



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES PARA
DETERMINAR LOS FACTORES DE AJUSTE DE LA RESISTENCIA A
COMPRESIÓN Y POR ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN EN DISTINTOS
SISTEMAS DE RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO (PAPR)**

Andrés Felipe Guzmán Cifuentes

Mateo Echavarría Sánchez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental

Medellín, Colombia

2019

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR
LOS FACTORES DE AJUSTE DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y POR
ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN EN DISTINTOS SISTEMAS DE RIOSTRAS
DE PANDEO RESTRINGIDO (PAPR)

Andrés Felipe Guzmán Cifuentes

Mateo Echavarría Sánchez

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Análisis y diseño de estructuras

Asesor:

Mauricio José Castro García, I.C., M.Sc.C.E.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental

Medellín; Colombia

2019

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 4 |
| 3. OBJETIVOS DEL PROYECTO | 5 |
| 3.1. Objetivo general | 5 |
| 3.2. Objetivos específicos | 5 |
| 5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE..... | 6 |
| 5.1. Comportamiento estructural de las riostras de pandeo restringido | 8 |
| 6. METODOLOGÍA | 11 |
| 6.1. CONEXIONES..... | 13 |
| 6.2. Ensayos cíclicos para la calificación de riostras de pandeo restringido | 14 |
| 6.3. Diseño del núcleo de la riostra..... | 15 |
| 6.4. Diseño de la camisa o tubo de acero | 16 |
| 6.5. Mortero de relleno..... | 17 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 24 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA..... | 25 |

TABLA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Diferencia de comportamiento cíclico entre una riostra con pandero restringido y una riostra típica. tomada y adaptada de [11]. | 8 |
| Ilustración 2. Ejemplo de un pórtico con riostras de pandeo restringido donde se observa que la conexión es concéntrica. Crisafulli, F. J. (2014). | 9 |
| Ilustración 3. Secciones típicas de riostras con pandeo restringido. Tomado y adaptado de [11]. | 10 |
| Ilustración 3. Diafragma fuerza-deformación considerado para el diseño de las riostras [11]. | 11 |
| Ilustración 4. Tipos de configuración estructuras para pórticos arriostrados | 14 |
| Ilustración 6. Riostras de pandeo restringido, núcleo (A), camisa (B) y mortero (C). Adaptado de [8]...... | 15 |
| Ilustración 7. Idealización de mortero de relleno en Riostras de pandeo restringido. Adaptado de [22]...... | 17 |
| Ilustración 6. Valores de β para riostras tipo 1 según bibliografía. | 19 |
| Ilustración 7. Valores de ω para riostra tipo 1 según bibliografía..... | 19 |
| Ilustración 10. Valores de β para riostras tipo 3 según bibliografía..... | 21 |
| Ilustración 11. Valores de ω para riostras tipo 3 según bibliografía..... | 21 |
| Ilustración 8. Valores de β para riostras tipo 2 según bibliografía. | 23 |
| Ilustración 9. Valores de ω para riostras tipo 2 según bibliografía. | 23 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación de los sistemas estructurales sismorresistentes según ANSI/AISC 341-16 [23]..... | 2 |
| Tabla 2. Valores de β y ω para riostras tipo 1. | 18 |
| Tabla 4. Valores de β y ω para riostras tipo 3. | 20 |
| Tabla 3. Valores de β y ω para riostras tipo 2. | 22 |

RESUMEN

La aplicación de las riostras de pandeo restringido no se limita a los edificios nuevos de acero. A partir de la implementación de las normas sísmo resistentes en Colombia, muchas estructuras, en especial edificios, han tenido que ser reforzados y repotenciados, bien sea como parte de la actualización a la norma o porque su deterioro así lo requería. En particular, se requiere disponer de una referencia para los parámetros β y ω (factores de ajuste de la resistencia a compresión y por endurecimiento por deformación respectivamente), cuyos valores se encuentran dispersos en la literatura para distintos sistemas de riostras de pandeo restringido. Por lo anterior se evidencia la importancia de tomar el máximo provecho de los resultados de los ensayos disponibles para la literatura como referencia para el desarrollo de los diseños.

Los resultados proporcionan valores de β y ω para los diferentes tipos de riostras estudiados, según literatura, los cuales se pueden usar para el predimensionamiento del sistema resistente sísmico de la edificación, antes de hacer una inversión económica considerable en ensayos.

Palabras clave: Diseño sísmico, Riostras, Pandeo Restringido, Diagrama de histéresis, disipador de energía.

ABSTRACT

The application of restricted buckling braces is not limited to new steel buildings. Since the implementation of the earthquake resistant standards in Colombia, many structures, in special buildings, have had to be reinforced and repowering, either as part of the update to the standard or because their help required it. In particular, if it is required to have a reference for the parameters ω and β (adjustment factors for compressive strength and deformation resistance respectively), our values are dispersed in the literature for different systems of restricted buckling braces . The foregoing demonstrates the importance of taking full advantage of the results of the trials available for literature as a reference for the development of the designs.

The results can be successful using the Betas and Omegas proposed for the different types of beams studied, according to the literature, they can be used for the pre-dimensioning of the

seismic resistant building system and in many standards it is allowed to use it for the definitive design, before of making a considerable economic investment in trials.

Keywords: Seismic design, Braces, Restricted Buckling, Hysteresis diagram, energy dissipator.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas actuales de diseño sismorresistente basado en capacidad están orientados por una estrategia común que puede resumirse en los siguientes puntos:

- Incorporar en la estructura un sistema de resistencia sísmica (SRS) bien definido.
- Proveer un mecanismo dúctil como parte del SRS.
- Dimensionar el mecanismo dúctil para que entre en fluencia bajo unas cargas sísmicas reducidas.
- Detallar este mecanismo dúctil para que pueda resistir varios ciclos de carga en el rango inelástico.
- Dimensionar los restantes elementos del SRS para que se mantengan en el rango elástico.
- Detallar el resto de la estructura de manera que se garantice su integridad bajo los desplazamientos esperados.

La implementación de distintos mecanismos dúctiles para disipar energía da origen a los diferentes sistemas de resistencia sísmica, que en el caso del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 se resumen en la Tabla 1.

El sistema de pórticos con riostras de pandeo restringido (PAPR) es relativamente nuevo en el mundo de la ingeniería, surge de la necesidad de mejorar el comportamiento de los pórticos arriostrados concéntricamente (PAC), en los cuales las riostras funcionan muy bien cuando son solicitadas a tensión, pero cuando la carga es a compresión no alcanzan su capacidad máxima debido a que el pandeo se presenta primero. Los PAPR se crearon para evitar este estado límite de pandeo y garantizar que el elemento tenga la misma capacidad de fluencia a tensión como a compresión.

| SISTEMA | SIGLA |
|--|--------------|
| PORTICOS RESISTENTES A MOMENTO | PRM-DMI |
| | PRM-DMO |
| | PRM-DES |
| PORTICOS CON CERCHAS DUCTILES | PCD |
| PORTICOS COMPUESTOS ARRIOSTRADOS CONCENTRICAMENTE | PACC-DMI |
| | PACC-DES |
| SISTEMAS DE COLUMNAS EN VOLADIZO CON DISIPACION DE ENERGIA MINIMA | SCV-DMI |
| | SCV-DES |
| PORTICO ARRIOSTRADOS CONCENTRICAMENTE | PAC-DMI |
| | PAC-DES |
| PORTICO ARRIOSTRADO EXCENRICAMENTE | PAEC |
| PORTICOS CON ARRIOSTRAMIENTOS CON PANDEO RESTRINGIDO | PAPR |
| MUROS DE CORTANTE DE ACERO | MCA |
| MUROS DE CORTANTE COMPUESTOS DE CONCRETO REFORZADO Y PERFILES DE ACERO | MCC-DMI |
| | MCC-DES |
| MURO DE CORTANTE DE ACERO COMPUESTOS | MCAC |
| PORTICOS REISTENTES A MOMENTOS COMPUESTOS | PRMC-DMI |
| | PRMC-DMO |
| | PRMC-DES |
| PORTICOS RESISTENTES A MOMENTOS PARCIALMENTE RESTRINGIDOS | PRMC-PR |

Tabla 1. Clasificación de los sistemas estructurales sismorresistentes según NSR-10

El uso del sistema PAPR está permitido por la normativa colombiana sismo resistente (NSR-10), que reconoce su alta capacidad de disipación de energía asignándole un coeficiente R igual a 8.0, como corresponde a su excelente comportamiento histerético, lineal y homogéneo, tanto en tracción como en compresión, lo que garantiza la disipación de energía en el edificio durante el movimiento sísmico, independientemente del sentido y del modo de vibración. Estas características hacen que el sistema PAPR sea óptimo para estructuras nuevas o rehabilitaciones estructurales.

