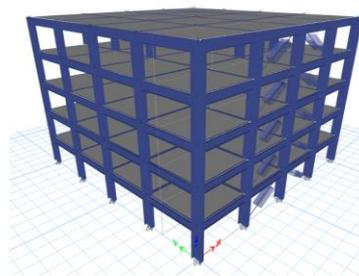
(a) Estructura de 1 piso sin BRB



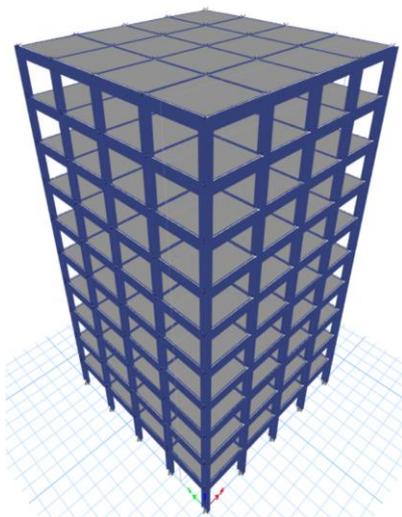
(b) Estructura de 1 piso con BRB



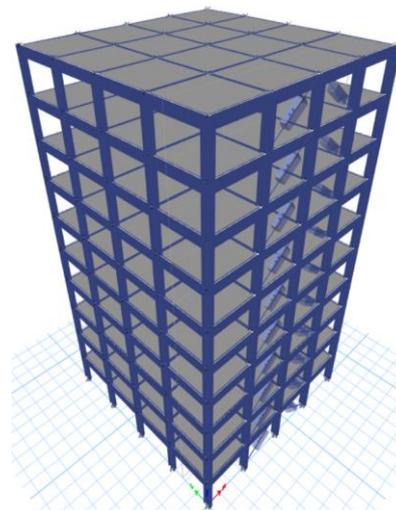
(c) Estructura de 5 pisos sin BRB



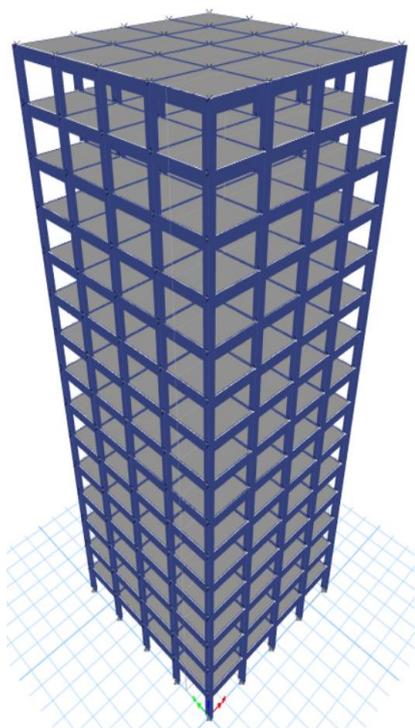
(d) Estructura de 5 pisos con BRB



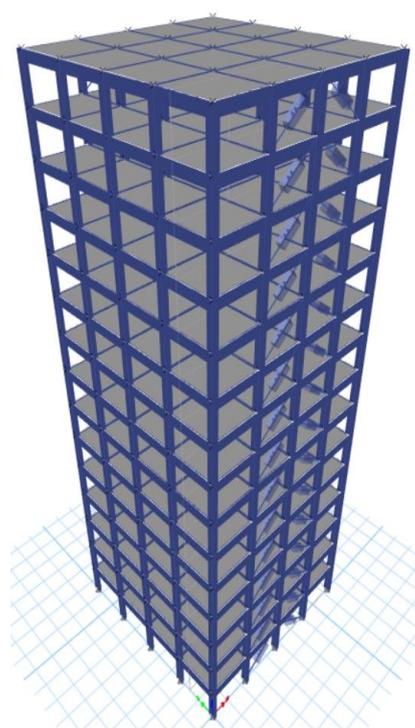
(e) Estructura de 10 pisos sin BRB



(f) Estructura de 10 pisos con BRB



(g) Estructura de 15 pisos sin BRB



(h) Estructura de 15 pisos con BRB

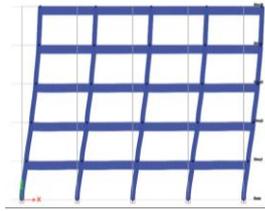
*Nota:* En la estructura de 1 piso se ha usado un solo arriostramiento en diagonal y en las estructuras de 5, 10 y 15 pisos se han usado cuatro arriostramientos en diagonal por piso, dos pertenecientes al plano XZ con  $Y=0$  m, y dos pertenecientes al plano XZ con  $Y=20$  m. No se colocaron riostras en los planos paralelos al plano YZ.

#### 4.4. Principales modos de vibración de las estructuras analizadas

En la Figura 24 se presentan gráficamente los principales modos de vibración de las estructuras de 5, 10 y 15 pisos sin riostras, los cuales corresponden al 1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> modo de vibración con componentes significativas en la dirección X. Tratándose de las estructuras sin riostras, son en este caso iguales a los primeros modos de vibración con componentes significativas en dirección Y.

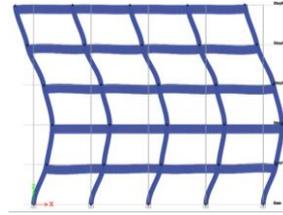
**Figura 24**

1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> modo de vibración de las estructuras de 5, 10 y 15 pisos.



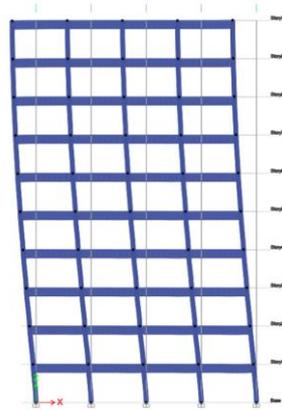
(a) 1<sup>er</sup> modo de vibración

$$T = 0.60 \text{ s}$$



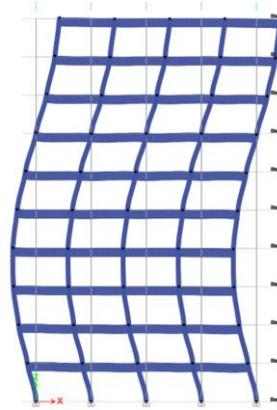
(b) 2<sup>do</sup> modo de vibración

$$T = 0.20 \text{ s}$$



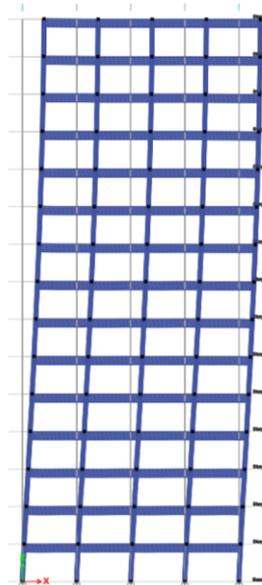
(c) 1<sup>er</sup> modo de vibración

$$T = 1.20 \text{ s}$$



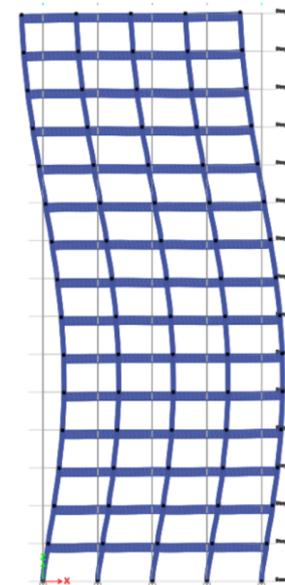
(d) 2<sup>do</sup> modo de vibración

$$T = 0.40 \text{ s}$$



(e) 1<sup>er</sup> modo de vibración

$$T = 1.80 \text{ s}$$



(f) 2<sup>do</sup> modo de vibración

$$T = 0.60 \text{ s}$$

El periodo fundamental considerado para cada estructura corresponde al número de pisos multiplicado por 0.12, ello con el objetivo de analizar estructuras flexibles y obtener resultados sobre el comportamiento de las riostras al disipar la energía proveniente de las fuerzas sísmicas. Por el contrario, si se tuvieran estructuras poco flexibles, las riostras de pandeo restringido no serían una solución conveniente, lo cual será explicado más adelante en el Capítulo V.

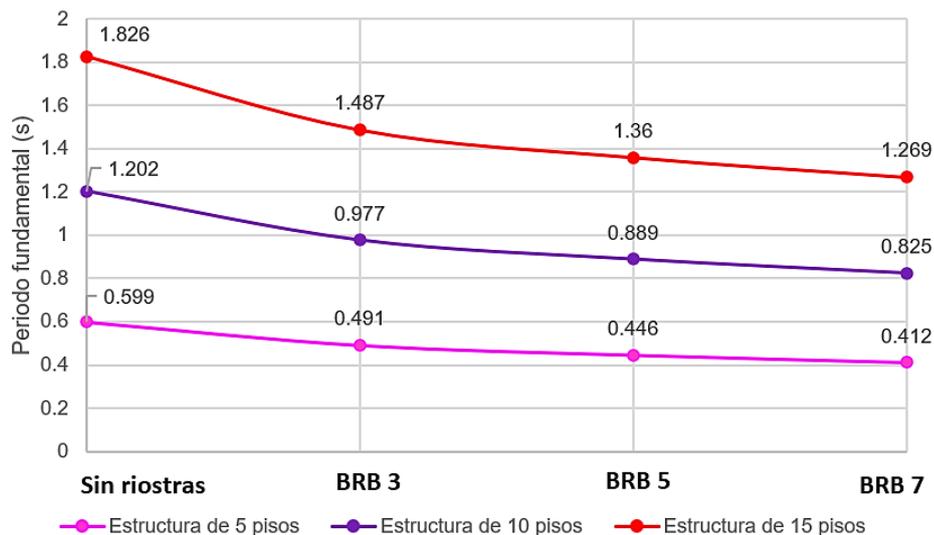
#### 4.5. Modificación del período fundamental y factores de participación

Las riostras de pandeo restringido siempre aportan rigidez, aun cuando para acciones sísmicas de baja intensidad no disipen energía por histéresis. En este acápite se considera la rigidez inicial de las riostras, como si tuvieran un comportamiento lineal.

Cabe mencionar que mientras más rígida sea la BRB, el periodo fundamental de la estructura disminuye (Figura 25). El periodo fundamental de las estructuras con riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7 disminuye respecto a la estructura sin riostras en aproximadamente un 20%; 25% y 30%, respectivamente.

**Figura 25**

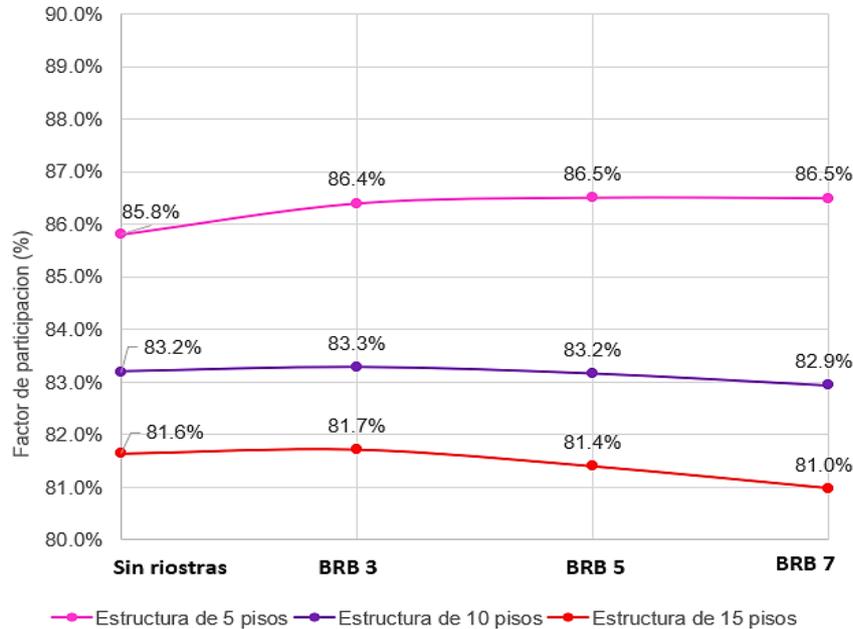
*Periodo fundamental de las estructuras de 5, 10 y 15 pisos.*



Para las estructuras analizadas de 5, 10 y 15 pisos, el 1<sup>er</sup> modo de vibración es el predominante, con un factor mínimo de participación del 81% (Figura 26).

**Figura 26**

*Factor de participación del 1<sup>er</sup> modo de vibración en estructuras de 5, 10 y 15 pisos en la dirección X.*



#### 4.6. Registros sísmicos considerados para el análisis tiempo-historia

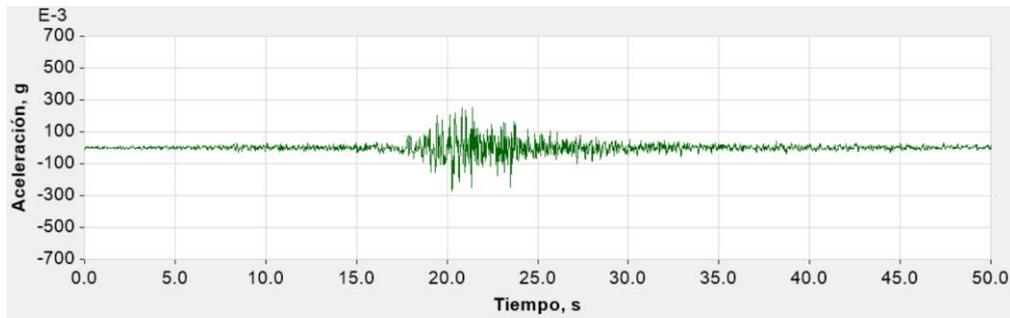
##### 4.6.1. Registros sísmicos

Para el análisis tiempo-historia se usaron dos registros sísmicos, el primero corresponde al evento sísmico ocurrido en Lima en octubre de 1966, para el cual se ha considerado el registro sísmico obtenido de la estación denominada Parque de la Reserva (Figura 27). Actualmente esta información se puede obtener del CISMID (Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres) de la Facultad de Ingeniería Civil perteneciente a la Universidad Nacional de Ingeniería.

