



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE SISTEMA DE ENSAYO CUASIELÁSTICO CÍCLICO
DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN PARA RIOSTRAS DE
PANDEO RESTRINGIDO.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSÉ IGNACIO ESPINOZA BRAVO

PROFESOR GUÍA:

RICARDO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

MARIA OFELIA MORONI YADLIN

SANTIAGO DE CHILE

2016

Esta memoria fue financiada por proyecto Fondef CA 13I 10026

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

POR: JOSÉ ESPINOZA B.

FECHA: 12/04/2016

PROF. GUIA: SR. RICARDO HERRERA M.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ENSAYO CUASIELÁSTICO CÍCLICO DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN PARA RIOSTRAS DE PANDEO RESTRINGIDO.

El estudio del comportamiento de riostras de pandeo restringido conlleva a la necesidad de implementar un sistema de ensayo para poder obtener resultados e información relevante su desempeño sísmico. Estos elementos se componen de un perfil de acero interior rodeado por otro perfil de acero y una capa de mortero u otro material confinante entre ambos, se caracteriza por presentar estabilidad lateral ante demandas axiales alcanzando resistencia similar tanto en tracción como en compresión sin sufrir pandeo, y son útiles ante demandas sísmicas actuando como disipadores de energía. El objetivo del presente trabajo es el diseño y construcción de un sistema de ensayo de tracción y compresión para riostras de pandeo restringido. Dicho sistema es capaz de proporcionar la carga de manera axial solamente mediante un actuador hidráulico de 25 [ton] de capacidad. El sistema de ensayo entrega como resultado las curvas de carga versus desplazamiento para caracterizar cuantitativamente el desempeño de los prototipos de riostra en términos de disipación de energía ante la acción cíclica, y posee un sistema de control sencillo para poder aplicar los ciclos de carga de acuerdo a las disposiciones y recomendaciones para este tipo de ensayos. Para llevar a cabo lo anterior se implementó el sistema de ensayo en el laboratorio de estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, donde se dispuso la instalación estructural lo suficientemente resistente para soportar las cargas generadas durante los ensayos. Como resultado se tiene un sistema que entrega mediciones confiables y son útiles para caracterizar cada prototipo ensayado, además de poseer un sistema de montaje y operación lo más sencillo posible.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Alcances de cada capítulo.	4
2.	Revisión de antecedentes sobre ensayos de BRB	5
2.1.	Sistemas de ensayo existentes.....	5
2.2.	Disposiciones de diseño y ensayo.	11
2.3.	Instrumentos y sistema de medición	14
2.3.1.	Strain Gage:.....	14
2.3.2.	Celda de carga:	16
2.3.3.	Sensor de desplazamiento (LVDT):.....	17
2.3.4.	Sistema de adquisición de datos.	20
2.4.	Curvas de Histéresis	21
2.5.	Actuador hidráulico.....	23
2.6.	Controlador PID	24
2.7.	Tipos de conexión BRB.....	25
2.7.1.	Conexión apernada:	25
2.7.2.	Conexión rotulada:.....	25
2.7.3.	Conexión soldada:.....	26
3.	Parámetros de diseño	27
3.1.	Equipos y entorno	27
3.2.	Tipos de BRB	28
3.2.1.	Largo de probetas:.....	29
3.2.2.	Tipo de conexión de probeta.	30
3.3.	Definición de límites de medición	31
3.3.1.	Resistencia máxima:.....	31
3.3.2.	Deformaciones máximas esperadas:.....	32
3.4.	Materiales.....	33
4.	Modelo estructural.....	34
4.1.	Descripción del mecanismo	34
4.2.	Elementos que componen el sistema de ensayo	35
4.2.1.	Apoyo fijo:.....	35
4.2.2.	Apoyo deslizante:	36

4.2.2.1.	Columnas apoyo deslizante (C2):	37
4.2.2.2.	Viga V1:.....	37
4.2.2.3.	Viga V2:.....	37
4.2.3.	Conexión Gusset con atiesadores:	38
4.2.3.1.	Consideraciones para el diseño de la placa Gusset:.....	38
4.2.4.	Modelación placa gusset en Ansys:.....	41
4.2.4.1.	Descripción del modelo:	41
4.2.4.2.	Contactos:	43
4.2.4.3.	Estados de carga:	43
4.2.4.4.	Resultados:	44
4.3.	Uniones de elementos.....	45
4.3.1.	Doble T rígida:	45
4.3.2.	Placas unidas por pasador:	46
4.3.3.	Unión Actuador hidráulico – Apoyo fijo:	46
5.	Sistema de control y adquisición de datos.	47
5.1.	Introducción.....	47
5.2.	Sistema de control.....	47
5.3.	Adquisición de datos.	51
5.3.1.	Programa LabVIEW de adquisición de datos.	54
5.4.	Calibración del sistema de control P	54
6.	Montaje y ensayo de prueba.	56
6.1.	Montaje sistema estructural.	56
6.1.1.	Anclaje de Apoyos del sistema de ensayo.	56
6.1.2.	Apriete uniones apernadas.	57
6.2.	Ensayo de prueba.	58
6.2.1.	Instrumentación.	58
6.2.2.	Observaciones y resultados.	58
7.	Discusión y conclusiones	60
7.1.	Discusión.....	60
7.2.	Conclusiones.....	60
7.3.	Limitaciones del sistema y posibles mejoras.....	61
	Bibliografía.	62
	Anexo	64
1.	Memorias de cálculo	64

Índice de figuras:

Figura 1. 1 Elementos que componen una riostra de pandeo restringido.....	2
Figura 1. 2 Comportamiento de una riostra común y de riostra con pandeo restringido.	2
Figura 2. 1 Ensayo uniaxial realizado por Black et al (2000).....	6
Figura 2. 2 Historia de desplazamiento básico y curvas de histéresis obtenidas por Black et al (2000).	7
Figura 2. 3 Curvas de histéresis obtenidas para historial de carga con una desviación con respecto al punto neutro. Black et al (2000).....	8
Figura 2. 4 Elevación y planta de ensayo de subestructura realizado por Takeuchi et al (2013)..	9
Figura 2. 5 Historia de deformación para ensayo realizado por Takeuchi et al (2013).	9
Figura 2. 6 Curvas de histéresis obtenidas por Takeuchi et al (2013).....	10
Figura 2. 7 Distintos mecanismos de aplicación de carga en ensayo de subestructura.	13
Figura 2. 8 Strain Gage.....	15
Figura 2. 9 Puente de Wheastone.....	15
Figura 2. 10 Sensor de desplazamiento.....	17
Figura 2. 11 Desplazamiento del núcleo hacia la izquierda.....	18
Figura 2. 12 Desplazamiento del núcleo hacia la derecha.	18
Figura 2. 13 Voltaje versus desplazamiento en un LVDT.....	19
Figura 2. 14 Parámetros relativos a la fluencia en ciclo de histéresis.....	21
Figura 2. 15 Curvas de histéresis real e idealizada para un ciclo de tracción y compresión.....	22
Figura 2. 16 Conexión apernada, rotulada y soldada para BRB.....	26
Figura 3. 1 Losa de reacción.....	28
Figura 3. 2 Secciones transversales de riostras de pandeo restringido.....	29
Figura 4. 1 Estados de carga impuestos en cada probeta.	34
Figura 4. 2 Planta y elevación de sistema de ensayo.....	35
Figura 4. 3 Apoyo deslizante.....	37
Figura 4. 4 Influencia de atiesadores en el extremo de una riostra de pandeo restringido. Takeuchi et al (2013).....	40
Figura 4. 5 Conexion BRB - Placa Gusset - Apoyo.	41
Figura 4. 6 Modelo 3D de elementos finitos.	42
Figura 4. 7 Estado tensional en elementos del modelo.	44
Figura 4. 8 Estado tensional en placa Gusset.	45
Figura 5. 1 Servo válvula de control MOOG.....	48
Figura 5. 2 PLC.....	49
Figura 5. 3 Historia de desplazamiento aplicado a BRB.....	50
Figura 5. 4 Disposición de instrumentos de medición.	52
Figura 5. 5 Chasis NI cDAQ-9188XT.	53
Figura 5. 6 Módulos de serie C conectados a cDAQ 9188XT.	54

Figura 6. 1 Post tensado de barras de anclaje.....	57
Figura 6. 2 Detalle de uniones apernadas.....	57
Figura 6. 3 Histéresis ensayo de prueba.....	59
Figura 6. 4 Probeta durante el ensayo y soporte de LVDT.....	59

1. Introducción

1.1. Motivación

Debido a la permanente ocurrencia de actividad sísmica en Chile, se hace necesario realizar innovación e investigación en nuevas tecnologías, sistemas y elementos estructurales con características que mejoren el desempeño sísmico de una estructura en términos de capacidad de disipación de energía, resistencia y aislación.

Las riostras de pandeo restringido (En Inglés, Buckling Restrained Braces), forman parte de los elementos sismo resistentes de una estructura. Pueden ser dispuestos, al igual que las riostras convencionales, en forma de “V”, “V invertida” o “K”, poseen la particularidad de resistir esfuerzos similares tanto en tracción como en compresión lo que, sumado al comportamiento de manera estable después del estado de fluencia del acero, brinda a una estructura una mejor capacidad de disipación de energía, entre otras ventajas. Lo anterior se logra otorgando confinamiento de alguna manera para la riostra, evitando o disminuyendo el desplazamiento fuera del plano producto del pandeo en la fase de compresión. Hasta la fecha han sido estudiadas numerosas configuraciones y materiales para lograr el objetivo anteriormente mencionado. Sin embargo la configuración más utilizada o típica es una placa o sección cruciforme de acero llamada núcleo, confinada por un tubo o camisa de acero relleno con hormigón o mortero. Además, se provee un material que permita el deslizamiento relativo con la menor fricción posible entre el núcleo y el hormigón confinante debido a que sin esta condición, en los ciclos de tracción existiría degradación del hormigón producto de la fricción entre ambos materiales. De esta manera se asegura que en la fase de compresión, el pandeo ocurra en modos altos, con lo cual se logra una resistencia en compresión incluso levemente mayor que en tracción. En la figura 1.1 se pueden apreciar los componentes de una riostra de pandeo restringido convencional. Se debe señalar que el núcleo o pletina de acero es el elemento que debe tomar la carga axial mientras que todo el sistema confinante se dispone con el objetivo de otorgar estabilidad lateral al núcleo y evitar el pandeo en modos bajos.

En la figura 1.2 se muestran curvas de histéresis para una riostra convencional a la izquierda y para una riostra de pandeo restringido. Puede inferirse una mayor capacidad de disipación en el caso de las riostras de pandeo restringido debido a la mayor área bajo las curvas de carga versus desplazamiento tanto en tracción como en compresión.



Figura 1. 1 Elementos que componen una riostra de pandeo restringido.

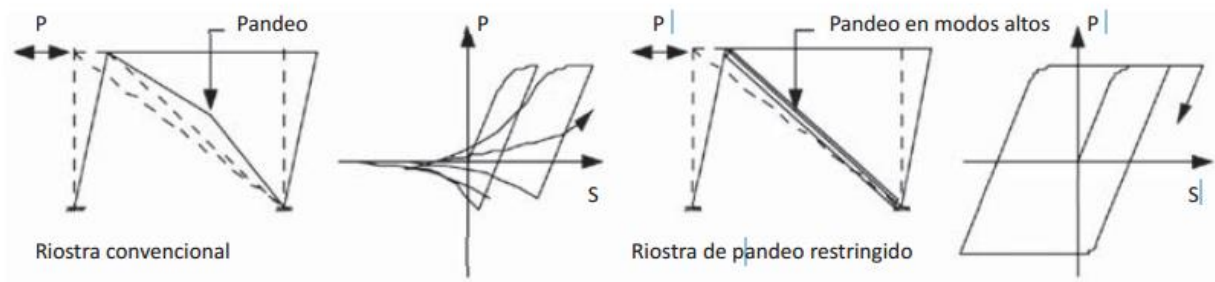


Figura 1. 2 Comportamiento de una riostra común y de riostra con pandeo restringido.

Los extremos de cada riostra se conectan a un marco mediante pernos, conexiones soldadas o mediante pasador. En el capítulo 2.9 se detallan las características más importantes, las diferencias entre las conexiones y las ventajas o desventajas que pueden tener para efectos de diseñar el sistema de ensayo.

El estudio y posterior uso de estos elementos comenzó en Japón a comienzos de los años 80, luego esta tecnología fue estudiada e implementada en EEUU a fines de los años 90. En Chile existen proyectos donde serán usados estos elementos pero no existe un sistema de ensayo para su investigación y caracterización.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño de un sistema de ensayo para riostras de pandeo restringido. Los esfuerzos requeridos para el ensayo de estos elementos corresponden a ciclos de tracción y compresión. Dichos ciclos de tracción y compresión serán aplicados a deformación controlada en base a los requerimientos de carga indicados en las disposiciones sísmicas de la norma AISC 314, donde se espera obtener curvas de fuerza versus desplazamiento que permiten evaluar el comportamiento de las probetas ensayadas.

Objetivos específicos de este trabajo:

- Proporcionar soporte a las estructuras contra las que va a reaccionar cada riostra ensayada, manteniendo apoyos estables y bien anclados.
- Diseñar el sistema de conexiones de manera tal que la posible falla en se produzca en las probetas y no en otro elemento estructural del sistema de ensayo tal como las conexiones o elementos de anclaje.
- Evitar algún tipo de esfuerzo que no corresponda a cargas axiales de manera que no se tengan lecturas de datos que puedan generar errores o conclusiones equivocadas.
- Proveer un sistema de control para el ensayo de manera que se pueda aplicar la carga de acuerdo a lo recomendado en la normativa AISC 314.
- Proveer un sistema de adquisición de datos con el objetivo de obtener curvas de histéresis y otras mediciones importantes para la caracterización de cada probeta ensayada.

1.3. Alcances de cada capítulo.

En el Capítulo 2 se hace una revisión de documentos, normativa y antecedentes relativos a la teoría y principalmente ensayos de riostras de pandeo restringido con el objetivo de establecer una base para tener la información previa al diseño del sistema de ensayo. Luego se determina el tipo de ensayo e historial de carga y desplazamiento que es necesario aplicar, junto con las ecuaciones que permiten caracterizar el desempeño de una probeta ensayada. También se describen las condiciones del lugar físico que ocupa el sistema de ensayo. Se describe el sistema de control y adquisición de datos, con los elementos principales que lo componen y la forma en que interactúan. Finalmente se revisan antecedentes de sistemas de ensayo existentes estableciendo las características más importantes desde el punto de vista estructural y de instrumentación.

En el Capítulo 3 se describen los parámetros necesarios para el diseño del sistema de ensayo, estableciendo las dimensiones y características de probetas admisibles para el sistema, además de determinar las fuerzas y desplazamientos máximos a medir. También se definen los materiales del sistema estructural y se establecen los límites permitidos de velocidades de aplicación de cargas por parte del actuador hidráulico.

En el Capítulo 4 se hace una descripción detallada de cada elemento que conforma el sistema estructural, junto con su función y composición además de señalar los modos de falla para los que han sido diseñados. También se describen las uniones entre elementos y se detalla el tipo de material, tipo de pernos y soldadura.

En el Capítulo 5 se hace una descripción de la disposición de los sensores, características de las tarjetas de adquisición de datos y detalle de los elementos de control durante los ensayos. Se menciona el formato y tipo de archivo de salida para todas las variables de interés para cada ensayo.

En el capítulo 6 se hace una discusión acerca del diseño estructural del sistema de ensayo desarrollado, estableciendo posibles mejoras y complementos para un análisis más completo de riostras de pandeo restringido. Además se establecen comentarios acerca de la efectividad del sistema de control y la posibilidad de aplicar otras formas de carga a parte de lo ya establecido en la normativa vigente.