De la estrategia de diseño descrita al inicio de esta sección se deriva que las conexiones y los miembros del SRS, distintos de aquellos elementos en los que se genera el mecanismo dúctil, se deban diseñar para las máximas fuerzas que les puedan transmitir dichos elementos cuando entren en fluencia. Estas fuerzas máximas se deben obtener considerando los distintos factores que puedan hacer que la resistencia de los elementos que van a entrar en fluencia sea mayor que la teórica. En el caso concreto de las riostras de pandeo restringido, estos factores son el factor de ajuste de la resistencia a compresión, β , y el factor de ajuste por endurecimiento por deformación, ω , este último se aplica tanto a elementos en tracción como a elementos en compresión.

Una de las condiciones que han limitado el uso del sistema de PAPR ha sido la necesidad de hacer ensayos de precalificación que, además de servir como base para determinar la capacidad del elemento, permiten obtener los factores de ajuste β y ω .

Los ensayos de verificación pueden realizarse específicamente para el proyecto que se requiera estudiar o adoptarse ensayos que estén documentados. El factor β (mayor o igual a 1.0) se calcula como la relación entre la fuerza a compresión máxima y la fuerza a tensión máxima de la muestra del ensayo, medidas a partir de los ensayos de calificación especificados en ANSI/AISC 341-16 [23], para las deformaciones esperadas. El valor de β a usar es el mayor entre los obtenidos de los dos ensayos de calificación de la riostra. El factor ω representa el efecto del aumento de resistencia por endurecimiento de deformación. Se determina de los resultados experimentales como la relación entre la resistencia máxima a tracción y la resistencia medida de fluencia.

Con el fin de proporcionar elementos que permitan a los ingenieros diseñadores aplicar su criterio en el uso de los PAPR, en este documento se realizará una recopilación de los valores de los factores de ajuste β y ω registrados en la literatura para distintos sistemas PAPR.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La utilización de las estructuras de acero en la construcción data en Colombia de la primera mitad del siglo XX, aplicadas en sus primeras etapas principalmente en la construcción de estructuras de cubierta y puentes. Sin embargo, el desarrollo de las técnicas constructivas y la mayor competitividad del acero frente a los materiales tradicionales hace que la construcción de edificios de acero sea hoy una clara alternativa para la construcción de edificios. Es así como la industria del acero en nuestro país necesita mantenerse actualizada con las últimas tendencias, estudios, ensayos, diseños, normatividad, construcción y procesos de fabricación de estructuras metálicas, para aportar al desarrollo del país múltiples opciones que cumplen con estándares internacionales de calidad y vanguardia.

En este contexto, surge como tema primordial la consideración de diversas alternativas de sistemas de resistencia sísmica, ya sean en acero o en construcción compuesta acero-concreto, para llegar a la solución que desde las distintas perspectivas sea la óptima para un proyecto. En particular, el sistema de pórticos con riostras de pandeo restringido (PAPR) ha demostrado ser una opción con claras ventajas en su implementación y comportamiento.

La aplicación de las riostras de pandeo restringido no se limita a los edificios nuevos de acero. A partir de la implementación de las normas sismo resistentes en Colombia, muchas estructuras, en especial edificios, han tenido que ser reforzados y repotenciados, bien sea como parte de la actualización a la norma o porque su deterioro así lo requería. Los elementos rigidizadores y disipadores de energía han sido generalmente riostras metálicas, sin embargo, hoy los pórticos arriostrados de pandeo restringido (PAPR) se constituyen en una alternativa como sistema de resistencia sísmica con claras ventajas, como ha quedado demostrado en las investigaciones realizadas.

En países desarrollados como Estados Unidos y Japón, donde el apoyo económico a la investigación sísmica tiene un valor importante, la construcción y diseño de estructuras metálicas con PAPR data de alrededor de veinte años atrás, pues representan principalmente una solución preventiva y no correctiva ante el impacto sobre las estructuras de fenómenos naturales, generando así economía para los inversionistas y seguridad en los usuarios.

Sin embargo, en nuestro país su utilización es todavía incipiente debido precisamente a las escasas investigaciones propias que permitan realizar ensayos concluyentes y patentar sistemas que los diseñadores puedan emplear al momento de calcular estructuras. Por lo anterior se evidencia la importancia de tomar el máximo provecho de los resultados de los ensayos disponibles para la literatura como referencia para el desarrollo de los diseños.

En particular, se requiere disponer de una referencia para los parámetros β y ω (factores de ajuste de la resistencia a compresión y por endurecimiento por deformación respectivamente), cuyos valores se encuentran dispersos en la literatura para distintos sistemas de riostras de pandeo restringido.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

3.1. Objetivo general

- Presentar una visión general de los sistemas PAPR, identificando la incidencia de los factores de ajuste de la resistencia a compresión y por endurecimiento por deformación, y analizando los resultados de ensayos de laboratorio que se encuentran en la literatura.

3.2. Objetivos específicos

- Conocer el estado del arte sobre el comportamiento de diferentes tipos de PAPR.
- Identificar los PAPR más utilizados en sistema de resistencia sísmica y agruparlos según sus características más representativas.

- Determinar, por medio de la revisión de literatura, los resultados de ensayos realizados, el factor de modificación por compresión y el factor de ajuste por endurecimiento por deformación para riostras de pandeo restringido.
- Comparar los factores estudiados en PAPR.
- Tabular y graficar los resultados obtenidos.
- Formular conclusiones con base en los valores obtenidos.

4. ALCANCE

Con esta investigación se pretende adelantar una revisión bibliográfica de los valores de los parámetros β y ω (factores de ajuste de la resistencia a compresión y por endurecimiento por deformación respectivamente) obtenidos en programas de ensayos adelantados en otros países, y tabular, graficar y analizar dichos valores de manera que sirvan a los diseñadores como una herramienta que facilite la implementación del sistema de resistencia sísmica PAPR, sin que en las etapas preliminares del diseño tengan que depender de la ejecución de costosos ensayos de laboratorio o del uso sistemas patentados para poder implementar las riostras de pandeo restringido en sus estructuras.

5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Las estructuras de acero, al igual que los métodos de análisis, han evolucionado como resultado de la experiencia de la industria de la construcción y la cantidad de investigaciones que se han efectuado en pro de generar nuevos desarrollos con el fin de optimizar su uso. Estas investigaciones han permitido clasificar diferentes sistemas estructurales sismo resistentes (Tabla 1), los cuales presentan variaciones significativas tanto en su construcción como en su funcionalidad y economía, lo que le permite al diseñador estructural disponer de varias opciones para definir el sistema que más se ajuste a las necesidades de un proyecto.