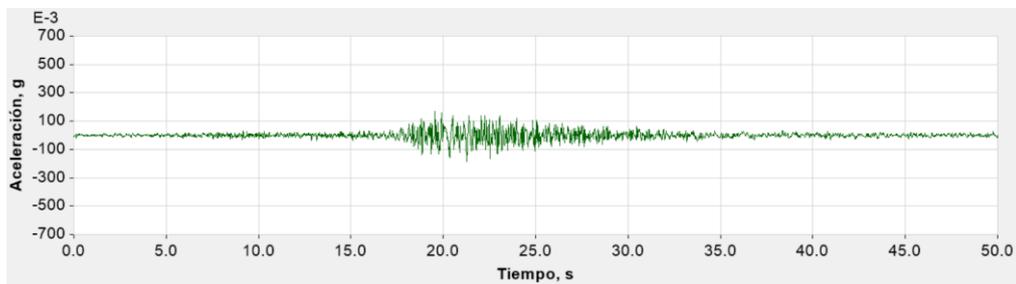
El segundo registro sísmico considerado para el análisis corresponde al evento sísmico ocurrido en el centro-Sur de Chile, en la región del Maule en febrero de 2010, para el cual se ha considerado la información obtenida de RENADIC (Red Nacional de Acelerógrafos) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, cuyo registro sísmico se obtuvo de la estación denominada Constitución (Figura 28).

### Figura 27

*Acelerograma del sismo ocurrido en Lima en 1966*



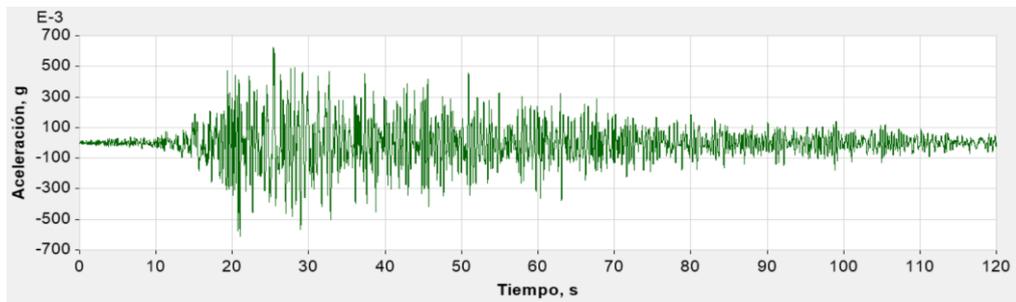
(a) Dirección Norte-Sur



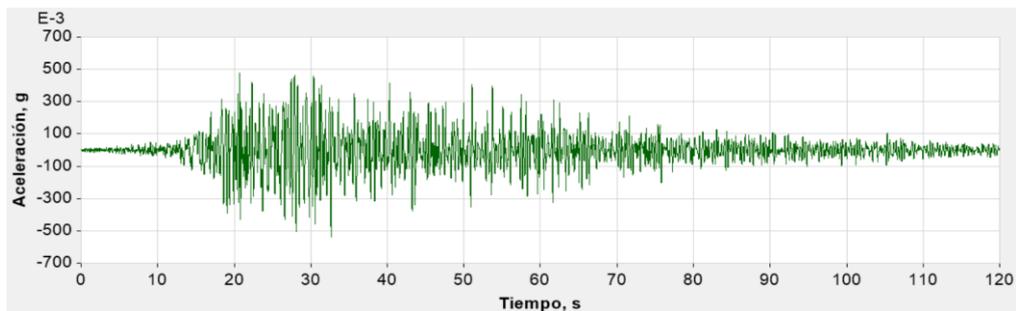
(b) Dirección Este-Oeste

### Figura 28

*Acelerograma del sismo ocurrido en Maule en 2010*



(a) Dirección Norte-Sur



(b) Dirección Este-Oeste

En la Figura 27 y la Figura 28 se observa que el sismo ocurrido en Maule registra mayores valores de aceleración respecto al sismo ocurrido en Lima, lo que también permitirá conocer la respuesta sísmica de las estructuras con riostras de pandeo restringido ante eventos sísmicos de distinta intensidad.

Para la presente tesis se han usado las componentes de los registros sísmicos con los mayores valores de aceleración; en este caso corresponden a la dirección Norte-Sur.

En la Tabla 4 se muestran las características de cada registro sísmico usado para los análisis tiempo-historia.

**Tabla 4**

*Características de los registros sísmicos considerados*

Fecha	Sismo	País	Magnitud (Mw)	Max aceleración (cm/s <sup>2</sup> )
17/10/1966	Lima	Perú	8.1	268.240
27/02/2010	Maule	Chile	8.8	613.808

#### **4.6.2. Registros sísmicos ajustados al espectro de la Norma E.030.**

También se realizó el análisis tiempo-historia con los registros sísmicos del evento ocurrido en Lima en 1966 y el evento ocurrido en Maule en 2010, ambos ajustados al espectro de la Norma E.030 cuyas características se explican en el acápite 4.1.1.

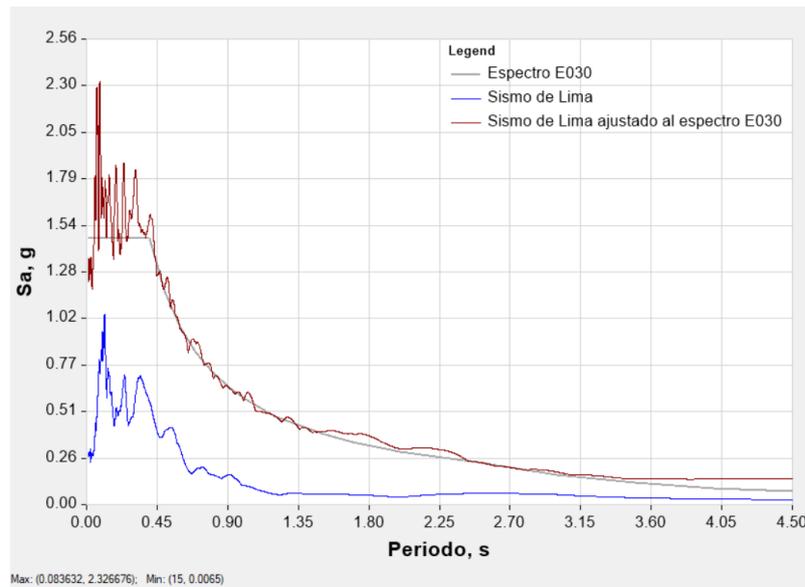
Uno de los métodos más utilizados para compatibilizar un espectro de respuesta con otro espectro de respuesta objetivo es denominado método de dominio de tiempo, el cual se encuentra disponible en el software ETABS.

Este método consiste en agregar iterativamente un conjunto de ondas a un registro de aceleraciones hasta que el espectro de respuesta resultante coincida con el espectro de respuesta objetivo. La adición de una onda modifica los picos en una respuesta espectral o incluso puede generar un segundo pico más grande. (Generation of Spectrum-

Compatible Time-History Functions by Modifying a Reference Time Series in the Frequency/Time Domain, s.f., como se citó en Lilhanand, K y Tseng, W. S., 1987).

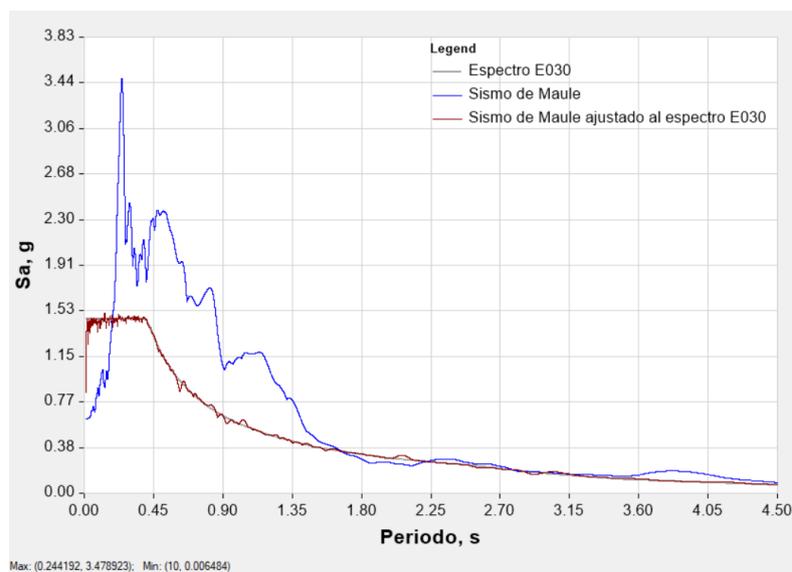
**Figura 29**

*Aceleración espectral del sismo ocurrido en la ciudad de Lima*



**Figura 30**

*Aceleración espectral del sismo ocurrido en la región de Maule*

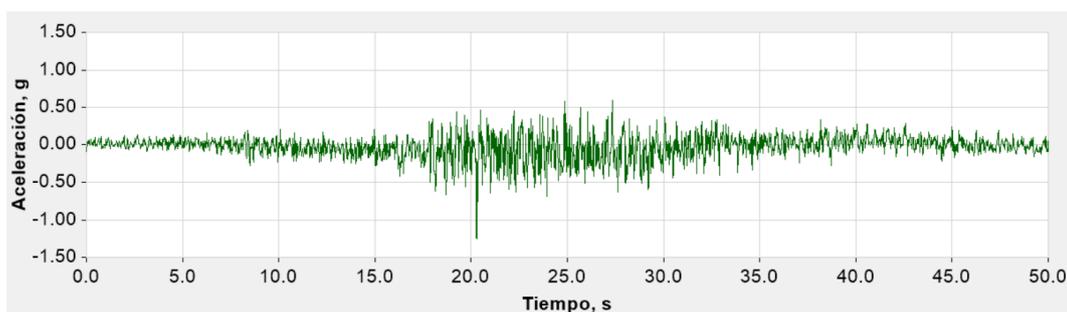


En la Figura 29 y en la Figura 30 se observa que el espectro de diseño en base a la norma E.030 es mayor que el espectro de pseudo aceleraciones del sismo ocurrido en

Lima y menor al espectro de pseudo aceleraciones del sismo ocurrido en Maule, lo cual permitirá conocer el comportamiento de las estructuras ante registros sísmicos diferentes. Cabe mencionar que el sismo de Lima ajustado al espectro de la norma E.030 tiene una mayor cantidad de picos en comparación al sismo de Maule ajustado al mismo espectro.

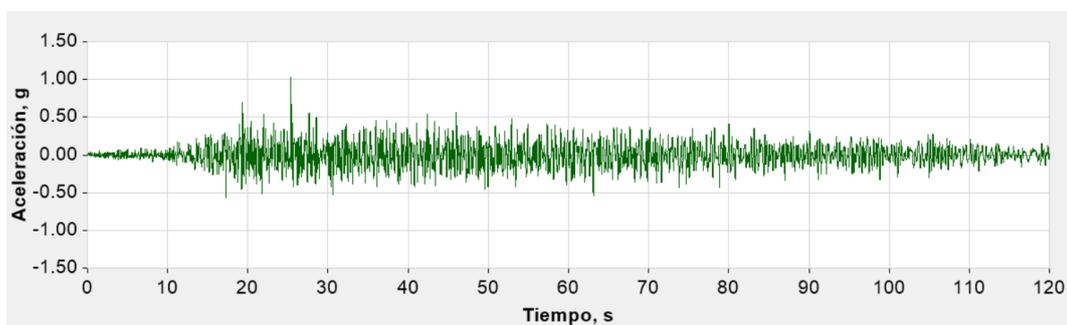
### Figura 31

Registro sísmico de Lima de 1966 ajustado al espectro de la norma E.030



### Figura 32

Registro sísmico de Maule de 2010 ajustado al espectro de la norma E.030



## 4.7. Comentarios finales

En este capítulo se presentaron las características de las estructuras estudiadas con riostras de pandeo restringido; así como las fuerzas sísmicas actuantes en las estructuras de baja y de mediana altura representadas por el registro acelerométrico del sismo de Lima en 1966 y el registro del sismo de Maule en 2010. Cabe mencionar que, el sismo ocurrido en la ciudad de Maule es de mayor magnitud y distinto contenido de

frecuencias respecto al sismo ocurrido en Lima, lo que permitirá conocer el comportamiento de las estructuras ante sismos de diferentes características.

Se revisaron los siguientes procedimientos de análisis usados en la tesis: El análisis-tiempo historia, el análisis no-lineal rápido y el análisis no-lineal estático; de los cuales, el método que ha sido más utilizado para el análisis computacional en la tesis es el análisis no-lineal rápido (FNA), el cual permite analizar estructuras con un número limitado de elementos no lineales (las riostras de pandeo restringido BRB) de forma rápida.