2. Revisión de antecedentes sobre ensayos de BRB

2.1. Sistemas de ensayo existentes.

A la fecha se han realizado un importante número y variedad de ensayos que han evaluado distintas configuraciones y métodos de restricción de pandeo, tanto para someter a prueba la estabilidad global de los elementos, como a nivel de uniones o en la interfaz tubo exterior y conexiones.

Una de las experiencias más interesantes corresponde a la desarrollada por Black, Markis y Aiken (2000) quienes sometieron a prueba riostras de pandeo restringido con distintas secciones transversales. El sistema de ensayo utilizado requiere de un actuador hidráulico el cual reacciona contra una columna empotrada. En el otro extremo de cada probeta, éstas reaccionan contra una columna empotrada en una losa de reacción lo suficientemente rígida para desprestigiar sus deformaciones a lo largo del ensayo. Los prototipos ensayados tienen como factor común el largo de la riostra el cual corresponde a 4.5 [m] de extremo a extremo incluyendo la zona de conexión. Los ejemplares con mayor área transversal alcanzan una resistencia a la fluencia alrededor de 200 [Ton]. La capacidad del actuador utilizado en este caso corresponde aproximadamente a 450 [ton] en compresión y 310 [Ton] en tracción con un rango de desplazamiento aproximado de ± 15 [cm] para cada lado.

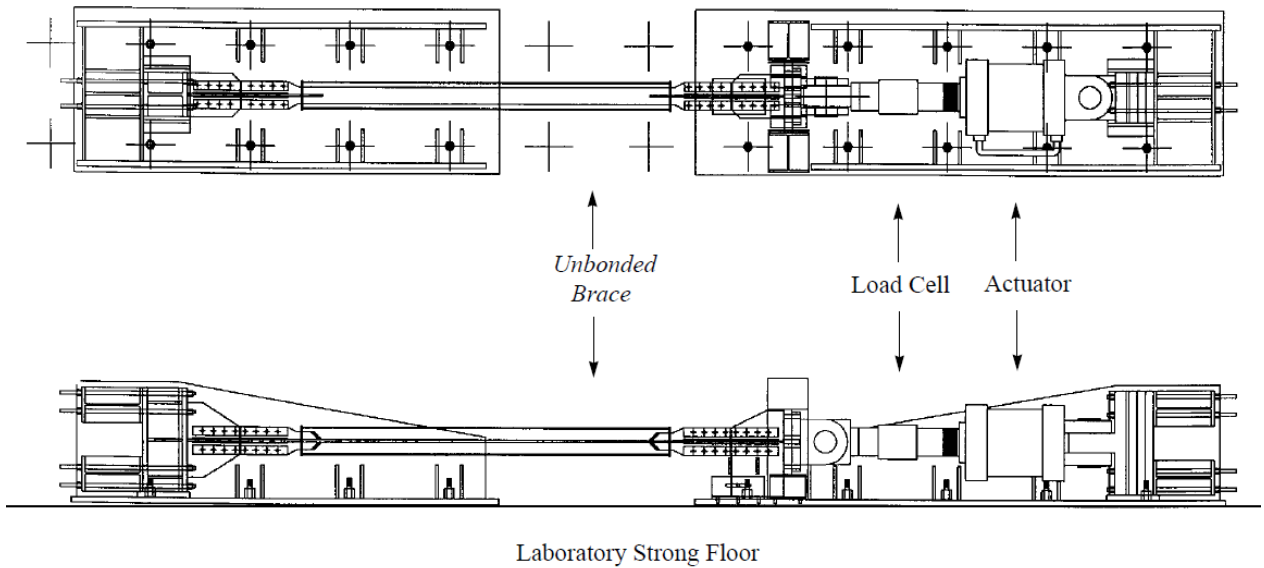


Figura 2. 1 Ensayo uniaxial realizado por Black et al (2000)

Para cada una de las variables de interés en la medición se instalaron dos sensores con el objetivo de presentar redundancia, lo cual es una característica deseable para este tipo de ensayos.

Se instalaron dos sensores de desplazamiento LVDT en el extremo de cada probeta para medir desplazamiento relativo entre la pletina central y el tubo exterior. Los sensores tienen un rango de movimiento aproximado de 7.5 [cm]. Además se instalaron potenciómetros para medir desplazamiento relativo entre los extremos de la riostra. Dos potenciómetros registran el desplazamiento entre extremos incluida la conexión y otros dos sensores registran el desplazamiento entre los extremos de la camisa de confinamiento. Finalmente se instalaron dos sensores de desplazamiento para registrar el movimiento fuera del plano de la camisa de confinamiento

El control de estos ensayos fue realizado estableciendo un historial de deformación cíclico cuya amplitud aumenta progresivamente basándose en múltiplos del desplazamiento entre piso de diseño. Esta deformación aumenta conforme avanza el número de ciclos. Adicionalmente se aplicaron desplazamientos derivados de registros sísmicos.

Para todos los patrones de carga aplicados se obtuvieron respuestas estables como se puede observar en la figura 2.2, registrándose fuerzas superiores en la fase de compresión en comparación con las fuerzas obtenidas en la fase de tracción. Incluso la

estabilidad se mantuvo con un protocolo de carga con una desviación con respecto al punto neutral o sin carga aplicada. La alta estabilidad obtenida en los ensayos realizados por Black et al puede explicarse en el hecho que las cargas son aplicadas solamente de manera axial dejando de lado las demandas rotacionales en los extremos de cada probeta. En la figura 2.3 se muestra un patrón de carga con una excentricidad con respecto al punto de desplazamiento neutro en la que también se observa una respuesta estable por parte del prototipo ensayado.

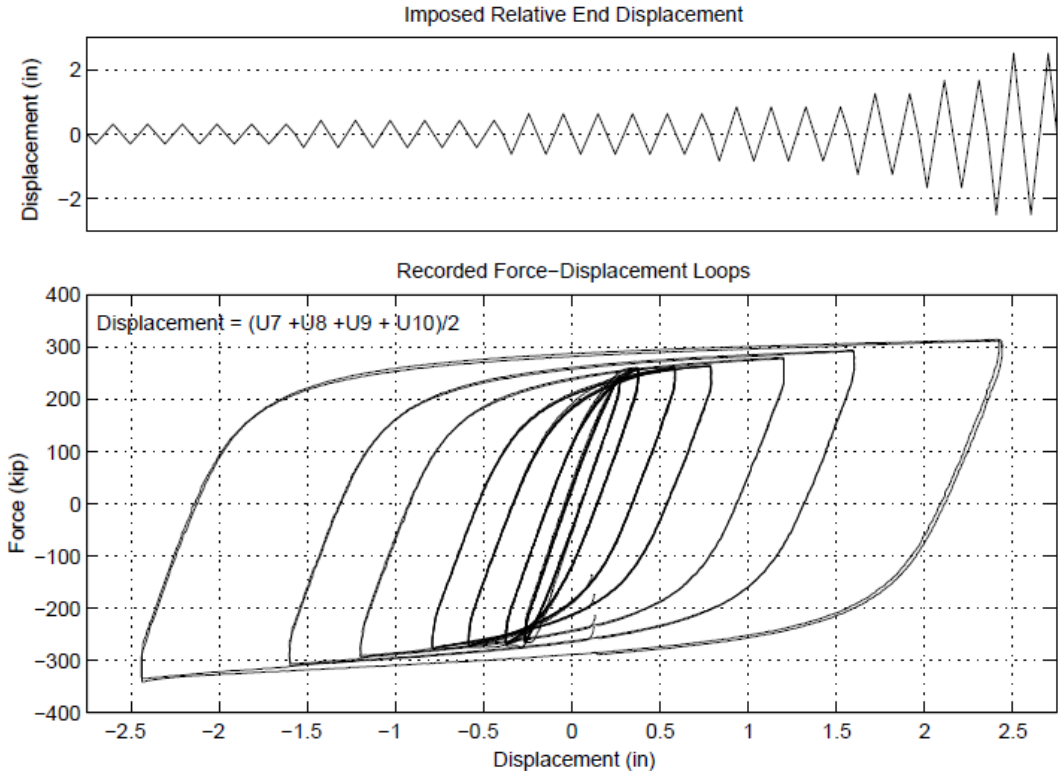


Figura 2. 2 Historia de desplazamiento básico y curvas de histéresis obtenidas por Black et al (2000).

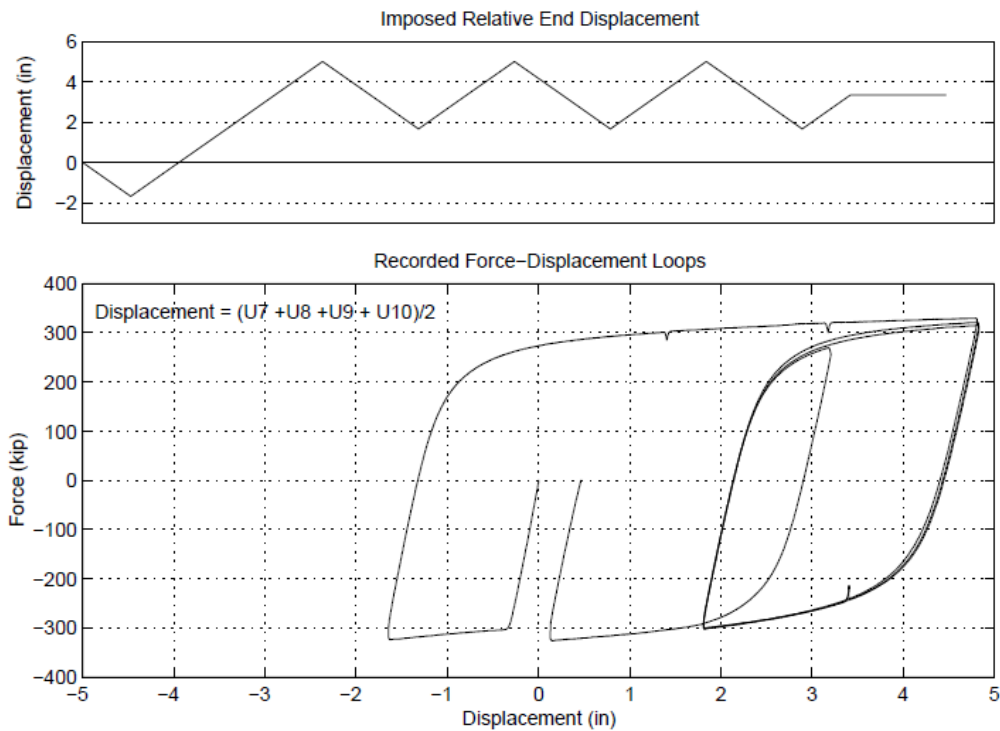


Figura 2. 3 Curvas de histéresis obtenidas para historial de carga con una desviación con respecto al punto neutro. Black et al (2000)

Takeuchi et al (2013) realizó ensayos de riostras de pandeo restringido con el objetivo de estudiar la estabilidad de las probetas y sus conexiones, imponiendo desplazamientos fuera del plano para obtener demandas rotacionales en las probetas aparte de los esfuerzos de tracción y compresión típicos. Se realizó un detallado estudio teórico y experimental para caracterizar los tipos de conexión y obtener recomendaciones para que las probetas se comporten de manera estable ante la combinación de la situación más desfavorable de carga. En la figura 2.4 puede apreciarse la instalación experimental, donde las conexiones en la unión viga – columna se representan tal como se realizarían en un edificio real. Además se observa el modo en que se aplica una deformación angular de 1/100 [rad].

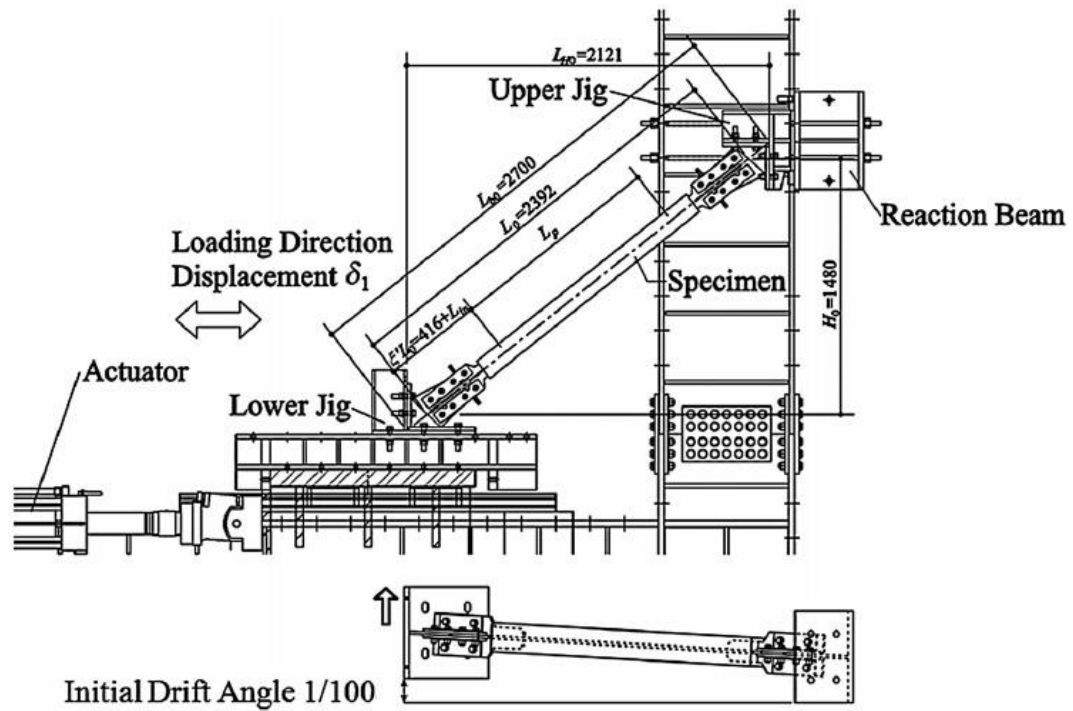


Figura 2. 4 Elevación y planta de ensayo de subestructura realizado por Takeuchi et al (2013)

La secuencia de carga axial aplicada para este set de ensayos fue un patrón similar a lo establecido por la normativa actual, con la salvedad que los desplazamientos se aplican en función de la deformación axial normalizada. Como ya se ha recalado anteriormente la deformación fuera del plano fue aplicada para generar la condición más desfavorable para las probetas.

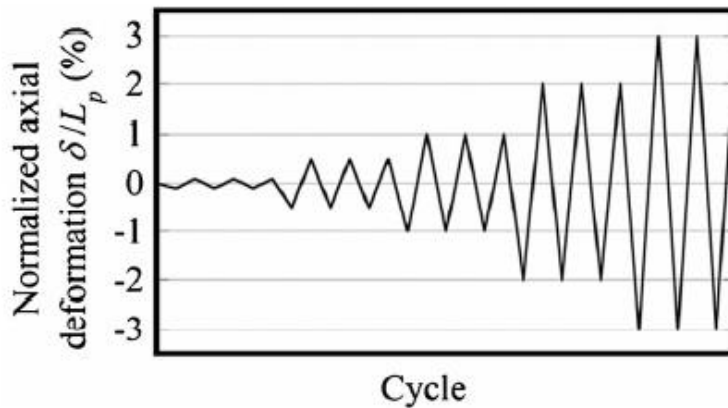


Figura 2. 5 Historia de deformación para ensayo realizado por Takeuchi et al (2013).

Varias probetas presentaron falla en la zona de las conexiones, donde se formaron rotulas plásticas en la interfaz tubo – conexión, y en la zona de la placa Gusset debido a la demanda rotacional impuesta por el desplazamiento fuera del plano. Las probetas que exhibieron un comportamiento más estable presentan atiesadores para la placa Gusset y un largo de inserción de atiesadores de conexión al menos dos veces el ancho del núcleo de acero. De estos ensayos se obtienen conclusiones que derivan en recomendaciones de diseño para evitar fallas por inestabilidad principalmente en la zona de conexiones. En la figura 2.6 se pueden observar las curvas de histéresis para estas probetas que fallan antes de completar los ciclos de carga establecidos.