Los pórticos con riostras de pandeo restringido pueden verse como un caso particular de los pórticos con riostras concéntricas.

Los pórticos arriostrados concéntricamente (PAC) surgen como una alternativa para las edificaciones de mediana y baja altura; en estos pórticos se presentan barras diagonales las cuales rigen el comportamiento del pórtico. Las cargas laterales de viento y sismo inducen en estas barras diagonales, esfuerzos de compresión y tracción, lo que le permite obtener una gran rigidez lateral y un comportamiento óptimo con las derivas de piso.

El criterio fundamental de diseño de los PAC se basa en limitar la ocurrencia del pandeo global en las riostras a compresión, lo que limita la posibilidad de disipar la energía del sismo de manera significativa. En ensayos realizados se pudo demostrar que este sistema puede disipar energía posteriormente al pandeo de las riostras, solo si se controlan los modos de falla frágil como el pandeo local y la fractura en las conexiones, lo que quiere decir que por medio de un diseño adecuado se puede lograr una respuesta dúctil y estable, con capacidad de disipar energía.

En los pórticos con riostras de pandeo restringido (PAPR), el mecanismo de disipación de energía es la fluencia de las riostras, que en este caso puede alcanzarse tanto en las riostras a tracción como en las riostras a compresión. El sistema fue desarrollado originalmente en Japón (Watanabe et al., 1988; Wada y Nakashima, 2004) y ha sido usado como una solución estructural óptima en diferentes países (Black et al, 2002; Sabelli et al, 2002; Tremblay et al., 2006; Palazzo et al., 2009).

Estas riostras de pandeo restringido están compuestas por un núcleo de acero recubierto por una capa que permite el deslizamiento, la cual lleva una camisa o tubo exterior que se rellena con mortero, con esto se logra que el núcleo de acero fluya tanto en tracción como en compresión, debido a que el tubo exterior evita el pandeo, tanto global como local, del núcleo.

5.1. Comportamiento estructural de las riostras de pandeo restringido

En este tipo de pórticos la estructura se diseña con el fin de que los ejes se corten en un punto, generando conexiones concéntricas, aunque se pueden aceptar excentricidades menores que el peralte de la viga siempre y cuando su efecto se considere en el diseño.

La característica distintiva de las riostras de pandeo restringido es su capacidad para fluir tanto en tracción como en compresión, con lo cual se evita la ocurrencia del pandeo, de forma global o local. La ilustración 1 muestra el ciclo histerético para una riostra de pandeo restringido (color azul) comparándolo con el ciclo histerético de una riostra con características típicas (color rojo). Es posible observar las diferencias significativas que se producen cuando las riostras se ven sometidas a fuerzas de compresión. Las riostras de pandeo restringido presentan un comportamiento a compresión prácticamente igual al comportamiento a tracción; mientras que las riostras con características típicas presentan una degradación en la rigidez y resistencia por efecto del pandeo, reduciendo ampliamente su capacidad de disipar energía.

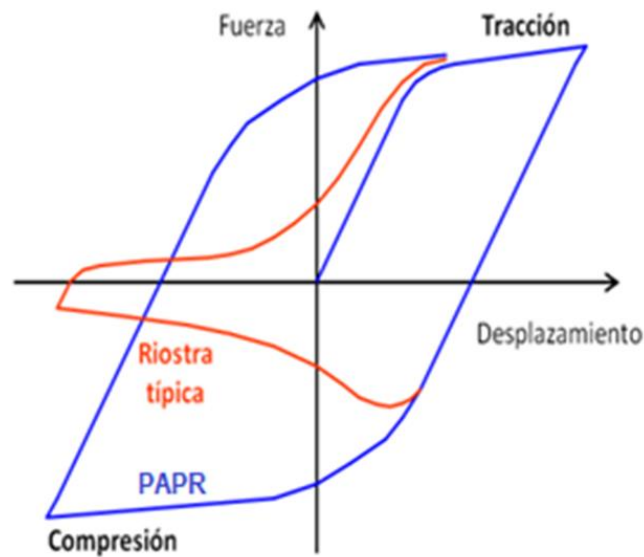


Ilustración 1. Diferencia de comportamiento cíclico entre una riostra con pandero restringido y una riostra típica. tomada y adaptada de [11].



Ilustración 2. Ejemplo de un pórtico con riostras de pandeo restringido donde se observa que la conexión es concéntrica. Crisafulli, F. J. (2014).

Dos condiciones permiten que la resistencia a compresión de la riostra pueda ser mayor que su resistencia a tracción. Primero, no es posible eliminar totalmente la transferencia de carga del núcleo de acero al sistema de confinamiento, y segundo, el efecto de Poisson hace que la sección transversal del núcleo de acero en compresión sea mayor que la del núcleo de acero en tracción. De esa manera se ve aumentada la resistencia a compresión de la riostra.

Los principales modos de falla de una riostra de pandeo restringido son:

- Pandeo flexional del núcleo de acero.
- Pandeo flexional del núcleo en modos altos de pandeo (en la bibliografía en inglés, este modo de falla se suele denominar como rippling).
- Pandeo torsional del núcleo en los extremos libres del núcleo o zona de transición.
- Pandeo local en los extremos libres del núcleo o zona de transición.
- Falla de la conexión.

Los dos primeros modos de falla están relacionados con el pandeo flexional del núcleo, este tipo de pandeo podría teóricamente producirse en cualquier miembro solicitado por compresión, según la teoría del pandeo crítico de Euler, sin embargo, en el caso de riostras de pandeo restringido, el núcleo está confinado en un medio elástico, lo que hace posible el pandeo flexional en modos altos. Los resultados obtenidos tanto de ensayos experimentales como de simulaciones numéricas confirman esta posibilidad.

El pandeo torsional del núcleo de acero puede producirse por tratarse de una barra comprimida axialmente, cuya sección transversal presenta generalmente dos ejes de simetría. Esta falla podría producirse en los extremos de la riostra, en la zona libre comprendida entre la conexión y el extremo del tubo exterior; con igual criterio se define la zona de transición que permite pasar, sin variaciones bruscas, de la sección trasversal del núcleo de acero a la sección donde la riostra se conecta con el resto de la estructura. Las secciones transversales del núcleo con forma rectangular, cuadrada o cruciforme (ver ilustración 3) presentan ventajas para evitar la ocurrencia del pandeo torsional, dado que el mortero de relleno impide el giro del núcleo dentro del tubo.

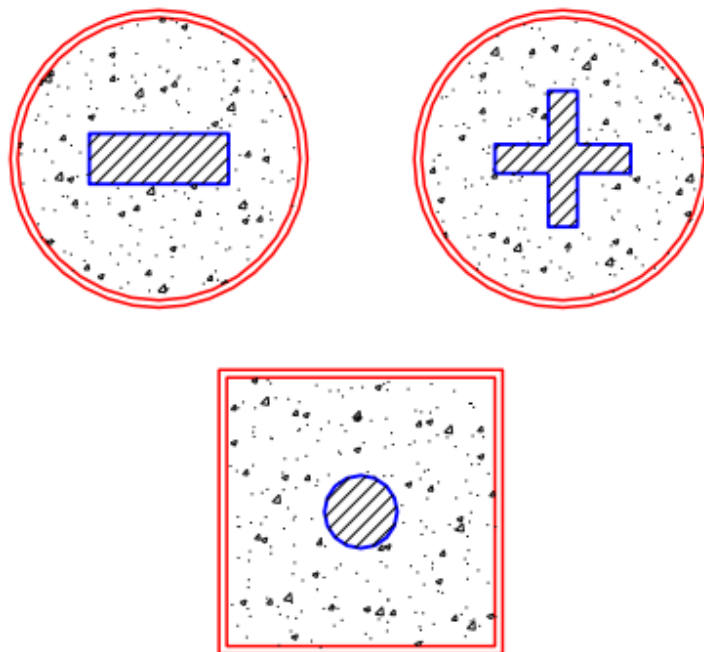


Ilustración 3. Secciones típicas de riostras con pandeo restringido. Tomado y adaptado de [11].

