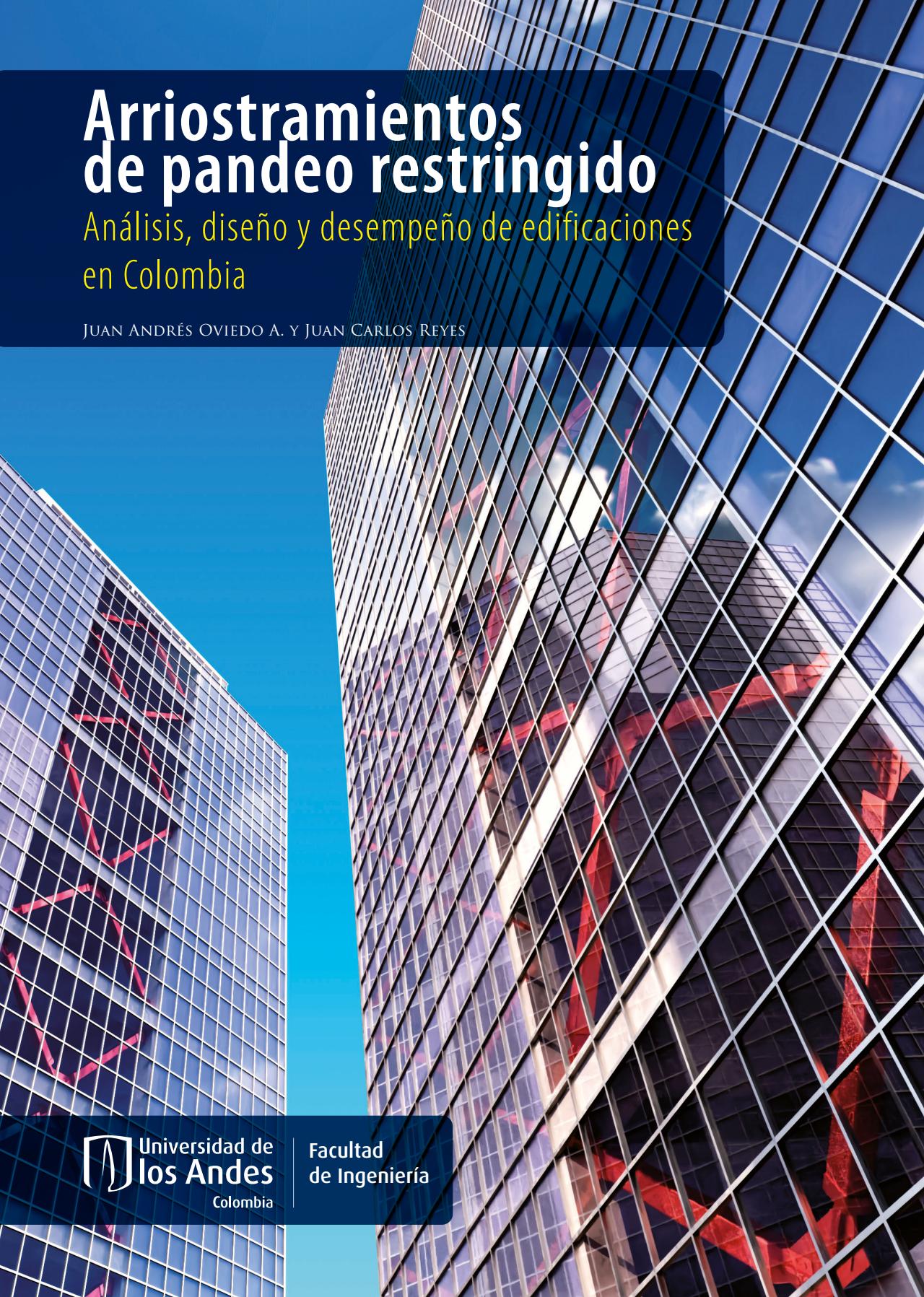


Arriostramientos de pandeo restringido

Análisis, diseño y desempeño de edificaciones
en Colombia

JUAN ANDRÉS OVIEDO A. Y JUAN CARLOS REYES



Universidad de
los Andes
Colombia

Facultad
de Ingeniería

Arriostramientos de pandeo restringido

Arriostramientos de pandeo restringido

Análisis, diseño y desempeño de edificaciones en Colombia

Juan Andrés Oviedo A.
y Juan Carlos Reyes

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Nombre: Oviedo Amézquita, Juan Andrés, autor. | Reyes Ortiz, Juan Carlos, autor.

Título: Arriostramientos de pandeo restringido: análisis, diseño y desempeño de edificaciones en Colombia / Juan Andrés Oviedo A. y Juan Carlos Reyes.

Descripción: Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Ediciones Uniandes, 2024. | xxviii, 198 páginas: ilustraciones; 17 x 24 cm.

Identificadores: ISBN 978-958-798-715-7 (rústica) | 978-958-798-716-4 (e-book) |

Materias: Riostras (Ingeniería) | Diseño estructural | Pandeo (Mecánica)

Clasificación: CDD 624.1774–dc23

SBUA

Primera edición: noviembre del 2024

© Juan Carlos Reyes Ortiz y Juan Andrés Oviedo Amézquita

© Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Ediciones Uniandes

Carrera 1.ª n.º 18A-12, bloque Tm

Bogotá, D. C., Colombia

Teléfono: 601 339 4949, ext. 2133

<http://ediciones.uniandes.edu.co>

ediciones@uniandes.edu.co

ISBN: 978-958-798-715-7

ISBN e-book: 978-958-798-716-4

DOI: <http://doi.org/10.51573/Andes.9789587987157.9789587987164>

Corrección de estilo: María Paula Méndez Penagos

Diagramación: Leonardo Cuéllar

Imagen de cubierta: “Ilustración de edificios con arriostramientos tipo BRB”, de David Felipe Rodríguez Vargas

Impresión:

Imageprinting Ltda.

Carrera 27 n.º 76-38

Teléfonos: 601 631 1350 - 601 631 1736

Bogotá, D. C., Colombia

Impreso en Colombia – *Printed in Colombia*

Universidad de los Andes | Vigilada Mineducación. Reconocimiento como universidad: Decreto 1297 del 30 de mayo de 1964. Reconocimiento de personería jurídica: Resolución 28 del 23 de febrero de 1949, Minjusticia. Acreditación institucional de alta calidad, 10 años: Resolución 582 del 9 de enero del 2015, Mineducación.

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial.

Contenido

Lista de recursos gráficos	XI
Lista de siglas	XVII
Nomenclatura relacionada con el diseño de riostras de pandeo restringido	XIX
Definiciones relacionadas con el diseño de edificaciones con disipación de energía	XXIII
Prefacio	XXV
Agradecimientos	XXVII
Capítulo 1. Aplicación de arriostramientos de pandeo restringido en edificios	1
1.1. Introducción	1
1.2. Conceptos y aplicaciones	6
1.3. Comportamiento de edificaciones con arriostramientos de pandeo restringido	11

Capítulo 2. Propiedades mecánicas de arriostramientos de pandeo restringido	17
2.1. Rigididad axial de riostras de pandeo restringido	17
2.2. Rigididad axial nodo a nodo de las riostras	21
2.3. Relación entre rigidez experimental y teórica	25
2.4. Factores de modificación	26
2.4.1. Factor KF	26
2.4.2. Factores de ajuste de propiedades	28
2.5. Influencia de los factores de dimensionamiento de las riostras	29
2.6. Variación de los factores de ajuste de resistencia ω y $\beta\omega$	32
Capítulo 3. Procedimiento general de diseño	35
3.1. Introducción	35
3.2. Flujo del proceso de diseño de edificaciones con pórticos con arriostramientos de pandeo restringido	35
Capítulo 4. Ejemplo de diseño de un edificio de concreto reforzado con pórticos con arriostramientos de pandeo restringido	41
4.1. Descripción general	41
4.2. Configuración típica de la estructura	42
4.3. Proceso de diseño	43
Capítulo 5. Ejemplo de diseño de un edificio de acero con pórticos con arriostramientos de pandeo restringido	71
5.1. Descripción general	71
5.2. Proceso de diseño	73
Capítulo 6. Modelación y criterios de aceptación para arriostramiento de pandeo restringido	91
6.1. Modelación y criterios de aceptación	91
6.2. Análisis estructural de la edificación	96

Capítulo 7. Ejemplo de diseño con arriostramientos de pandeo restringido como disipadores de energía	97
7.1. Criterio de diseño	97
7.1.1. Análisis cronológico no lineal	98
7.1.2. Procedimientos alternos de fuerza horizontal equivalente y análisis dinámico espectral	98
7.1.3. Procedimiento general de diseño	99
7.2. Diseño preliminar de la Estructura Principal	100
7.2.1. Correspondencia de parámetros sísmicos entre NSR-10 y ASCE 7-16	100
7.2.2. Propiedades dinámicas preliminares de la Estructura Principal	102
7.2.3. Parámetros de diseño para la Estructura Principal según ASCE 7-16	103
7.3. Parámetros de diseño del Sistema de Disipación de Energía según el método alterno de fuerza horizontal equivalente	106
7.3.1. Cálculo del amortiguamiento viscoso efectivo β_{V1} para ríostras de pandeo restringido	107
7.3.2. Parámetros preliminares de diseño del Sistema de Disipación de Energía	109
7.3.3. Parámetros de diseño ajustados para el Sistema de Disipación de Energía	116
7.3.4. Derivas del sistema estructural sismorresistente	120
7.4. Estimación de propiedades de los disipadores de energía para un desplazamiento objetivo	127
7.4.1. Capacidad de la Estructura Principal	127
7.4.2. Capacidad preliminar de disipadores de energía	130
7.4.3. Resultados de análisis para el sistema estructural sismorresistente	137
7.5. Método de análisis dinámico espectral	146
7.6. Método dinámico cronológico no lineal	146
Capítulo 8. Verificación del desempeño sísmico	147
8.1. Parámetros de modelación de la estructura en concreto	149
8.2. Parámetros de modelación de los disipadores de energía (ríostras de pandeo restringido)	150

8.3. Registros de aceleración del suelo	151
8.4. Análisis estático no lineal	152
8.4.1. Amortiguamiento adicionado por los disipadores	156
8.5. Análisis dinámico no lineal	157
8.5.1. Respuesta de la deriva máxima	158
8.5.2. Respuesta de cortante basal	158
8.5.3. Estado de rótulas plásticas	159
Capítulo 9. Ejemplo de diseño básico de conexiones	163
9.1. Diseño de la conexión	163
9.1.1. Criterio de diseño	164
9.1.2. Identificación de fuerzas sobre la conexión en “esquina”	165
9.1.3. Identificación de componentes de la conexión	166
9.1.4. Estados límites de diseño	167
9.2. Consideraciones finales	173
Capítulo 10. Marco normativo de ensayo	175
Riostras de pandeo restringido como “riostras avanzadas”	176
Riostras de pandeo restringido como disipadores de energía	176
Apéndice A. Estados límites para el diseño de la conexión	179
A.1. Estados límites para la conexión riostra- <i>Gusset Plate</i>	180
A.2. Estados límites para la conexión <i>Gusset Plate</i> -viga	186
A.3. Estados límites para la conexión <i>Gusset Plate</i> -columna	189
A.4. Estados límites para la conexión a concreto <i>Gusset Plate</i> -columna y <i>Gusset Plate</i> -viga	191
Referencias	193

Listado de recursos gráficos

Figuras

Figura 1.1. Esquema de un disipador de energía tipo arriostramiento de pandeo restringido	8
Figura 1.2. Curva histerética de riostras de pandeo restringido	9
Figura 1.3. Esquemas de instalación de arriostramiento de pandeo restringido en edificaciones	11
Figura 1.4. Sistema pórtico-disipador: (a) configuración esquemática; (b) curva de piso idealizada cortante-deriva	12
Figura 1.5. Aumento esquemático de rigidez, resistencia y capacidad de disipación de energía	13
Figura 1.6. Relación esquemática de fuerza restauradora de la Estructura Principal y el Sistema de Disipación de Energía	14
Figura 1.7. Deformación global a flexión: (a) deformación del pórtico arriostrado; (b) efecto sobre el Sistema de Disipación de Energía	15
Figura 2.1. Deformación horizontal idealizada de un pórtico arriostrado	18
Figura 2.2. Identificación de zonas en la riostra	19
Figura 2.3. Modelo idealizado de riostra	19

Figura 2.4. Esquema completo de instalación de arriostramiento de pandeo restringido	22
Figura 2.5. Componentes de arriostramiento de pandeo restringido	22
Figura 2.6. Comparación entre K_b teórica y experimental para riostras	26
Figura 2.7. Implicación de factores λ en la curva característica del arriostramiento de pandeo restringido	29
Figura 2.8. Variación de la capacidad de deriva alcanzada	30
Figura 2.9. Variación del factor KF	31
Figura 2.10. Variación del factor ω con ε_p	33
Figura 2.11. Variación del factor $\beta\omega$ con ε_p	34
Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de diseño	39
Figura 4.1. Modelo en 3D de la edificación estudiada	44
Figura 4.2. Derivas de diseño	45
Figura 4.3. Espectro elástico de diseño	46
Figura 4.4. Modelo estructural con riostras de pandeo restringido: vista en planta y en 3D	47
Figura 4.5. Derivas máximas de diseño (a) diseño preliminar; (b) diseño final	58
Figura 4.6. Elementos del pórtico del eje 1	63
Figura 4.7. Momentos en las columnas del pórtico del eje 1 en kN-m	64
Figura 4.8. Momentos en las vigas del pórtico del eje 1 en kN-m	65
Figura 4.9. Cortantes en los primeros tres pisos del pórtico del eje 1 en kN	65
Figura 4.10. Momentos y cortantes amplificados del pórtico arriostrado del eje 1 en kN-m y kN	66
Figura 4.11. Fuerzas axiales amplificadas en las riostras del eje 1 en kN	67
Figura 4.12. Cuantías para el eje 1 bajo cargas sísmicas amplificadas en kN	68
Figura 4.13. Cuantías de diseño para el eje 1 bajo cargas sísmicas en kN	69
Figura 4.14. Cuantías de diseño para el eje 1 bajo cargas sísmicas amplificadas en kN	70
Figura 5.1. Esquema de planta estructural	72
Figura 5.2. Elevación y distribución de las riostras	73
Figura 5.3. Espectro elástico de diseño	74
Figura 5.4. Fuerzas internas de las riostras, kN	78
Figura 5.5. Deriva de piso (a) deformación para un pórtico típico arriostrado; (b) resultados de deriva de piso	81
Figura 5.6. Fuerzas transmitidas por las riostras sobre las vigas	83
Figura 5.7. Fuerzas transmitidas por las riostras sobre las columnas	88
Figura 6.1. Curva característica de riostras de pandeo restringido	92