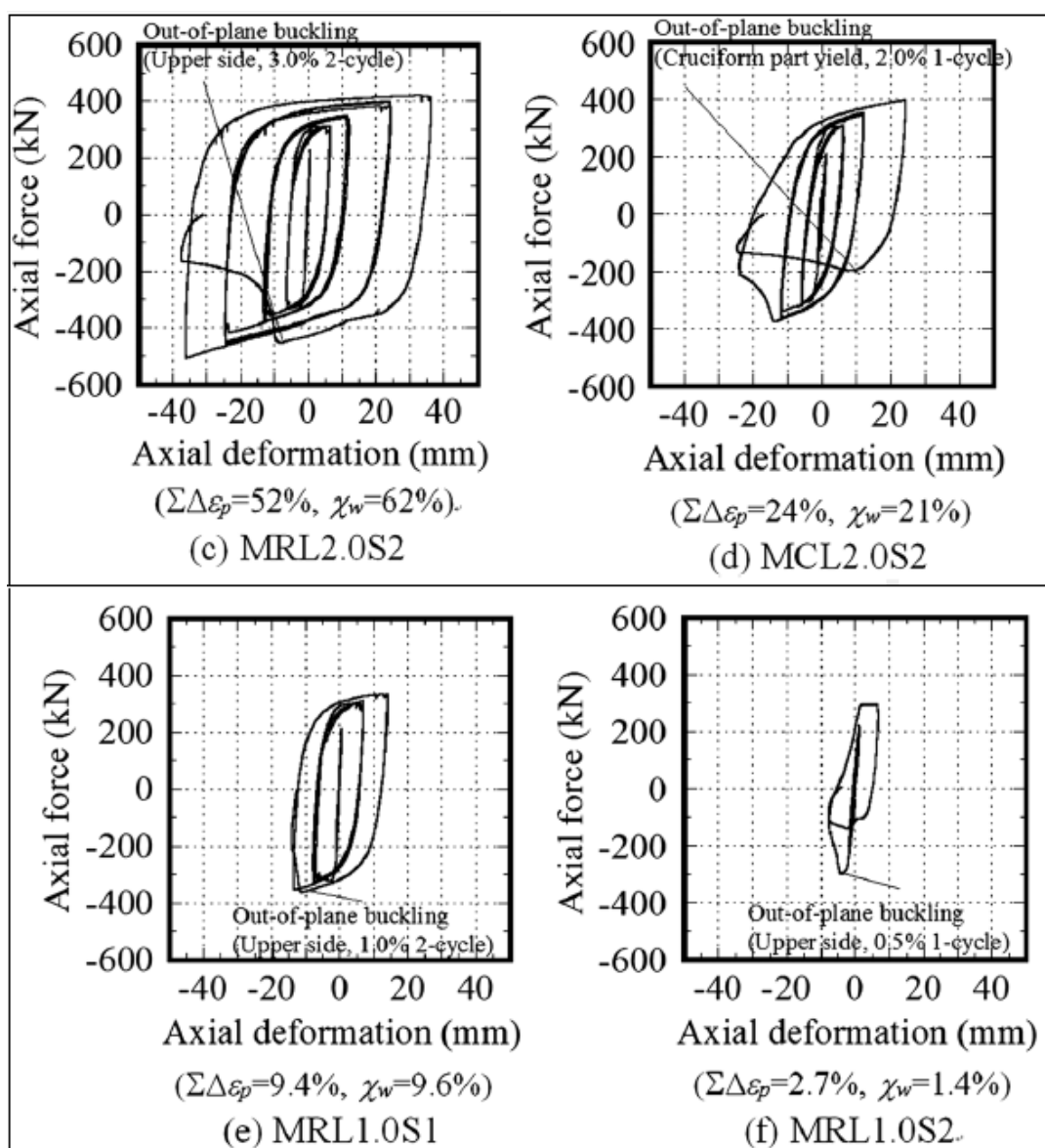


Figura 2. 6 Curvas de histéresis obtenidas por Takeuchi et al (2013)

2.2. Disposiciones de diseño y ensayo.

Para el diseño de elementos de conexión y soportes estructurales para los ensayos se utiliza la *Specification for Structural Steel Building* (AISC, 2010a).

Para la definición de los protocolos de carga en el ensayo se utiliza la norma *Seismic provisions for Structural Steel building*. (AISC, 2010b)

Dicha normativa especifica que se debe aplicar un historial de desplazamiento con el objetivo de someter a cada probeta ensayada a una deformación inelástica acumulada mínima que corresponde a 200 veces la deformación axial que provoca la fluencia en el núcleo o pletina de cada riostra. También se permite que sean realizados incrementos adicionales de carga y desplazamiento para evaluar otros posibles modos de falla. Por lo tanto, el ensayo se realiza a deformación controlada y la fuerza medida en la celda de carga es un resultado del ensayo.

Las cargas deben ser aplicadas en cada probeta de manera tal que se tengan los siguientes ciclos de deformación, comenzando desde la posición neutra y de carga nula.

- a. 2 ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = \Delta_{by}$
- b. 2 ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 0.5\Delta_{bm}$
- c. 2 ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 1.0\Delta_{bm}$
- d. 2 ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$
- e. 2 ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 2.0\Delta_{bm}$
- f. Adicionalmente se deben agregar tantos ciclos completos como fuese necesario a una deformación de $\Delta_b = 1.5\Delta_{by}$ con el objetivo de completar una deformación inelástica acumulada de 200 veces la deformación de fluencia.

Donde:

Δ_{by} : Valor de deformación para la fluencia del núcleo de cada riostra de pandeo restringido.

Δ_{bm} : Valor de la deformación en el arriostramiento correspondiente al desplazamiento entre piso de diseño.

Los parámetros definidos anteriormente se determinan posteriormente y condicionan los requerimientos de espacio y deformaciones máximas presentes en el ensayo, por lo tanto también determinan algunos parámetros de los elementos del sistema estructural.

El cálculo de Δ_{by} por lo general es calculado sobre el largo total entre los extremos de cada riostra de pandeo restringido, incluyendo las conexiones. Con respecto al valor Δ_{bm} se señala que éste no necesita ser mayor que cinco veces Δ_{by} ; si bien esta recomendación ya no se encuentra en AISC 2010b sirve como guía para tener nociones de un valor cercano y realizar una comparación con la estimación del cálculo proveniente de la deriva de piso de diseño.

Además se exige para cada ensayo lo siguiente:

- Esquema detallado de las conexiones, dimensiones, calidad de acero, tipo y tamaño de pernos y detalles de soldadura.
- Gráfico del historial de desplazamiento aplicado
- Gráfico de carga versus desplazamiento.

Con respecto a la clasificación de los tipos de ensayo para riostras de pandeo restringido, la normativa existente hace la distinción según el nivel y tipo de solicitaciones impuesto en cada probeta. Se denomina ensayo Uniaxial en el caso donde sólo se aplican ciclos de tracción y compresión. En este ensayo es posible ensayar cada probeta de manera aislada y no como parte de un sistema. Por otra parte se denomina ensayo de subestructura si además del efecto de los ciclos de tracción y compresión axial se aplican solicitaciones de tipo rotacional en los extremos de cada probeta, como se puede apreciar en la figura 2.7, simulando el efecto real al que se ven sometidas las riostras dispuestas en un pórtico. Cabe señalar que éste tipo de ensayo más completo debido a que permite no solo calificar el desempeño global del elemento sino que obtener conclusiones del comportamiento a nivel de conexiones. Sin embargo resulta más costoso, debido a que aplicar este tipo de carga requiere ensayar una estructura de marco completa, o bien, disponer de un actuador o sistema de aplicación de cargas que sea capaz de actuar no solo en sentido axial sino que además de manera excéntrica para generar el estado de carga deseado.

La norma AISC 2010b muestra posibles disposiciones para aplicar los estados de carga axial más rotación en los extremos en un ensayo de subestructura.

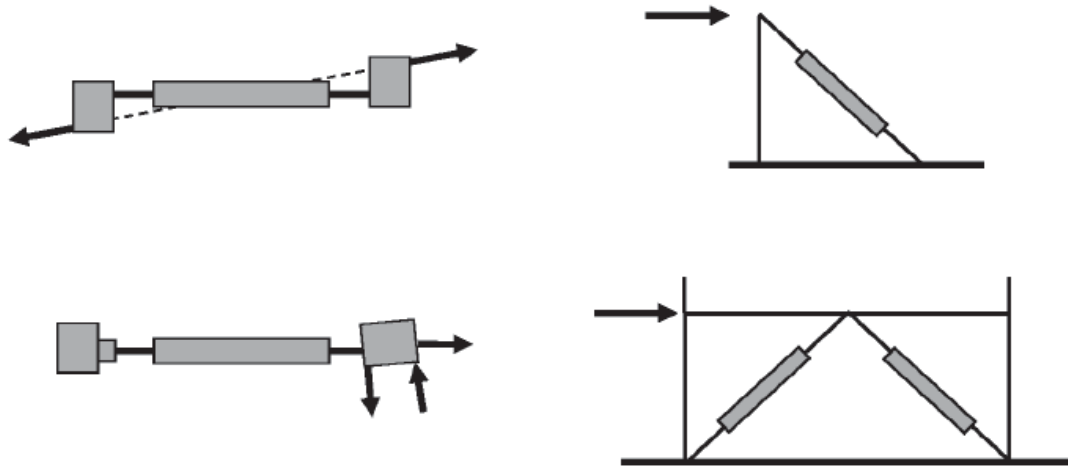


Figura 2. 7 Distintos mecanismos de aplicación de carga en ensayo de subestructura.

Un ensayo de subestructura permite además realizar estudios y evaluación de las conexiones de las riostras de pandeo restringido típicamente unidas por placas Gusset en la unión viga – columna, lo cual corresponde a un tema a considerar desde el punto de vista de la estabilidad global de una riostra de pandeo restringido.

2.3. Instrumentos y sistema de medición

En este capítulo se explicará la composición y funcionamiento de los instrumentos que serán los encargados de captar y tomar registro de las variaciones de cada uno de los parámetros físicos de interés durante los ensayos. Todos estos elementos son dispositivos eléctricos los cuales entregan a un computador señales que deben ser transformadas con los equipos correspondientes para poder ser interpretadas correctamente como unidades físicas de uso habitual.

2.3.1. Strain Gage:

Son sensores cuya función es medir deformaciones unitarias en el elemento sobre el cual se encuentran instalados. Corresponden a un semiconductor o resistencia la cual varía proporcionalmente con la deformación del instrumento. El tipo de Strain Gage más utilizado corresponde al metálico, el cual consiste en una delgada fibra metálica dispuesta en forma de grilla con sus fibras paralelas con respecto al eje de deformación con el objetivo de reducir el efecto de Poisson y la deformación por corte. La grilla o malla está unida a una lámina delgada llamada Carrier y esta a su vez, se pega sobre la superficie en que se desea medir la deformación. Este tipo de sensores son de naturaleza pasiva, es decir, no aportan energía al sistema sobre el cual realizan las mediciones. Se destaca la importancia de un montaje adecuado, de manera que la deformación se transmita íntegramente hacia el elemento de medición y se registren medidas correctas.

El parámetro que representa la razón entre el cambio de la resistencia y la deformación se denomina Gage Factor (GF). A continuación se muestra la ecuación 2.1 donde R representa la resistencia, L la longitud de la malla del Strain Gauge y ε la deformación relativa.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Para conductores metálicos el valor de GF es cercano a 2.

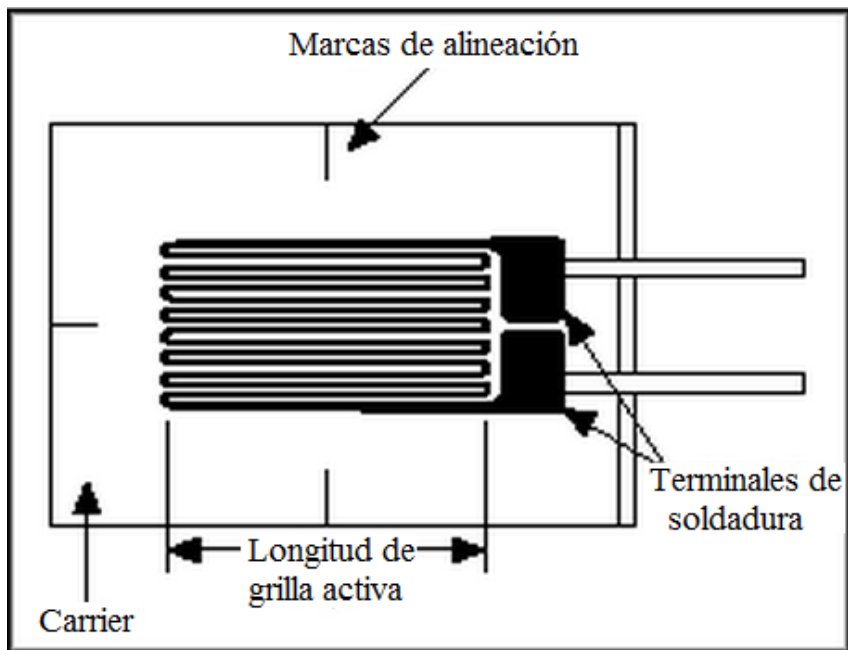


Figura 2. 8 Strain Gage

En la práctica las deformaciones que ocurren y se registran en un Strain Gage, las cuales se encuentran en el orden de mili strain ($\epsilon \times 10^{-3}$), generan en el mismo un cambio muy pequeño en la resistencia, es por esta razón que deben ser utilizados en configuración de puente. En la figura 2.10 se muestra la configuración de puente de Wheastone, la cual consiste en 4 resistencias con voltaje de excitación V_{ex} .

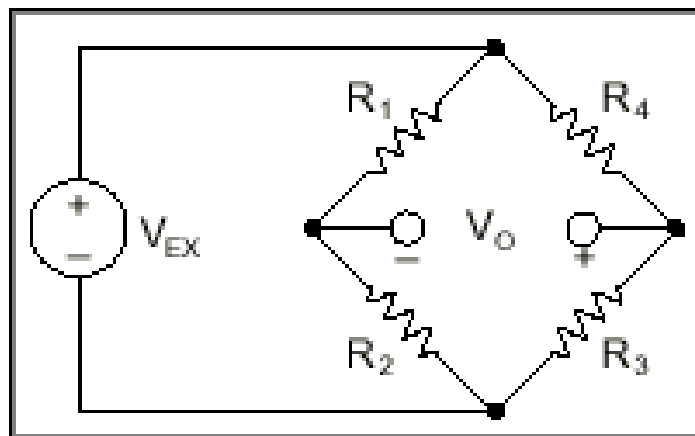


Figura 2. 9 Puente de Wheastone.

Se puede establecer la siguiente relación entre los valores de las resistencias R y el Voltaje de excitación V_{ex} y el voltaje de salida V_0 .

$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{ex} \quad (2.2)$$

Se deduce de la ecuación anterior que si se cumple $R_1/R_2 = R_3/R_4$, el voltaje de salida se hace igual a cero. Si ocurre esta condición, entonces se dice que el puente está balanceado, luego cualquier cambio en la resistencia en cada lado del puente provocará un voltaje de salida distinto de cero.