Las especificaciones indican que las riostras no deben ser consideradas para resistir las cargas gravitacionales.

Las especificaciones se basan en el uso de riostras calificadas mediante ensayos, de modo de asegurar que su uso se ajusta al rango de deformaciones requerido y que se evita la ocurrencia de modos de falla no deseados.

6. METODOLOGÍA

El diseño debe realizarse de manera que las deformaciones inelásticas se presenten principalmente por fluencia de las riostras. Las especificaciones definen el diseño a partir de las resistencias ajustadas de la riostra a compresión y de la riostra a tracción.

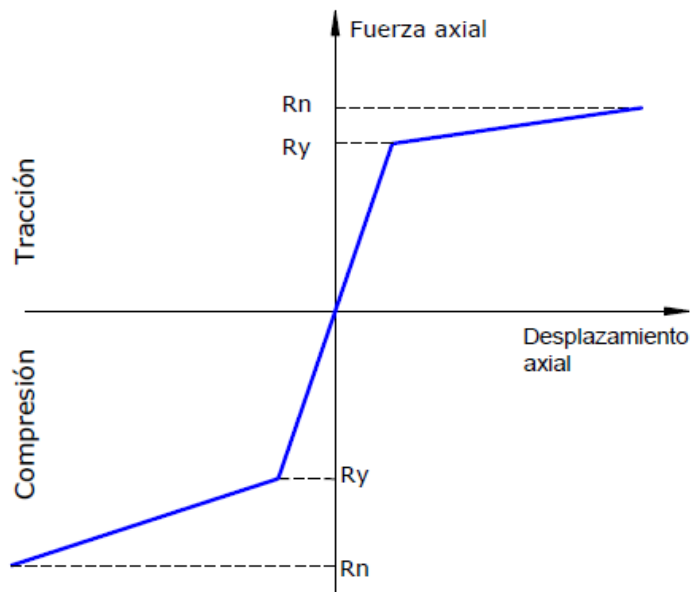


Ilustración 4. Diafragma fuerza-deformación considerado para el diseño de las riostras [11].

La resistencia ajustada a compresión está dada por:

$$R_n = \beta * \omega * R_y * F_y * A_g \quad (\text{Ecn. 1})$$

La resistencia ajustada a tracción está dada por:

$$R_n = \omega * R_y * F_y * A_g \quad (\text{Ecn. 2})$$

El factor β (mayor o igual que 1.0) se calcula como la relación entre la máxima fuerza de compresión y la máxima fuerza de tracción, medidas en un ensayo realizado según los requerimientos indicado en ANSI/AISC 341-16 [23], numeral K3. El factor ω representa el efecto del aumento de resistencia por endurecimiento de deformación, se determina de los resultados experimentales como la relación entre la resistencia máxima a tracción y la resistencia medida de fluencia.

Estos dos factores, junto con la rigidez de la riostra PAPR, son los datos más relevantes para el diseño. En el presente trabajo, por medio de revisión de literatura se recopila información de los sistemas de riostras de pandeo restringido más usados, las cuales se clasifican en función de la longitud, la sección transversal, la calidad del acero, el tipo de conexión, el mortero de relleno, el perfil de recubrimiento, el material aislante y las dimensiones geométricas. Sobre esta base se podrán comparar los resultados de diferentes sistemas, autores y ensayos y determinar la variabilidad de los factores de ajuste β y ω y los parámetros que inciden en ellos. Estos factores serán la base para calcular las resistencias ajustadas a compresión y a tracción de las riostras.

Para un proyecto en particular, se podrán realizar ensayos de verificación específicos o bien adoptar ensayos realizados previamente para proyectos similares, que se encuentren debidamente documentados (este criterio es similar al aplicado para conexiones viga-columna en pórticos no arriostrados).

El factor ω representa el efecto del aumento de resistencia por endurecimiento de deformación. Se determina de los resultados experimentales como la relación entre la resistencia máxima a tracción R_n y la resistencia medida de fluencia R_y .

El núcleo de acero de la riostra no puede presentar empalmes y debe diseñarse para resistir la carga axial actuante, adoptando como resistencia de diseño el valor de ϕR_y . Esta parte de la riostra debe considerarse como zona protegida.

6.1. Conexiones

El diseño de las conexiones de la riostra de pandeo restringido representa un aspecto de significativa importancia, y como se indicó previamente, se aplican criterios del diseño por capacidad para asegurar que las conexiones tengan la resistencia adecuada. La resistencia requerida de las conexiones de la riostra debe tomarse como 1.1 veces la resistencia ajustada de la riostra, tanto en compresión como en tracción. El diseño de la conexión deberá considerar el pandeo local o global, para lo cual pueden usarse los valores de fuerzas transversales medidos en los ensayos de calificación. Para resistir esta fuerza pueden disponerse rigidizadores o arriostramientos laterales.

Las conexiones viga-columna deben cumplir los mismos requerimientos indicados para los pórticos arriostrados concéntricamente.

Teóricamente, una riostra restringida contra pandeo bien diseñada y fabricada no se pandea si la resistencia a la fluencia del núcleo de acero es menor que la carga crítica de Euler del elemento restrictivo [12].

El dispositivo garantizará un ciclo histerético estable al tener la misma resistencia a la fluencia tanto para las cargas de compresión como para las de tracción [11]. Las riostras se instalan en los pórticos de diferentes maneras, destacándose la configuración en diagonal simple o en V (tipo chevron) ver ilustración 4.

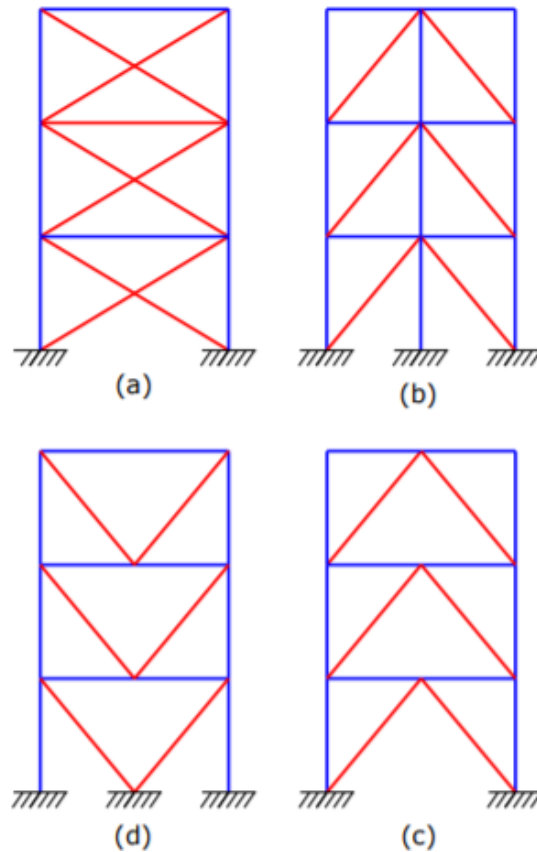


Ilustración 5. Tipos de configuración estructuras para pórticos arriostrados

6.2. Ensayos cíclicos para la calificación de riostras de pandeo restringido

Una riostra de pandeo restringido se somete a varios ciclos de carga según lo indicado en la Sección ANSI/AISC 341-16 [23], numeral K.3, con el fin de determinar el comportamiento del elemento como conjunto y proporcionar evidencia de que el diseño de la riostra puede soportar satisfactoriamente las demandas de deformación y rotación asociadas a las acciones sísmicas, además el ensayo del conjunto procura demostrar que el comportamiento histerético de la riostra es consistente con el de los elementos que la componen.