## CAPÍTULO V: ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE LAS RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO

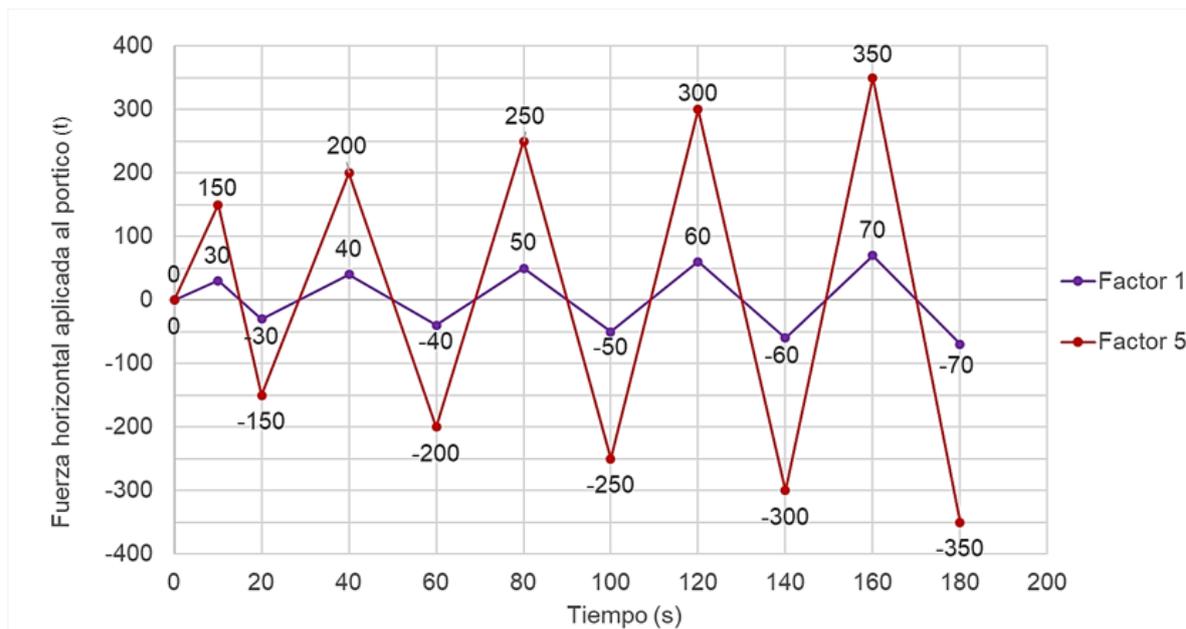
En el presente capítulo se analizan estructuras de baja y de mediana altura que incorporan riostras de pandeo restringido. El objetivo de este capítulo es conocer el comportamiento de las estructuras analizadas ante cargas estáticas y cargas dinámicas correspondientes a los registros sísmicos originales de Lima y de Maule, y registros sísmicos modificados y ajustados a un espectro definido, obteniendo así, la fuerza cortante en columnas, desplazamientos por piso, y el comportamiento histerético de los dispositivos en el rango lineal y no lineal, así como también el punto de desempeño para cada uno de los dispositivos analizados mediante el análisis no lineal estático (pushover).

### 5.1. Análisis con cargas estáticas cíclicas en una estructura de un piso

Se analizó la estructura de un piso, cuyas características se comentan en el acápite 4.3 (Figura 23). A la estructura se le aplicaron fuerzas horizontales de carga y descarga multiplicadas por un factor de uno y luego, por un factor de cinco (Figura 33).

**Figura 33**

*Ciclos de carga y descarga aplicados al pórtico de un piso.*

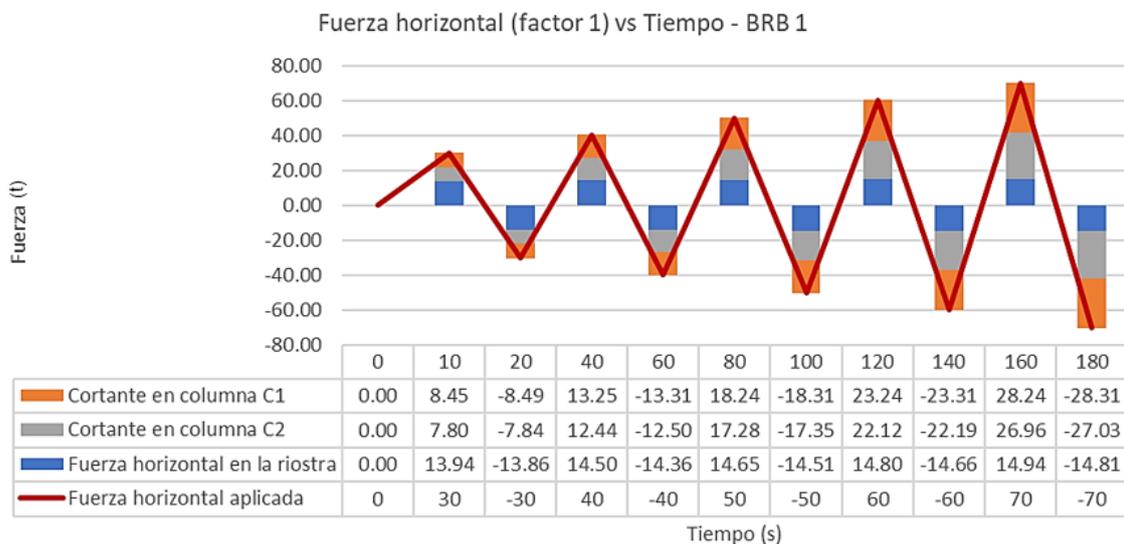


El pórtico se encuentra arriostrado diagonalmente con riostras tipo BRB 1 y luego con riostras tipo BRB 4.5 que aportan una rigidez respecto a la rigidez lateral del pórtico de 1 a 1 y de 3 a 1, respectivamente. Las características de las riostras se comentan en el acápite 2.4.4.

Al analizar el pórtico con una riostra tipo BRB 1, ante la fuerza horizontal mostrada en la Figura 33 con el factor uno, se obtiene que la componente horizontal de la fuerza axial perteneciente a la BRB representa aproximadamente el 50% de la fuerza aplicada en los primeros ciclos de carga y descarga. Posteriormente, va disminuyendo respecto al aumento de la fuerza aplicada, lo que indicaría que se requiere de una riostra con mayor rigidez para resistir fuerzas mayores y así, convertirse en el elemento principal de absorción de energía (Figura 34).

**Figura 34**

*Fuerza horizontal en BRB 1 y fuerza cortante en columnas ante una fuerza horizontal aplicada de factor uno.*

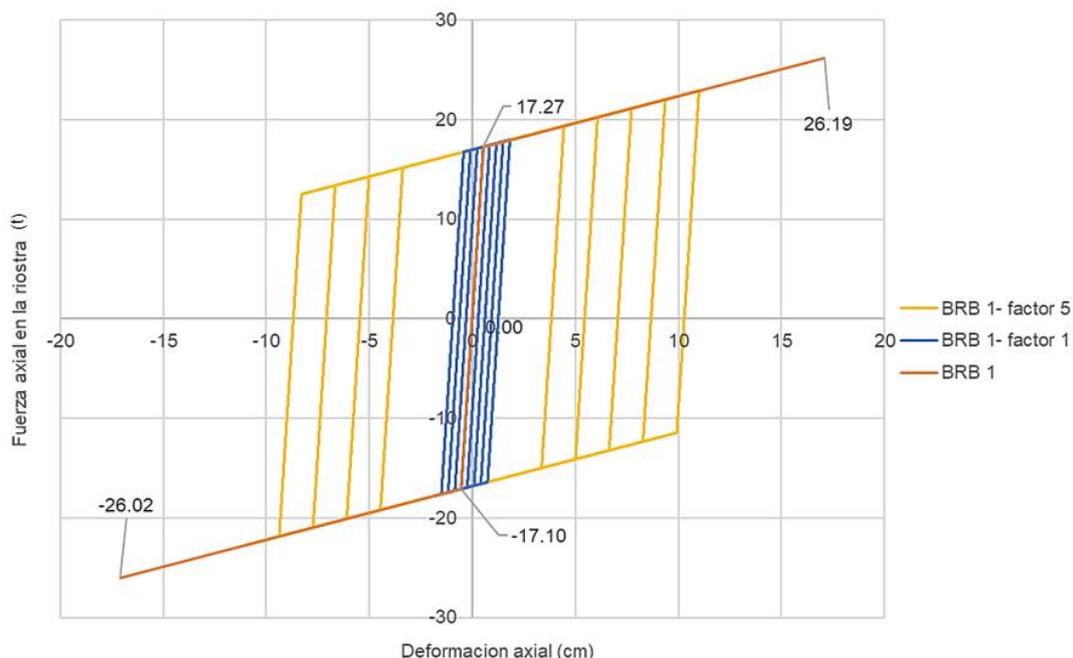


En la Figura 35 se muestra el diagrama de fuerza axial en la riostra vs la deformación axial en la riostra, donde la BRB 1 resiste cargas por compresión y cargas por tracción, lo que representa su comportamiento histerético ante ciclos de carga y descarga.

Al multiplicar las fuerzas actuantes por un factor de cinco se observa que los lazos de histéresis de la riostra se amplían y los valores máximos de capacidad de carga a tracción y compresión por cada ciclo de carga y descarga pertenecen a la curva bilineal definida para cada riostra en el acápite 2.4.4.

**Figura 35**

*Fuerza axial vs la deformación axial de BRB 1.*



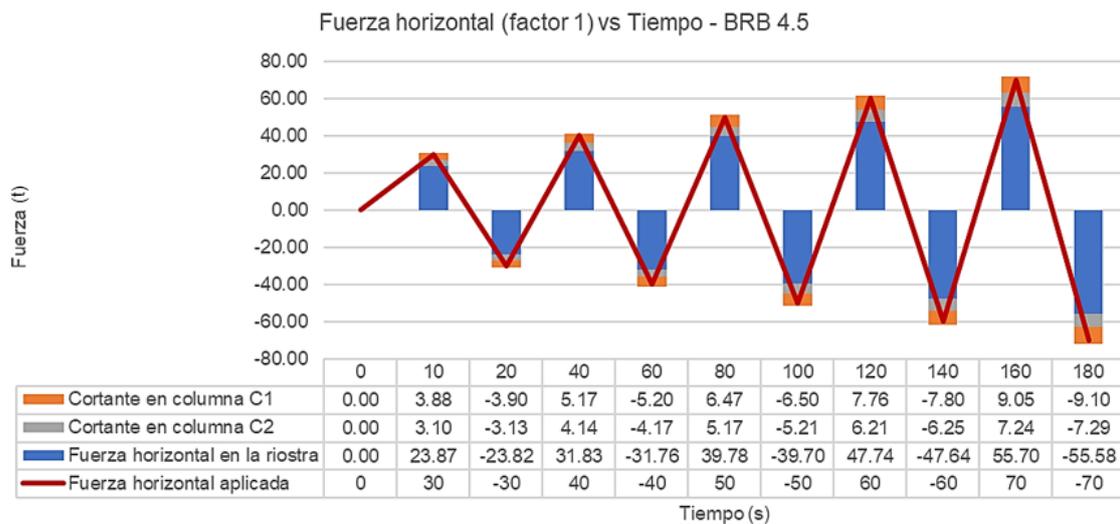
Al realizar el mismo análisis, pero esta vez con una riostra más rígida, BRB 4.5, se obtiene que la componente horizontal de la fuerza axial perteneciente a la BRB representa en promedio el 80% de la fuerza aplicada, restando alrededor de un 20% de fuerza horizontal para las columnas del pórtico.

En la Figura 36 se observa que, ante la fuerza horizontal multiplicada por el factor de uno, la riostra BRB 4.5 permanece en el rango elástico, si bien se reduce la fuerza cortante en las columnas, la riostra es tres veces más rígida para el pórtico analizado y las cargas aplicadas sobre el mismo, por lo que con la fuerza de factor uno la riostra permanece en el rango lineal. Sin embargo, si la fuerza horizontal aplicada fuera cinco veces mayor, la BRB pasaría a actuar en el rango inelástico y la fuerza cortante en las

columnas disminuiría en menor medida, aproximadamente en un 50% de la fuerza aplicada en los primeros ciclos de carga y descarga, luego, disminuiría a medida que aumenta la fuerza.