Figura 6.2. Esquema de criterio de aceptación	93
Figura 6.3. Criterio de aceptación para riostras de pandeo restringido en términos de ϵ_p	94
Figura 6.4. Esquema de criterio de aceptación para riostras de pandeo restringido basado en el ASCE 41-17	94
Figura 6.5. Criterio de aceptación para riostras de pandeo restringido en términos de δ_{By} para $L_p = 64\% L_B$	95
Figura 6.6. Criterio de aceptación para riostras de pandeo restringido en términos de δ_{By} para $L_p = 30\% L_B$	96
Figura 7.1. Derivas máximas de la Estructura Principal	106
Figura 7.2. Derivas máximas del sistema estructural sismorresistente bajo un análisis dinámico espectral	126
Figura 7.3. Derivas máximas del sistema estructural sismorresistente para el sismo de Armenia	126
Figura 7.4. Curva de desempeño de la Estructura Principal en dirección X	128
Figura 7.5. Curvas cortante-deriva de la Estructura Principal en dirección X	129
Figura 7.6. Derivas máximas de la Estructura Principal con secciones fisuradas	129
Figura 7.7. Fuerza restauradora esquemática	132
Figura 7.8. Perfil de derivas para el sismo de diseño ajustado y sin ajustar	145
Figura 7.9. Perfil de derivas máximas para el sismo de Armenia (a) sistema estructural sismorresistente; (b) Estructura Principal	146
Figura 8.1. Asignación de rótulas en el eje 1	149
Figura 8.2. Espectro de aceleraciones NSR-10 y del registro fuente modificado, sismo de diseño	151
Figura 8.3. Curva de capacidad en dirección X	152
Figura 8.4. Curvas ASCE 41-17 en dirección X, (a) demanda de sismo de diseño; (b) demanda de sismo máximo considerado	154
Figura 8.5. Curvas de desempeño según ATC-40	155
Figura 8.6. Curvas FEMA 440 en dirección X, (a) demanda de sismo de diseño; (b) demanda de sismo máximo considerado	155
Figura 8.7. Estado de rótulas en el punto de desempeño para el sismo de diseño, (a) eje 1; (b) eje 3	156
Figura 8.8. Perfil de deriva máxima bajo el sismo de Armenia	158
Figura 8.9. Respuesta tiempo-historia de la cortante de base	159
Figura 8.10. Estado de rótulas para el sismo de diseño, (a) eje 1; (b) eje 3	160
Figura 8.11. Desempeño de rótulas para el sismo de diseño, (a) eje 1; (b) eje 3	161

Figura 8.12. Respuesta de una riostra de pandeo restringido en el primer piso	161
Figura 9.1. Identificación de fuerzas sobre la conexión en esquina	165
Figura 9.2. Definición de fuerzas sobre la conexión en esquina	166
Figura 9.3. Identificación de componentes de la conexión	167
Figura 9.4. Resumen geometría de la conexión	172
Figura A.1. Esquema: estado límite # 1	180
Figura A.2. Esquema: estado límite # 2	181
Figura A.3. Esquema: estado límite # 3	182
Figura A.4. Esquema: estado límite # 4	182
Figura A.5. Esquema: estado límite # 5	183
Figura A.6. Esquema: estado límite # 6	184
Figura A.7. Esquema: estado límite # 7	184
Figura A.8. Esquema: estado límite # 8	185
Figura A.9. Esquema: estado límite # 9	185
Figura A.10. Esquema: estado límite # 10	186
Figura A.11. Esquema: estado límite # 12	187
Figura A.12. Esquema: estado límite # 13	188
Figura A.13. Esquema: estado límite # 19	189
Figura A.14. Esquema: estado límite # 20	189
Figura A.15. Esquema: estado límite # 21	190
Figura A.16. Esquema: estado límite # 27	191

Tablas

Tabla 1.1. Aspectos deseables en el uso de dispositivos de control de respuesta sísmica en edificaciones	7
Tabla 2.1. Influencia de la conexión al pórtico sobre la rigidez y la deriva alcanzada	24
Tabla 4.1. Resumen de parámetros sísmicos de la estructura referencia	46
Tabla 4.2. Distribución vertical preliminar de la cortante sísmica reducida para el sistema de arriostramiento	49
Tabla 4.3. Demandas preliminares sobre las riostras para un pórtico arriostrado en el piso	49

Tabla 4.4.	Resistencia mínima preliminar de riostras por piso para un pórtico con arriostramientos de pandeo restringido típico	50
Tabla 4.5.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 6	52
Tabla 4.6.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 5	53
Tabla 4.7.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 4	54
Tabla 4.8.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 3	54
Tabla 4.9.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 2	55
Tabla 4.10.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 1	56
Tabla 4.11.	Resistencia final para un pórtico con arriostramientos de pandeo restringido típico	57
Tabla 4.12.	Capacidad máxima ajustada de las riostras para $2\Delta_u$	60
Tabla 4.13.	Capacidad máxima ajustada de las riostras para 2 % de la altura de piso	61
Tabla 5.1.	Resumen de parámetros sísmicos de la estructura de referencia	74
Tabla 5.2.	Ánálisis de fuerzas horizontales	75
Tabla 5.3.	Fuerzas axiales preliminares de diseño en las riostras	76
Tabla 5.4.	Dimensiones mínimas de riostras por piso para un pórtico arriostrado en el piso	77
Tabla 5.5.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 4	79
Tabla 5.6.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 3	79
Tabla 5.7.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 2	79
Tabla 5.8.	Revisión demanda-capacidad de las riostras del piso 1	80
Tabla 5.9.	Dimensiones finales de las riostras	80
Tabla 5.10.	Deformaciones totales y unitarias de las riostras	81
Tabla 5.11.	Resistencias máximas ajustadas de las riostras	82
Tabla 5.12.	Fuerzas de diseño para los principales combos sísmicos del reglamento colombiano	84
Tabla 5.13.	Chequeo interacción axial-momento	88
Tabla 5.14.	Fuerzas internas para los combos sísmicos principales del reglamento colombiano	89
Tabla 7.1.	Parámetros sísmicos según ASCE 7-16	104
Tabla 7.2.	Cortantes mínimos de diseño según ASCE 7-16	104
Tabla 7.3.	Características nominales de riostras de pandeo restringido	107
Tabla 7.4.	Cálculo de β_{V1} para la dirección X	109
Tabla 7.5.	Parámetros preliminares de diseño según fuerza horizontal equivalente	110
Tabla 7.6.	Ajuste de cortante de diseño	117

Tabla 7.7.	Parámetros finales de diseño según fuerza horizontal equivalente	117
Tabla 7.8.	Demanda de desplazamiento según fuerza horizontal equivalente	119
Tabla 7.9.	Propiedades nominales y efectivas de las riostras	120
Tabla 7.10.	Parámetros de diseño para $T_1 = 0.80$ seg	121
Tabla 7.11.	Parámetros ajustados de diseño para $T_1 = 0.80$ seg	123
Tabla 7.12.	Demanda de desplazamiento según fuerza horizontal equivalente para $T_1 = 0.80$ seg	124
Tabla 7.13.	Propiedades de piso idealizadas de la Estructura Principal en dirección X	130
Tabla 7.14.	Propiedades de piso para los disipadores	133
Tabla 7.15.	Propiedades preliminares de riostras para un pórtico arriostrado	134
Tabla 7.16.	Propiedades preliminares de riostras para un pórtico arriostrado ($F_{jyc} = 250$ MPa)	134
Tabla 7.17.	Perfiles de deriva	135
Tabla 7.18.	Geometría de riostras para un pórtico arriostrado ($F_{jyc} = 250$ MPa, $\phi = 0.90$)	136
Tabla 7.19.	Propiedades de riostras para la fluencia en el núcleo	136
Tabla 7.20.	Deformación de las riostras para el doble de la deriva de diseño y la máxima deformación ε_p permitida	137
Tabla 7.21.	Propiedades efectivas de riostras para el perfil de derivas de diseño de la tabla 7.17	138
Tabla 7.22.	Cálculo preliminar de β_{V1} para el perfil objetivo de deriva de diseño	139
Tabla 7.23.	Parámetros de diseño	140
Tabla 7.24.	Parámetros ajustados de diseño	142
Tabla 7.25.	Demanda de desplazamiento según fuerza horizontal equivalente	142
Tabla 7.26.	Cálculo final de β_{V1} para los parámetros de diseño	143
Tabla 8.1.	Características estructurales de modelación de riostras de pandeo restringido	150
Tabla 9.1.	Resumen conexión Zona 1	168
Tabla 9.2.	Resumen conexión Zona 2	169
Tabla 9.3.	Resumen conexión Zona 3	170
Tabla 9.4.	Resumen anclaje Zona 2	170
Tabla 9.5.	Resumen anclaje Zona 3	171
Tabla 9.6.	Resumen de propiedades de la conexión	173
Tabla A.1.	Esquema: estado límite # 28	191

Lista de siglas

APR	arriostramiento de pandeo restringido
ADRS	formato espectro de aceleración - desplazamiento
ASCE	American Society of Civil Engineers
AISC	American Institute of Steel Construction
ATC	Applied Technology Council
BRB	Buckling-Restrained Brace
CP	límite de prevención de colapso
CSM	método del espectro de capacidad
DE	sismo de diseño (<i>Design Earthquake</i>)
DES	dissipación de energía especial en el rango inelástico
FHE	fuerza horizontal equivalente
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FO	límite de operación continua
IO	límite de ocupación inmediata
LS	límite de seguridad de vida
PAPR	pórticos con arriostramientos de pandeo restringido

NSP	procedimiento estático no lineal (Non-linear Static Procedure)
NSR-10	Reglamento colombiano de construcción sismorresistente
MCE	sismo máximo considerado (<i>Maximum Considered Earthquake</i>)
NLDA	análisis dinámico no lineal (<i>Non-linear Dynamic Analysis</i>)
RSA	análisis dinámico espectral (<i>Response Spectrum Analysis</i>)
SRSS	raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (<i>Square Root of Sum of Squares</i>)
UD	sismo de umbral de daño

Nomenclatura relacionada con el diseño de riostras de pandeo restringido

A_c	= área media de la sección de la conexión pórtico-riostra
$A_{c,min}$	= valor mínimo de A_c
A_{e1}	= área de la sección de la riostra de pandeo restringido en la Zona 1
A_{e2}	= área media de la sección de la riostra de pandeo restringido en la Zona 2
A_p	= área de la sección del núcleo de acero de la riostra de pandeo restringido en la Zona 3
A_{sc}	= área de la sección del núcleo de acero igual a A_p
C_{max}	= resistencia máxima ajustada a compresión de la riostra de pandeo restringido
E	= módulo de elasticidad del acero de la riostra de pandeo restringido
F_{yc}	= esfuerzo de fluencia del núcleo de acero de la riostra de pandeo restringido
$F_{yc,min}$	= esfuerzo de fluencia mínimo del núcleo de acero de la riostra de pandeo restringido
$F_{yc,max}$	= esfuerzo de fluencia máximo del núcleo de acero de la riostra de pandeo restringido
FI_i	= fuerza inercial en el nivel <i>i</i> -ésimo
H	= altura nodo a nodo de piso

K_c	= rigidez axial de la zona de conexión pórtico-riostra de la riostra de pandeo restringido
K_B	= rigidez axial total de la riostra de pandeo restringido
K'_B	= rigidez axial experimental de la riostra de pandeo restringido
K_{Bwp}	= rigidez axial total nodo a nodo de la riostra de pandeo restringido
K_{BpC}	= rigidez post-fluencia a tracción de la riostra de pandeo restringido
K_{BpC}	= rigidez post-fluencia a compresión de la riostra de pandeo restringido
KF	= factor de ajuste de rigidez
K_{e1}	= rigidez axial de la Zona 1 ($Z1$) de la riostra de pandeo restringido
K_{e2}	= rigidez axial de la Zona 2 ($Z2$) de la riostra de pandeo restringido
K_p	= rigidez axial de la Zona 3 ($Z3$) de la riostra de pandeo restringido
L	= longitud nodo a nodo del vano del pórtico
L_{e1}	= longitud total de la Zona 1 ($Z1$) de la riostra de pandeo restringido
L_{e2}	= longitud total de la Zona 2 ($Z2$) de la riostra de pandeo restringido
L_B	= longitud total de la riostra de pandeo restringido
L_c	= longitud de la conexión pórtico-riostra
L_p	= longitud total de la Zona 3 ($Z3$) de la riostra de pandeo restringido
L_{Bwp}	= longitud total de trabajo, nodo a nodo, de la riostra de pandeo restringido
P_{yc}	= resistencia axial de fluencia del núcleo de acero
T_{max}	= resistencia máxima ajustada a tracción de la riostra de pandeo restringido
$Z1$	= zona elástica de conexión de la riostra de pandeo restringido
$Z2$	= zona elástica de transición de la riostra de pandeo restringido
$Z3$	= zona plástica de la riostra de pandeo restringido
α_1	= factor adimensional de área, A_{e1}/A_p
α_2	= factor adimensional de área, A_{e2}/A_p
α_c	= factor adimensional de área, A_c/A_p
$\alpha_{c,min}$	= valor mínimo de α_c
β	= factor de ajuste de resistencia por compresión
δ_B	= deformación axial total de la riostra de pandeo restringido
$\delta_{B-\epsilon_p}$	= deformación axial total de la riostra de pandeo restringido a una deformación unitaria ϵ_p

δ_{Bwp}	= deformación axial total nodo a nodo de la riostra de pandeo restringido
δ_{By}	= deformación axial total de la riostra de pandeo restringido en fluencia
δ_c	= deformación axial de la zona de conexión pórtico-riostra
δ_{e1}	= deformación axial de la Zona 1 ($Z1$) de la riostra de pandeo restringido
δ_{e2}	= deformación axial de la Zona 2 ($Z2$) de la riostra de pandeo restringido
δ_p	= deformación axial de la Zona 3 ($Z3$) de la riostra de pandeo restringido
δ_i	= desplazamiento total en el nivel i -ésimo
ε_p	= deformación unitaria (plástica) en la longitud L_p
λ_1	= factor adimensional de longitud, L_1/L_B
λ_2	= factor adimensional de longitud, L_2/L_B
λ_c	= factor adimensional de longitud, L_c/L_B
λ_p	= factor adimensional de longitud, L_p/L_B
θ	= ángulo de inclinación de instalación de la riostra de pandeo restringido
$\Delta_{B-\varepsilon P}$	= deriva de piso alcanzada a una deformación ε_p sin considerar los elementos de conexión al pórtico
Δ_{Bwp}	= deriva de piso alcanzada a una deformación ε_p considerando los elementos de conexión al pórtico
ω	= factor de ajuste de resistencia por deformación
β'	= cociente de resistencia de fluencia
ν	= cociente de deriva de fluencia
φ	= factor de variación de la energía de entrada (<i>energy input</i>)

Definiciones relacionadas con el diseño de edificaciones con disipación de energía

Sistema estructural sismorresistente: es la combinación de elementos estructurales de la Estructura Principal y del Sistema de Disipación de Energía, responsables de resistir las fuerzas sísmicas.