Reemplazando R_4 por un Strain Gage activo, cualquier cambio en su resistencia producirá un voltaje de salida distinto de cero. Si se denomina R_g a la resistencia del Strain Gage, la variación de la resistencia de éste puede ser expresada en términos de la deformación como

$$\Delta R = R_g \cdot GF \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

Luego asumiendo $R_1 = R_2$ y $R_3 = R_g$ la ecuación 2.3 puede quedar rescrita expresando V_0/V_{ex} como función de la deformación.

$$\frac{V_0}{V_{ex}} = -\frac{GF \cdot \varepsilon}{4} \cdot \left(\frac{1}{1 + GF \cdot \varepsilon/2} \right) \quad (2.4)$$

2.3.2. Celda de carga:

La celda de carga corresponde a un elemento el cual se encarga de transformar una fuerza percibida en una señal eléctrica. Existen diversos tipos de celdas de carga siendo las más frecuentes las conformadas en base a un arreglo de Strain Gages. Las celdas de carga consisten en un metal que sufre deformación conforme se aplica una fuerza. Este metal debe trabajar en su rango elástico para mantener una relación de proporcionalidad entre la deformación y la fuerza aplicada. Lo anterior delimita la capacidad de la celda de carga.

Al metal se adhieren Strain Gages a las cuales se aplica un voltaje y varían su resistencia conforme se deforma el metal. Como se ha detallado en la sección anterior los strain gages por lo general se utilizan en una configuración de puente de Wheatstone.

Para efectos de este ensayo se necesita una celda de carga que sea capaz de medir fuerzas tanto en tracción como en compresión, con una capacidad dada por la máxima fuerza que el actuador hidráulico es capaz de aplicar.

2.3.3. Sensor de desplazamiento (LVDT):

Los sensores de desplazamiento o LVDT (en inglés, linear variable differential transducer) corresponden a elementos utilizados para medir desplazamiento con respecto a un punto de referencia. Estos dispositivos funcionan en base al mismo principio que un transformador. Están compuestos por un núcleo metálico y un arreglo de bobinas. Típicamente el bobinado se encuentra fijo mientras que el núcleo es quien se mueve con respecto al arreglo de bobinas. De las tres bobinas, la central es denominada primaria, y por ésta se induce una corriente alterna, luego, al desplazarse el núcleo dentro del arreglo de bobinas éste genera un campo magnético el cual induce a su vez una corriente alterna en las bobinas externas, llamadas secundarias.

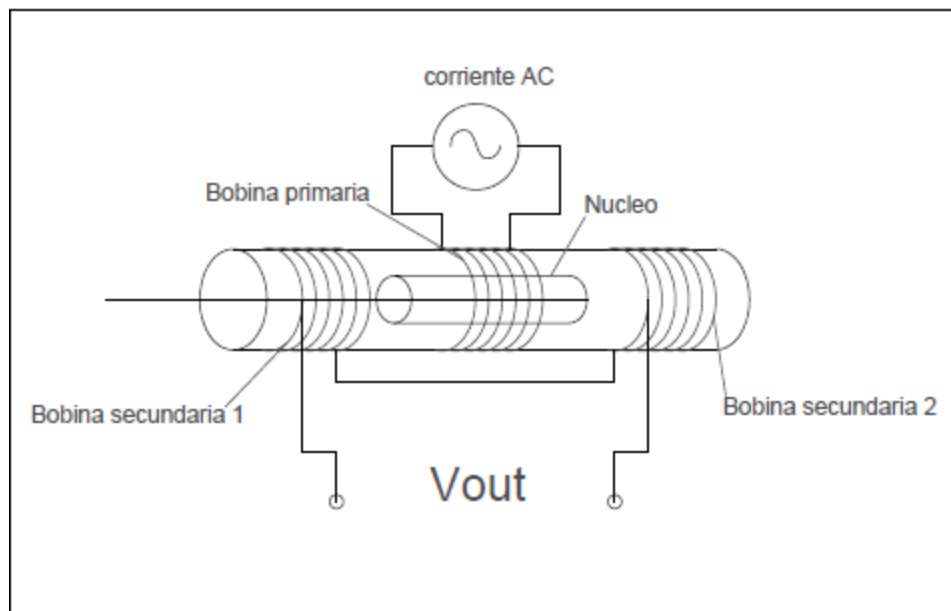


Figura 2. 10 Sensor de desplazamiento

La figura 2.11 muestra la sección transversal de un LVDT. Cuando el núcleo está centrado perfectamente, el voltaje inducido en las dos bobinas secundarias es igual en amplitud y con un desfase de 180°. Por lo tanto el voltaje de salida del LVDT es cero ya que los voltajes de las dos bobinas secundarias se cancelan.

Desplazando el núcleo a la izquierda (figura 2.12) se obtiene que la primera de las bobinas secundarias genera un voltaje mayor en relación a la segunda bobina secundaria, y se tiene un voltaje de salida en fase con el voltaje de entrada inducido en la bobina primaria.

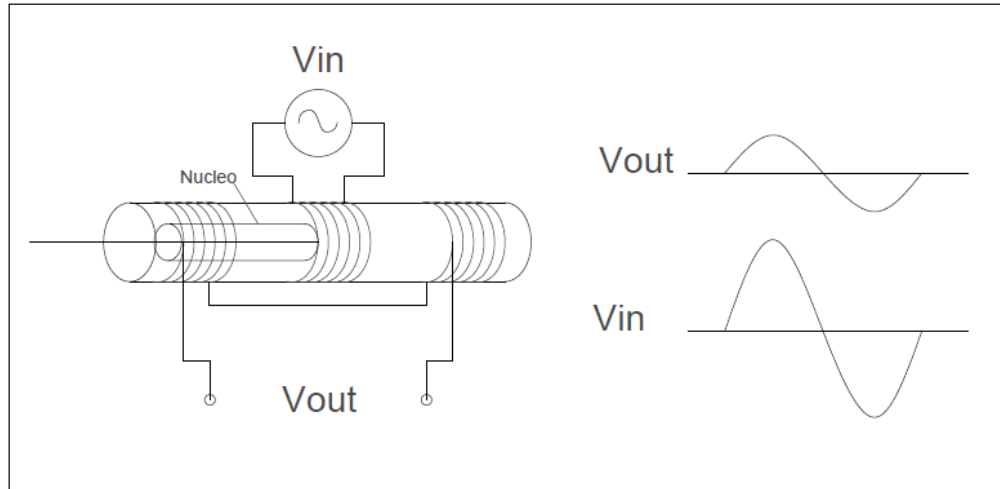


Figura 2. 11 Desplazamiento del núcleo hacia la izquierda.

De manera similar, desplazando el núcleo hacia la derecha (figura 2.13) ocasiona que el voltaje inducido en la segunda bobina secundaria sea mayor que el inducido en la primera. El voltaje de salida en el LVDT se encuentra en desfase con respecto al voltaje de entrada.

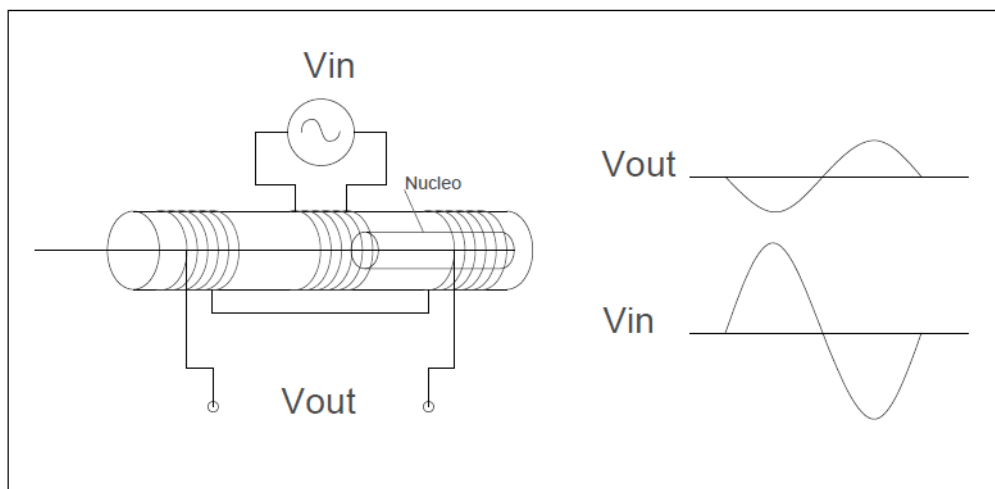


Figura 2. 12 Desplazamiento del núcleo hacia la derecha.

En resumen, midiendo el voltaje y la fase de la señal de salida, se puede determinar la dirección y el desplazamiento del LVDT con respecto a algún punto de referencia. La

figura 2.9 muestra el comportamiento del voltaje de salida medido con respecto al desplazamiento de la posición central del núcleo. Se debe notar la pérdida de linealidad en los extremos del rango de medición. Lo anterior se debe tener en cuenta para seleccionar adecuadamente el LVDT de acuerdo al rango de medición y además tener una estimación precisa de los desplazamientos máximos que se espera medir para el tipo de ensayo.

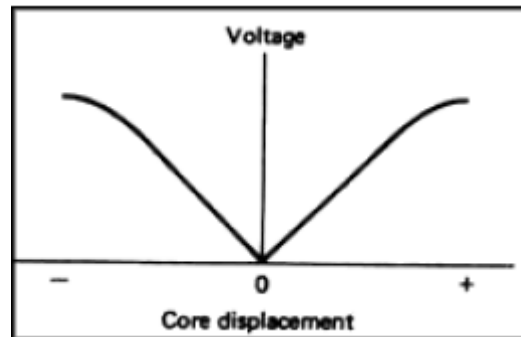


Figura 2. 13 Voltaje versus desplazamiento en un LVDT.

2.3.4. Sistema de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos corresponde al conjunto de dispositivos que se encargan de transformar las variables y magnitudes físicas de interés para el ensayo registradas por los distintos instrumentos de medición, en señales digitales que puedan ser interpretadas y procesadas en un computador.

El sistema de adquisición de datos está compuesto, además de los instrumentos explicados en el capítulo anterior, encargados de captar las señales de entrada por:

a) Acondicionador de señal:

Un acondicionador de señal es un dispositivo que convierte un tipo de señal en otro tipo. Esto puede ser necesario debido a diversas razones. Entre las diversas funciones de un acondicionador de señal se encuentra la amplificación, atenuación, linealización, filtro, aislamiento eléctrico y excitación externa entre otras.

En el caso particular de este tipo de ensayo el Acondicionador de señal aportará energía a los Strain Gauges y los LVDT ya que son elementos pasivos y necesitan de un voltaje de excitación para funcionar además de corregir la no linealidad de la señal de los LVDT para desplazamientos cercanos al límite de capacidad de medición de este instrumento.

b) Conversor Análogo Digital:

Debido a que se necesita almacenar y procesar los datos provenientes de los distintos sensores y además realizar el control del ensayo mediante computadores es necesario convertir las señales provenientes de los transductores las cuales son de tipo analógico, a un formato digital para que el computador sea capaz de leer y manipular la información entregada.

Un conversor análogo digital transforma una señal de entrada análoga como un voltaje a un número binario donde la resolución está dada por el número de bits del instrumento.

c) Multiplexor:

Corresponde a un dispositivo para enviar toda la información proveniente de distintos sensores y canales independientes a través de un solo canal de salida, de esta forma se

evita la necesidad de disponer de un acondicionador de señal para cada instrumento de medición.

2.4. Curvas de Histéresis

Para el caso de cualquier elemento estructural las curvas de histéresis permiten su respuesta ante cargas cíclicas como puede ser la carga impuesta por un sismo. Estas curvas corresponden al resultado de graficar la fuerza registrada en el eje de las ordenadas y el desplazamiento o bien la deformación normalizada por el largo de una riostra en el eje horizontal. Con estas variables el área contenida en un ciclo en una curva de histéresis representa la energía disipada en un ciclo, donde se infiere que para que exista disipación un elemento debe trabajar más allá de su rango elástico para que exista área significativa encerrada por la curva.

Cada probeta puede ser caracterizada en base a su área transversal, y si además se conoce la calidad del acero y la tensión de fluencia de éste, puede calcularse la carga F_y que hará que el núcleo de cada riostra entre en fluencia. De la misma manera, se puede estimar el desplazamiento u_y para el cual la sección del núcleo alcanza la fluencia. Estos valores sirven como referencia para normalizar las curvas de fuerza versus desplazamiento debido a que indican el punto teórico en el cual cada riostra comienza a trabajar más allá del rango elástico lineal y es a partir de ese punto donde se comienza a disipar la mayor cantidad de energía.

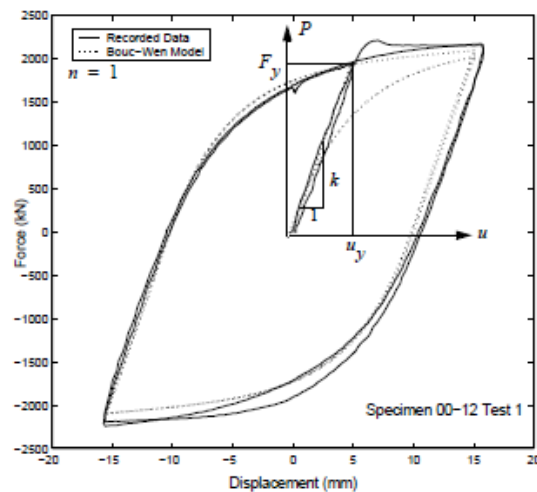


Figura 2. 14 Parámetros relativos a la fluencia en ciclo de histéresis.

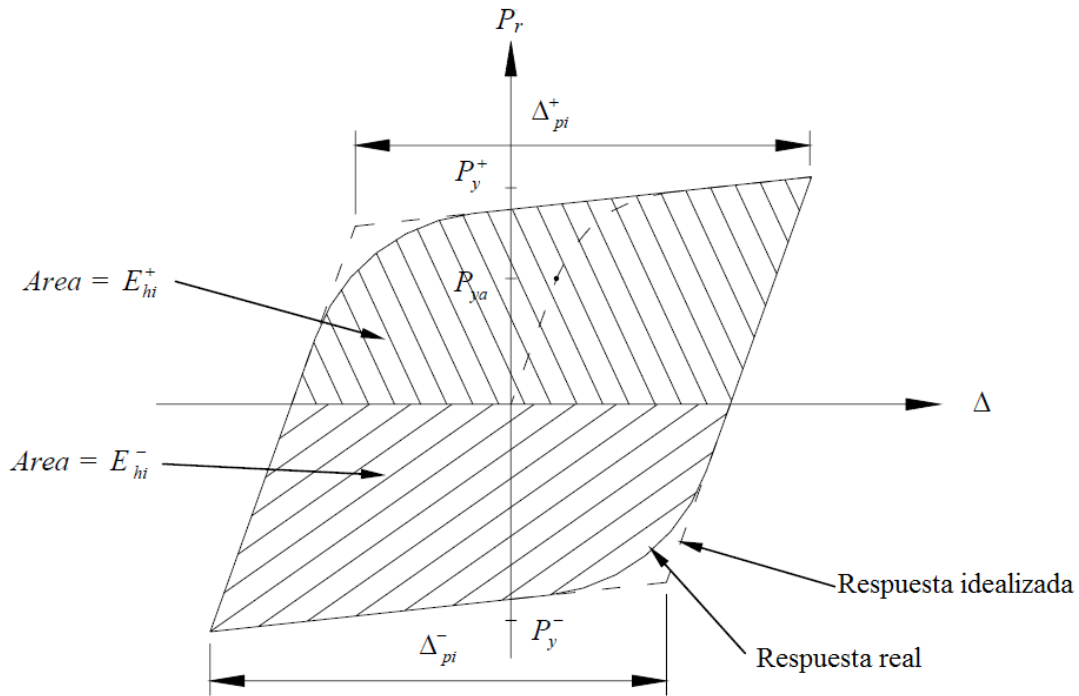


Figura 2. 15 Curvas de histéresis real e idealizada para un ciclo de tracción y compresión.