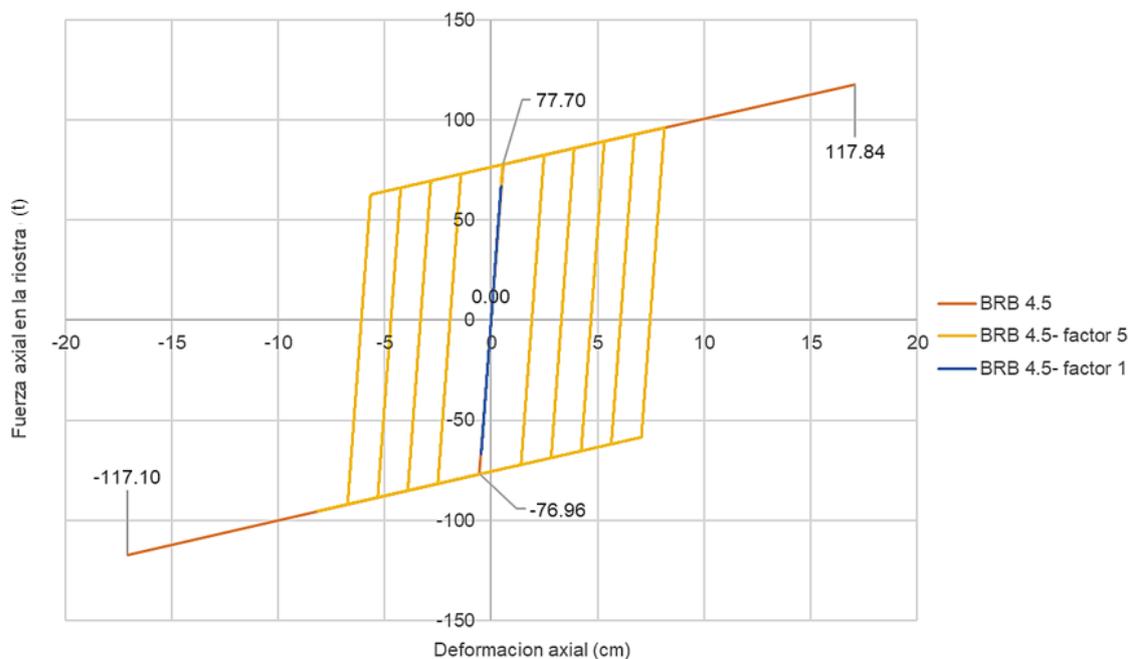
**Figura 36**

*Fuerza horizontal en BRB 4.5 y fuerza cortante en columnas ante una fuerza horizontal de factor uno.*



**Figura 37**

*Fuerza axial vs la deformación axial de la BRB 4.5.*

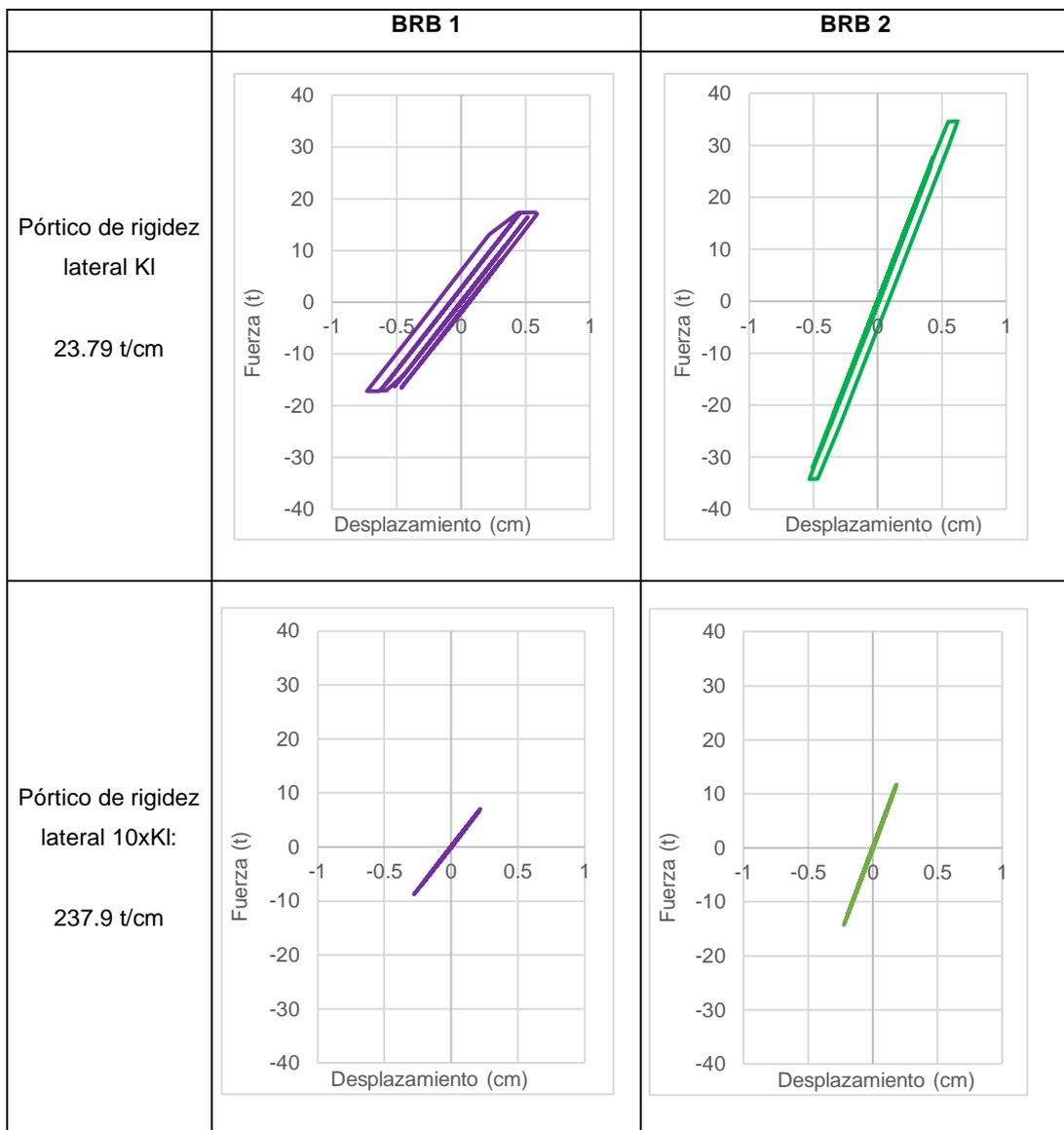


## 5.2. Análisis tiempo-historia con cargas dinámicas en una estructura rígida

Se analizó la estructura de un piso con una rigidez diez veces mayor a la original con el objetivo de conocer el comportamiento de las riostras. Se usó la BRB 1 y luego, la BRB 2, cuyas características se comentan en el acápite 2.4.4. A diferencia del acápite 5.1, a esta estructura se le aplicaron cargas dinámicas del sismo ocurrido en Lima en 1966 en la dirección Norte-Sur (Figura 27).

**Figura 38**

*Fuerza axial vs deformación axial de la BRB 1 y BRB 2 en la estructura de 1 piso.*



Los resultados muestran que para el pórtico de un piso diez veces más rígido que el originalmente descrito en el acápite 4.3, las riostras permanecen en el rango elástico mientras que para el pórtico original se presentan lazos de histéresis en las BRB, es decir, las riostras pasan al rango inelástico, lo que indica que si el pórtico es suficientemente rígido las BRB actúan como cualquier riostra convencional, por lo que no sería una solución apropiada, mas si la estructura es flexible las riostras muestran un comportamiento histerético en compresión y tracción.

### 5.3. Análisis tiempo-historia con cargas dinámicas en estructuras flexibles

Se analizaron las estructuras de 5, 10 y 15 pisos cuyas características se comentan en el acápite 4.3 (Figura 23) con riostras tipo BRB 3, BRB 5 y BRB 7. A cada estructura se le aplicaron cargas dinámicas del sismo ocurrido en Lima en la dirección Norte-Sur (Figura 27) y luego, del sismo ocurrido en Maule en la dirección Norte-Sur (Figura 28). Cabe mencionar que se aplicaron riostras del mismo tipo en todos los pisos de la estructura.

#### 5.3.1. Estructura de 5 pisos

- **Desplazamientos por piso**

De acuerdo con los registros sísmicos mostrados en el acápite 4.6, es de esperarse que los desplazamientos de la estructura ante las cargas dinámicas del sismo de Maule sean mayores a las generadas por el sismo ajustado al espectro de la E.030 y a su vez estas sean mayores a los desplazamientos generados por el sismo real de Lima.

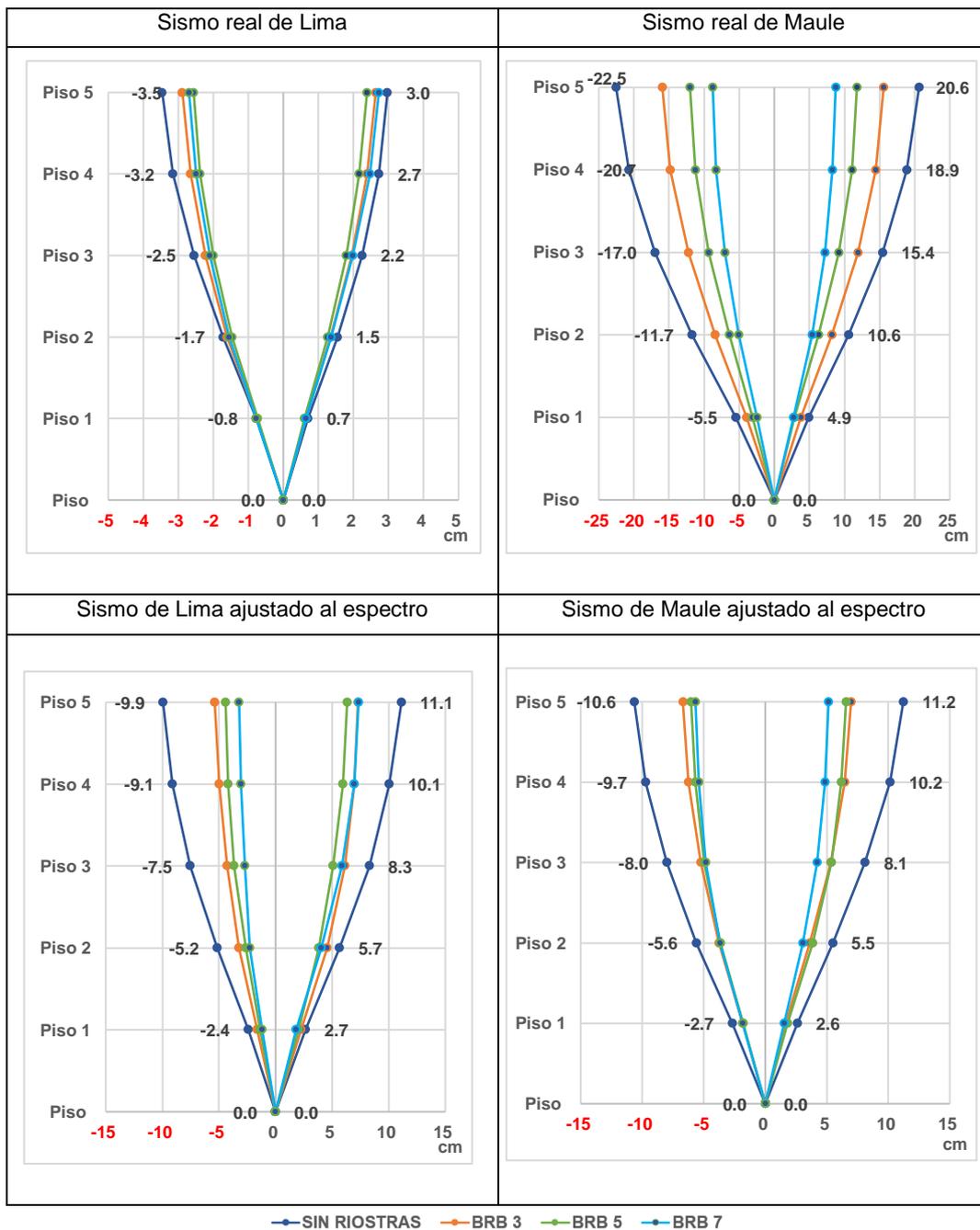
Los valores numéricos mostrados en la Figura 39 representan los desplazamientos de la estructura sin riostras, con el objetivo de tener una mejor comparativa con los desplazamientos obtenidos con cada tipo de BRB usada.

En la Figura 39 se muestra que para el sismo real de Maule actuante en la estructura existe un comportamiento más ordenado de los desplazamientos de cada piso (considerados como diafragmas en Etabs) en comparación a lo obtenido con el sismo real de Lima. Además, a medida que aumentan las secciones de las riostras los desplazamientos de cada piso tienden a disminuir respecto a la estructura sin riostras puesto que aportan una mayor rigidez a la estructura, lo que se refleja con mayor diferencia a medida que aumenta la fuerza sísmica aplicada, es decir, desde el sismo real de Lima aplicado, luego el sismo ajustado al espectro de la norma E.030, hasta el sismo real de Maule.

Ante el registro sísmico de Maule el desplazamiento máximo en el tope de la estructura con riostras tipo BRB 3, BRB 5 y BRB 7 disminuye respecto a la estructura original aproximadamente en un 25%, 45% y 60%, respectivamente.