Estructura Principal: se trata del sistema estructural sismorresistente, sin incluir los disipadores de energía ni sus componentes de conexión.

Disipador de energía: dispositivo que disipa energía a través del movimiento relativo de sus extremos. El dispositivo se puede clasificar según su comportamiento, si es dependiente de la velocidad o del desplazamiento, o una combinación de ambos. El diseño del disipador requiere que se determine si trabajará en el rango lineal o no lineal durante un evento sísmico.

Sistema de Disipación de Energía: es el conjunto de elementos estructurales que incluye todos los disipadores de energía y los componentes de conexión que se utilizan para transmitir las fuerzas desde los disipadores de energía a la Estructura Principal y a la base de la edificación.

Componentes de conexión: elementos como rótulas, pernos, placas de conexión, riostras y otros componentes que se requieren para conectar los disipadores de energía a los otros elementos de la Estructura Principal.

Disipador de energía dependiente del desplazamiento: es aquel cuya respuesta, medida en términos de la fuerza que genera el disipador, debe estar principalmente en función del desplazamiento relativo entre cada extremo del dispositivo. La respuesta debe ser sustancialmente independiente de la velocidad relativa entre cada extremo del dispositivo y la frecuencia de la excitación.

Disipador de energía dependiente de la velocidad: es aquel cuya respuesta, medida en términos de la fuerza que genera el disipador, debe estar principalmente en función de la velocidad relativa entre cada extremo del dispositivo.

Elementos controlados por fuerza: son aquellos de la Estructura Principal y del Sistema de Disipación de Energía, cuya respuesta de deformación inelástica es muy poco confiable y sucede con una caída crítica súbita de la capacidad de carga. Estos elementos deben diseñarse para tener un comportamiento elástico frente a las fuerzas de respuesta ante el sismo máximo considerado (MCE).

Prefacio

El presente documento corresponde a una guía de diseño para edificaciones a las que se les incorporan arriostramientos de pandeo restringido (APR) o *Buckling-Restrained Braces* (BRB). En la actualidad existen textos similares, desarrollados principalmente para la práctica de la ingeniería estructural en Estados Unidos y para estructuras metálicas. Sin embargo, en Colombia, el uso de estos dispositivos estructurales no es común, por lo que este documento se convierte en una herramienta de consulta para el diseño estructural de edificaciones con APR bajo el marco normativo actual colombiano.

En el primer capítulo, el documento presenta una breve descripción de los fundamentos de comportamiento de las riostras de pandeo restringido. Luego, en el capítulo 2, a través del análisis de resultados de pruebas experimentales realizadas en un dispositivo desarrollado y fabricado en Colombia, se discuten aspectos técnicos relacionados con las propiedades mecánicas de las riostras, y con el diseño de las edificaciones y de estos dispositivos estructurales. El capítulo 3 se enfoca en el esquema general de diseño de edificaciones con riostras. En los capítulos 4 y 5 se muestran ejemplos de diseño aplicados sobre edificaciones de concreto reforzado y acero estructural, bajo los lineamientos de la reglamentación colombiana.

A continuación, en el capítulo 6, se discute sobre los criterios de modelación y de aceptación de las riostras de pandeo restringido, para usarse en metodologías

de diseño basadas en desempeño. El capítulo 7 presenta el mismo ejemplo del capítulo 4, pero diseñado para utilizar los requisitos del capítulo 18 del documento de la *American Society of Civil Engineers ASCE 7-16*. Es decir, las riostras se consideran como disipadores de energía, por lo que el esquema general de diseño de la edificación difiere de los esquemas prescriptivos convencionales. En el capítulo 8, se implementa una verificación del desempeño estructural de las edificaciones diseñadas en los capítulos 4 y 7 a través de análisis no lineales estáticos y dinámicos. Se aborda, además, la metodología del espectro de capacidad (CSM, por sus siglas en inglés) para determinar el desempeño global de la edificación. El capítulo 9 muestra un ejemplo de diseño de una conexión entre la riostra y la Estructura Principal a través de una cartela (*Gusset Plate* en inglés). Vale la pena mencionar que los conceptos discutidos en el ejemplo pueden ser usados para el diseño de otro tipo de conexión.

Finalmente, el capítulo 10 presenta aspectos relacionados con el marco normativo sobre pruebas experimentales a las riostras de pandeo restringido. Para ello, se muestran especificaciones del reglamento colombiano y del documento del *American Institute of Steel Construction AISC 341*, los cuales consideran a las riostras o a los arriostramientos como “riostras avanzadas”. Adicionalmente, se desarrolla una discusión sobre los requisitos de ensayo de acuerdo con el documento *ASCE 7-16*, el cual trata a las riostras como disipadores de energía.

Agradecimientos

Expresamos nuestra mayor gratitud hacia nuestras familias: esposas, hijas e hijos por su gran apoyo y comprensión, para dedicarnos a la investigación y al desarrollo de técnicas de ingeniería relacionadas con los arriostramientos de pandeo restringido (riostras BRB). Muchas gracias por el ánimo y el tiempo que nos han dado.

Así mismo, a los colegas y profesionales vinculados a la empresa F'C Control y Diseño de Estructuras SAS, quienes aportaron con sus conocimientos a las diferentes actividades relacionadas con el desarrollo de las riostras BRB. Un agradecimiento especial al ingeniero Andrés Mauricio Bernal Zuluaga por su apoyo incondicional desde lo personal, lo profesional y lo empresarial, y a la ingeniera Nayive Jaramillo Santana por su valioso apoyo en la investigación.

A los estudiantes y profesionales de la Universidad de los Andes y de la Universidad EIA; con esta última, hemos compartido las excelentes y valiosas experiencias en las pruebas del dispositivo desarrollado por más de una década. Al profesor Carlos A. Blandón U. y a los ingenieros Mauricio Ramírez y Javier Penagos, por liderar las pruebas.

A todas las personas por su interés en esta publicación. Esperamos que la información suministrada sirva para futuras implementaciones de riostras de pandeo restringido en las edificaciones colombianas, con las que se logrará reducir el panorama de riesgo sísmico.

Un agradecimiento especial a la Facultad de Ingeniería de la Universidad los Andes y a Ediciones Uniandes por su liderazgo en el proceso de publicación de este libro. Finalmente, expresamos nuestra enorme gratitud a todos aquellos que contribuyeron y nos apoyaron para la elaboración del presente texto. Muchas gracias al ingeniero Gustavo A. Fuentes por el soporte en la preparación y la edición de este documento.

Juan Andrés Oviedo A. y Juan Carlos Reyes

Capítulo 1.

Aplicación de arriostramientos de pandeo restringido en edificios

1.1. Introducción

A medida que las metodologías y las técnicas de diseño avanzan, el diseño estructural apunta más allá del solo control de colapso de las edificaciones, y se enfoca también en evaluar el comportamiento de la estructura ante diferentes niveles de demanda sísmica. Esto no solo con el objeto de satisfacer necesidades de protección del patrimonio, de elementos de uso de la estructura, del mobiliario interior, de elementos no estructurales, sino también de asegurar el funcionamiento de edificaciones indispensables durante y después de un terremoto fuerte.

Entre las filosofías modernas de diseño se presenta la de diseño por desempeño o diseño basado en comportamiento estructural, unido al concepto de tolerancia de daño en elementos estructurales, no estructurales y de equipamiento de la edificación. Esta filosofía de diseño permite evaluar la fiabilidad sísmica de una edificación ante sismos de diferentes intensidades.

Ciertos códigos de diseño basados en las recomendaciones del Programa Nacional de Reducción de Riesgos de Terremotos (NEHRP, por sus siglas en inglés) como ATC-40 (1996), FEMA-273 (1997), FEMA-356 (2000) y FEMA 450 (2003), y otros proyectos como 'Vision 2000', que presentan el método de diseño basado en desempeño con algunas diferencias, han sido ampliamente usados en el diseño y el reforzamiento de edificaciones. Esto ha dado la posibilidad de generar estructuras con un desempeño sísmico predecible. De igual forma, las edificaciones diseñadas bajo el concepto de diseño basado en comportamiento (*performance-based design*) y diseño basado en desplazamiento (*displacement-based design*) tienen un nivel de confiabilidad mayor que aquellas a las que no se les ha aplicado este criterio.

Por ejemplo, Montiel y Terán-Gilmore (2008) presentan la evaluación de la fiabilidad de dos edificios de 24 pisos. Este estudio compara dos edificios de estructura metálica, uno correspondiente a un sistema estructural tradicional de pórticos de acero dúctil combinado con pórticos resistentes a momentos, diseñado por el método tradicional; y el otro, con dispositivos de control de respuesta sísmica, específicamente riostras de pandeo restringido. Entre sus resultados se resalta la mayor fiabilidad sísmica del edificio que utiliza los dispositivos. Esto se basa, sobre todo, en el hecho de que su esqueleto estructural pesa el 40 % del edificio tradicional.

En las últimas décadas, se ha visto un interés marcado y creciente por el desarrollo de sistemas y elementos estructurales que mejoren el desempeño de las edificaciones ante cargas sísmicas y protejan la integridad estructural. Las técnicas de control de respuesta sísmica (véanse Bozorgnia y Bertero, 2004; Higashino y Okamoto, 2006; Soong y Spencer Jr., 2002) han demostrado, a través de numerosas aplicaciones en el mundo, ser una opción eficiente para aumentar el nivel de seguridad contra los terremotos en edificaciones, al controlar la demanda de derivas y daño sísmico. Entre estas técnicas, los disipadores histeréticos por deformación (véanse Chang y Albermani, 2008; Iwata y Murai, 2006; Wada y Nakashima, 2004; Whittaker *et al.*, 1989) son uno de los elementos estructurales de disipación de energía más usados en el mundo debido, principalmente, a su bajo costo y a la facilidad de construcción y modelamiento. Estos elementos estructurales especiales son instalados en puntos seleccionados dentro la Estructura Principal, con el propósito de disipar la mayor parte o la totalidad de la energía sísmica. El daño se concentra en estos elementos, por lo que se protege la Estructura Principal.

Vale la pena destacar que las técnicas de control de respuesta sísmica han sido desarrolladas con el objetivo de reducir y controlar el daño estructural asociado principalmente a sismos. Estas técnicas complementan a las tradicionales de diseño al introducir elementos estructurales adicionales, los cuales deben disipar la mayor parte de la energía sísmica. Estos dispositivos se colocan estratégicamente en la Estructura Principal para maximizar su capacidad de disipación de energía y poderlos reemplazar fácilmente (Oviedo A. y Duque, 2006).

La utilización de técnicas de control de respuesta sísmica en edificaciones tiene gran acogida en países como Japón, Estados Unidos, Chile y México (Higashino y Okamoto, 2006; Kitamura *et al.*, 2004; Housner *et al.*, 1997). Sin embargo, su uso ha sido reducido en Colombia (Oviedo A. y Duque, 2009). Oviedo A. *et al.* (2008, 2010-2012) realizaron una serie de análisis comparativos de la respuesta sísmica de una edificación de pórticos de concreto reforzado con 5, 10 y 20 pisos sin disipadores histeréticos metálicos tipo ristra con pandeo restringido y con ellos. Las propiedades mecánicas de los disipadores se variaron sistemáticamente para controlar la deformación de fluencia de los disipadores. Se reportaron reducciones significativas del daño estructural en la Estructura Principal (concreto reforzado) y una mejora del desempeño estructural cuando las ristras eran instaladas según el esquema propuesto. Así mismo, se reportaron reducciones que iban desde el 10 % hasta el 80 % del desplazamiento lateral y daño sísmico de piso. Se mostró, además, una distribución en altura casi uniforme de la reducción de las derivas de entrepiso y del daño sísmico. Esto sugiere una protección controlada de la Estructura Principal. Igualmente, la reducción de los desplazamientos laterales de piso se atribuye básicamente al aumento de rigidez del sistema dado por las ristras, además de su elevada capacidad de disipación de la energía.