Los resultados de pruebas de calificación deben consistir de al menos dos ensayos cíclicos exitosos. El primero consiste en un ensayo de pre ensamblaje en el que se contemplan demandas de rotación en las conexiones de la riostra según ANSI/AISC 341-16 [23], numeral K.3.2. El segundo consiste en un ensayo que puede ser uniaxial o en un pre ensamblaje contemplado en ANSI/AISC 341-16, numeral K.3.3. Ambos ensayos deben estar reportados en investigaciones o ensayos para otros proyectos debidamente documentados, o en ensayos para el proyecto a ejecutar. Cualquier interpolación o extrapolación debe ser debidamente justificada por análisis que demuestren distribuciones de esfuerzos y deformaciones internas consistentes.

6.3. Diseño del núcleo de la riostra.

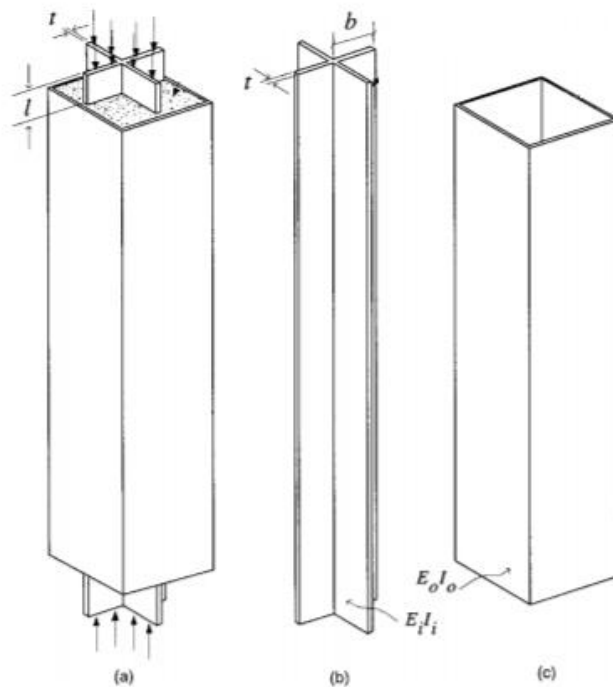


Ilustración 6. Riostras de pandeo restringido, núcleo (A), camisa (B) y mortero (C). Adaptado de [8].

Resistencia de diseño de la riostra:

$$\phi R_n = \phi F_y^* A_n$$

R_n = Resistencia de fluencia de la riostra.

ϕ = Factor de reducción por resistencia a tracción o compresión.

F_y = Esfuerzo mínimo de fluencia de la riostra.

A_n = Área de la sección transversal del segmento de fluencia del núcleo de acero.

Se requiere que la resistencia de fluencia de la riostra sea modificada a partir de los factores de ajuste β y ω , así las resistencias ajustadas a tracción y compresión son las indicadas en las ecuaciones 1 y 2.

Deben aplicarse las siguientes especificaciones normativas para el diseño del núcleo de la riostra.

1. Cuando las placas usadas en el núcleo tengan un espesor mayor o igual que 50 mm, su tenacidad del ensayo Charpy debe ser como mínimo de 27 J a una temperatura de 21°C.
2. No están permitidos los empalmes en el núcleo.
3. En los cálculos de estabilidad, tanto el recubrimiento del núcleo como las vigas, las columnas y las placas de unión que conecten el núcleo deben considerarse como parte del mecanismo que restringe el pandeo.

6.4. Diseño de la camisa o tubo de acero

El encamisado de la riostra debe considerarse conjuntamente con vigas, columnas y platinas de nudo para conformar el mecanismo que restrinja el pandeo.

Este elemento se diseña para evitar el pandeo de Euler de la riostra. Se puede utilizar la siguiente expresión para el diseño.

$$P_e/P_y \geq 1.5$$

donde P_y es la resistencia de fluencia del segmento de fluencia restringido al pandeo.

En la expresión anterior se debe considerar un endurecimiento por deformación del 30% para el núcleo de acero, y un factor de seguridad de 0.85.

6.5. Mortero de relleno

Mientras que la función del núcleo de acero es la de resistir el 100% de las cargas axiales, la función del mortero junto con la camisa o tubo de acero, es la de evitar el pandeo del núcleo de la riostra. Para que el mortero cumpla esta función, algunos autores han idealizado al mortero de relleno como una serie de resortes ubicados entre el núcleo de acero y la camisa exterior. [22]

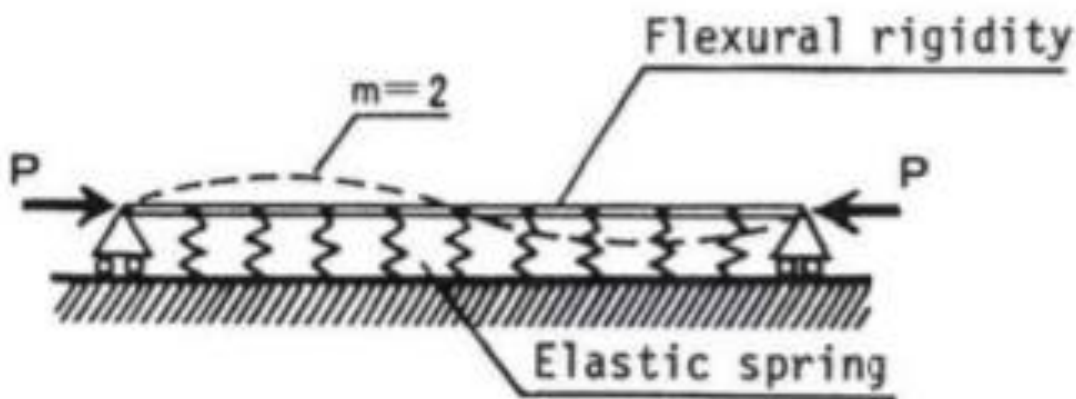


Ilustración 7. Idealización de mortero de relleno en Riostras de pandeo restringido. Adaptado de [22].

Para que la riostra pueda desarrollar toda su capacidad a compresión, y se pueda evitar los modos altos de pandeo, Fujimoto et al. [22] han propuesto una expresión que determina la carga crítica de capacidad del concreto.

$$P_c = 2\sqrt{kEnI_n}$$

donde

- P_c = Carga crítica de capacidad del mortero
- K = Constante del resorte por unidad de longitud del mortero (β).
- E_n = Modulo de elasticidad del núcleo de acero
- I_n = Momento de inercia del núcleo con respecto al eje débil.