Para el caso de las riostras de pandeo restringido se definen además los siguientes parámetros llamados de ajuste de resistencia;

Factor de ajuste ω : Este factor es calculado como la tracción máxima resistida por la riostra dividida por la carga de fluencia o el producto del área transversal por la tensión de fluencia.

$$\omega = \frac{T_{max}}{F_y \cdot A_{sc}} \quad (2.5)$$

Factor de ajuste β : Este factor se calcula como la compresión máxima resistida dividida por la tracción máxima resistida por la riostra.

$$\beta = \frac{C_{max}}{T_{max}} \quad (2.6)$$

Para que un arriostramiento sea considerado como de pandeo restringido los dos parámetros descritos anteriormente deben ser mayores a la unidad. En el caso del factor

β , éste representa el hecho de que en compresión se registran valores más altos de carga debido al confinamiento que impide el pandeo.

Como se mencionó anteriormente el área encerrada bajo la gráfica P v/s delta representa la energía disipada de acuerdo a Merrit et al (2003).

$$E = \int P d\Delta \quad (2.7)$$

Considerando el ciclo n-ésimo cualquiera para el gráfico de la figura 2.16, se puede calcular la deformación inelástica, donde la línea interrumpida representa la curva idealizada de histéresis.

$$\Delta_n = \Delta_n^+ + \Delta_n^- = \frac{E_n^+}{P_y^+} + \frac{E_n^-}{P_y^-} \approx \frac{E_n}{P_y^*} \quad (2.8)$$

Donde P_y^* representa el promedio entre las fuerzas reales de fluencia tanto en compresión como tracción. Se tiene que además este valor puede ser calculado como

$$P_y^* = \omega \cdot P_{y_{sc}} \quad (2.9)$$

Finalmente la capacidad de deformación inelástica acumulada para una riostra puede ser calculada como

$$\Delta = \sum \Delta_n = \frac{E_{total}}{P_y^*} \quad (2.10)$$

2.5. Actuador hidráulico

Corresponde al elemento encargado de aplicar la fuerza necesaria para generar el estado de esfuerzos deseado sobre las probetas. Para este caso en particular el actuador hidráulico actuará en el sentido del eje axial de las probetas y será de doble acción, es decir, será capaz de inducir en la probeta tanto esfuerzos de compresión como de tracción. Los actuadores hidráulicos cilíndricos son alimentados con un fluido a presión, típicamente aceite, el cual produce el movimiento de un pistón a una determinada velocidad y fuerza. Este tipo de actuadores son utilizados como alternativa a los

actuadores neumáticos cuando se tienen elevados requerimientos de fuerza o desplazamiento.

El actuador cilíndrico de acción doble utiliza la fuerza generada por el fluido hidráulico para mover el pistón en los dos sentidos mediante una válvula de control.

Una vez determinado el actuador a utilizar para el ensayo la fuerza máxima y la carrera máxima son datos necesarios para el resto del sistema estructural.

2.6. Controlador PID

Corresponde al sistema de control que permite al actuador hidráulico aplicar la carga de acuerdo a lo establecido en la normativa en la cual se basa el ensayo. En el caso de los ensayos de riostras de pandeo restringido, estos se realizan a deformación controlada, por lo tanto es necesario disponer en el actuador un sensor de desplazamiento el cual permita conocer en todo instante el desplazamiento de éste.

Un sistema de control P trabaja en base a una señal de referencia llamada valor deseado, o comando y por otra parte una señal que corresponde al valor real o “feedback”, el cual en este caso corresponde a la lectura del sensor LVDT del actuador hidráulico, que indica su posición en cada instante del ensayo. El valor deseado en este caso es el historial de desplazamiento que se debe aplicar para cada ensayo. Con estos dos valores en cada instante, el software de control realiza una comparación entre ambos asegurando que la diferencia o error se mantenga dentro de un valor aceptable.

El valor de una constante proporcional llamado ganancia corresponde a un parámetro el cual representa cuan rápido se aproxima la señal de feedback al valor deseado, y debe ser calibrado de manera tal que los ensayos se ejecuten de manera correcta. Si dicho valor se establece muy grande, se puede tener como consecuencia movimientos bruscos en el actuador, mientras que si la ganancia es establecida demasiado baja, es probable que la señal de feedback no alcance a aproximarse al valor deseado.

El control del actuador se realiza por medio de una servo válvula de marca MOOG, modelo G76, la cual es operada a través de un computador por medio del lenguaje MOOG-MACS, lo que permite realizar el procedimiento del ensayo de acuerdo a los

historiales de desplazamiento establecidos, que exigen que el ensayo se realice a deformación controlada.

2.7. Tipos de conexión BRB

A continuación serán descritos los principales modos de conexión de una riostra de pandeo restringido. Típicamente estos elementos son conectados en las uniones viga – columna de un marco.

2.7.1. Conexión apernada:

Corresponde al tipo de conexión más utilizado donde se une el extremo de la riostra a una placa gusset por medio de placas y pernos. El número de pernos y espesor de las placas de unión además del tamaño de la placa gusset son determinados según las solicitaciones pero por lo general van desde 12 pernos hasta más de 20 por cada extremo de riostra. De acuerdo a Hussein et al (2005), entre las ventajas que presenta este tipo de conexión se puede mencionar que se admiten perforaciones sobredimensionadas que permiten una mayor tolerancia en el montaje, y además el uso de un número mayor de pernos provee redundancia y una mejor capacidad de distribuir los esfuerzos en la placa gusset reduciendo así la probabilidad de presentar deformaciones en el rango inelástico en la placa Gusset. Entre las desventajas se menciona el hecho que el largo de la conexión es mayor que en el caso rotulado real y por lo tanto reduce la dimensión restringida al pandeo de la riostra. Como ya se mencionó este tipo de conexión no es realmente rotulada, por lo tanto deben considerarse momentos debido a la deformación de los marcos. Otra desventaja en términos de montaje corresponde al hecho que son muchas más piezas que en una conexión rotulada, por lo tanto requiere más trabajo de montaje.

2.7.2. Conexión rotulada:

Corresponde a una conexión donde el extremo de la riostra se conecta a una placa Gusset mediante un pasador. Entre las ventajas se puede mencionar el hecho que la riostra posee un largo de fluencia mayor en comparación a la conexión apernada y no se

tienen momentos secundarios en la placa Gusset debido al desplazamiento entre pisos. También se tiene un trabajo más sencillo al momento de realizar el montaje bajo este tipo de conexión.

2.7.3. Conexión soldada:

Es similar a la conexión apernada excepto que se reemplazan los pernos por cordones de soldadura. Es un tipo de conexión menos utilizado debido a los inconvenientes de montaje y posibilidad de reemplazo de las riostras. También se trata de una conexión donde las riostras se ven sometidas a momentos flectores en los apoyos debido a los desplazamientos entre piso.



Figura 2. 16 Conexión apernada, rotulada y soldada para BRB.

3. Parámetros de diseño

3.1. Equipos y entorno

Laboratorio:

El sistema de ensayo será emplazado en el laboratorio de estructuras del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Para los fines del sistema de ensayo diseñado se utiliza la losa existente en el laboratorio la cual tiene un espesor de 65 cm, lo cual permite considerar que la losa es lo suficientemente rígida para despreciar sus deformaciones ante las cargas impuestas por el actuador hidráulico al momento de realizar los ensayos. La losa cuenta con perforaciones de 2 pulgadas de diámetro espaciadas a 40 cm en toda la planta de esta. Estas perforaciones pueden ser utilizadas como puntos de anclaje para las estructuras que componen el sistema de ensayo.

Para el montaje del sistema estructural y las probetas se cuenta con un puente grúa de 5 toneladas de capacidad, el cual cumple con los requerimientos para obtener un montaje seguro de todos los elementos necesarios para llevar a cabo el ensayo.

En la figura 2.8 se puede observar la losa de reacción que soporta la instalación experimental.



Figura 3. 1 Losa de reacción

Para el anclaje de las estructuras de soporte del ensayo a la losa del laboratorio se utilizaron barras de acero de 32 mm de diámetro las cuales fueron post tensadas para resistir las cargas durante los ensayos.

3.2. Tipos de BRB

Actualmente existen diversas configuraciones de riostras de pandeo restringido, donde se hace la diferencia tanto en el sistema de confinamiento y restricción de pandeo, como en los distintos materiales utilizados. En tal sentido no hay restricción alguna con respecto al material a utilizar ni al sistema de confinamiento para las probetas a ensayar.

En la figura 3.1 se muestran ejemplos de las secciones transversales de las diferentes configuraciones de riostras de pandeo restringido que han sido sometidas a análisis numérico y/o ensayo en laboratorio. Dado que todas trabajan bajo el mismo régimen de carga y que ocupan relativamente el mismo espacio en términos de área transversal, no existen restricciones para poder ser ensayadas en el sistema de ensayo diseñado.

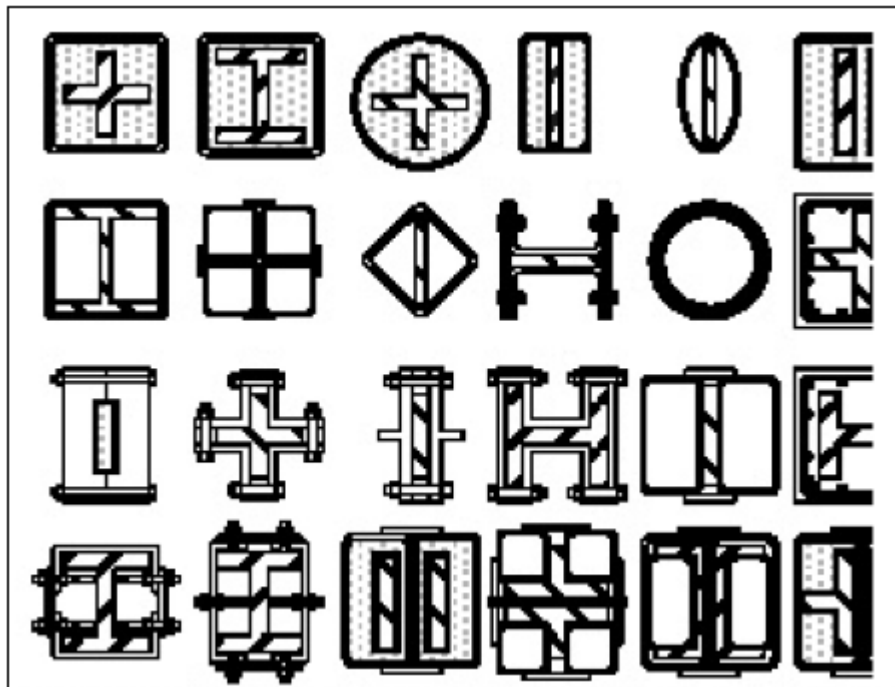


Figura 3. 2 Secciones transversales de riostras de pandeo restringido.

Uno de los principales factores que condiciona el diseño de las probetas es la capacidad del actuador hidráulico, donde se debe tener la precaución de, al menos, diseñar el núcleo de las probetas de manera que en el ensayo las cargas aplicadas sean capaces de producir el estado de fluencia en el núcleo o sección que se encarga de resistir la sollicitación axial, para que se puedan obtener resultados útiles para caracterizar a cada probeta, ya que es en la etapa posterior a la fluencia del núcleo donde se manifiestan las propiedades más destacadas de las riostras de pandeo restringido, como la estabilidad de los ciclos de histéresis y el desplazamiento post fluencia.

En base a lo anterior, teniendo en cuenta la capacidad de 25 ton del actuador hidráulico y suponiendo una sección transversal de núcleo de acero A36, con una tensión de fluencia nominal de 250 MPa se tiene que como límite superior de área transversal para el núcleo de aproximadamente 10 [cm²].

3.2.1. Largo de probetas:

Existe un largo máximo de probetas por las limitaciones propias de espacio en el laboratorio y falta de perforaciones para el anclaje de los apoyos del sistema de ensayo debido a la presencia de muros bajo la losa de anclaje. El tamaño máximo de probeta a

ensayar es de aproximadamente 2.5 [m] de largo incluyendo las conexiones. Para tamaños menores al largo anteriormente expresado es posible mover el apoyo fijo del sistema de ensayo con el objetivo de ajustarse al tamaño de la probeta. Con respecto a la sección transversal de cada probeta se tiene como restricción que el ancho de esta no puede exceder 40 [cm] que es la distancia desde el eje de cada riostra ensayada a la base de la losa de reacción. Dada la restricción con respecto al largo máximo de cada probeta resulta difícil superar el límite de sección transversal debido a que existe una relación de aspecto entre el largo y el área transversal principalmente por criterios de esbeltez. El espacio total disponible para el sistema de ensayo corresponde a 6.3 [m] en la dirección longitudinal, mientras que en el sentido transversal se requieren como mínimo cuatro líneas de perforaciones para anclaje lo que resulta en un ancho necesario de 1.6 [m].

3.2.2. Tipo de conexión de probeta.

Las conexiones apernadas diseñadas por deslizamiento crítico tienen la capacidad de transmitir esfuerzos de flexión, y ofrecen facilidad en el montaje y mayor tolerancia con respecto a una unión soldada. Para los requerimientos del sistema de ensayo a diseñar y específicamente debido que el interés principal de éste es evaluar la fluencia y comportamiento de la riostra a nivel de núcleo y sistema de confinamiento, dejando de lado el comportamiento de la conexión, se genera la necesidad que las conexiones se comporten en el rango lineal sin presentar falla ni la posibilidad que deban ser reemplazadas.

Para el sistema de ensayo se utiliza una conexión a placas tipo Gusset por medio de pernos, debido a que se trata del tipo de conexión más utilizado y brinda facilidad en el montaje y cambio de probetas, junto con la estabilidad necesaria para que la falla no ocurra en la conexión. Sin embargo las conexiones de tipo Gusset se encuentran a su vez apernadas a los elementos de apoyo y por lo tanto son desmontables, quedando a libre disposición de quien diseñe las probetas a ensayar, de fabricar su propio tipo de elemento de conexión con los apoyos. No se puede dejar de mencionar el hecho que debido a las limitaciones del sistema de ensayo, ya que no reproducen los efectos rotacionales en los extremos de la probeta, resulta poco provechoso y difícil observar efectos sobre las conexiones. En otras palabras este sistema de ensayo sirve de mejor

manera para evaluar la estabilidad cíclica a nivel del núcleo de cada probeta y verificar la efectividad del sistema de restricción de pandeo escogido que para verificar efectos en las conexiones.

Con las limitaciones anteriormente señaladas, la escala máxima de las probetas ensayadas corresponde aproximadamente a [0.5:1] dependiendo de la configuración del sistema de riostras y de la altura de piso considerada. Esto genera la necesidad de tener en cuenta la escala del ensayo para efectos del cálculo del desplazamiento en la riostra correspondiente al desplazamiento entre piso de diseño, con el objetivo de estimar de manera correcta el historial de desplazamiento que se debe aplicar para cargar cada probeta.

3.3. Definición de límites de medición

En esta sección se determina el desplazamiento en el eje longitudinal que deben tener las probetas para lograr los estados de post – fluencia deseados y que la riostra sea sometida y evaluada a plena capacidad. En el caso de la máxima sollicitación de desplazamiento, ésta se encuentra dada por el largo máximo de probeta a ensayar el cual corresponde a 2.5 [m] como se ha expresado anteriormente.

3.3.1. Resistencia máxima:

La resistencia máxima esperada para una riostra de pandeo restringido depende de su área transversal, la cual determina la carga que provoca la fluencia. Además esta resistencia se ve aumentada por el producto de los factores β y ω , definidos en la sección 2.7, donde el primer factor corresponde al aumento en la resistencia en compresión, y el segundo parámetro corresponde al aumento de resistencia en tracción por el endurecimiento del acero del núcleo. Bajo un comportamiento estable ante los ciclos de carga y deformación los dos valores anteriormente señalados deben ser mayores a la unidad para que una riostra se comporte como de pandeo restringido.