Con relación a los arriostramientos de pandeo restringido, Oviedo A. y Duque (2009) sugieren que, para las edificaciones colombianas, se podrían adoptar procedimientos de diseño de Estados Unidos para estructuras con arriostramientos metálicos. Esto es, tratar los APR como ristras especiales que soportan esfuerzos de compresión sin fallar por pandeo y utilizar los mismos valores de R que se usan para edificaciones tradicionales. Este esquema de trabajo representaría un cambio mínimo dentro de la filosofía de diseño tradicional en Colombia. Sin embargo, se deben plantear a futuro métodos de análisis y diseño más elaborados que permitan hacer uso de las propiedades de disipación de energía de estos dispositivos. Oviedo A. y Duque (2009) presentaron, además, una descripción cualitativa de la viabilidad para la aplicación de técnicas de control de respuesta

sísmica en edificaciones colombianas. Para ello, determinaron las técnicas más apropiadas para ser implementadas en el país, de acuerdo con condiciones de fabricación y aplicación, y así cumplir con las condiciones deseadas de protección y control de daño estructural. En este trabajo, se llegó a la conclusión de que los disipadores histeréticos tipo ristra con pandeo restringido eran una opción viable y se ajustaban más a las condiciones locales colombianas.

Por su parte, Reyes y Rubiano (2002) han direccionado esfuerzos en trabajos de investigación sobre disipadores de energía. Publicaron resultados de una investigación en la que se plantearon metodologías de diseño y se realizaron ensayos experimentales con dispositivos histeréticos metálicos analizando su comportamiento. Dentro de las conclusiones y las recomendaciones de este trabajo, se puede resaltar la necesidad de desarrollar más estudios, ya que dentro de la rehabilitación de edificaciones con estos dispositivos intervienen una gran cantidad de variables. Es importante resaltar que se encontraron grandes ventajas en el uso de dichos dispositivos para la rehabilitación de edificaciones; entre estas, el impacto mínimo en la operatividad, la facilidad para la disposición de material en obra y un amplio abanico de posibilidades y libertades arquitectónicas.

De igual manera, algunos ingenieros de Argentina y España desarrollaron una investigación orientada a diseñar, analizar y producir un modelo de disipador histerético de tipo APR que requiriera baja tecnología. Esto permitió su producción en masa, principalmente en países de infraestructura emergente. Los autores concluyeron que sí es posible encontrar dispositivos de bajo costo, eficientes, con poco mantenimiento y durables en el tiempo que requieran procesos de producción de baja tecnología (Palazzo *et al.*, 2009).

El reglamento colombiano de construcciones sismorresistentes permite el uso de estructuras aisladas sísmicamente en su base y el uso de elementos disipadores de energía, siempre y cuando se cumplan los requisitos respectivos, exigidos en Estados Unidos para las construcciones con técnicas de control de respuesta sísmica, en al menos uno de los dos siguientes documentos:

- Building Seismic Safety Council. (2004). *NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450), 2003 Edition*. Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences.
- American Society of Civil Engineers. (2006). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-05*. American Society of Civil Engineers.

El ingeniero responsable del diseño debe demostrar que la estructura cumple con los propósitos de seguridad, durabilidad y resistencia, especialmente sísmica, y debe presentar, además, en

los documentos necesarios para la obtención de la licencia, la evidencia demostrativa y un memorial en el cual inequívocamente acepta la responsabilidad sobre las metodologías de análisis y diseño, como también presentar el diseño a aceptación de la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismorresistentes. (Artículo 10°, Capítulo II, Ley 400 de 1997)

Desde finales del 2015, el Comité AIS-700 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) ha venido desarrollando el primer documento normativo colombiano para edificaciones con aislamiento sísmico y con disipación de energía. El texto normativo está basado principalmente en los requisitos dados en ASCE 7-16.

Cancelado *et al.* (2013) realizaron unas pruebas experimentales en la Universidad de los Andes a cuatro probetas de APR a escala 1:4. Se llevaron a cabo ensayos cíclicos según el protocolo dado por la NSR-10 a cada una de las 4 probetas. A partir de esto, se concluyó que el tipo de riostras ensayado cumplía con los requisitos mínimos de la NSR-10. De igual forma, en los últimos diez años, Oviedo A. *et al.* han realizado una serie de pruebas experimentales a escala real a diferentes prototipos de APR, sometiéndolos a cargas cíclicas de tracción y compresión axial (Oviedo A., 2015, 2017, 2019, 2022). Estos prototipos fueron construidos con materiales y mano de obra local y ensayados en el Laboratorio de Mecánica Estructural de la Universidad EIA. Los diferentes estudios han mostrado que los dispositivos ensayados cumplen satisfactoriamente con los requisitos establecidos por el reglamento colombiano; lo cual indica que estos dispositivos presentan una gran oportunidad para ser implementados en las edificaciones colombianas. Adicionalmente, los resultados de las pruebas experimentales mostraron que los dispositivos podían alcanzar deformaciones unitarias de hasta 3%, con ciclos de histéresis estables y con buena capacidad de disipación de energía.

En un estudio reciente, realizado por Alzate y Oviedo A. (2020, 2022), se reportó que los parámetros sísmicos actuales de edificaciones de concreto resistente a momento serían adecuados para ser usados en el caso de que la misma edificación presentara riostras de pandeo restringido. De hecho, el estudio mostró que el parámetro de modificación de respuesta R podría ser incrementado, si se tenía

en cuenta el efecto positivo de la incorporación de APR en el diseño. Finalmente, Oviedo A. *et al.* (2021) propusieron una metodología para determinar un índice de daño y el criterio de aceptación para ser usado en el diseño de edificaciones con APR. En el capítulo 6 de este documento se tratará con mayor detalle el criterio de aceptación para ser usado en metodologías basadas en desempeño.

1.2. Conceptos y aplicaciones

Una de las razones principales para el uso de dispositivos de disipación de energía es su mayor versatilidad y amplios beneficios comparados con otras técnicas, como se muestra en los aspectos considerados en la tabla 1.1. Según Oviedo A. y Duque (2006), la técnica de disipadores pasivos con mayor factibilidad de implementarse en Colombia y otros países de Latinoamérica es la de disipadores pasivos histeréticos metálicos tipo ríostras de pandeo restringido. Esto se debe, principalmente, a la disponibilidad de los materiales y a la sencillez en el proceso de fabricación.

En la figura 1.1 se muestra un esquema de un disipador de energía tipo ríostra de pandeo restringido, el cual está compuesto por un núcleo de acero, un material de confinamiento (por lo general, hormigón o mortero especial) y un tubo externo. El núcleo de acero disipa energía por la fluencia en su propio material, debido a las fuerzas transmitidas por la estructura a la ríostra, y dependiendo de su forma geométrica y de su posición en la estructura. El material de confinamiento y el tubo de acero tienen como función restringir el pandeo lateral del núcleo. Un aspecto fundamental para el funcionamiento adecuado de la ríostra, como disipador de energía, es la no adherencia entre el núcleo de acero y el material de confinamiento; de esta manera, las fuerzas son tomadas y soportadas únicamente por el núcleo. La facilidad de consecución de elementos de acero en el mercado local colombiano, la homogeneidad en sus propiedades, la factibilidad de la realización de ensayos locales a este material, el uso común en la construcción de morteros y la relativa sencillez en la fabricación de los dispositivos histeréticos metálicos tipo ríostra son características que convierten a este dispositivo en un candidato óptimo para ser fabricado e implementado en las edificaciones en Colombia y otros países en Latinoamérica.

En el mundo se han ensayado muchas clases de ríostras metálicas de pandeo restringido. Las variables involucradas en su comportamiento son: la geometría

del núcleo de acero, la calidad del material de confinamiento, el material de aislamiento entre el confinamiento y el núcleo de acero, la geometría del tubo exterior y la colocación dentro de la estructura (Palazzo *et al.*, 2009; Qiang, 2005; Black *et al.*, 2004; Chung-Che *et al.*, 2016; Bozkurt *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2017). En un estudio realizado por Oviedo A. y Kitamura (2005) se mostró que los aisladores y los disipadores, comúnmente utilizados en Japón, eran demasiado rígidos para ser usados en estructuras colombianas convencionales, por lo que era necesario adaptar el diseño a las estructuras típicas latinoamericanas.

TABLA 1.1. Aspectos deseables en el uso de dispositivos de control de respuesta sísmica en edificaciones

Aspectos deseables	Dispositivo de control pasivo		
	Aislamiento basal	Disipadores de energía	Masa adicional
Bajo costo inicial	✓		
Eficiencia contra sismo	✓	✓	✓
Eficiencia contra viento		✓	✓
Larga vida útil	✓	✓	✓
Bajo costo de mantenimiento		✓	
Eficiencia en estructuras flexibles		✓	✓
Eficiencia en suelos blandos		✓	✓
Eficiencia en suelos duros	✓	✓	✓
Bajo costo-reemplazo postsismo		✓	
Bajo costo de fabricación		✓	
Fácil instalación		✓	
Bajo daño estructural postsismo	✓	✓	✓
Fácil rehabilitación de estructuras		✓	
Fácil implementación en sistemas aporticados	✓	✓	✓
Fácil implementación en muros de carga		✓	✓

Fuente: Oviedo A. y Duque, 2006, elaboración propia.

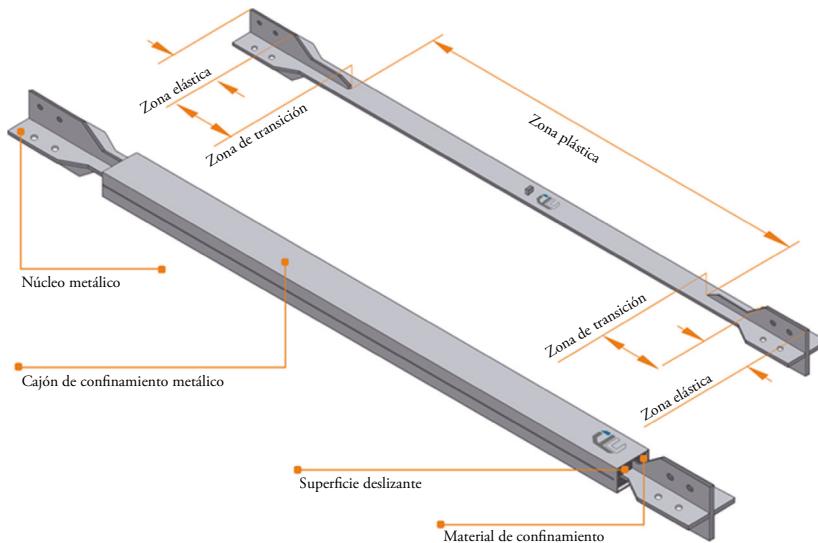


Figura 1.1. Esquema de un disipador de energía tipo arriestramiento de pandeo restringido

Fuente: elaboración propia.

La figura 1.2 muestra los ciclos de histéresis de un espécimen de riostra de pandeo restringido ensayado en Colombia (Oviedo A., 2017; Oviedo A. *et al.*, 2017-2022). El eje vertical muestra la resistencia axial normalizada por la resistencia nominal de fluencia y el eje horizontal muestra la deformación unitaria axial. Entre los diferentes modos probables de falla (Takeuchi y Wada, 2017), el predominante en el estado último de resistencia de la riostra corresponde a la falla por compresión con pandeo inelástico, acompañado del abultamiento del mecanismo de restricción de pandeo.

Del comportamiento mostrado en la figura 1.2 se pueden resaltar las siguientes características de una riostra de pandeo restringido:

- Resistencia a cargas de tracción y compresión, más allá de fluencia.
- Alta ductilidad a tracción y compresión.
- Ciclos de histéresis estables.
- Excelente disipación de energía.
- Excelente desempeño sísmico.
- Poca degradación de rigidez.

Además de las características mencionadas, las riostras de pandeo restringido ofrecen una instalación y una manipulación fácil por parte del personal de la obra. De igual forma, en los últimos años se ha registrado dentro del estado del arte mundial otro aspecto muy importante a evaluar, el comportamiento a fatiga. Esta evaluación es representativa del comportamiento de las riostras de pandeo restringido ante sismos suaves (o moderados) frecuentes, y es un aspecto técnico clave en el desarrollo del dispositivo. Tsai *et al.* (2004) realizaron pruebas experimentales a un tipo de riostra de doble núcleo de acero, en las cuales reportaron el comportamiento ante cargas cíclicas de fatiga. Para esta evaluación, los autores sometieron un espécimen a cargas de fatiga con una deformación unitaria igual a la deriva de diseño. Encontraron una capacidad de sostener hasta 262 ciclos antes de la falla para una deformación unitaria de 1.25 %. Por otro lado, Usami *et al.* (2011) realizaron pruebas experimentales con tres protocolos de carga de fatiga: un protocolo de amplitud constante y dos protocolos con amplitud variable. Utilizaron amplitudes de deformación axial desde el 1.0 % al 3.0 %, y encontraron una capacidad de sostener hasta 110 ciclos antes de la falla para una deformación unitaria máxima del 1.0 %. Recientemente, Oviedo A. *et al.* (2017) reportaron los resultados de un programa experimental en el que se realizaron pruebas bajo condiciones de fatiga a dos prototipos de riostras a escala real. En su estudio se reportó que (1) la falla por fatiga se presentó por rotura por tracción en el núcleo, debido al agrietamiento gradual de este, dado por aplicaciones repetidas de esfuerzos insuficientes para causar la falla en una sola aplicación; (2) los cajones de restricción de todas las riostras no presentaron daño; y (3) la deformación plástica acumulada resultó mayor que los límites establecidos para diferentes niveles de intensidad sísmica (sismo de diseño y máximo). Todo esto indica capacidad suficiente de disipación de energía.

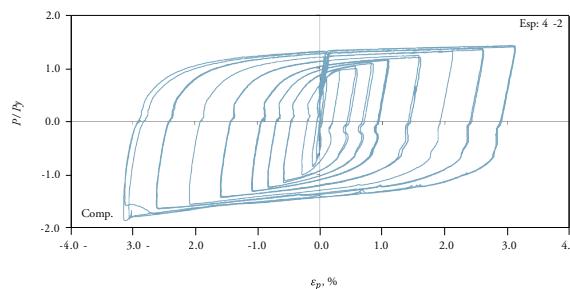


Figura 1.2. Curva histerética de riostras de pandeo restringido

Fuente: Oviedo A. *et al.*, 2017, elaboración propia.