7. ANALISIS DE RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO EN BIBLIOGRAFIA

Análisis de riostras de longitud entre 1,5m - 3m (Tipo 1), núcleo de platina y confinamiento cuadrado, conexión cruciforme empernada.


| Descripción | Referencia | Beta | Omega |
|--|--|-------------|-------------|
| Riostras de longitud entre 1,5m - 3m, núcleo de platina y confinamiento cuadrado, conexión cruciforme  | [20]. Cancelado, R. A. (2013). Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas. Revista de Ingeniería, (39), 17-23. | 1.10 | 1.12 |
| | | 1.18 | 1.03 |
| | [14]. Karimi, S., & Arbabi, F. (2008). Seismic Evaluation And Cyclic Testing Of Buckling Restrained Braces Manufactured in Iran. In 14th World Conference on Earthquake Engineering, Conferencia llevada a cabo por International Association of Earthquake Engineering. Beijing, China. | 1.30 | 2.06 |
| | | 1.25 | 2.215 |
| | | 1.15 | 1.1 |
| | | 1.31 | 1.1 |
| | [15]. Wang, C., Li, T., Chen, Q., Wu, J., & Ge, H. (2014). Experimental and Theoretical Studies on Plastic Torsional Buckling of Steel Buckling-restrained Braces. Advances in Structural Engineering, 17(6), 871. | 1.06 | |
| | | 1.18 | |
| | | 1.20 | |
| | | 1.02 | |
| | | 1.06 | |
| | | 1.18 | |
| | [17]. Zhao, J., Wu, B., & Ou, J. (2011). A novel type of angle steel buckling-restrained brace: Cyclic behavior and failure mechanism. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 40(10), 1083-1102. | 1.18 | |
| | | 1.10 | |
| | | 1.14 | |
| 1.17 | | | |
| 1.12 | | | |
| Todos los núcleos de las diferentes bibliografías son de acero ASTM A572 G50 | 1.14 | | |
| | 1.26 | | |
| | | | |
| | Promedio | 1.16 | 1.44 |
| | Desviación estandar | 0.08 | 0.55 |

Tabla 2. Valores de β y ω para riostras tipo 1.

Para las riostras tipo 1, los valores promedio para β y ω son 1.16 y 1.44 respectivamente.

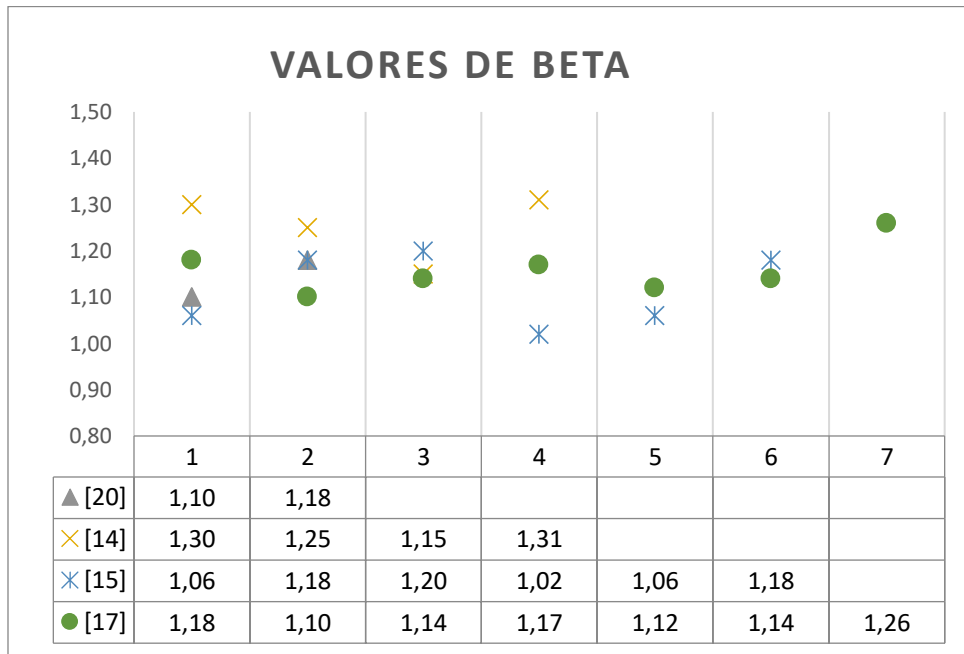


Ilustración 8. Valores de β para riostras tipo 1 según bibliografía.

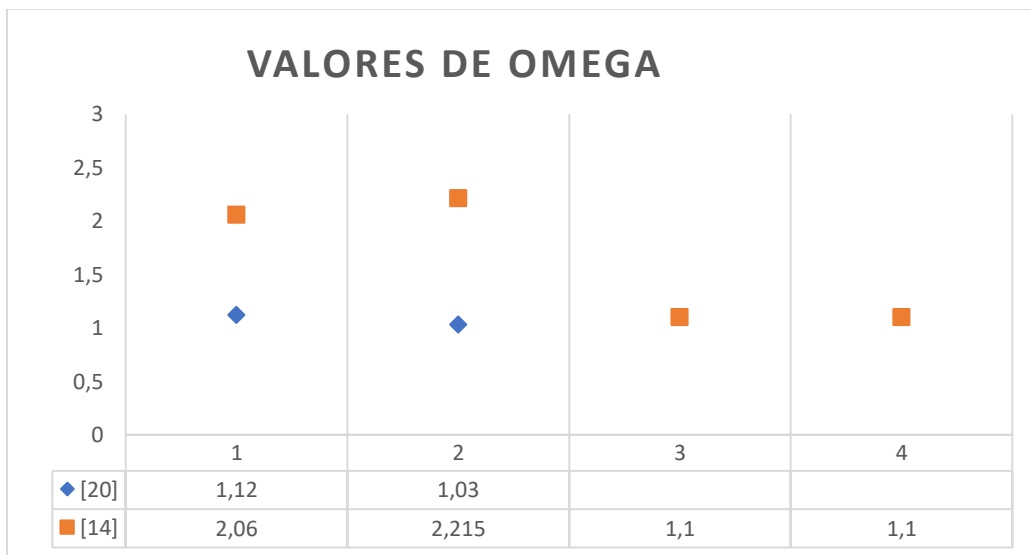


Ilustración 9. Valores de ω para riostra tipo 1 según bibliografía.

Análisis de riostras de longitud entre 1,5m - 3m (Tipo 2), núcleo de platina y confinamiento circular, conexión cruciforme emperrada.

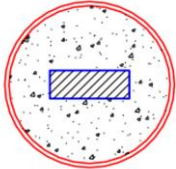
| Descripción | Referencia | Beta | Omega |
|---|---|-------------|-------------|
| Riostras de longitud entre 1,5m - 3m, nucleo de platina y confinamiento circular, conexión cruciforme | [21]. López, W. A., & Sabelli, R. (2004). Seismic design of buckling-restrained braced frames. Steel tips, 78. | 1.02 | 1.15 |
| | | 1.02 | 1.16 |
| | | 1.02 | 1.18 |
| | | 1.02 | 1.16 |
| | | 1.02 | 1.16 |
| | | 1.02 | 1.17 |
|  | [20]. Cancelado, R. A. (2013). Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas. Revista de Ingeniería, (39), 17-23. | 1.02 | 1.15 |
| | | 1.21 | 1.26 |
| | [19]. Ma, N., Ou, J. P., & Li, H. (2012). Experimental study of low-yield strength steel buckling restrained brace. In Proceedings of (Vol. 15). | 1.20 | 1.02 |
| | | 1.47 | 0.80 |
| | | 1.10 | 1.26 |
| | | 1.07 | 1.38 |
| | | 1.15 | 1.51 |
| | | 1.09 | 1.71 |
| | | 1.07 | 1.70 |
| | | 1.25 | 1.08 |
| Todos los nucleos de las diferentes bibliografias son de acero ASTM A572 G50 | 1.12 | 1.39 | |
| | 1.09 | 1.52 | |
| | 1.16 | 1.68 | |
| | 1.12 | 1.89 | |
| | | 1.09 | 2.00 |
| | Promedio | 1.11 | 1.35 |
| | Desviación estandar | 0.11 | 0.31 |

Tabla 3. Valores de β y ω para riostras tipo 2.

Para las riostras tipo 2, los valores promedio para β y ω son 1.11 y 1.35 respectivamente.