**Figura 39**

*Desplazamiento de la estructura de 5 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados a un espectro de la norma E.030.*



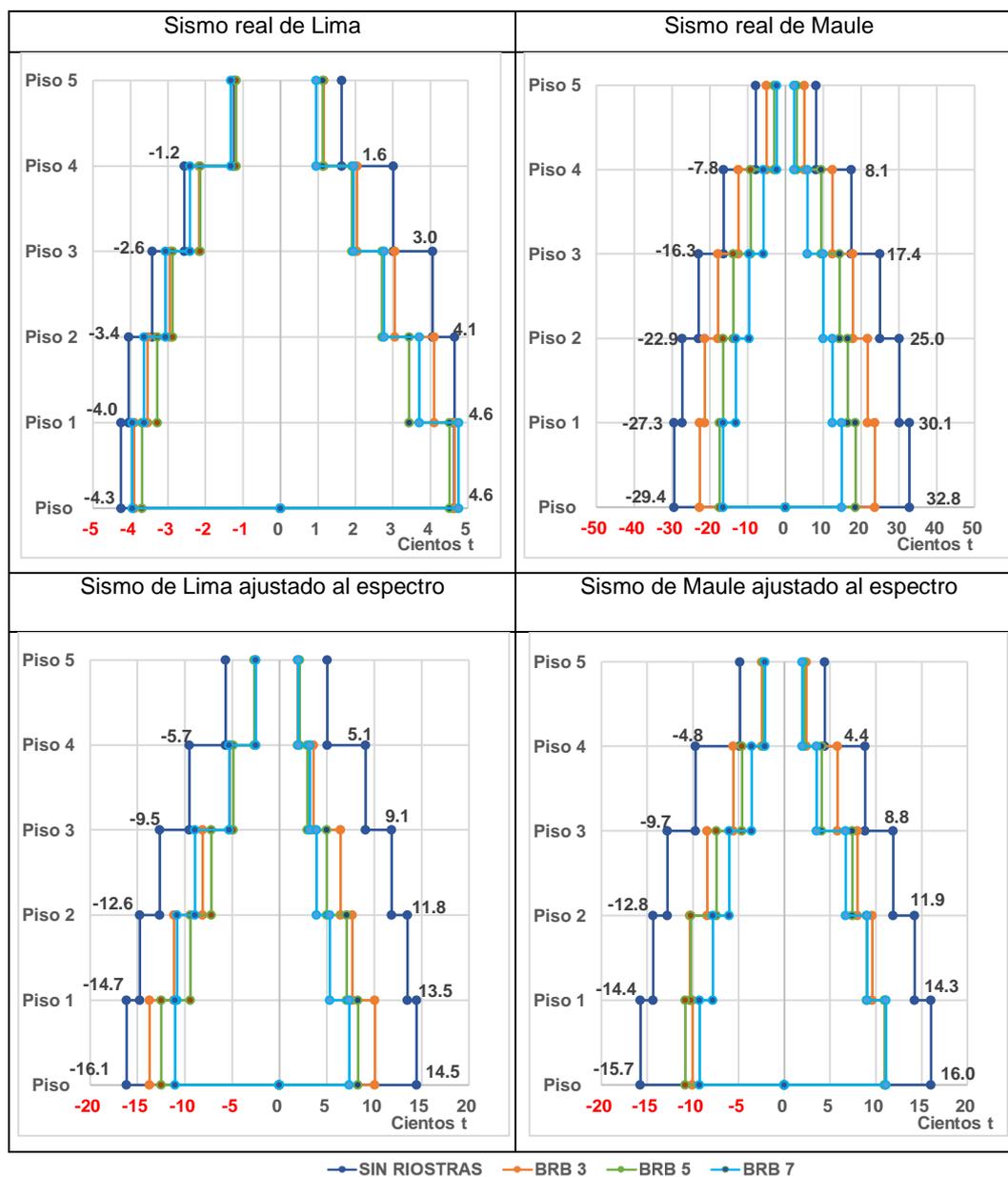
- **Fuerza cortante en columnas**

Las riostras de mayor sección tienen una mayor rigidez, y con ello la capacidad para absorber mayores fuerzas provenientes del sismo, lo que reduce la fuerza cortante en las columnas.

De la misma forma que lo explicado anteriormente con los desplazamientos obtenidos, las fuerzas cortantes en las columnas también tienen un comportamiento más ordenado con la aplicación del sismo real de Maule, el cual representa una mayor fuerza sísmica para la estructura de cinco pisos en comparación al sismo real de Lima y al sismo ajustado al espectro de la norma E.030 (Figura 40). Los resultados obtenidos con el sismo real de Lima muestran valores muy cercanos entre sí para todas las BRB analizadas, lo cual significa que la aplicación de riostras más rígidas es innecesaria para tales cargas.

**Figura 40**

Fuerza cortante en columnas de la estructura de 5 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados al espectro de la norma E.030.



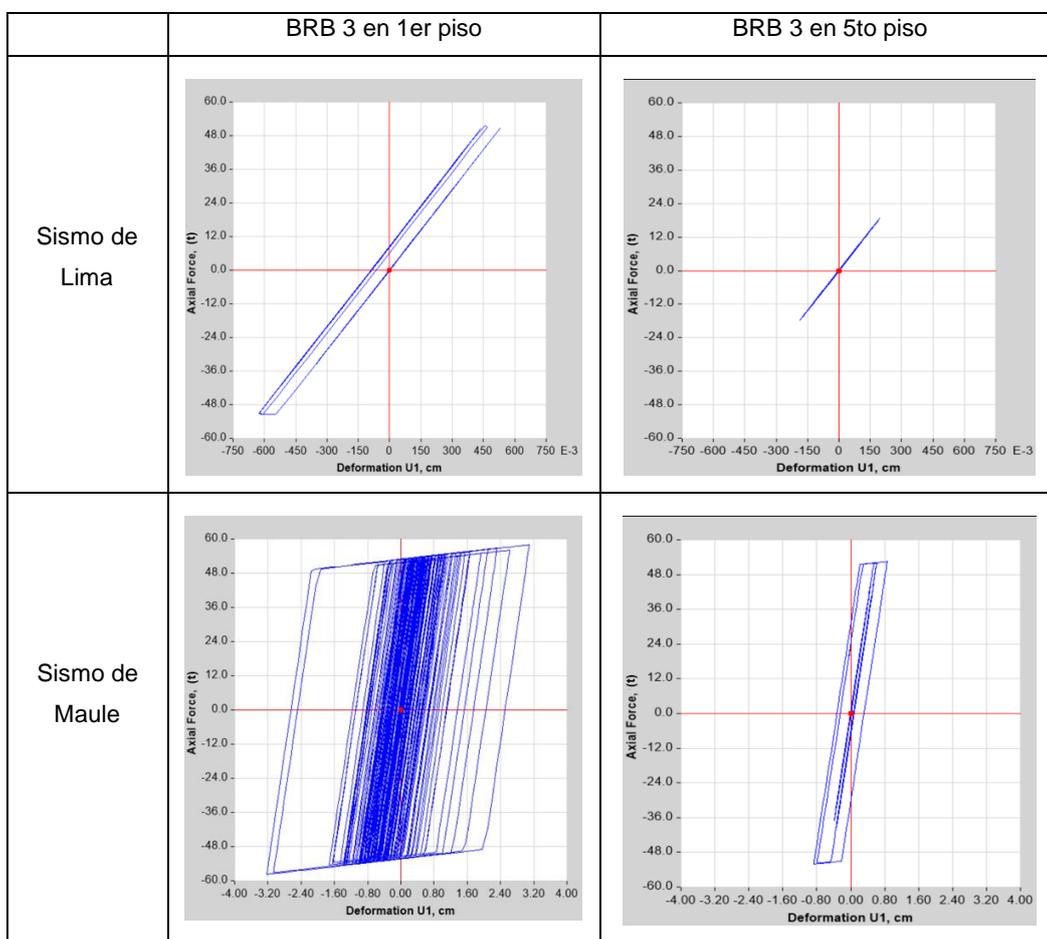
• **Comportamiento histerético en riostras**

En la Figura 41 se muestran los diagramas de fuerza axial vs deformación axial para la riostra BRB 3 en el primer piso y en el quinto piso, esto con el objetivo de observar la variación del comportamiento histerético a medida que se aumenta el número de niveles

en la estructura. Además, se observa que para el sismo real de Lima la riostra tiende a mantenerse en el rango elástico, mientras que, para el sismo real de Maule, muestra una mayor cantidad de lazos de histéresis que se van reduciendo a medida que aumenta el número de niveles en la estructura.

**Figura 41**

*Fuerza axial de la BRB 3 en la estructura de 5 pisos frente a los registros sísmicos aplicados de Lima y de Maule.*



Las riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7 muestran un comportamiento similar a la BRB 3, además, muestran capacidad para resistir cargas a tracción y a compresión, y de esta forma mantener los elementos estructurales, como columnas y vigas, en el rango elástico.

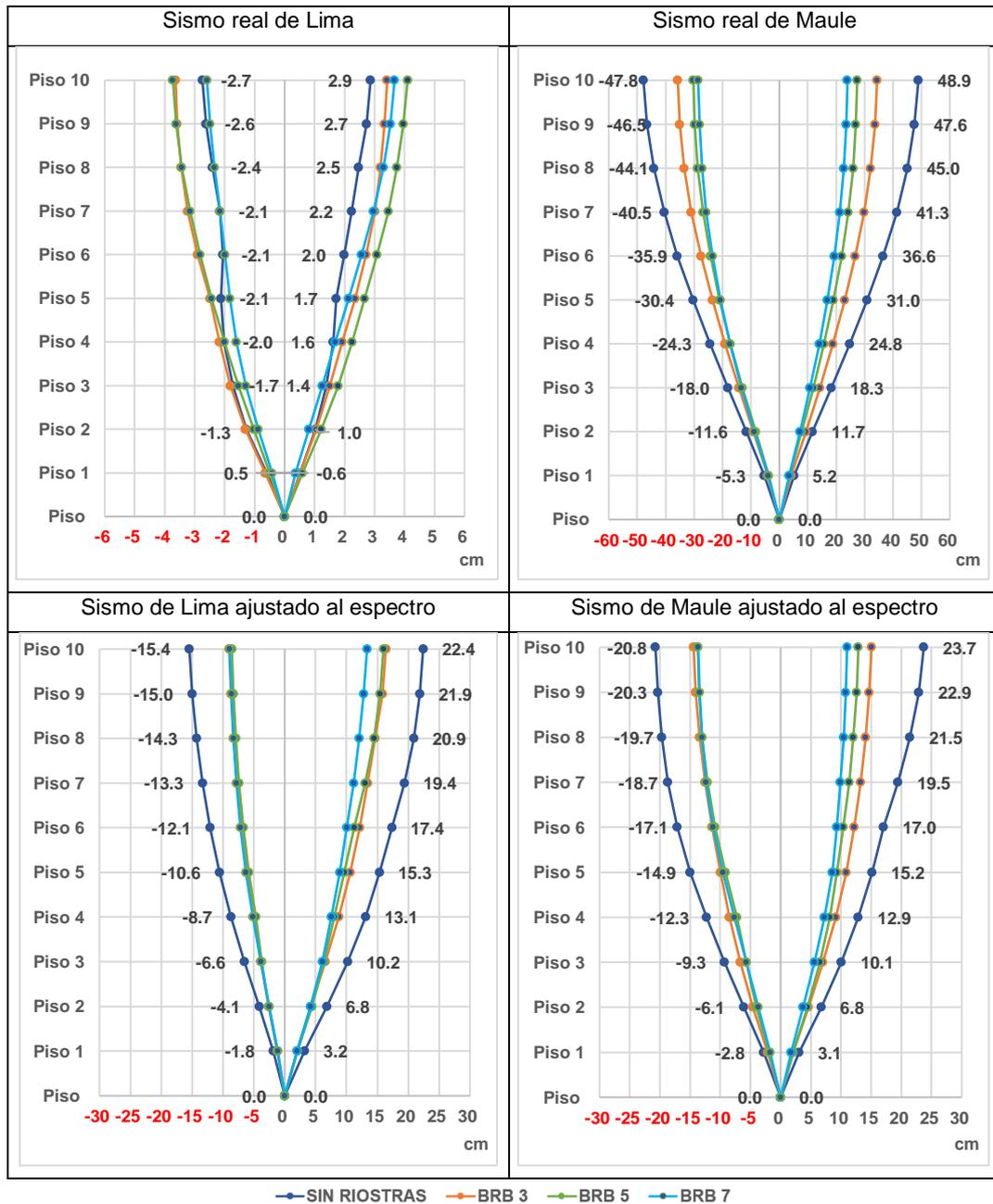
### **5.3.2. Estructura de 10 pisos**

- **Desplazamientos por piso**

Si bien los desplazamientos obtenidos bajo el sismo real de Maule muestran un comportamiento más ordenado en comparación a los obtenidos con el sismo real de Lima y, a su vez, a los sismos ajustados al espectro de la norma E.030, los desplazamientos de la estructura con BRB 5 y BRB 7 son similares, a diferencia de lo obtenido para la estructura de 5 pisos, donde se aprecia una mayor diferencia. Ante el registro sísmico de Maule el desplazamiento máximo en el tope de la estructura con riostras tipo BRB 3, BRB 5 y BRB 7 disminuye respecto a la estructura original aproximadamente en un 30%, 45% y 50%, respectivamente.

**Figura 42**

Desplazamiento de la estructura de 10 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados a un espectro de la norma E.030.