Los APR se instalan en edificaciones, principalmente, en 4 tipos de configuración, como se muestra en la figura 1.3. Una variante a la configuración de arriostramiento en diagonal zig-zag es la configuración en diagonal sencilla donde piso a piso se tiene la misma orientación de las riostras. Los dispositivos se conectan al pórtico principal (concreto o acero) de forma directa a través de conexiones calificadas tipo *Gusset Plate* o de forma indirecta por medio de marcos metálicos. Esto último es muy común en el caso de reforzamientos estructurales, en los cuales la alternativa de riostras de pandeo restringido presenta una alternativa eficiente de reforzamiento estructural desde el punto de vista económico y de desempeño estructural. En Estados Unidos, por ejemplo, el uso de pórticos con arriostramientos de pandeo restringido (PAPR) ha crecido fuertemente en los últimos años, tanto para estructuras nuevas como para reforzamientos estructurales. La conexión entre las riostras y las cartelas (*Gusset Plates*) se realiza a través de conexiones pernadas o soldadas. El tipo de conexión depende de cada fabricante; las pruebas experimentales de calificación deben tener en cuenta el tipo de conexión. En Takeuchi y Wada (2017) puede consultarse más información sobre las características de la conexión.

Dentro de las ventajas obtenidas con la incorporación de sistemas PAPR en edificaciones se resaltan:

- Menor cantidad de arriostramientos y conexiones.
- Mayor libertad arquitectónica al requerirse un menor número de pórticos arriostrados.
- Aumento del desempeño sísmico estructural de las edificaciones.
- Reducción del daño sísmico en elementos estructurales, no estructurales y en contenidos (si el diseño se realizó para tal fin).
- Menor peso muerto de la edificación.
- Reducciones de las fuerzas de diseño, tanto en su uso como riostra especial o como disipador de energía.
- Reducción en el tamaño de columnas y vigas que no hacen parte de los pórticos arriostrados.
- Reducción de fuerzas de diseño transmitidas a la cimentación.
- Aumento en la velocidad de construcción.
- Reducción en la extensión de la intervención en obra para proyectos de reforzamiento o rehabilitación estructural.

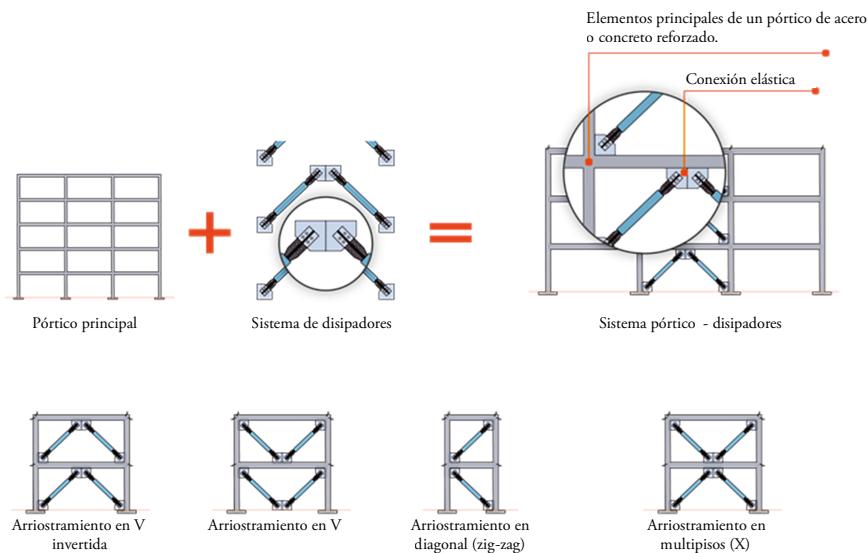


FIGURA 1.3. Esquemas de instalación de arriostramiento de pandeo restringido en edificaciones

Fuente: elaboración propia.

1.3. Comportamiento de edificaciones con arriostramientos de pandeo restringido

Desde la práctica de diseño estructural, la incorporación de APR en una edificación se puede abordar desde dos esquemas: (1) las riestras actúan como “riestras avanzadas”; es decir, resisten cargas a compresión sin presentar pandeo elástico, o (2) las riestras actúan como disipadores de energía. Los dos esquemas tienen un tratamiento diferencial en cuanto a métodos de diseño y de evaluación del desempeño sísmico de la edificación. Por ejemplo, en Estados Unidos, las riestras son comúnmente usadas como arriostramientos especiales, mientras que en Japón se usan como disipadores de energía. Este tratamiento diferencial se identifica, claramente, en los diferentes documentos normativos de ambos países. Las riestras de pandeo restringido son elementos estructurales especiales comúnmente instalados en el plano de los pórticos de una edificación. Dependiendo del tipo

de instalación, el sistema pórtico-disipador puede ser clasificado en tres tipos: conexión directa, conexión indirecta y sistema especial (Higashino y Okamoto, 2006); los del tipo conexión directa son los más usados, ya que otorgan una mayor eficiencia para el control de la respuesta sísmica. En este tipo, los disipadores conectan elementos estructurales de pisos consecutivos para controlar el desplazamiento lateral relativo del piso donde se instalan. La figura 1.3 muestra esquemas de PAPR en conexión directa. En edificaciones de baja y mediana altura, los disipadores histeréticos se relacionan muy bien con la fuerza cortante y la deriva del entrepiso donde son instalados. En el caso de edificaciones altas, se debe tener en cuenta el efecto del comportamiento global a flexión de la edificación sobre el comportamiento de los disipadores de energía. En términos generales, la fuerza restauradora del sistema pórtico-disipador se puede asumir como la combinación de dos sistemas (pórtico principal y sistema de disipadores) conectados en paralelo de tal forma que ambos sistemas comparten la misma deformación lateral (figura 1.4). La figura 1.4b muestra la curva idealizada de cortante de piso contra deriva de piso. Bajo esta hipótesis, se espera que el pórtico principal permanezca elástico o con baja inelasticidad, mientras que el sistema de disipadores desarrolla un comportamiento inelástico significativo.

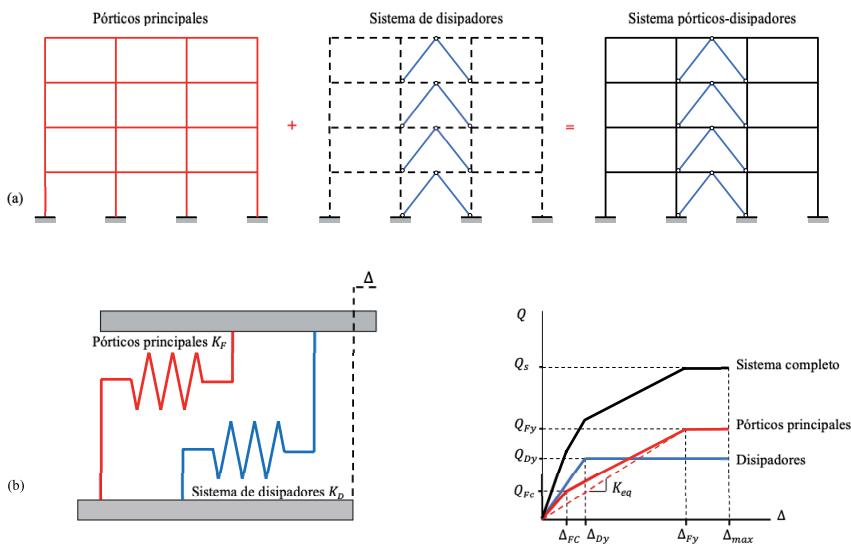


FIGURA 1.4. Sistema pórtico-disipador: (a) configuración esquemática; (b) curva de piso idealizada cortante-deriva

Fuente: elaboración propia.

Los disipadores histeréticos proporcionan rigidez, resistencia y capacidad de disipación de energía a una edificación, como se muestra en la figura 1.5. En ella es claro que los disipadores de energía contribuyen a la reducción de la demanda de desplazamiento lateral y de la energía inelástica (plástica) en la Estructura Principal (pórtico principal). De esta forma, se puede llevar incluso la Estructura Principal a un comportamiento elástico.

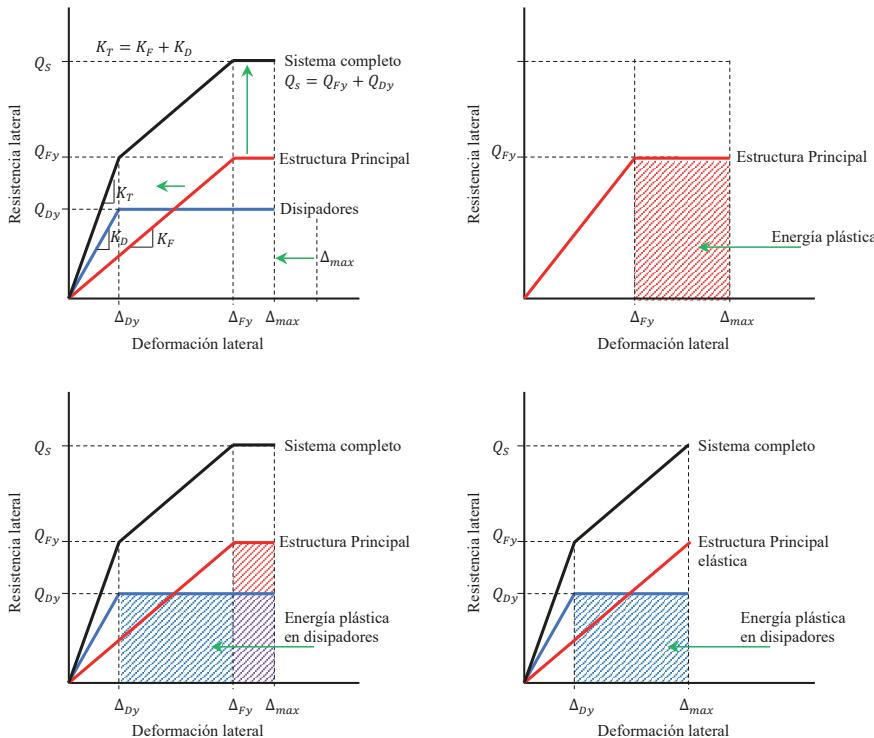


FIGURA 1.5. Aumento esquemático de rigidez, resistencia y capacidad de disipación de energía

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, para que el sistema de disipadores contribuya notablemente a la reducción del daño sísmico y del desplazamiento lateral, se requiere que los disipadores alcancen su nivel de fluencia mucho antes que la fluencia en la Estructura Principal. Para esto, la resistencia de fluencia de los disipadores es generalmente menor que la de la Estructura Principal. No obstante, se le debe poner atención especial a la rigidez de los disipadores ya que, si esta rigidez es

mucho menor que la de la Estructura Principal, los disipadores no fluyen antes que la Estructura Principal (figura 1.6). Esto hace que se disminuya la efectividad del sistema de disipadores. Una opción para asegurar que el sistema de disipadores fluya primero que la Estructura Principal es a través del control explícito de la deriva de fluencia de los disipadores. Algunos detalles adicionales pueden encontrarse en Oviedo A. *et al.* (2010; 2012).

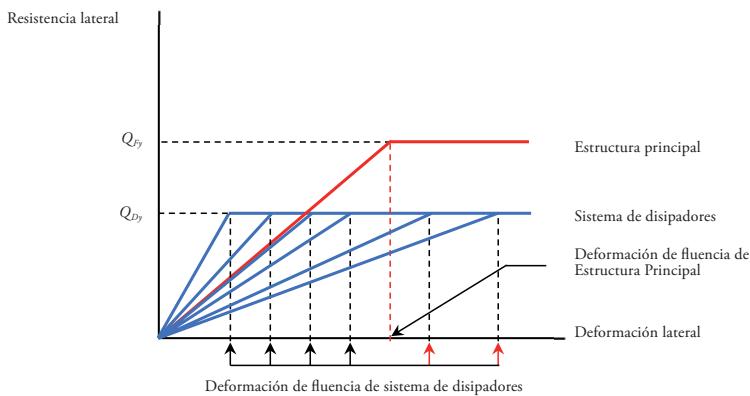


FIGURA 1.6. Relación esquemática de fuerza restauradora de la Estructura Principal y el Sistema de Disipación de Energía

Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, en el caso de edificaciones altas, se debe considerar el efecto global a flexión de la edificación sobre el comportamiento del Sistema de Disipación de Energía. La deformación global a flexión de la edificación, particularmente la de los pórticos arriostrados, conlleva a una reducción de la rigidez efectiva del Sistema de Disipación de Energía. Esto reduce su contribución a la disipación de energía inelástica. Como resultado, especialmente en los pisos superiores de la edificación, los disipadores (o riostras) pueden no activarse (sobrepasar su punto de fluencia) o comportarse esencialmente elásticos mientras que la Estructura Principal absorbe el daño sísmico. Esto último no restringe el uso de PAPR en tal escenario (las riostras siguen aportando rigidez y resistencia lateral a la edificación), sino que se podrían flexibilizar algunos aspectos normativos de comportamiento del dispositivo en los ensayos de calificación. La figura 1.7a muestra el efecto de la deformación global a flexión de la estructura sobre la deriva de piso. El efecto global a flexión lleva a un incremento en el desplazamiento lateral relativo de piso, dado por la rotación de piso generada por