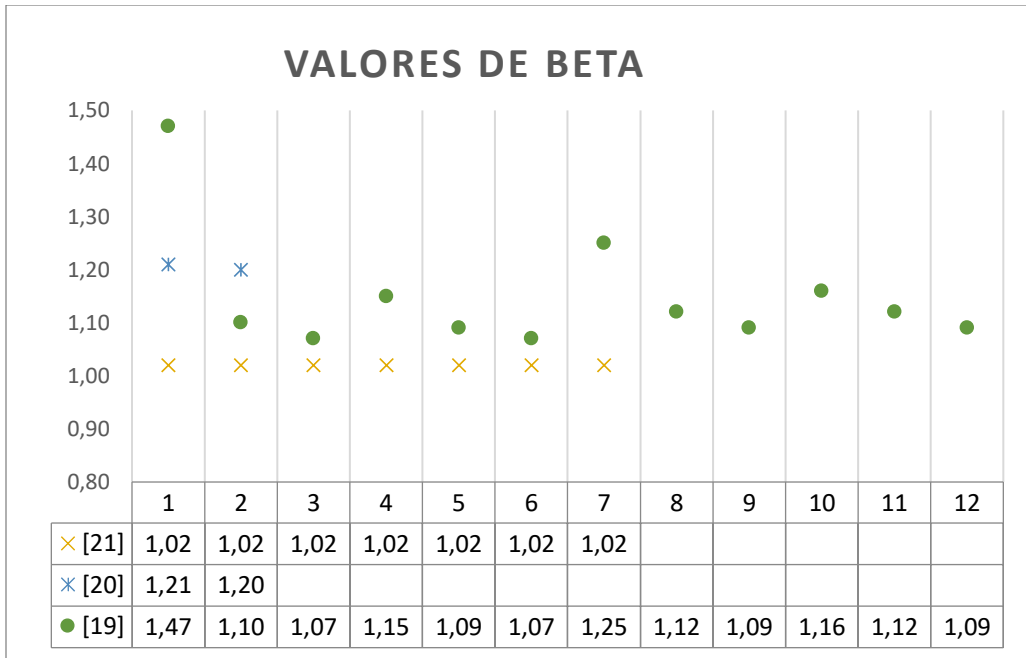


Ilustración 3. Valores de β para riostras tipo 2 según bibliografía.

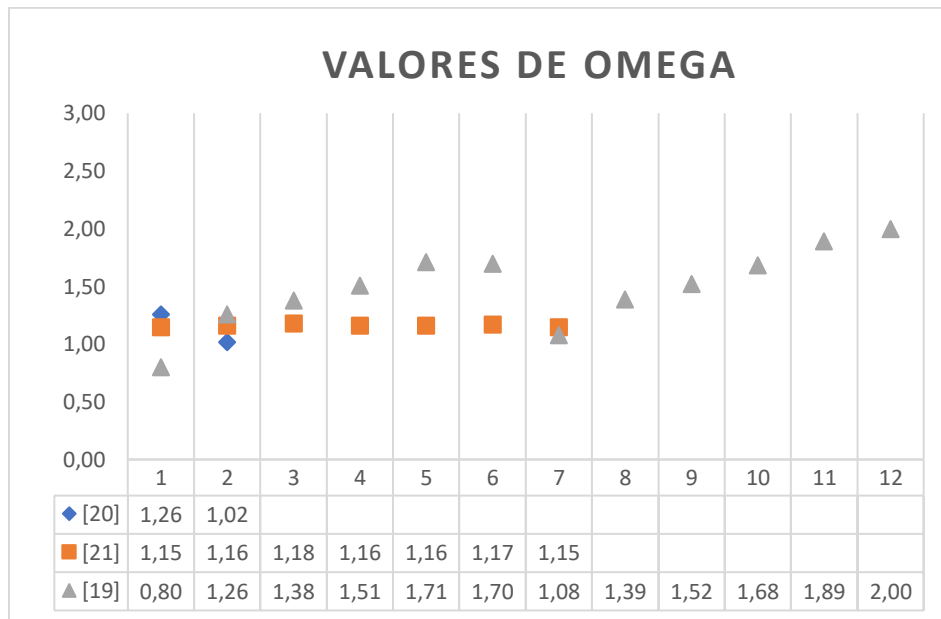


Ilustración 4. Valores de ω para riostras tipo 2 según bibliografía.

Análisis de riostras de longitud entre 4m - 6m (Tipo 3), núcleo de platina A36 y confinamiento circular ASTM A500 Grado B, concreto de 3000 psi y conexión cruciforme empernada.


| Descripción | Referencia | Beta | Omega |
|---|--|-------------|-------------|
| Riostras de longitud entre 4m - 6m, núcleo de platina A36 y confinamiento cuadrado A500 G-B, Concreto de 3000PSI  | [21]. López, W. A., & Sabelli, R. (2004). Seismic design of buckling-restrained braced frames. Steel tips, 78. | 1.01 | 1.12 |
| | | 1.03 | 1.22 |
| | | 1.03 | 1.22 |
| | | 1.03 | 1.22 |
| | | 1.03 | 1.22 |
| | | 1.03 | 1.20 |
| | [13]. Chen, Q., Wang, C. L., Meng, S., & Zeng, B. (2016). Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces. Engineering Structures, 111, | 1.10 | 1.07 |
| | | 1.30 | 1.14 |
| | | 1.69 | 1.30 |
| | | 1.38 | 1.15 |
| 1.19 | | 1.12 | |
| [16]. Xu, W., Pantelides, C. P., Robinson, K., & Powell, S. D. Hysteretic performance of new generation buckling restrained braces. In 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Paper (No. 1276). | 1.06 | 1.57 | |
| | 1.11 | 1.46 | |
| | 1.25 | 1.61 | |
| | 1.19 | 1.67 | |
| Todos los núcleos de las diferentes bibliografías son de acero ASTM A36 | [18]. Tsai, C. S., Su, H. C., & Chiang, T. C. (2012, September). Huge scale tests of all-steel multi-curve buckling restrained braces. In The 15th World Conference on Earthquake Engineering. | 1.0555 | |
| | | 1.0832 | |
| | | 1.1094 | |
| | Promedio | 1.14 | 1.28 |
| | Desviación estandar | 0.17 | 0.19 |

Tabla 4. Valores de β y ω para riostras tipo 3.

Para las riostras tipo 3, los valores promedio de β y ω son 1.14 y 1.28 respectivamente.

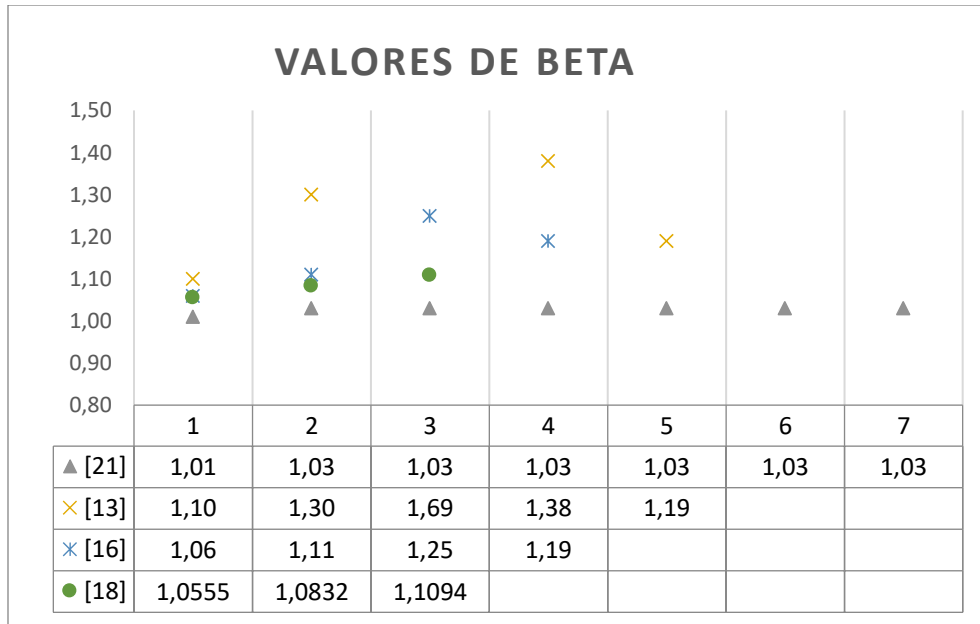


Ilustración 12. Valores de β para riostras tipo 3 según bibliografía.