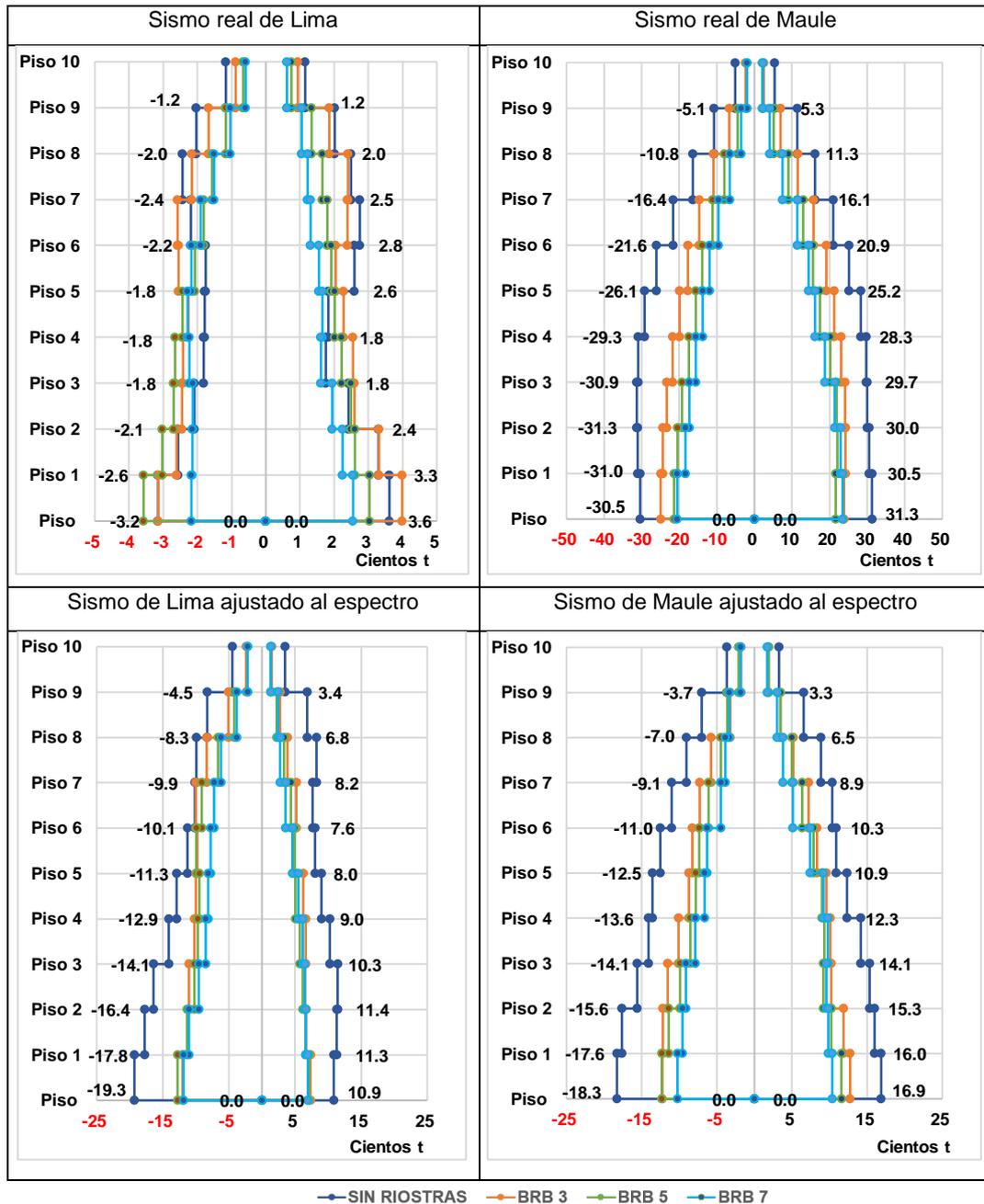
• **Fuerza cortante en columnas**

En la Figura 43 se observa que, a diferencia de la estructura de 5 pisos, la fuerza cortante en las columnas para el sismo real de Lima muestra mayor diferencia, al reducirse

la cortante a medida que aumenta la rigidez de las riostras, además, su reducción es más notoria a mitad de la estructura.

**Figura 43**

Fuerza cortante en columnas de la estructura de 10 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados al espectro de la norma E.030.



- **Comportamiento histerético en riostras**

Para el sismo real de Lima las riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7 se comportan en el rango lineal, mientras que para el sismo real de Maule las riostras tienen un comportamiento similar al mostrado para la estructura de 5 pisos, donde la cantidad de lazos de histéresis de las riostras se va reduciendo a medida que aumentan los niveles de la estructura.

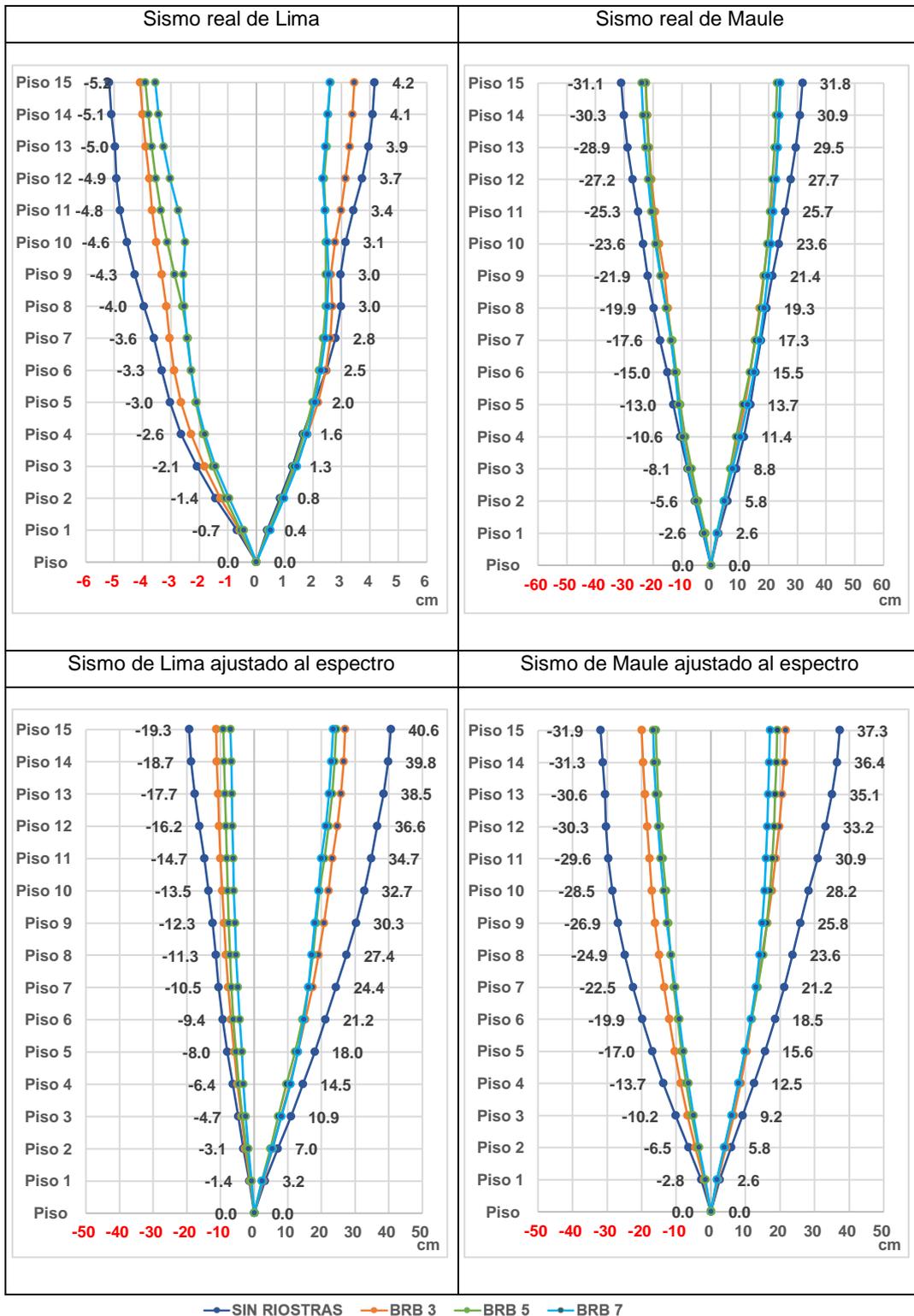
### **5.3.3. Estructura de 15 pisos**

- **Desplazamientos por piso**

A diferencia de las estructuras de 5 y de 10 pisos, los desplazamientos de la estructura de 15 pisos con BRB 3, BRB 5 y BRB 7 para el sismo real de Lima muestran una mayor diferencia al disminuir a medida que aumenta la rigidez de las riostras, mientras que para el sismo real de Maule y los sismos ajustados al espectro de la E.030 los desplazamientos obtenidos son muy cercanos entre sí para todas las riostras analizadas, lo que indica que a mayor ductilidad de la estructura y donde la rigidez de las riostras sea menor a la estructura, los desplazamientos por piso son similares con riostras o sin riostras. Ante el registro sísmico de Maule el desplazamiento máximo en el tope de la estructura con riostras tipo BRB 3, BRB 5 y BRB 7 disminuye respecto a la estructura original aproximadamente en un 25%, 30% y 25%, respectivamente.

**Figura 44**

Desplazamiento de la estructura de 15 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados a un espectro de la norma E.030.



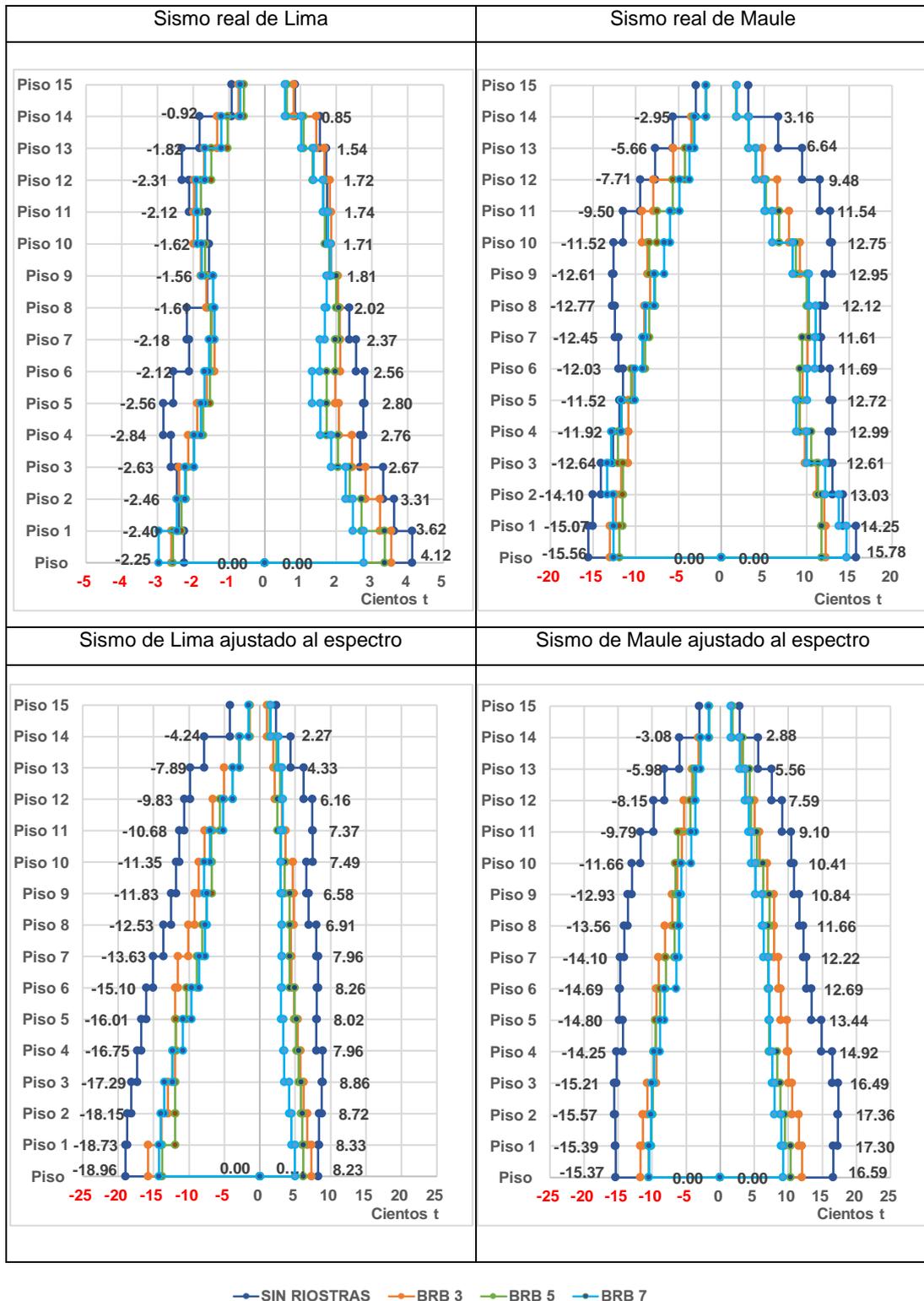
- **Fuerza cortante en columnas**

Los resultados obtenidos con la aplicación del sismo real de Lima y el sismo real de Maule muestran una reducción de la fuerza cortante en columnas a mitad de la estructura, a diferencia de los sismos ajustados al espectro de la norma E.030 (Figura 45). Esto se explica por la influencia del 2<sup>do</sup> modo de vibración en la estructura, tal y como se muestra en la Figura 46, donde se observa que, si se considera como respuesta solo el 1<sup>er</sup> modo de vibración, las fuerzas cortantes en las columnas son mayores en el primer nivel y van disminuyendo a medida que aumentan los niveles de la estructura; aquel comportamiento se asemeja al obtenido con la aplicación de los registros sísmicos ajustados al espectro. Sin embargo, al involucrar en el resultado el 2<sup>do</sup> modo de vibración se observa su predominancia al aumentar nuevamente el valor de las fuerzas cortantes a mitad de la estructura.

Cabe mencionar que, para el sismo real de Maule y para los sismos ajustados al espectro de la E.030 las fuerzas cortantes obtenidas son muy cercanas entre sí para todas las riostras analizadas.