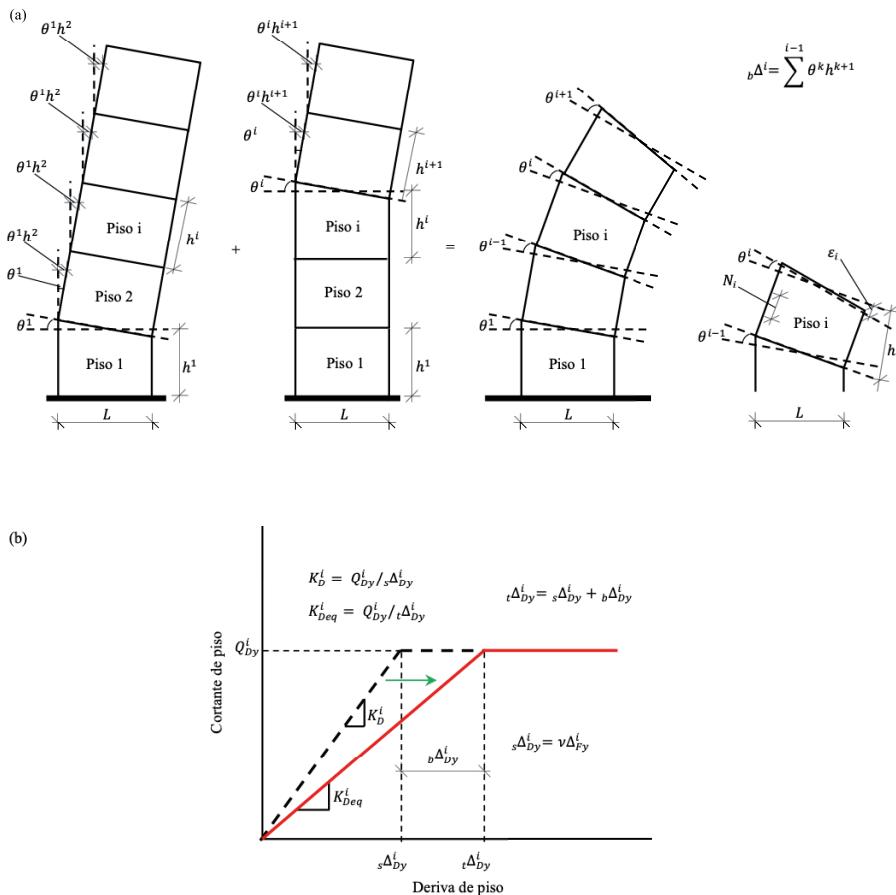


FIGURA 1.7. Deformación global a flexión: (a) deformación del pórtico arriostrado; (b) efecto sobre el Sistema de Disipación de Energía

Fuente: elaboración propia.

el acortamiento y la extensión simultánea de los elementos verticales (columnas en la ilustración). Sin embargo, cabe resaltar que este incremento en la deriva de piso no genera deformaciones en los disipadores de energía. La figura 1.7b muestra el efecto de la deformación global a flexión sobre un disipador instalado en un piso determinado. La deriva a la cual el disipador alcanza fluencia será aquella en la que se tiene en cuenta tanto el componente de deformación lateral por el comportamiento global a cortante como el de flexión. De este modo, entre mayor sea la contribución del comportamiento global a flexión en la

edificación, mayor será la reducción en la rigidez lateral efectiva y la efectividad del Sistema de Disipación de Energía. Por lo anterior, es muy importante tener en cuenta el efecto de la deformación global a flexión dentro del diseño de la edificación y sobre todo en la definición de los parámetros estructurales de los dispositivos de disipación de energía. Una alternativa para disminuir el efecto global a flexión es a través del incremento de la capacidad axial de las columnas del pórtico arriostrado. En Oviedo A. *et al.* (2012) y Kamura *et al.* (2002) se puede encontrar mayor información al respecto.

Capítulo 2.

Propiedades mecánicas de arriostramientos de pandeo restringido

2.1. Rigidez axial de riostras de pandeo restringido

Dentro del proceso de diseño estructural de edificaciones equipadas con APR es muy importante determinar las deformaciones axiales en el núcleo de los dispositivos que se generan bajo la deriva de diseño de la edificación. De acuerdo con el documento AISC 341, las riostras deben ser capaces de acomodar la deformación axial que se produzca cuando se presente el doble de la deriva de piso calculada en el diseño. Este mismo documento establece que el valor del doble de la deriva de diseño corresponde al valor medio de la respuesta máxima bajo movimientos de terreno, que representan un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años.

La figura 2.1 muestra la condición deformada de un pórtico arriostrado bajo un desplazamiento horizontal Δ (*deriva de piso*). La relación entre la deriva de piso Δ y la deformación axial total del arriostramiento δ_B está dada por:

$$\Delta = \delta_B \frac{L_B}{L} \quad (2.1)$$

donde L_B , L y δ_B son la longitud total de la riostra, la longitud del vano del pórtico donde está instalada la riostra y la deformación axial total de la riostra, respectivamente. La ecuación (2.1) puede reescribirse en términos del ángulo de inclinación de instalación θ , así:

$$\Delta = \frac{\delta_B}{\cos \theta} \quad (2.2)$$

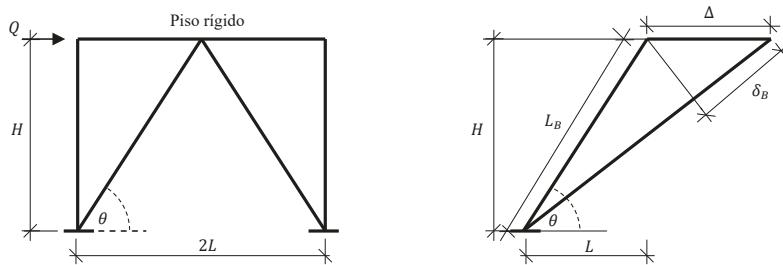


FIGURA 2.1. Deformación horizontal idealizada de un pórtico arriostrado

Fuente: elaboración propia.

La figura 2.2 muestra la identificación de las tres zonas en las que se divide el trabajo mecánico de la riostra. La zona 1 corresponde a la zona de conexión elástica de la riostra; la zona 2, a la de transición elástica; y la zona 3, a la de la riostra donde se espera toda la deformación inelástica (disipación de energía). En esta figura se muestra solamente la mitad del espécimen. Dado que las rios- tras están compuestas por diferentes partes según su comportamiento, para el cálculo de δ_B es necesario separar las diferentes contribuciones de cada una de las partes. Con base en la figura 2.2, la figura 2.3 muestra cinco resortes conectados en serie; cada uno representa una de las cinco partes en las que está dividida la riostra (dos zonas 1, dos zonas 2 y una zona 3). Por lo tanto, la deformación total de la riostra y la rigidez axial equivalente K_B están dadas por:

$$\delta_B = 2\delta_{e1} + 2\delta_{e2} + \delta_p \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{K_B} = \frac{2}{K_{e1}} + \frac{2}{K_{e2}} + \frac{1}{K_p} \quad (2.4)$$

donde, δ_{e1} , δ_{e2} y δ_p representan la deformación de la zona elástica 1, la deformación de la zona elástica 2 y la deformación de la zona plástica, respectivamente. Por otro lado, K_{e1} y K_{e2} representan la rigidez axial de las zonas elásticas 1 y 2, respectivamente.

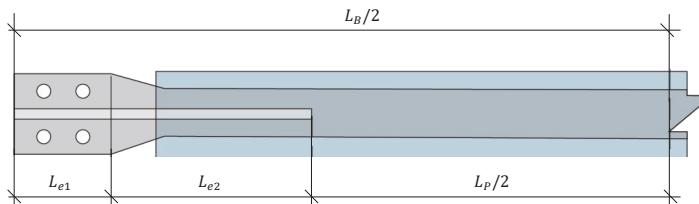


FIGURA 2.2. Identificación de zonas en la riostra

Fuente: elaboración propia.

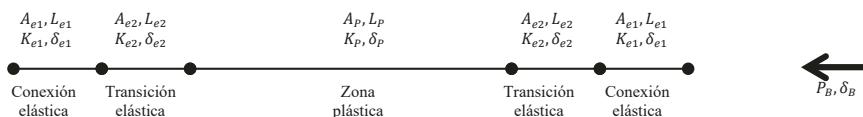


FIGURA 2.3. Modelo idealizado de riostra

Fuente: elaboración propia.

En el momento de la fluencia del núcleo en la zona plástica, la ecuación (2.3) se puede reescribir así:

$$\delta_{By} = 2\delta_{e1y} + 2\delta_{e2y} + \delta_{py} \quad (2.5)$$

Con base en la relación entre carga y deformación axial de un elemento, la ecuación (2.5) nuevamente se puede expresar así:

$$\delta_{By} = 2 \frac{P_{ysc}}{E} \left[\frac{L_{e1}}{A_{e1}} + \frac{L_{e2}}{A_{e2}} + \frac{L_p}{2A_p} \right] \quad (2.6)$$

En esta ecuación, P_{ysc} es la carga de fluencia en el núcleo. L_{e1} , L_{e2} y L_p representan la longitud de la zona elástica 1, la zona elástica 2 y la zona plástica, respectivamente. A_{e1} , A_{e2} y A_p representan las áreas de las secciones transversales en las zonas elásticas 1 y 2 y en la zona plástica, respectivamente.

Al introducir los parámetros adimensionales λ_1 , λ_2 , λ_p , α_1 , y α_2 , la ecuación (2.6) se puede reescribir así:

$$\delta_{By} = \frac{2P_{ysc}L_B}{EA_p} \left[\frac{\lambda_1}{\alpha_1} + \frac{1 - 2\lambda_1 - \lambda_p}{2\alpha_2} + \frac{\lambda_p}{2} \right] \quad (2.7)$$

$$\lambda_1 = \frac{L_{e1}}{L_B}, \quad \lambda_2 = \frac{L_{e2}}{L_B}, \quad \lambda_p = \frac{L_p}{L_B} \quad (2.8)$$

$$\alpha_1 = \frac{A_{e1}}{A_p}, \quad \alpha_2 = \frac{A_{e2}}{A_p} \quad (2.9)$$

Después de comenzar la fluencia en el núcleo, las deformaciones axiales se concentran dentro de la zona plástica y las deformaciones axiales pequeñas que se presentan en las zonas elásticas se pueden despreciar dentro del cálculo de δ_B . Por lo tanto, para una deformación unitaria ε_p dentro de la zona plástica, la deformación total de la rostra se puede determinar por:

$$\delta_{B-\varepsilon_p} \approx \frac{2P_{ysc}L_B}{EA_p} \left[\frac{\lambda_1}{\alpha_1} + \frac{1 - 2\lambda_1 - \lambda_p}{2\alpha_2} \right] + \varepsilon_p L_p \quad (2.10)$$

Con base en los resultados experimentales de Oviedo A. *et al.* (2015; 2017; 2018; 2019; 2022) y para efectos de diseño práctico, la deformación unitaria máxima en la zona plástica se podría limitar al 25 % ($\varepsilon_{p_{max}} = 0.025$). Por lo tanto, la deformación máxima del APR bajo esta condición resultaría en:

$$\delta_{Bmax} = \frac{2P_{ysc}L_B}{EA_p} \left[\frac{\lambda_1}{\alpha_1} + \frac{1 - 2\lambda_1 - \lambda_p}{2\alpha_2} \right] + 0.025L_p \quad (2.11)$$

La deriva máxima estaría dada por:

$$\Delta_{max} = \frac{\delta_{Bmax}}{\cos \theta} \quad (2.12)$$

2.2. Rigidez axial nodo a nodo de las riostras

En la sección anterior, se discutió sobre la capacidad de deformación alcanzada por los dispositivos en términos de deriva de piso. En esta evaluación, no se tomó en cuenta la flexibilidad axial de los elementos de conexión entre los APR y los nudos de la Estructura Principal. La figura 2.4 muestra un esquema completo de la instalación de los APR dentro de un pórtico, y se resalta la longitud nodo a nodo L_{Bwp} . En comparación con la figura 2.3, el esquema de la figura 2.5 adiciona un elemento de conexión a cada extremo del APR. Es importante resaltar que en esta evaluación se asume que los puntos de conexión a la estructura (nodos) son rígidos y no permiten rotaciones por fuera del plano que induzcan momentos a la riostra. Por lo tanto, la idealización de la riostra mostrada en la figura 2.3 se modifica al añadir dos resortes en serie, uno a cada extremo, que representan la rigidez de los elementos de conexión al pórtico. En consecuencia, las ecuaciones (2.3) y (2.4) son reescritas así:

$$\delta_{Bwp} = 2\delta_c + 2\delta_{e1} + 2\delta_{e2} + \delta_p \quad (2.13)$$

$$\delta_{Bwp} = 2\delta_c + \delta_B \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{K_{Bwp}} = \frac{2}{K_c} + \frac{2}{K_{e1}} + \frac{2}{K_{e2}} + \frac{1}{K_p} \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{K_{Bwp}} = \frac{2}{K_c} + \frac{1}{K_B} \quad (2.16)$$

donde δ_c y K_c representan la deformación y la rigidez axial de las conexiones, respectivamente. Las variables δ_{Bwp} y K_{Bwp} representan la deformación y la rigidez total axial nodo a nodo de la riostra, respectivamente. La ecuación (2.4) se puede escribir en términos de los factores adimensionales definidos en la sección 2.1. La rigidez axial total elástica K_B es:

$$K_B = \frac{EA_p}{L_B} \left[\frac{\alpha_1 \alpha_2}{2\lambda_1 \alpha_2 + 2\lambda_2 \alpha_1 + \lambda_p \alpha_1 \alpha_2} \right] \quad (2.17)$$

Al incluir la rigidez axial de las conexiones al pórtico (K_c), la rigidez K_{Bwp} se define por:

$$K_{Bwp} = \frac{K_c K_B}{K_c + 2K_B} \quad (2.18)$$

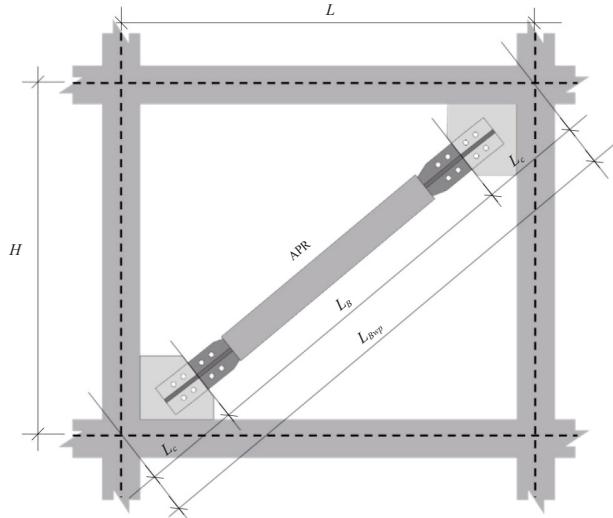


FIGURA 2.4. Esquema completo de instalación de arriostramiento de pandeo restringido

Fuente: elaboración propia.