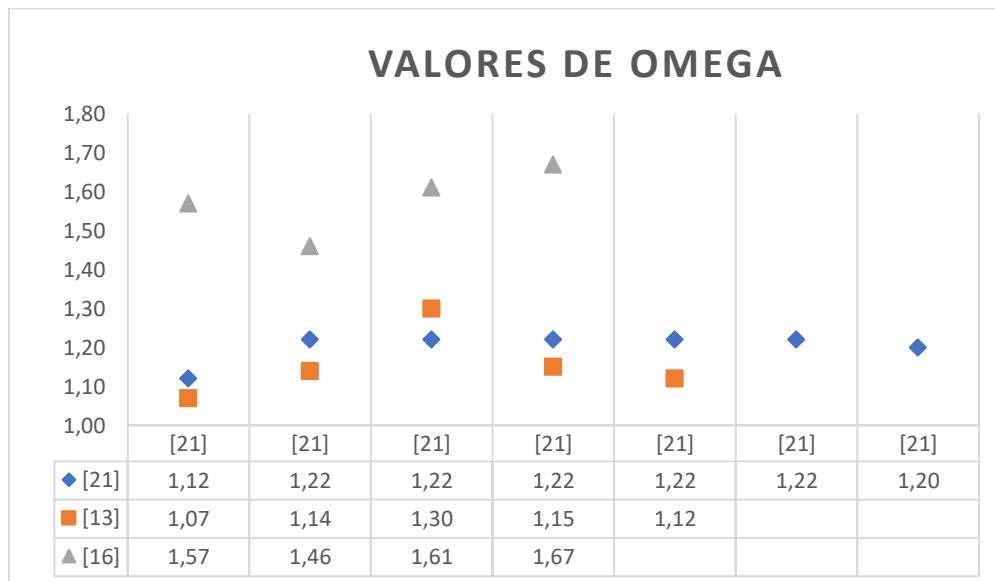


Ilustración 13. Valores de ω para riostras tipo 3 según bibliografía.

8. CONCLUSIONES.

- Los valores de β y ω propuestos para los diferentes tipos de riostras estudiados, según literatura, se pueden usar para el predimensionamiento del sistema resistente sísmico de la edificación, antes de hacer una inversión económica considerable en ensayos.
- El uso de modelos matemáticos, comparados con ensayos de laboratorio, tiene alta fiabilidad, con porcentajes de error hasta menores del 1% [16].
- No hay variaciones considerables en los valores de β y ω para los tres grupos de riostras considerados, lo que sugiere que el factor más relevante en el cálculo de estos valores es el tipo de material del núcleo.
- Se puede iniciar un modelo con valores de $\beta:1.14$ y $\omega:1.35$, como base para el predimensionamiento de la estructura, luego se debe hacer un ensayo de laboratorio para corroborar esos valores usados o comparar esos valores con PAPR usados en literatura que tengan los valores aproximados.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Bosco, M., & Marino, E. M. (2013). Design method and behavior factor for steel frames with buckling restrained braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(8), 1243-1263.
- [2] KIM, Jinkoo; CHOI, Hyunhoon. Behavior and design of structures with buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 2004, vol. 26, p. 693-706.
- [3] Vigh, L. G., Zsarnóczyay, Á., & Balogh, T. (2017). Eurocode conforming design of BRBF–Part I: Proposal for codification. *Journal of Constructional Steel Research*, 135, 265-276.
- [4] Della Corte, G., D’Aniello, M., Landolfo, R., & Mazzolani, F. M. (2011). Review of steel buckling-restrained braces. *Journal Steel Construction*, 4(2).
- [5] DEVICES, B. A. H. E. D. (2008). Optimum strength ratio of buckling-restrained braces as hysteretic energy dissipation devices installed in R/C frames.
- [6] Tsai, K. C., Lai, J. W., Hwang, Y. C., Lin, S. L., & Weng, C. H. (2004, August). Research and application of double-core buckling restrained braces in Taiwan. In *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper* (No. 2179).
- [7]. D’Aniello, M., Della Corte, G., & Landolfo, R. (2014). Finite element modelling and analysis of “all-steel” dismountable buckling restrained braces. *Open Construction & Building Technology Journal*, 8(Suppl 1: M4), 216-226.
- [8]. Black, C. J., Makris, N., & Aiken, I. D. (2004). Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces. *Journal of Structural Engineering*, 130(6), 880-894.
- [9]. Karavasilis, T. L., Kerawala, S., & Hale, E. (2012). Hysteretic model for steel energy dissipation devices and evaluation of a minimal-damage seismic design approach for steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 358-367.

- [10] Chan, R. W., & Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, 30(4), 1058-1066.
- [11] Uang, C. M., Nakashima, M., & Tsai, K. C. (2004). Research and application of buckling-restrained braced frames. *International Journal of Steel Structures*, 4(4), 301-313.
- [12] Wada, A., & Nakashima, M. (2004, August). From infancy to maturity of buckling restrained braces research. In *13th WCEE*.
- [13]. Chen, Q., Wang, C. L., Meng, S., & Zeng, B. (2016). Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 111, 478-493.
- [14]. Karimi, S., & Arbabi, F. (2008). Seismic Evaluation And Cyclic Testing Of Buckling Restrained Braces Manufactured in Iran. In 14th World Conference on Earthquake Engineering, Conferencia llevada a cabo por International Association of Earthquake Engineering. Beijing, China.
- [15]. Wang, C., Li, T., Chen, Q., Wu, J., & Ge, H. (2014). Experimental and Theoretical Studies on Plastic Torsional Buckling of Steel Buckling-restrained Braces. *Advances in Structural Engineering*, 17(6), 871.
- [16]. Xu, W., Pantelides, C. P., Robinson, K., & Powell, S. D. Hysteretic performance of new generation buckling restrained braces. In 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Paper (No. 1276).
- [17]. Zhao, J., Wu, B., & Ou, J. (2011). A novel type of angle steel buckling-restrained brace: Cyclic behavior and failure mechanism. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(10), 1083-1102.
- [18]. Tsai, C. S., Su, H. C., & Chiang, T. C. (2012, September). Huge scale tests of all-steel multi-curve buckling restrained braces. In The 15th World Conference on Earthquake Engineering.

- [19]. Ma, N., Ou, J. P., & Li, H. (2012). Experimental study of low-yield strength steel buckling restrained brace. In Proceedings of (Vol. 15).
- [20]. Cancelado, R. A. (2013). Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas. *Revista de Ingeniería*, (39), 17-23.
- [21]. López, W. A., & Sabelli, R. (2004). Seismic design of buckling-restrained braced frames. *Steel tips*, 78.
- [22] Fujimoto, M., Wada, A., Saeki, E., Takeuchi, T., & Watanabe, A. (1990). Development of unbonded brace. *Quarterly Column*, 115, 91-96.
- [23]. ANSI/AISC 341-16 (2016). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.[9]. Karavasilis, T. L., Kerawala, S., & Hale, E. (2012). Hysteretic model for steel energy dissipation devices and evaluation of a minimal-damage seismic design approach for steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 358-367.