Evidentemente los factores de sobre resistencia pueden variar dependiendo de cada probeta, sin embargo como antecedente se tiene que de los ensayos realizados por Takeuchi et al (2013), se obtuvo entre otros resultados, que la carga axial máxima

soportada por las probetas ensayadas oscila entre 1.2 a 1.5 veces la carga de fluencia nominal para cada riostra ensayada.

3.3.2. Deformaciones máximas esperadas:

En esta sección se determina el desplazamiento máximo requerido para cumplir con el historial de carga básico establecido y así llevar a cabo el ensayo. Esta deformación está determinada principalmente por el parámetro Δ_{bm} , el cual fue definido en la sección 2.3 y representa la deformación en la riostra para el desplazamiento entre piso de diseño. En la normativa actual, específicamente en las disposiciones sísmicas y documentos anteriores como FEMA (2004), existen recomendaciones útiles para estimar correctamente Δ_{bm} . Se ha encontrado una correlación y equivalencia en las dos recomendaciones siguientes:

(1) El desplazamiento entre piso de diseño no debe ser menor que el 1% de la altura de piso considerada.

(2) Δ_{bm} no necesita ser mayor que cinco veces Δ_{by} , donde Δ_{by} es el desplazamiento para el cual se tiene la fluencia del núcleo.

Considerando el largo máximo de riostra incluyendo las conexiones, el cual se estableció en 2.5 [m], la estimación del parámetro Δ_{bm} es cercano a 15.5 mm, donde se ha considerado una configuración de riostra dispuesta en un marco con forma de "V" invertida. Lo anterior sugiere que la carrera del actuador debe ser de al menos 31 mm. Este parámetro de máxima deformación además condiciona el tipo y capacidad de sensores que se ocuparán específicamente para medir desplazamiento el relativo entre los extremos de cada probeta y el desplazamiento relativo en la interfaz tubo exterior-conexión. Además la deformación máxima esperada en la probeta condiciona el diseño de las estructuras de soporte del ensayo debido a que se tienen requerimientos de rigidez donde no se debe superar cierto porcentaje de la deformación total de cada probeta.

3.4. Materiales

Todos los elementos, tanto apoyos como elementos de conexión son de acero estructural ASTM A36, cuyo límite de fluencia nominal es $F_y = 250$ [MPa], y su módulo de Young o elasticidad es $E = 200000$ [MPa].

Los pernos que forman parte del sistema de conexiones son de acero de alta resistencia A325.

Las soldaduras utilizan electrodo E70XX según la clasificación AWS, cuya resistencia a la tracción es de 480 [MPa], y su límite de fluencia es 400 [MPa].

4. Modelo estructural

4.1. Descripción del mecanismo

En este capítulo se describe el funcionamiento estructural de los elementos y conexiones que forman el sistema de ensayo cíclico de tracción y compresión axial.

Como se mencionó anteriormente, se dispone de un actuador hidráulico de 100 [Ton], el cual reacciona contra un apoyo fijo empotrado en la losa del laboratorio, el cual se diseñó de manera tal que las deformaciones sufridas por el apoyo no excedan el 1% de las deformaciones esperadas para la probeta ensayada.

La tarea principal del sistema de ensayo es someter las probetas (BRB) a esfuerzos axiales de tracción y compresión de manera cíclica. Para llevar a cabo este propósito las riostras se ubican sobre un apoyo fijo y un apoyo móvil el cual solo permite desplazamiento en el eje axial, dejando restringido el desplazamiento tanto en el sentido vertical como transversal de la probeta. Se supone que no existe fricción entre el extremo de la riostra y el apoyo móvil, pues, de aparecer esfuerzos friccionales significativos se tendrían lecturas de datos de fuerza erróneas que pueden generar conclusiones e interpretaciones incorrectas acerca del comportamiento de las probetas ensayadas.

De manera simplificada el estado de carga que se desea imponer en cada probeta puede ser explicado en la figura 4.1:

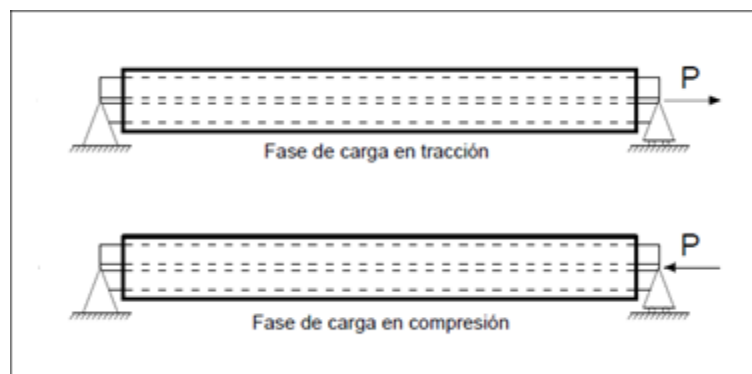


Figura 4. 1 Estados de carga impuestos en cada probeta.

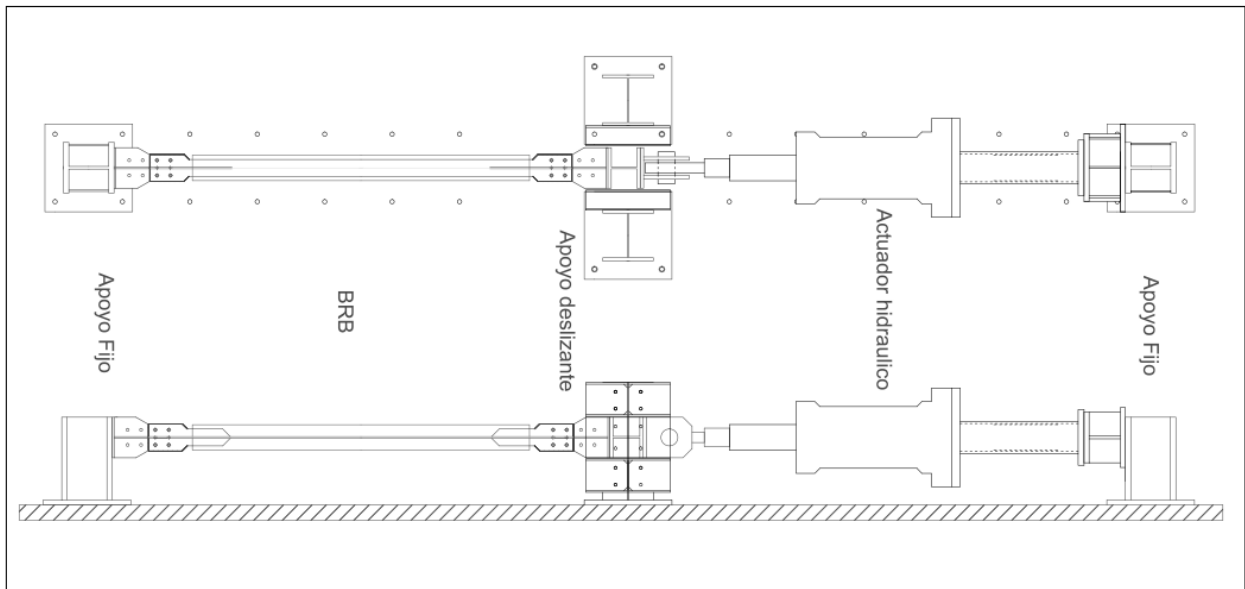


Figura 4. 2 Planta y elevación de sistema de ensayo.

4.2. Elementos que componen el sistema de ensayo

4.2.1. Apoyo fijo:

Este elemento se puede apreciar en la parte inferior de la figura 4.2. Corresponde a una columna de acero de dimensiones 300 x 300 x 32 x 16, la cual está conectada en su parte superior al extremo de la riostra. En la parte inferior la columna se encuentra soldada por todo el contorno a una placa de 30 [mm], la que a su vez se encuentra fija contra la losa del laboratorio por medio de 4 barras de anclaje post tensadas de 32 [mm] de diámetro.

Su función es proveer un apoyo fijo para el extremo de la riostra. Evidentemente al ser cargado en el extremo superior y encontrarse empotrado en la base se debe calcular que la deformación por momento y corte de esta columna no supere el 1% de la deformación esperada para toda la riostra. En el anexo 1 se adjunta la memoria de cálculo que permite llegar al perfil mencionado.

Debido a la relación base – altura de esta columna, al ser cargada en el extremo superior, la mayoría de la deformación se produce por efecto de esfuerzo de corte y no de flexión. Por la disposición de la columna y la dirección de la aplicación de carga se tiene que es la sección del alma del perfil la que debe resistir estos esfuerzos. De ser necesario atiesadores, éstos deben ser ubicados de manera que sean paralelos al alma, aportando así, sección resistente adicional a los esfuerzos de corte. Finalmente se disponen dos

atiesadores paralelos al alma de un espesor de 8 mm, debido a que el perfil sólo no cumple con los requerimientos de deformación. Se escoge la solución de un refuerzo a la columna versus utilizar una columna más grande debido a la dificultad que supone la instalación teniendo en cuenta limitaciones por espacio debido a las perforaciones de anclaje a la losa de reacción.

El ala que se une al sistema de conexión cuenta con perforaciones que dan libertad de modificar o reemplazar la conexión si se desea. Las perforaciones en la losa de reacción permiten además mover este apoyo fijo en espacios de 40 cm para adaptarse al tamaño de probetas más pequeñas.

4.2.2. Apoyo deslizante:

Este elemento se puede observar a continuación del extremo superior de la riostra de pandeo restringido de la figura 4.2. Corresponde a un conjunto de columnas y vigas dispuestas de manera tal de asegurar que el desplazamiento de la riostra sea sólo en el eje axial evitando el movimiento vertical y transversal. Las uniones entre los elementos se realizan mediante conexiones apernadas con el objetivo de facilitar la instalación y reemplazo de probetas. En la figura 4.3 se puede apreciar la disposición de vigas y columnas que conforman el apoyo móvil. El largo de las vigas que restringen el movimiento fuera del eje corresponde a 50 [cm] y fue escogido a partir del rango de movimiento total del actuador, con el objetivo de eliminar la posibilidad que en algún momento el apoyo móvil quede sin restricción alguna fuera del eje de aplicación de cargas. En todas las superficies que quedan en la cavidad interior del apoyo donde pasará la riostra y su conexión se dispondrá de una película de teflón de 5 [mm] de espesor con el fin de disminuir la fricción que pueda afectar las fuerzas aplicadas por el actuador. Como sollicitación de diseño para los elementos que restringen el desplazamiento vertical se consideró el 2% de la máxima carga axial esperada de acuerdo a lo recomendado en AISC 2010a.

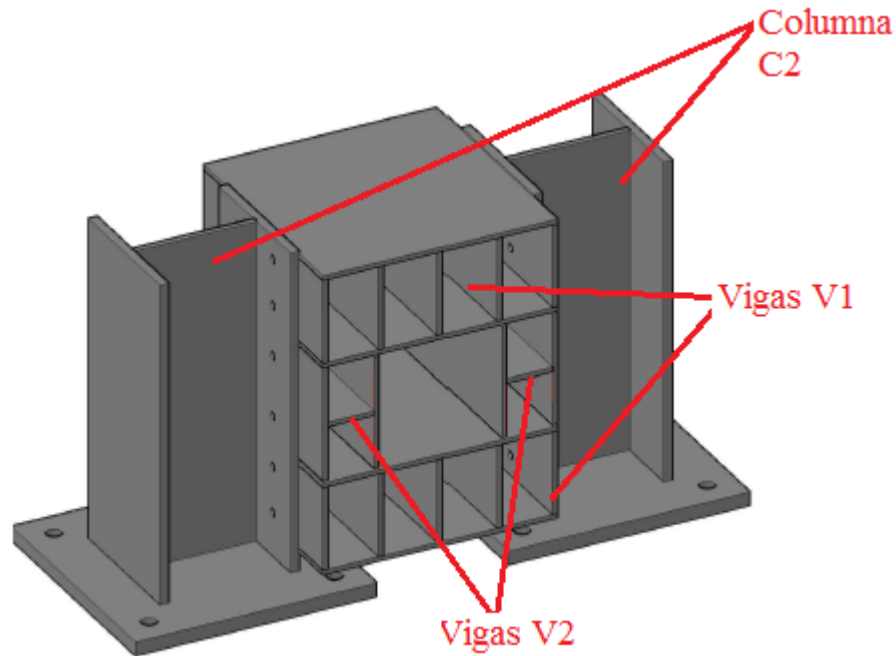


Figura 4. 3 Apoyo deslizante.

Elementos que componen apoyo móvil:

4.2.2.1. Columnas apoyo deslizante (C2):

Corresponden a dos columnas con sección transversal HN 300 x 108, con altura 65 cm. Estas columnas se encuentran ancladas a la losa de la misma forma que la columna del apoyo fijo.

4.2.2.2. Viga V1:

Son dos elementos compuestos por alas y alma de 10 mm de espesor los cuales tienen la función de restringir el desplazamiento en el sentido vertical. Se incorporan atiesadores debido a que la mayor sollicitación se encuentra en el sentido vertical debido al eje de rotación del extremo del actuador.

4.2.2.3. Viga V2:

Son dos elementos compuestos por alas y alma de 10 mm de espesor los cuales tienen la función de restringir el desplazamiento en el sentido horizontal. Posee una capa de teflón de 5 mm de espesor en las zonas de contacto con los elementos de conexión

4.2.3. Conexión Gusset con atiesadores:

Corresponde al elemento que se encarga de unir la riostra de pandeo restringido al resto del sistema estructural.

Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades y comportamiento de las conexiones de riostras de pandeo restringido, es aún un tema en estudio. Para efectos del sistema de ensayo a diseñar en particular, donde el objetivo principal es evaluar el desempeño de las probetas en términos de las curvas de histéresis y comportamiento a nivel de núcleo y material confinante, y debido al hecho que al ser este ensayo de tipo uniaxial no se pueden imponer demandas rotacionales significativas en los extremos de las probetas, se tendrá como objetivo diseñar una conexión que resista las sollicitaciones del ensayo en su rango lineal elástico, evitando así modos de falla en las conexiones los cuales no son deseables para propósitos de éste sistema de ensayo.

Es por el motivo anterior que se elige diseñar una conexión de tipo apernada.

Los parámetros de diseño más importantes para las dimensiones de la placa Gusset y el tamaño y número de pernos son:

- a) Dimensiones de la pletina de acero del núcleo.
- b) Carga máxima esperada.

4.2.3.1. Consideraciones para el diseño de la placa Gusset:

Las siguientes consideraciones de diseño para la placa Gusset, y recomendaciones para las riostras de pandeo restringido, se han elaborado con el único objetivo de evitar fallas por inestabilidad en la zona de conexiones ya sea por la generación de rotulas plásticas en la interfaz tubo exterior - conexión o pandeo de la placa Gusset, y de esta forma poder evaluar el desempeño de cada probeta en términos de su comportamiento cíclico a nivel de núcleo, material confinante y mecanismo de restricción de pandeo. Estas recomendaciones han sido basadas en experiencias anteriores tanto para ensayos de tipo uniaxial como para ensayos de subestructura como los realizados por Black et. al (2000), y Christopulos (2005).

- Ensanchamiento de pletina de acero en la zona de conexión:

Esta consideración se realiza para tener una mayor área disponible para las perforaciones de los pernos y cumplir con las distancias mínimas desde la perforación a los bordes.

- Mismo espesor que el núcleo de acero de la riostra de pandeo restringido:

El espesor de las placas fue diseñado para el espesor de pletina máximo esperado para las riostras de pandeo restringido ensayadas, el cual corresponde a 10mm. Evidentemente se pueden utilizar riostras con un núcleo de acero y espesor de conexión menor.