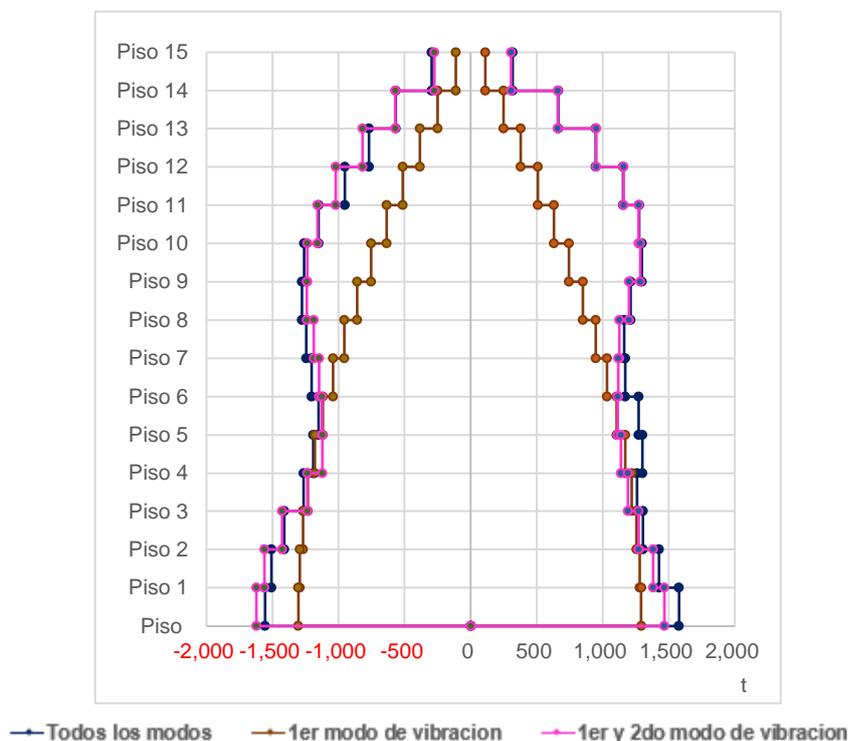
**Figura 45**

Fuerza cortante en columnas de la estructura de 15 pisos con BRB y sin BRB ante los registros sísmicos de Lima, de Maule y ajustados al espectro de la norma E.030.



**Figura 46**

*Fuerza cortante de columnas pertenecientes a la estructura de 15 pisos sin riostras ante el registro sísmico de Maule.*



• **Comportamiento histerético en riostras**

Para el sismo real de Lima las riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7 se comportan en el rango lineal, del mismo modo que para la estructura de 10 pisos, mientras que para el sismo real de Maule las riostras muestran comportamiento similar al mostrado para la estructura de 5 y 10 pisos, donde el comportamiento histerético de las riostras se va reduciendo a medida que aumentan los niveles de la estructura.

Para las estructuras de baja y de mediana altura también se analizaron las aceleraciones de piso con el registro sísmico de Lima y de Maule, obteniendo mayores valores de aceleración para la estructura de 5 y 10 pisos, cuya implementación de riostras de pandeo restringido permitió reducir aquellos valores desde la mitad de la estructura hacia el último piso. Las aceleraciones en la estructura de 15 pisos no muestran un comportamiento definido, se incrementan o disminuyen para distintos pisos.

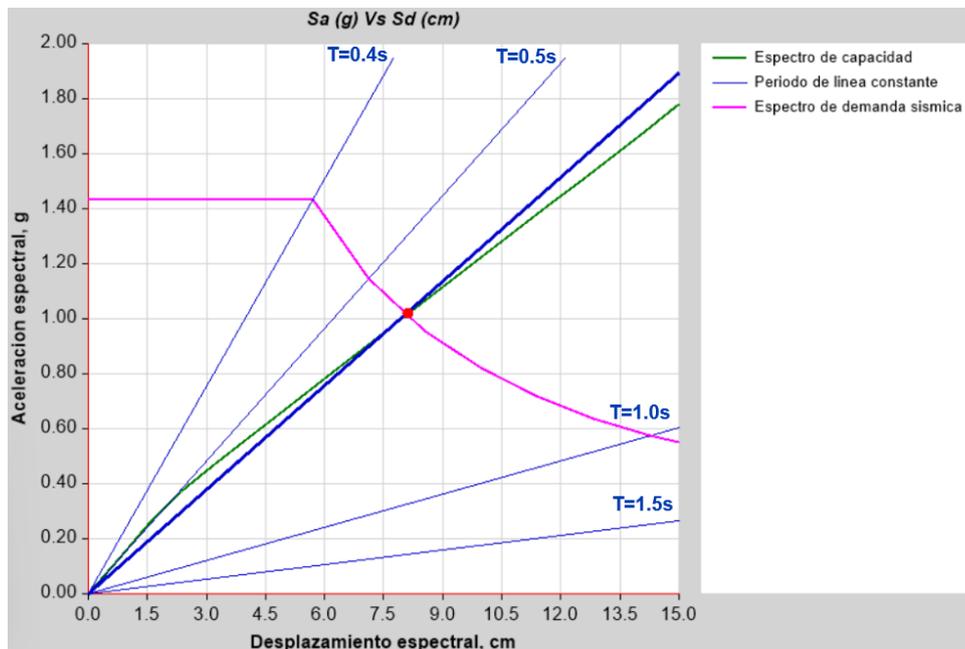
### 5.4. Análisis Pushover

Las estructuras de 5, 10 y 15 pisos fueron analizadas con el método pushover (explicado con mayor detalle en el acápite 4.2.3), para lo cual se hizo primero un análisis por cargas gravitatorias y posteriormente con cargas horizontales de magnitud monótonicamente creciente y con la distribución en altura que se explica en el acápite 4.1.1. Se consideró una carga gravitatoria de 1 ton/m<sup>2</sup> y 0.8 ton/m<sup>2</sup> para los pisos típicos y el último piso, respectivamente.

Al convertir el espectro de respuesta elástica definido ( $S_a$  vs.  $T$ ) en el espectro de demanda sísmica ( $S_a$  vs.  $S_d$ ) los periodos son representados mediante líneas radiales, como se muestra en la Figura 47. Para la presente tesis, el espectro de demanda sísmica se definió con un factor de reducción de 1.5, ya que se considera el análisis en el rango inelástico y con un factor mínimo por sobrerresistencia.

**Figura 47**

*Gráfica de aceleración espectral vs desplazamiento espectral en estructura de 5 pisos de acuerdo con FEMA 440.*

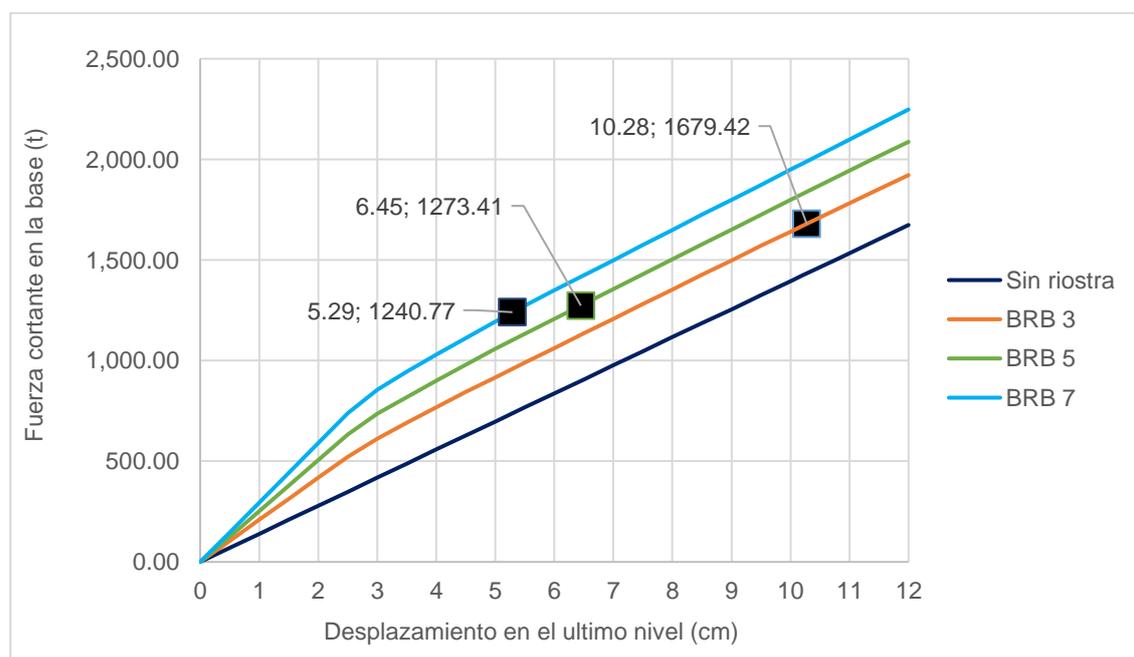


La Figura 47 muestra la intersección entre la curva espectral de capacidad de la estructura de 5 pisos con riostras tipo BRB 3 y la curva espectral de demanda sísmica reducida, ambas obtenidas de ETABS de acuerdo con FEMA 440, lo cual se explica en el acápite 4.2.3.

La intersección de curvas mostrada en la Figura 48 representa el punto de desempeño de la estructura de 5 pisos con riostras BRB 3. De la misma manera se obtuvieron los puntos de desempeño para las estructuras de 10 y 15 pisos con las riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7. En la Figura 48 los marcadores de color negro representan los puntos de desempeño, es decir, la respuesta máxima probable de la estructura ante el sismo de diseño.

**Figura 48**

*Curva de capacidad de la estructura de 5 pisos.*



Se observa que, para las estructuras con riostras BRB 3, las menos rígidas en comparación con las riostras BRB 5 y BRB 7, el punto de desempeño de la estructura correspondería a desplazamientos y fuerzas cortantes mayores.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7, todas las estructuras tienen un mayor porcentaje de amortiguamiento cuando se usan riostras BRB 3, esto se explica porque mientras las estructuras sean más flexibles, es decir con un mayor periodo fundamental de vibración, se generan mayores desplazamientos relativos de entrepiso, lo que permite a las riostras de pandeo restringido disipar energía.

**Tabla 5**

*Resultados del punto de desempeño para la estructura de 5 pisos con riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7.*

	5 PISOS		
	BRB 3	BRB 5	BRB 7
<b>V (t)</b>	1679.42	1273.41	1240.77
<b>D (cm)</b>	10.28	6.45	5.29
<b>Sa (g)</b>	1.02	0.77	0.74
<b>Sd (cm)</b>	8.12	5.13	4.23
<b>T sec (s)</b>	0.57	0.52	0.48
<b>T eff (s)</b>	0.84	0.59	0.50
<b>Ductilidad</b>	3.79	2.47	2.10
<b>Amortiguam.</b>	19.3%	12.1%	9.5%
<b>Factor modif</b>	2.21	1.30	1.07

**Tabla 6**

*Resultados del punto de desempeño para la estructura de 10 pisos con riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7.*

	10 PISOS		
	BRB 3	BRB 5	BRB 7
<b>V (t)</b>	1647.11	1132.80	1120.77
<b>D (cm)</b>	23.04	12.73	10.64
<b>Sa (g)</b>	0.52	0.35	0.35
<b>Sd (cm)</b>	17.66	9.83	8.21
<b>T sec (s)</b>	1.18	1.06	0.98
<b>T eff (s)</b>	1.80	1.14	0.96
<b>Ductilidad</b>	3.96	2.22	1.84
<b>Amortiguam.</b>	19.5%	10.3%	7.8%
<b>Factor modif</b>	2.34	1.16	0.97

**Tabla 7**

*Resultados del punto de desempeño para la estructura de 15 pisos con riostras BRB 3, BRB 5 y BRB 7*

	15 PISOS		
	BRB 3	BRB 5	BRB 7
<b>V (t)</b>	1641.86	1101.84	1108.37
<b>D (cm)</b>	35.50	19.09	16.43
<b>Sa (g)</b>	0.34	0.23	0.23
<b>Sd (cm)</b>	27.13	14.64	12.54
<b>T sec (s)</b>	1.78	1.60	1.48
<b>T eff (s)</b>	2.73	1.70	1.45
<b>Ductilidad</b>	3.95	2.12	1.76
<b>Amortiguam.</b>	19.4%	9.6%	7.4%
<b>Factor modif</b>	2.36	1.12	0.96

### 5.5. Predimensionamiento de riostras de pandeo restringido

El diagrama de flujo presentado en la Figura 49 muestra cómo se podrían predimensionar las riostras de pandeo restringido. Para ello se deberá tener en cuenta las recomendaciones del capítulo 18 de la ASCE 7-22, donde se indica que las estructuras que cuenten con un sistema de amortiguamiento deberán tener un sistema resistente a fuerzas sísmicas cuya fuerza cortante en la base usada para el diseño no deberá ser menor que el 75% de la fuerza cortante obtenida en la dirección de interés.