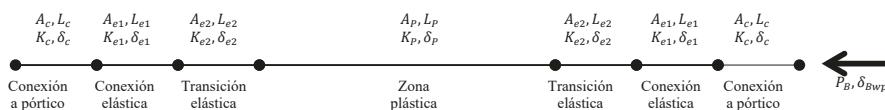


FIGURA 2.5. Componentes de arriostramiento de pandeo restringido

Fuente: elaboración propia.

$$K_c = \frac{EA_c}{L_c} \quad (2.19)$$

Las deformaciones axiales nodo a nodo, en fluencia (δ_{Bywp}), total (δ_{Bwp}), bajo una deformación unitaria ε_p mayor a ε_y y máxima (δ_{Bwpmax}) están dadas por:

$$\delta_{Bywp} = \delta_{By} + \frac{2P_{ysc}L_B}{A_p E} \frac{\lambda_c}{\alpha_c} \quad (2.20)$$

$$\delta_{Bwp} = \delta_{B\epsilon_P} + \frac{2P_{ysc}L_B}{A_P E} \frac{\lambda_c}{\alpha_c} \quad (2.21)$$

$$\delta_{Bwpmax} = \delta_{Bmax} + \frac{2P_{ysc}L_B}{A_P E} \frac{\lambda_c}{\alpha_c} \quad (2.22)$$

Los factores adimensionales λ_c y α_c están definidos por:

$$\lambda_c = \frac{L_c}{L_B} \quad (2.23)$$

$$\alpha_c = \frac{A_c}{A_P} \quad (2.24)$$

Con el propósito de mantener la premisa de que la deformación axial se concentra dentro de la longitud plástica (L_p) luego de la fluencia en el núcleo, el valor de α_c debe satisfacer que $K_c \geq K_{el}$. Por lo tanto, el valor mínimo de α_c está dado por:

$$\alpha_{cmin} = \frac{\lambda_c \alpha_1}{\lambda_1} \quad (2.25)$$

El valor mínimo de α_c que se obtiene a través de las ecuaciones (2.24) y (2.25) se entiende como el valor medio del área de sección transversal mínima requerida para satisfacer $K_c \geq K_{el}$, para una longitud determinada de L_c .

La tabla 2.1 muestra la influencia de la rigidez de la conexión al pórtico principal sobre las derivas máximas y sobre la rigidez total nodo a nodo, para un esfuerzo de fluencia del núcleo de acero $F_{ysc,min}$ de 225 MPa y una deformación unitaria ϵ_p de 2.5 %. Los datos mostrados en la tabla 2.1 corresponden a valores de α_c que cumplen con la condición dada en la ecuación (2.25). En la tabla también se puede ver que no hay influencia significativa de K_c en la deformación axial total nodo a nodo, y que podría ignorarse dentro del cálculo de δ_{Bwpmax} . De la misma forma, no hay mayor influencia sobre la rigidez total axial K_{Bwp} . Otros aspectos importantes para resaltar son: (1) entre mayor sea el valor de L_B , mayor será la deriva máxima alcanzada; (2) entre mayor sea el valor de L_p , mayor será la deriva máxima alcanzada; (3) es más económico reducir el valor de L_c que aumentar A_c para mantener un mismo valor de K_c ; y (4) el valor

TABLA 2.1. Influencia de la conexión al pórtico sobre la rigidez y la deriva alcanzada

H	L	L_{wp}	L_B	λ_c	λ_1	λ_2	λ_p	α_i	α_{i_1}	α_{i_2}	θ	δ_{Bwp}	Δ_{max}	δ_B	$\frac{K_{Bwp}}{K_B}$	
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)								(°)	(mm)	(mm)	(%)		
4,000	3,000	5,000	3,850	0.15	0.10	0.10	0.60	12.72	8.52	1.72	53	58.6	97.7	2.44	1.002	0.97
4,000	3,000	5,000	3,850	0.15	0.08	0.27	0.30	15.90	8.52	1.72	53	30.8	51.3	1.28	1.003	0.97
4,000	3,000	5,000	3,000	0.33	0.10	0.10	0.60	28.40	8.52	1.72	53	45.7	76.2	1.90	1.002	0.97
4,000	3,000	5,000	3,000	0.33	0.08	0.27	0.30	35.50	8.52	1.72	53	24.0	40.0	1.00	1.003	0.97
4,000	4,000	5,657	4,700	0.10	0.10	0.10	0.60	8.67	8.52	1.72	45	71.6	101.2	2.53	1.002	0.97
4,000	4,000	5,657	4,350	0.15	0.10	0.10	0.60	12.80	8.52	1.72	45	66.3	93.7	2.34	1.002	0.97
4,000	4,000	5,657	3,800	0.24	0.10	0.10	0.60	21.00	8.52	1.72	45	57.9	81.9	2.05	1.002	0.97
4,000	4,000	5,657	3,400	0.33	0.10	0.10	0.60	28.26	8.52	1.72	45	51.8	73.2	1.83	1.002	0.97
5,000	5,000	7,071	4,700	0.25	0.10	0.10	0.60	21.50	8.52	1.72	45	71.6	101.2	2.02	1.002	0.97
5,000	5,000	7,071	5,400	0.15	0.10	0.10	0.60	13.20	8.52	1.72	45	82.3	116.3	2.33	1.002	0.97
5,000	5,000	7,071	5,900	0.10	0.10	0.10	0.60	8.45	8.52	1.72	45	89.9	127.1	2.54	1.002	0.97
5,000	5,000	7,071	4,700	0.25	0.08	0.27	0.30	26.85	8.52	1.72	45	37.6	53.2	1.06	1.003	0.97
5,000	5,000	7,071	5,400	0.15	0.08	0.27	0.30	16.50	8.52	1.72	45	43.2	61.1	1.22	1.003	0.97
5,000	5,000	7,071	5,900	0.10	0.08	0.27	0.30	10.56	8.52	1.72	45	47.2	66.8	1.34	1.003	0.97

Fuente: elaboración propia.

de λ_c debe ser menor que 0.25 para poder alcanzar derivas superiores al 2.0 % (para $\lambda_p = 0.60$). Las derivas del 2 % corresponden al doble de la deriva máxima especificada en el reglamento colombiano.

Por otro lado, si se fija el valor de λ_c y se cambia el valor de α_c para obtener un valor de K_c muy inferior, o muy superior, a K_{el} se obtiene que (1) si α_c es igual al $0.1\alpha_{cmin}$, K_{Bwp} es aproximadamente $0.77K_B$, y (2) si α_c es mayor o igual a $3\alpha_{cmin}$, K_{Bwp} converge a K_B . Por lo tanto, y aunque la influencia sobre la rigidez total, nodo a nodo, no es muy grande, se recomienda usar el valor mínimo de α_c dado por la ecuación (2.25), que conlleva a $K_{Bwp} \approx 0.97 K_B$.

2.3. Relación entre rigidez experimental y teórica

Algunos estudios previos han mostrado que la rigidez axial experimental de un arriostramiento de pandeo restringido puede resultar diferente a la rigidez axial teórica calculada con expresiones como en la ecuación (2.17). Por lo tanto, la rigidez axial ajustada K'_B se obtiene a través de la ecuación (2.26), donde el coeficiente κ es determinado con base en resultados experimentales.

$$K'_B = \kappa(K_B) \quad (2.26)$$

Para los ensayos reportados por Oviedo A. (2015; 2017; 2018), el valor superior de κ es de 1.10. La figura 2.6 muestra la relación entre el valor de K_B teórico y el valor experimental correspondiente reportado en esa investigación. Se puede observar que la rigidez axial experimental se puede envolver con valores de κ entre 0.95 y 1.10. Los fabricantes deben tener en cuenta este ajuste en sus tablas de rigidez, y el ingeniero estructural, la variación de K_B en su diseño.

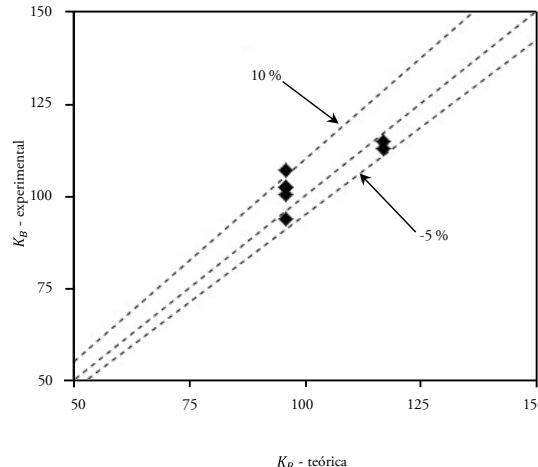


FIGURA 2.6. Comparación entre K_B teórica y experimental para ríostras
 Fuente: Oviedo A., 2015; 2017-2018, elaboración propia.

2.4. Factores de modificación

2.4.1. Factor KF

Para efectos de modelación del elemento completo de APR es común usar un factor KF para incrementar la rigidez axial del núcleo de acero, como se indica en la ecuación (2.27). Este procedimiento es válido cuando se usa un elemento elástico prismático con un área constante igual al área del núcleo A_{sc} ($A_{sc} = A_p$) y con una longitud del elemento modelado igual a la longitud nodo a nodo L_{Bwp} . El factor KF debe ser proporcionado por el fabricante del tipo de ríostra a utilizar, de acuerdo con el diseño del dispositivo de ríostra y sus procedimientos de fabricación. La variable K_{scwp} representa la rigidez axial del núcleo de acero proyectado entre nodos. El factor KF generalmente tiene valores entre 1.5 y 2.2.

$$K_{B,modelo} = KF(K_{scwp}) = KF \frac{A_{sc}E}{L_{Bwp}} \quad (2.27)$$

Como se mencionó en la sección 2.3, existe una variación entre la rigidez axial teórica y la axial experimental. Esta variación debe ser tenida en cuenta en el momento del análisis y el diseño estructural para establecer las tolerancias sobre el valor nominal de diseño de K_{Bwp} . Por lo tanto, el ingeniero de diseño debe considerar esta variación, estableciendo un límite superior e inferior de K_{Bwp} , y hacer revisiones de resistencia, rigidez y desplazamientos de la estructura.

Con base en los resultados experimentales reportados por Oviedo A. (2015; 2017; 2018), se establecen los siguientes límites:

$$K_{B,max} = 1.1K_B \quad (2.28)$$

$$K_{B,min} = 0.95K_B \quad (2.29)$$

Con base en los límites dados por las ecuaciones (2.28) y (2.29), y el análisis mostrado en la sección 2.2, se determinan los límites superior e inferior de la rigidez axial total K_{Bwp} para ser considerados en el proceso de diseño (ecuaciones 2.30 y 2.31).

$$K_{Bwp,max} = \frac{K_c(1.1K_B)}{K_c + 2.2K_B} \approx 1.07K_{Bwp} \quad (2.30)$$

$$K_{Bwp,min} = \frac{K_c(0.95K_B)}{K_c + 1.90K_B} \approx 0.92K_{Bwp} \quad (2.31)$$

Si se toman las ecuaciones (2.18) y (2.27), el valor de KF se puede determinar usando la rigidez K_{Bwp} así:

$$KF = \frac{K_{Bwp}}{K_{scwp}} \quad (2.32)$$

$$KF = \left[\frac{L_B(2\lambda_c + 1)}{EA_{sc}} \right] \times \left[\frac{\alpha_c K_B}{\alpha_c + 2\lambda_c \Phi} \right] \quad (2.33)$$

donde,

$$\Phi = \left[\frac{\alpha_1 \alpha_2}{2\lambda_1 \alpha_2 + 2\lambda_2 \alpha_1 + \lambda_p \alpha_1 \alpha_2} \right] \quad (2.34)$$

Los límites dados en las ecuaciones (2.30) y (2.31) están relacionados directamente con las tolerancias del factor KF ; esto es, una tolerancia aproximadamente de $\pm 8\%$. En la práctica de diseño es común considerar una tolerancia de $\pm 10\%$ (NIST, 2015).

2.4.2. Factores de ajuste de propiedades

Los factores de ajuste de propiedades λ deben ser tenidos en cuenta cuando los arriostramientos de pandeo restringido son utilizados en el diseño como disipadores de energía. En este caso, el documento ASCE 7-16 precisa en su sección 18.2.4.5 que se deben especificar las propiedades máximas y mínimas del disipador de energía a través de tres factores λ así: λ_{ae} , λ_{test} y λ_{spec} . Para el caso de las riostras, $\lambda_{ae,max}$ y $\lambda_{ae,min}$ comúnmente se especifican en 1.0, ya que este tipo de disipador de energía, generalmente, no presenta variaciones en las propiedades causadas por efectos de envejecimiento y ambientales. No obstante, esto depende del tipo de riostra, sus materiales constitutivos y el proceso de fabricación. Las variables $\lambda_{spec,max}$ y $\lambda_{spec,min}$ modifican la rigidez axial elástica del dispositivo y se podrían especificar de acuerdo con la variación del factor mostrado en la sección anterior. Para los resultados experimentales mostrados en 2.4.1, los valores máximos y mínimos de λ_{spec} son: $\lambda_{spec,max} = 1.08$ y $\lambda_{spec,min} = 0.92$. Para las rigideces poselásticas a tracción y a compresión, K_{Bp-T} y K_{Bp-c} , respectivamente, se considera que los valores de $\lambda_{spec,min}$ y $\lambda_{spec,max}$ pueden tomarse igual a 1.0, dada la poca influencia en el comportamiento (sección 6.1). Finalmente, las variables $\lambda_{test,max}$ y $\lambda_{test,min}$ se especifican de acuerdo con el criterio del ingeniero responsable del diseño, apoyado del fabricante. Ahora bien, es común considerar la variación del valor del esfuerzo de fluencia (F_{yse}) del acero del núcleo de la riostra; generalmente se considera una variación de $\pm 10\%$. Por lo tanto, los valores máximos y mínimos de λ_{spec} para modificar la resistencia (fluencia y máxima) de la riostra son: $\lambda_{spec,max} = 1.10$ y $\lambda_{spec,min} = 0.90$. Sin embargo, se considera que los valores máximos y mínimos de λ_{spec} para modificar la resistencia se pueden tomar con un valor de 1.0, siempre que el disipador de energía a usarse en el proyecto tenga las propiedades nominales de diseño. Estas son definidas con base en el esfuerzo de fluencia del acero obtenido a partir de ensayos previos a la fabricación del dispositivo. La variación de F_{yse} no afecta la rigidez axial de la riostra, pero sí su deformación.