- Atiesadores en los extremos de cada probeta para aportar mayor rigidez a la conexión:

Si se disponen atiesadores transversales en los extremos de la riostra con un largo de inserción con respecto al tubo o camisa de acero de al menos dos veces el ancho de la pletina se reduce considerablemente los riesgos de presentar fallas por la generación de rótulas plásticas en la interfaz camisa de acero-conexión debido a la demanda rotacional excesiva en la zona de conexión. Además, si se cumple la condición explicada anteriormente la riostra adquiere la capacidad de transferir momento hacia los extremos de la conexión tal como se explica en la figura 4.4. La capacidad de transferencia de momento en la interfaz tubo exterior- placas de conexión puede ser calculada en función de la imperfección inicial y la resistencia a carga axial esperada. Takeuchi et al (2013) obtuvo como resultado que el largo de inserción de los atiesadores transversales es un factor crítico en el desempeño global de una riostra de pandeo restringido.

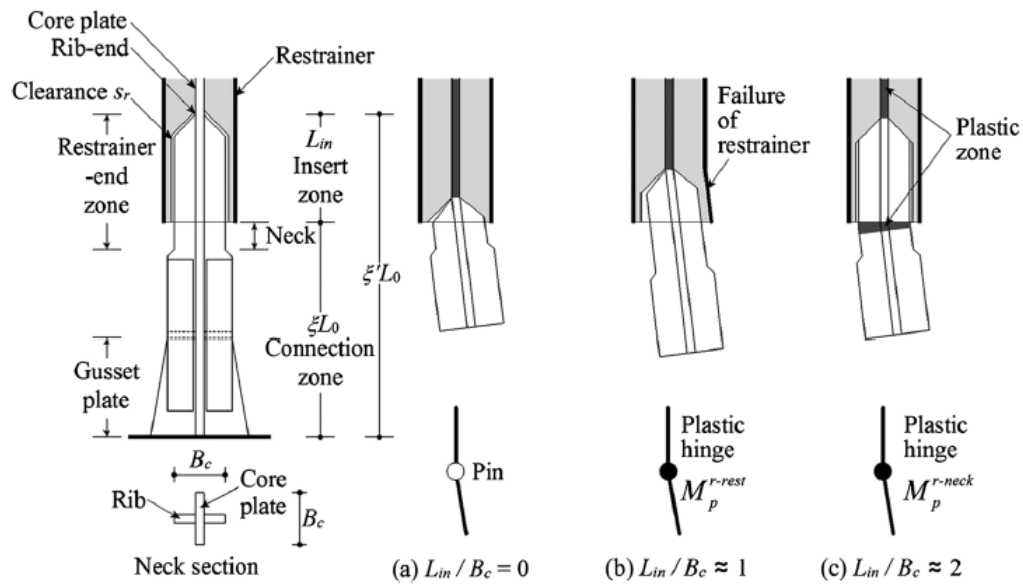


Figura 4. 4 Influencia de atiesadores en el extremo de una riostra de pandeo restringido. Takeuchi et al (2013)

- Conexión y placa gusset con forma transversal cruciforme para disponer de líneas de pernos en dos planos:

Esta conexión otorga estabilidad a la pletina de acero especialmente en la zona adyacente al tubo de confinamiento; reduce longitudinalmente el espacio que se necesita para disponer el número de pernos necesario para resistir las solicitaciones de diseño. Además los atiesadores por ambos lados aportan área extra para repartir de mejor forma la carga axial y disminuir los esfuerzos en el acero, reduciendo así la probabilidad que la placa gusset se encuentre en el rango no lineal de esfuerzos o que presente pandeo.

Con las consideraciones mencionadas anteriormente la conexión de la riostra de pandeo restringido hacia los apoyos quedaría de la siguiente forma.

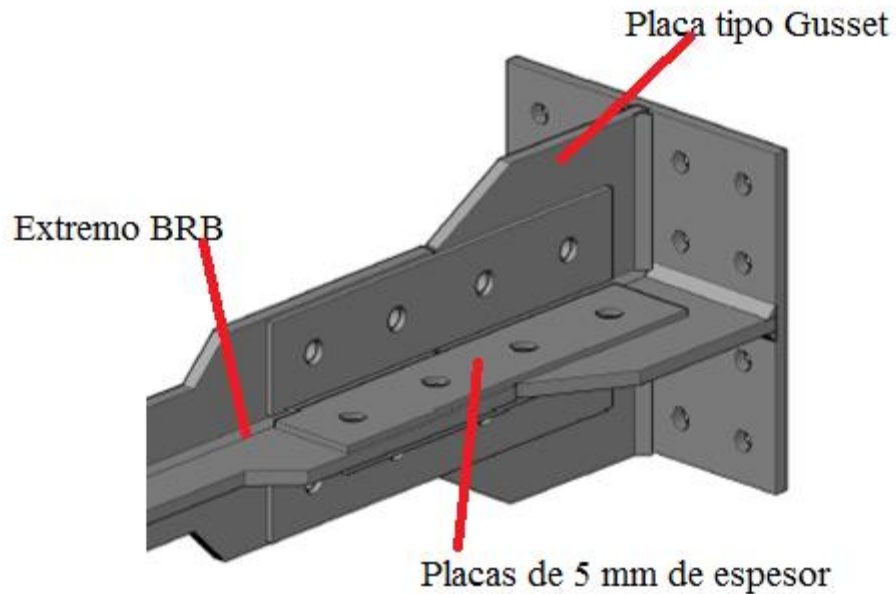


Figura 4. 5 Conexión BRB - Placa Gusset - Apoyo.

4.2.4. Modelación placa gusset en Ansys:

Con el objetivo de estudiar la distribución de esfuerzos y deformaciones en la zona de las placas Gusset y los extremos de cada probeta se realizó el modelamiento de un extremo de riostra de pandeo restringido y su conexión a una placa Gusset en el software de elementos finitos Ansys, para detectar posibles puntos de inestabilidad y tener un respaldo de que la placa tipo Gusset se encuentre en todo momento en su rango elástico para no obtener modos de falla no esperados durante los ensayos de carga uniaxial que obliguen a la necesidad de un reemplazo de piezas inoportuno para la realización de los ensayos.

4.2.4.1. Descripción del modelo:

Se elaboró un modelo con elementos sólidos en tres dimensiones de la placa Gusset con sus atiesadores y una conexión al extremo de una riostra de pandeo restringido incluidas placas de conexión entre una riostra y la placa Gusset. Como material para las placas y el extremo de cada probeta se utiliza acero ASTM A36. Todos los elementos modelados presentan la misma geometría que las piezas reales. Con respecto al extremo de la riostra éste es modelado desde la zona de los atiesadores, la cual corresponde a la sección

restringida al pandeo donde no ocurre fluencia, según Tsai et al (2004). Se han considerado los siguientes elementos en el modelo.

- 1 Placa Gusset principal
- 2 Atiesadores de placa Gusset soldados
- 1 Extremo de riostra de pandeo restringido
- 2 Atiesadores transversales del extremo de riostra de pandeo restringido soldados.
- 8 Placas de conexión de 5 mm de espesor y de dimensiones 35 mm x 325 mm.

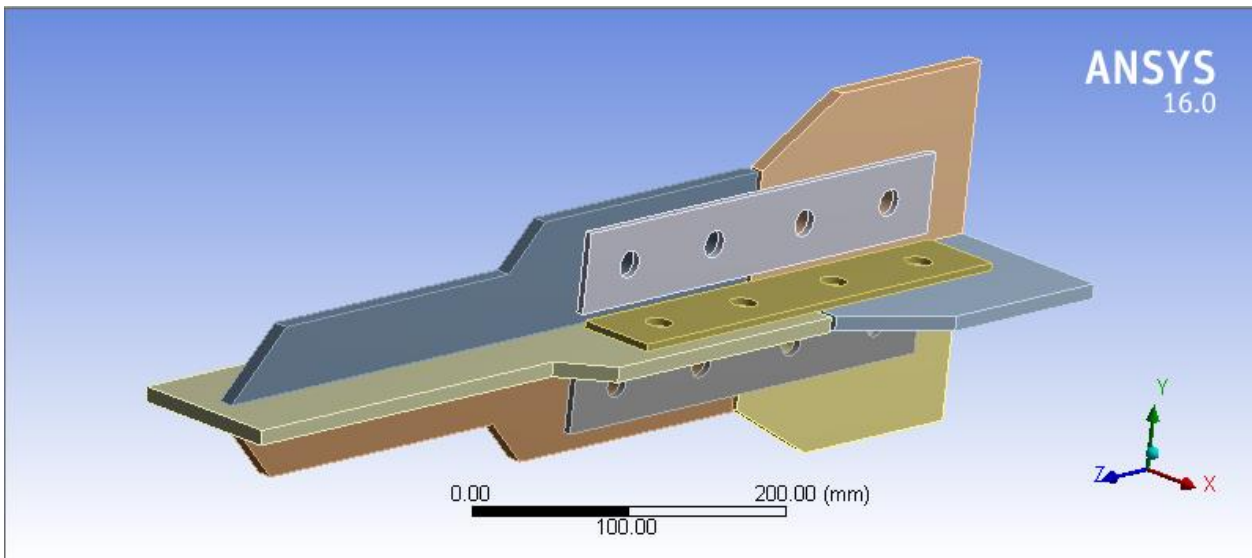


Figura 4. 6 Modelo 3D de elementos finitos.

Debido a que la simulación de una conexión de deslizamiento crítico por medio de pernos A325 pretensados resulta una tarea más compleja y sumado al hecho que la falla en los pernos no es habitual en riostras de pandeo restringido se realizará la simplificación de simular el apriete de los pernos como una presión uniforme actuando normal a cada una de las 8 placas de conexión entre el extremo de cada probeta y la placa Gusset. En el modelo se tienen 16 pernos de 5/8 de acero ASTM A325 que generan la conexión de deslizamiento crítico. Se ha aplicado una presión uniforme sobre cada placa de conexión, logrando que la fricción entre placas permita resistir las cargas aplicadas. La carga aplicada corresponde a 16 [Mpa] en la dirección normal a cada una de las placas de unión lo cual se aproxima a la carga de pretensado aplicada en los pernos según disposiciones de AISC (2010), donde se alcanza un 70% de la capacidad a fluencia de los pernos ASTM A325.

4.2.4.2. Contactos:

Para representar la soldadura de los elementos se ha utilizado el contacto tipo “bonded” entre placas el cual restringe completamente el desplazamiento relativo entre éstas. Para representar el contacto entre las placas de unión (65mm x 325 mm) y la placa gusset junto al extremo de cada riostra se ha utilizado un contacto de tipo “frictional” con un coeficiente de roce $\mu = 0.33$

4.2.4.3. Estados de carga:

La mayor sollicitación para la placa Gusset ocurre para cada fase de compresión durante el ensayo por dos razones.

- 1) En la fase de compresión se registran valores de fuerza mayores que en tracción.
- 2) Existen sollicitaciones de flexión en la fase de compresión debido al movimiento fuera del plano de cada probeta además de sollicitaciones de flexión que se producen debido a imperfecciones en la placa o en las estructuras que componen el sistema estructural. Como se explicó en el capítulo 4.2.3, la presencia de atiesadores con un largo de inserción $L_{in} = 2 \cdot B_c$ otorga a la riostra la capacidad de transmitir demandas de flexión las cuales son transmitidas hacia la zona de las placas Gusset. Se realizará una estimación de la demanda de momento y por otra parte en base a las características geométricas se estimará la resistencia a flexión de la conexión.

La carga axial correspondiente a 100 [ton] se aplica como presión en toda el área transversal de la pletina de acero justo antes de que comience la zona con atiesadores. El momento generado por la excentricidad de la carga axial se ha estimado de acuerdo a la inercia del tubo exterior, además se ha considerado una imperfección inicial debido a posibles errores de fabricación. Las cargas anteriores se pueden expresar como un desplazamiento impuesto en el extremo de la pletina de acero.

4.2.4.4. Resultados:

Para la condición más crítica analizada se aplicó una carga de compresión un 20% mayor a la esperada en el ensayo, junto a un desplazamiento en el eje fuera del plano que contiene al BRB y a nivel de esfuerzos por el criterio de Von Mises se observa fluencia en el extremo de la conexión de la riostra y a nivel de placas de conexión de 35 x 325 mm. Sin embargo en la placa Gusset y sus atiesadores los valores más altos de tensión no superan a 200 MPa y no se observan deformaciones fuera del rango lineal o signo de pandeo. Las tensiones superiores a 250 MPa y signos de pandeo en el comienzo de la pletina de acero pueden ser explicadas por la ausencia de confinamiento en el modelo en una sección que en realidad si posee un material confinante, la cual no se ha representado ya que dicha zona no corresponde al objetivo principal de este estudio.

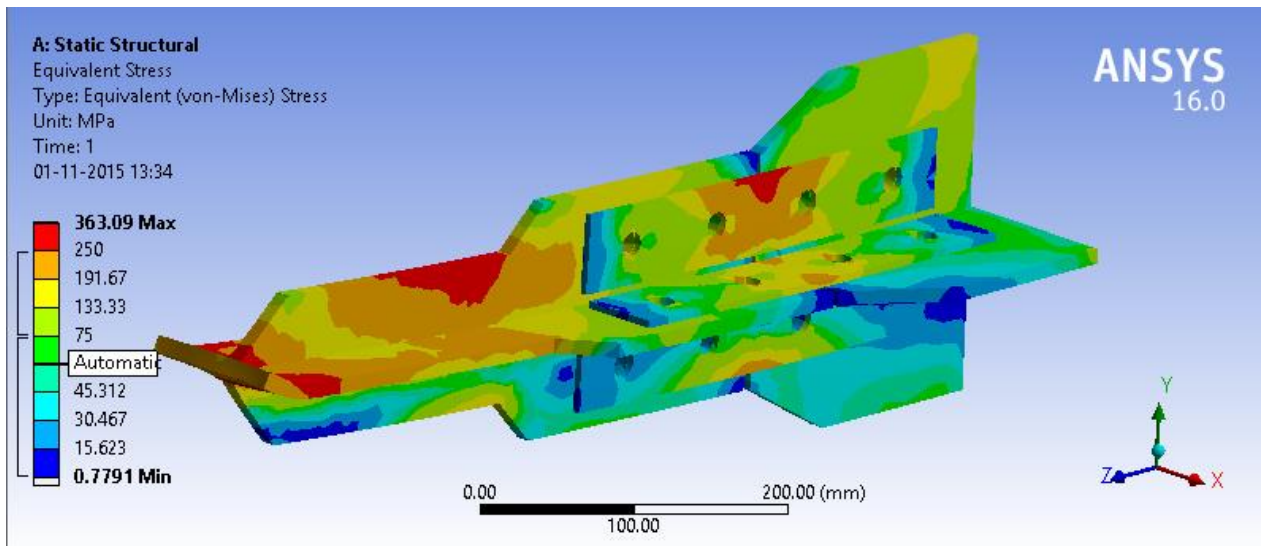


Figura 4. 7 Estado tensional en elementos del modelo.