La componente horizontal de la fuerza axial  $f$  en las riostras absorberá el porcentaje de fuerza cortante considerado, con ello se puede obtener el área mínima de la sección de la riostra:

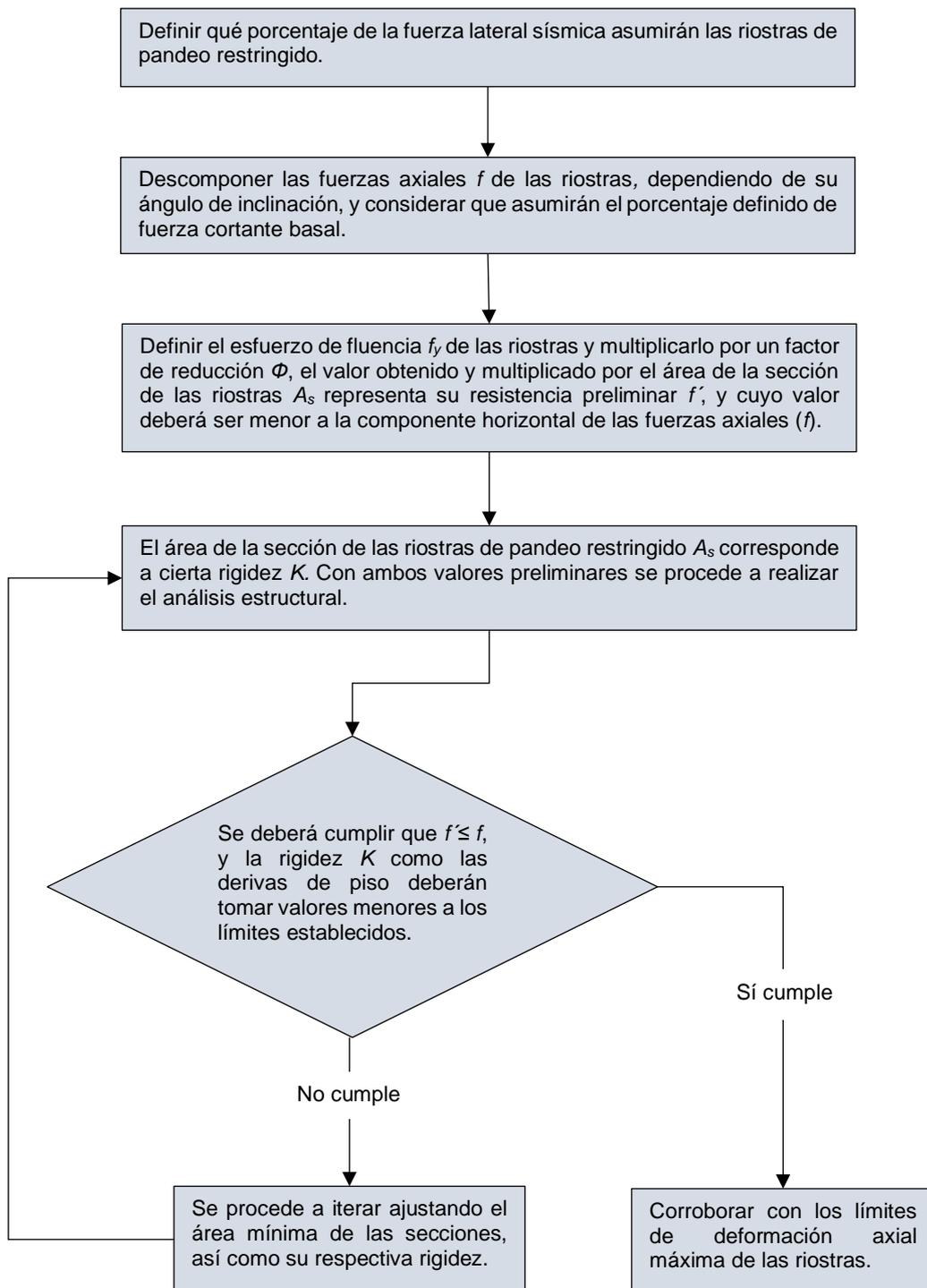
$$f' = \phi \cdot f_y \cdot A_s \leq f \quad (60)$$

La rigidez de cada riostra se asocia al área seccional mínima  $A_s$  obtenida. Con esos datos se procede con el análisis estructural. Si se cumple que  $f' \leq f$  las derivas de entrepiso cumplen con los límites de deformación establecidos, entonces, se procede a corroborar si cumplen con los límites máximos de deformación axial de las riostras; en caso contrario,

se realiza el proceso de iteración del análisis estructural al ajustar el área seccional de la riostra hasta cumplir con todas las condiciones.

**Figura 49**

*Diagrama de flujo sobre el predimensionamiento de BRB*



## 5.6. Comentarios finales

En el presente capítulo se analizaron estructuras de baja y de mediana altura con riostras de pandeo restringido implementadas en todos los niveles. Mediante el análisis computacional FNA (análisis no-lineal rápido) se pudo conocer la respuesta sísmica de las estructuras analizadas bajo la aplicación de cargas dinámicas. A continuación, se resumen los resultados:

- Las estructuras analizadas muestran una reducción en su respuesta sísmica al implementarse riostras de pandeo restringido, lo que implica una disminución de la fuerza cortante basal y los desplazamientos de piso.

- La estructura de un piso analizada muestra que al implementarse una riostra más rígida que el pórtico mismo genera que la riostra se mantenga en el rango elástico a medida que aumentan las cargas. Si bien, al ser la riostra más rígida genera una reducción en la respuesta sísmica estructural, también genera que los elementos que pasen antes al rango no-lineal sean los elementos estructurales como vigas y columnas, es así como las riostras no estarían cumpliendo la función de actuar como un elemento de sacrificio de disipación de energía.

- Los análisis realizados muestran que al implementar riostras de pandeo restringido existe una mayor reducción de la respuesta sísmica en estructuras flexibles (con mayor periodo de vibración) que en estructuras rígidas (con menor periodo de vibración), además de presentar en la gráfica de fuerza axial vs. deformación axial de las BRB una mayor cantidad de lazos de histéresis, demostrando así una mayor capacidad de disipación de energía y evidenciando su resistencia tanto a la compresión como a la tracción.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los análisis realizados se puede determinar la eficiencia del uso de las riostras de pandeo restringido reflejado en la disipación de energía proveniente de las acciones sísmicas. Estos dispositivos histeréticos aportan similar resistencia a la compresión y a la tracción, así como una mayor rigidez a las estructuras, incluso para eventos de poca intensidad. En los casos estudiados se puede apreciar que incrementan notoriamente el amortiguamiento efectivo, desde aproximadamente un 8% hasta un 19%, dependiendo de la rigidez de las riostras usadas.

De la información recopilada de proveedores de riostras de pandeo restringido y los resultados experimentales obtenidos por Cancelado (2012) y Black et al. (2002), entre otros, se observa que la resistencia máxima a la compresión de las riostras es ligeramente mayor, aproximadamente entre un 10% a un 20% respecto a la resistencia a la tracción, además su aplicación proporciona una respuesta cíclica con disipación de energía histerética estable alcanzando una deformación inelástica acumulada de más de 200 veces la deformación de fluencia.

El uso de riostras de pandeo restringido permite reducir las fuerzas en los elementos estructurales y las derivas de entrepiso a medida que aumenta el área transversal de las BRB aplicadas, ya que aportan una mayor rigidez y disipan energía ante eventos sísmicos de mayor intensidad. En las figuras 39, 42 y 44 se pueden observar reducciones desde un 25% hasta un 60% en desplazamientos, y en las figuras 40, 43 y 45 se pueden observar reducciones en la fuerza cortante basal desde un 45% hasta un 60%.

El aumento del área transversal de una BRB es directamente proporcional al aumento de su rigidez, por lo que si se colocan en una estructura permitirían que las fuerzas en los elementos estructurales y las derivas de entrepiso se reduzcan; sin embargo, de acuerdo con los análisis realizados, para un sismo de menor intensidad, a pesar de que se aumente

el área transversal de la riostra, los resultados de fuerza cortante basal y los desplazamientos por piso no varían sustancialmente, lo que expresa que las riostras son muy rígidas para la carga aplicada. Para un sismo de mayor intensidad existe una mayor diferencia de resultados para las estructuras con cada tipo de riostra colocada, lo que se explica por la disipación de energía debida al comportamiento no-lineal de las riostras. Véanse los resultados obtenidos con el sismo de Lima en contraste con los obtenidos con el sismo de Maule en las figuras 39 y 40.

Las riostras de pandeo restringido son más eficientes cuando son usadas en estructuras flexibles (con un mayor periodo fundamental de vibración), es decir que su uso permite reducir las acciones sísmicas en la estructura, como la fuerza cortante en las columnas y las derivas de entrepiso, puesto que para estructuras rígidas, las BRB tienden a mantenerse en el rango elástico ante las cargas aplicadas, mientras que los restantes elementos estructurales podrían pasar al rango-no lineal antes que las riostras, lo que es contrario a la filosofía de diseño con estos dispositivos.

Como es el caso al usar cualquier dispositivo de control sísmico, es indispensable realizar un análisis lineal preliminar, que permita dimensionar los elementos y conocer el comportamiento inicial de la estructura, para luego determinar la conveniencia del uso de las riostras de pandeo restringido o de otros dispositivos de control sísmico.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar análisis tiempo-historia de edificaciones con configuraciones estructurales irregulares que implementen riostras de pandeo restringido, con el objetivo de conocer la respuesta sísmica de tales estructuras, así como también las posibles reducciones de fuerzas cortantes y momentos en vigas y columnas, derivas de entrepiso y aceleraciones de piso.

Se recomienda considerar la implementación de riostras de pandeo restringido como dispositivos de control sísmico debido a su menor costo de fabricación, instalación y mantenimiento frente a otros dispositivos de control pasivo. Además, no requieren de mano de obra altamente calificada para su instalación.

El diseño de las riostras de pandeo restringido debe ser realizado por profesionales con conocimiento y experiencia en el campo, que sean responsables del diseño de la estructura, así como de establecer un programa de ensayo y mantenimiento de los dispositivos histeréticos, de manera que su respuesta estructural sea confiable a lo largo de su vida útil.

La presente tesis no contiene información acerca de la viabilidad constructiva de los dispositivos histeréticos, por lo que se recomienda realizar un análisis sobre su adquisición en el mercado y la relación costo-beneficio de su uso.

Se recomienda promover ensayos de laboratorio con riostras de pandeo restringido cuyos componentes sean fabricados con material y mano de obra local. Ello tiene el fin de difundir el diseño y uso de los dispositivos histeréticos en el Perú y así permitir a los ingenieros incluir esta alternativa como posible solución de protección sísmica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abell, M. (2016, junio). *Fast Nonlinear Analysis (FNA)*. CSI Knowledge Base.  
<https://wiki.csiamerica.com/pages/viewpage.action?pageId=9536464>
- AISC (2010). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-10)*. American Institute of Steel Construction.
- American Institute of Steel Construction (2016, febrero). *Corebrace Purchases Star Seismic*. AISC. <https://www.aisc.org/modernsteel/news/2016/february/corebrace-purchases-star-seismic/#:~:text=CoreBrace%2C%20LLC%2C%20a%20wholly%20owned,buildings%20against%20earthquake%2Drelated%2Dstresses>
- ASCE (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16)*. American Society of Civil Engineers.
- Bathe K. (2014). *Finite Element Procedures (2.aed.)*. Prentice Hall, Pearson Education, Inc.
- Black, C., Makris, N. y Aiken, I. (2002). *Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces™*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, 130(8), 80-894.
- Canales, M. (2016). *Diseño y estudio numérico del desempeño sísmico de pórticos con riostras de pandeo restringido*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.  
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143715>
- Cancelado, R. (2012). *Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostramiento de pandeo restringido Parte 1*.

- [Tesis de maestría en estructuras, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10653>
- Chiang, D. Y. (1999). The generalized Masing models for deteriorating hysteresis and. *Applied Mathematical Modelling*, 23 (11), 847-863. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(99\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(99)00015-3)
- Crisafulli, F. (2014). *Diseño sismorresistente de construcciones de acero* (4.a ed.). Asociación Latinoamericana del Acero – Alacero.
- Di Sarno, L., y Manfredi, G. (2010). Seismic retrofitting with buckling restrained braces: Application to an existing non-ductile RC framed building. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1279–1297. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.001>
- Efe Prima Ce (2020). *Riostras F’C-BRB (Buckling Restrained Brace)*. Efe Prima Ce. <https://efepripace.pe/proteccion-sismica/riostras-brb/>
- Higashino, M. y Okamoto, S. (2006). *Response control and seismic isolation of buildings* (1.a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203018866>
- Jayakumar, P. (1987). *Modeling and identification in structural dynamics*. [Tesis doctoral, Instituto de Tecnología de California]. Repositorio Institucional de Caltech. <https://thesis.library.caltech.edu/11411/>
- Jones, A. (2020). *Design and Sensitivity of Buckling Restrained Braces*. [Tesis para obtener el título de Doctor en Filosofía en Ingeniería Civil y de Recursos Naturales, Universidad de Canterbury]. Repositorio Institucional UC. <https://ir.canterbury.ac.nz/items/d925f806-8264-43e9-8ff3-584c69b1eef2>

- Kimura, K., Yoshizaki, K. y Takeda, T. (1976). *Tests on braces encased by mortar infilled steel tubes*. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting.
- Newmark, N.M. (1959). A Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 85 (3), 67-94.  
<https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000098>
- Nippon Steel & Sumikin Engineering (2017). *UBBTM (Unbonded Brace)*. Nippon Steel Engineering. [https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/respons\\_e\\_control\\_and\\_seismic\\_isolation\\_devices/ubb/](https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/building/respons_e_control_and_seismic_isolation_devices/ubb/)
- Oviedo, J. y Duque, M. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 3(6), 105-120.  
<https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/163>
- Reyes, J.C. y Rubiano, N.R. (2002). Modelación inelástica de edificios de concreto con disipadores de energía histeréticos. *Revista De Ingeniería*, 1(15), 30-39.  
<https://doi.org/10.16924/revinge.15.5>
- Sabelli, R., Mahin, S., y Chang, C. (2003). Seismic Demands on Steel Braced Frame Buildings with Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structures*, 25(5), 655-666.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(02\)00175-x](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/s0141-0296(02)00175-x)
- Takeuchi, T., y Wada, A. (2017). *Buckling-Restrained Braces and Applications*. The Japan Society of Seismic Isolation.
- Tavera, H. (2021). *Perú, un país altamente sísmico*. El Peruano.  
<https://elperuano.pe/noticia/131730-peru-un-pais-altamente-sismico>

- Toro, G. (2004). *Respuesta experimental de edificios a escala con disipadores de energía*.  
[Tesis para optar el título de Magister en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes].  
Repositorio Institucional Séneca. <http://hdl.handle.net/1992/10396>
- Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Yogoyama, H. y Morisono, T. (1973).  
*Experimental study on the elastoplastic behavior of braces enclosed by precast  
concrete panels under horizontal cyclic loading*. Summaries of technical papers of  
annual meeting (Parts 1 & 2).
- Wilson, E. (2004). *Static and dynamic analysis of structures* (4.<sup>a</sup> ed.). Berkeley:Computers  
and Structures Inc.