Para el caso del diseño práctico de edificaciones con PAPR, los parámetros estructurales que podrían tener variación son, principalmente, la resistencia de

fluencia del núcleo P_{ysc} y la rigidez axial elástica K_B . La figura 2.7 muestra un esquema del efecto de los factores de ajuste de propiedades λ sobre la deformación de fluencia δ_{By} del dispositivo. Al variar la rigidez axial y/o la resistencia de fluencia del dispositivo, la deformación de fluencia del dispositivo puede ser mayor o menor. En la figura 2.7, la línea continua representa la curva característica de diseño nominal y las líneas discontinuas representan el rango de variación de la curva característica. Estas son resultado de variar la resistencia de fluencia y la rigidez elástica del dispositivo. Se espera que el ingeniero responsable del diseño de la estructura lo realice usando las propiedades nominales, y que luego revise la capacidad de los elementos estructurales al considerar las variaciones de las propiedades de los dispositivos.

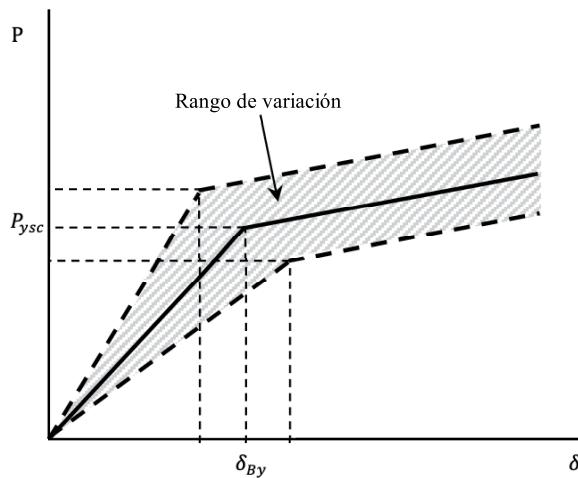


FIGURA 2.7. Implicación de factores λ en la curva característica del arriostramiento de pandeo restringido

Fuente: elaboración propia.

2.5. Influencia de los factores de dimensionamiento de las riestras

La figura 2.8 muestra la influencia de factores de dimensionamiento de las riestras sobre la capacidad de derivas alcanzadas. Los comportamientos mostrados en la figura 2.8 corresponden a $F_{ysc} = 250$ MPa y $\varepsilon_p = 2.5\%$. La figura 2.9 muestra

la variación del factor KF . En ambas figuras se observa que el factor que más genera variación en el valor de KF es λ_p . Además, se puede inferir que el valor mínimo de KF para ser empleado en un análisis y diseño preliminar es de aproximadamente 1.40. Sin embargo, con base en la experiencia de diseños nuevos, el valor mínimo recomendado es de 1.60.

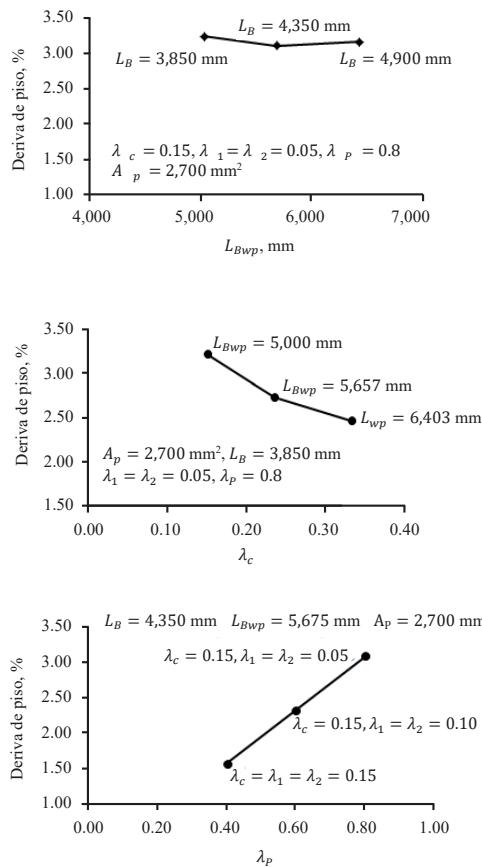
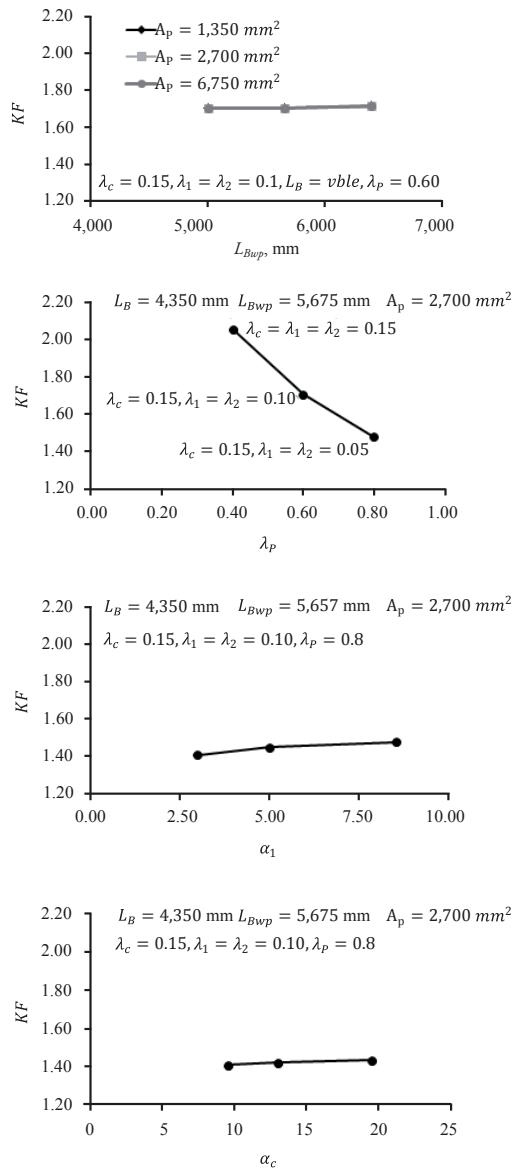


FIGURA 2.8. Variación de la capacidad de deriva alcanzada
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2.9. Variación del factor K_F

Fuente: elaboración propia.

2.6. Variación de los factores de ajuste de resistencia ω y $\beta\omega$

Dentro del diseño de edificaciones de acero con PAPR, el reglamento colombiano (basado en AISC 341) establece que la resistencia máxima ajustada a tracción T_{max} y compresión C_{max} se obtiene para los máximos desplazamientos de los dispositivos usando las ecuaciones (2.35) y (2.36).

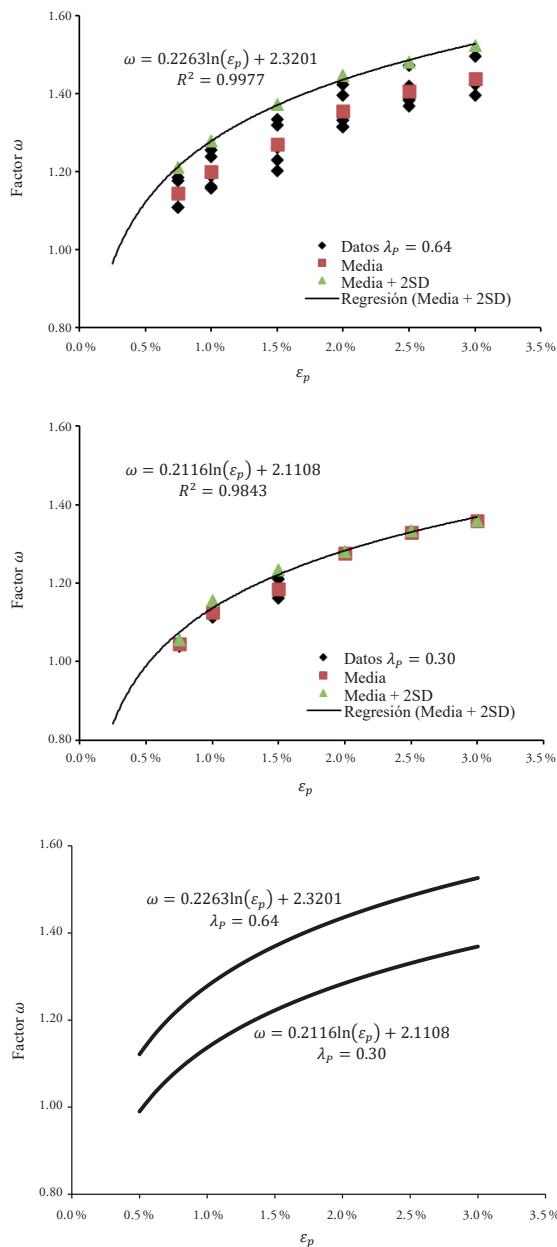
$$T_{max} = \omega R_y P_{ysc} \quad (2.35)$$

$$C_{max} = \beta\omega R_y P_{ysc} \quad (2.36)$$

donde P_{ysc} es igual al área del núcleo de acero por su resistencia a la fluencia y R_y es la relación entre la resistencia esperada y la resistencia mínima especificada a la fluencia del tipo de acero utilizado en el núcleo. La variable ω es un factor de ajuste por endurecimiento por deformación y el factor β es la relación entre la resistencia máxima a la compresión y la resistencia máxima a la tracción de la riostra. Cabe mencionar que el valor de R_y puede ser tomado como la unidad, siempre y cuando, para el cálculo de P_{ysc} se use un valor de F_{ysc} obtenido a través de pruebas de laboratorio sobre el material del núcleo.

Las figuras 2.10 y 2.11 muestran el comportamiento de los factores ω y $\beta\omega$ en función de la deformación axial ε_p . Se muestran los resultados de pruebas experimentales conducidas para dos valores de λ_p (0.64 y 0.30), junto con sus ecuaciones de regresión para ser usadas en la estimación de valores para ω y $\beta\omega$. Vale la pena recordar que λ_p es la relación entre la longitud del núcleo que fluye sobre la longitud total del dispositivo. Los datos experimentales se representan con diamantes; su media, con cuadrados; y el valor del promedio más dos desviaciones estándares (sd), con triángulos.

Si se tiene la deformación unitaria axial de diseño (ε_p para el mayor entre dos veces la deriva calculada Δ_u y el 2 % de la altura de entrepiso), y se usan las curvas de las figuras 2.10 y 2.11, se pueden determinar los valores de ω y $\beta\omega$ a usarse en el cálculo de las resistencias ajustadas de las riostras (sección 4.3). De este modo, se puede interpolar para diferentes valores de λ_p . Es importante anotar que la variación de los factores de ajuste por resistencia depende del disipador usado, por lo tanto, se recomienda tener una buena comunicación con el fabricante.

FIGURA 2.10. Variación del factor ω con ε_p

Fuente: elaboración propia.

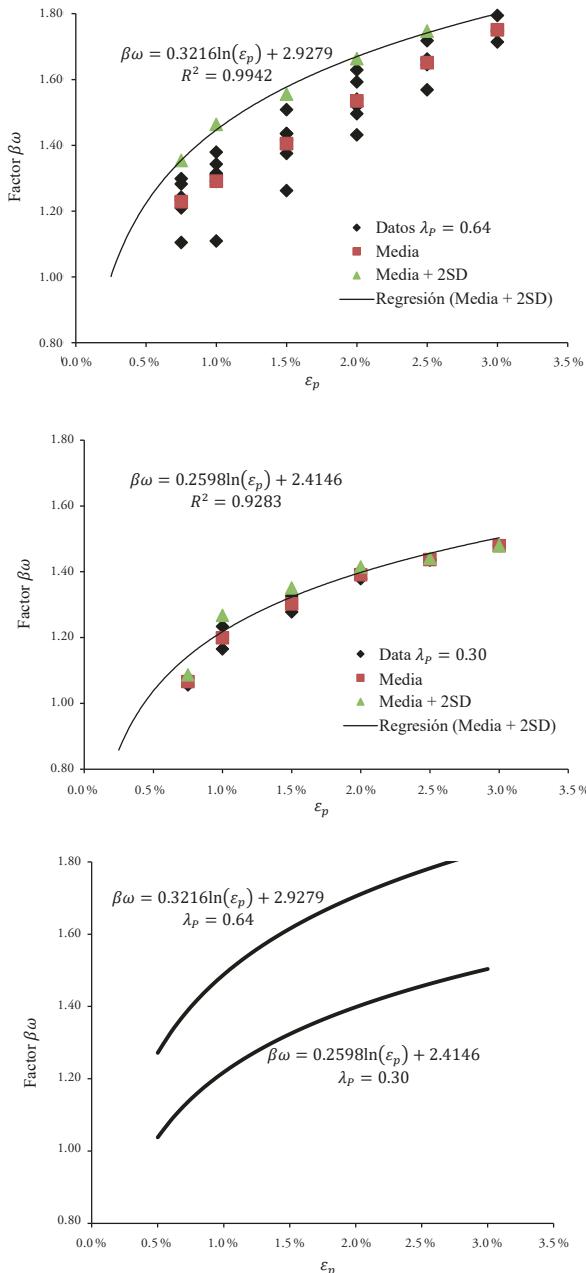


FIGURA 2.11. Variación del factor $\beta\omega$ con ε_p

Fuente: elaboración propia.