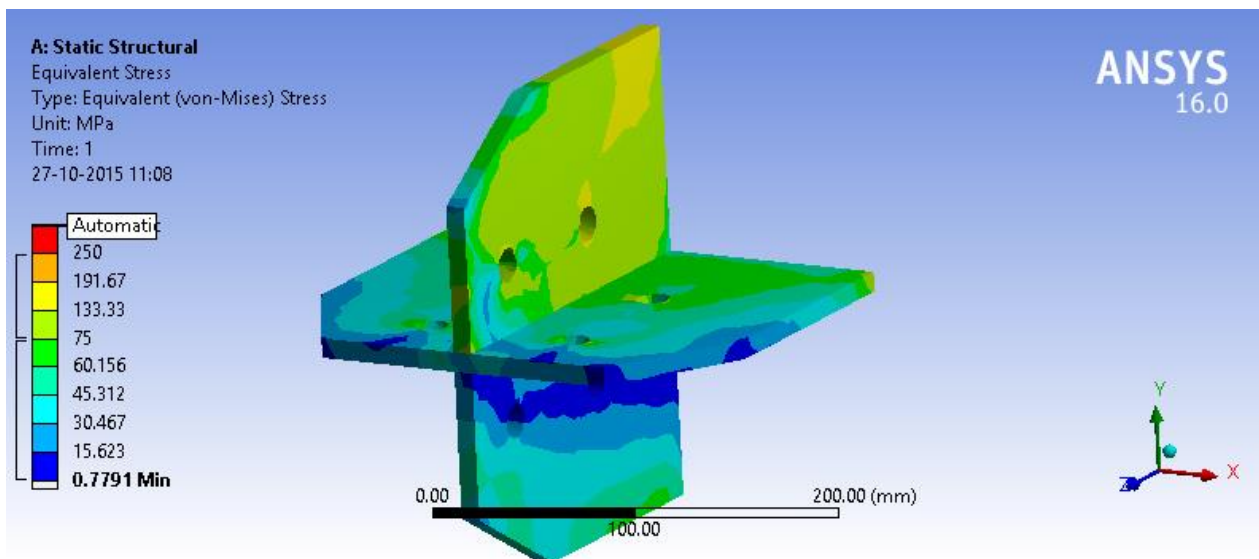


Figura 4. 8 Estado tensional en placa Gusset.

4.3. Uniones de elementos

En este caso la mayoría de las uniones entre elementos han sido consideradas de tipo apernadas con el objetivo de ampliar en la mayor medida posible el tamaño de probetas a ensayar y más aún el dejar abierta la posibilidad a los futuros usuarios de elaborar sus propias piezas de conexión. En todos los casos se ha considerado pernos de alta resistencia A 325.

A continuación se describe el funcionamiento y mecanismo estructural de las uniones más importantes del sistema.

4.3.1. Doble T rígida:

Corresponde a una sección de viga “doble T” con atiesadores tanto en el sentido paralelo al alma como perpendicular a ésta. Este elemento se necesita debido a la dificultad de unir el extremo de la placa Gusset con las placas unidas por pasador directamente. Esta dificultad tiene su origen en el hecho que el espacio es limitado y se tienen configuraciones distintas de ubicación de pernos. Debido a que este elemento se ubica dentro del apoyo móvil, se cubrirán todas sus superficies con una capa de teflón de 5 [mm] con el fin de evitar contactos friccionales.

4.3.2. Placas unidas por pasador:

Corresponde a la pieza que permite generar una rótula en el extremo del actuador, para que la carga sea aplicada de manera solamente axial y no se generen momentos adicionales en los extremos. Este elemento se encuentra idealmente en todo momento dentro del apoyo móvil, por lo que tiene limitaciones en cuanto a su sección transversal. Por la razón anterior, los bordes de este elemento están cubiertos por una película de teflón del mismo espesor que el resto de las partes para disminuir los efectos del contacto friccional entre elementos de acero.

4.3.3. Unión Actuador hidráulico – Apoyo fijo:

Este elemento también corresponde a una especie de perfil doble T con atiesadores el cual permite conectar el actuador hidráulico al apoyo fijo. En el extremo final se tiene una placa con ocho perforaciones para pernos A325 de diámetro $\frac{3}{4}$ ". Con lo anterior se asegura una conexión empotrada a columna que sirve como apoyo fijo para el ensayo.

5. Sistema de control y adquisición de datos.

5.1. Introducción

El sistema de control y adquisición de datos corresponde al conjunto de sensores, hardware y programas, los cuales se encargan por una parte de controlar la acción del actuador hidráulico en todo instante para cumplir con las disposiciones de carga de acuerdo a lo establecido en la normativa vigente y por otra parte se encarga de obtener, procesar y mostrar los resultados de todas las variables físicas de interés para los efectos del ensayo, tales como carga, desplazamiento y deformación.

Para cualquier sistema de ensayo es recomendable que el sistema de control y el sistema de adquisición de datos sean operados desde distintos computadores con el objetivo de prevenir estados de peligro ante falla de alguno de los dos sistemas. De esta forma se tendrán sensores destinados al control del ensayo, que en este caso corresponderá al LVDT del actuador hidráulico, ya que el ensayo se debe realizar a deformación controlada, y por otra parte se tendrán sensores y hardware destinados a la adquisición de datos los cuales se detallarán a lo largo del capítulo.

Además, es necesario notar que los elementos de medición usados para el sistema de ensayo (Strain gages, potenciómetros, LVDT's y celda de carga) corresponden todos a sensores de tipo analógico, es decir entregan una señal continua. Lo anterior condiciona el uso de ciertos equipos y la arquitectura del sistema de adquisición y distribución de señales, donde se hace necesario disponer además de un acondicionador de señal y multiplexor, de un conversor análogo digital y viceversa.

5.2. Sistema de control

El sistema de control opera desde un computador con el objetivo principal de manejar la acción del actuador hidráulico en cada instante de los ensayos. Para llevar a cabo la tarea anterior, el software debe disponer de toda la información acerca de la posición del actuador hidráulico durante los ensayos en todo instante. Esto se realiza mediante la comunicación del computador y el o los sensores. En el caso particular de este ensayo la normativa establece que se debe aplicar un historial de desplazamiento, por lo tanto,

esta última variable se transforma en la variable de control, la cual se monitorea en todo momento con un sensor de desplazamiento ubicado en el actuador hidráulico. Por otra parte, el resto de las variables provenientes de sensores como celda de carga, strain gages o el resto de los LVDT van dirigidas hacia el sistema de adquisición de datos. El software de control realiza las siguientes tareas durante el ensayo:

- Maneja la tarjeta de adquisición estableciendo frecuencia de muestreo
- Modifica e interpreta las señales de entrada provenientes del sensor de desplazamiento ubicado en el actuador hidráulico.
- Detecta estados críticos del sistema
- Mantiene comunicación con el usuario
- Genera un gráfico de desplazamiento versus tiempo aplicado.

El actuador hidráulico es controlado por una servo válvula (figura 5.1) la cual controla el flujo de aceite proveniente del sistema de bombeo que permite mover el actuador. Debido a que el ensayo es de naturaleza cuasi estático los caudales de la bomba que se utilizarán corresponden a 6 lt /min. Para el control de la servo válvula y el LVDT del actuador se utilizará un PLC (programmable logic controller).

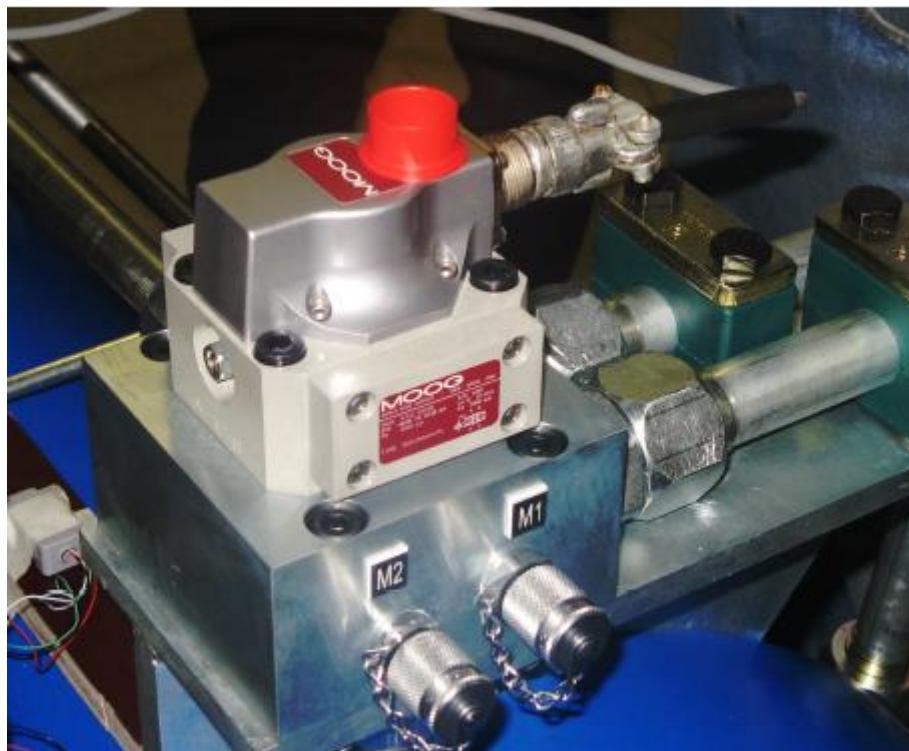


Figura 5. 1 Servo válvula de control MOOG



Figura 5. 2 PLC

Se puede observar los canales del sistema de control en la siguiente tabla:

Canal	Instrumento
0	LVDT actuador
1	Servo válvula

Tabla 5.1: canales sistema de control.

El sistema de control recibe como datos de entrada el historial de desplazamiento que debe ejecutar el actuador hidráulico y de acuerdo a lo establecido en la sección 2.8 el sistema de control PID debe encargarse que el actuador siga la señal indicada verificando en todo instante mediante la posición del LVDT. El historial de desplazamiento para una probeta de máximo tamaño según las limitaciones del sistema de ensayo se ve de la siguiente manera.

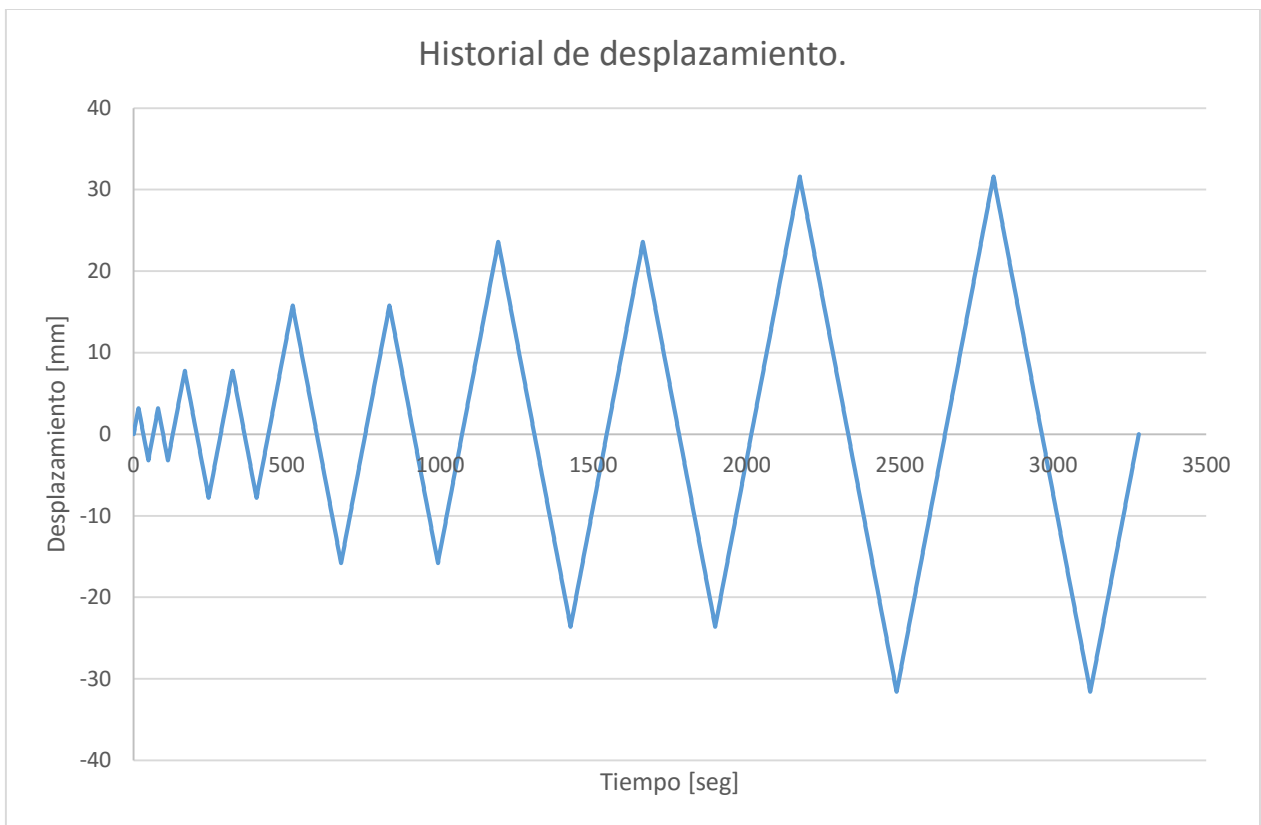


Figura 5. 3 Historia de desplazamiento aplicado a BRB.

Se debe recalcar que si bien la variable de control es el desplazamiento obtenido por el LVDT del actuador hidráulico, la norma establece que la deformación mostrada en la figura 5.1 debe ser aplicada sobre cada probeta. Esto significa que si el LVDT marca una deformación dada, el desplazamiento real en la probeta siempre será menor debido a que parte de la estructura de soporte del ensayo se lleva una parte de la deformación, evidentemente poca debido a su alta rigidez, pero que de todas maneras se debe considerar al momento de realizar los ensayos. Se puede estimar una relación entre la deformación aplicada en el actuador y la deformación real entre los extremos de la probeta mediante prueba y error para obtener un factor de ajuste para aplicar siempre una deformación un tanto mayor que la requerida para cumplir efectivamente con la normativa establecida.

En el software de control se deberá además calibrar el parámetro de control de ganancia de acuerdo a lo explicado en la sección 2.8.

Si bien la variable de control corresponde al desplazamiento, se recomienda monitorear en cada instante del ensayo la carga aplicada obtenida a partir de la celda de carga. Para

lo anterior se debe contar con un sistema de adquisición de datos que pueda obtener y dar a conocer la carga en todo momento del ensayo.

5.3. Adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos corresponde al sistema encargado de procesar y almacenar todos los datos provenientes de los sensores tales como lvdt, strain gages, y celda de carga los cuales no participan en el control del ensayo y son un dato de salida de éste. El listado de instrumentos de medición se detalla a continuación (ver figura 5.4):

- Se dispone de 2 LVDT por cada extremo de la probeta con el objetivo de medir el desplazamiento relativo entre la camisa de confinamiento y la conexión de la riostra.
- Se dispone 2 LVDT en el centro de cada probeta, ubicados en direcciones perpendiculares entre sí para registrar el desplazamiento fuera del plano de la probeta durante el ensayo.
- Se dispone de 2 potenciómetros los cuales registran el desplazamiento relativo entre los extremos de cada probeta. Este último parámetro se grafica en las curvas de fuerza versus desplazamiento que se exigen como requisito mínimo para cada ensayo.
- Se dispone de strain gages ubicados en los cuartos de cada probeta para registrar la deformación en la camisa de confinamiento. En cada cuarto de la camisa de confinamiento de la probeta se dispondrá de un strain gage en cada cara, lo que hace un total de 12 strain gages por cada probeta ensayada.
- Finalmente la celda de carga se dispone a continuación del actuador hidráulico para registrar la fuerza axial aplicada en cada instante del ensayo.

El listado de canales se puede observar en la siguiente tabla:

Canal	Instrumento	Canal	Instrumento
0	Celda de Carga	11	Strain Gage 3
1	LVDT ext 1	12	Strain Gage 4
2	LVDT ext 2	13	Strain Gage 5
3	LVDT ext 3	14	Strain Gage 6
4	LVDT ext 4	15	Strain Gage 7
5	LVDT f_plano 1	16	Strain Gage 8
6	LVDT f_plano2	17	Strain Gage 9
7	Potenciómetro 1	18	Strain Gage 10
8	Potenciómetro 2	19	Strain Gage 11
9	Strain Gage 1	20	Strain Gage 12
10	Strain Gage 2		

Tabla 5.2: Canales sistema de adquisición de datos

En la figura 5.3 se puede observar un esquema el cual representa la disposición de todos los instrumentos de medición que conforman el sistema de adquisición de datos.

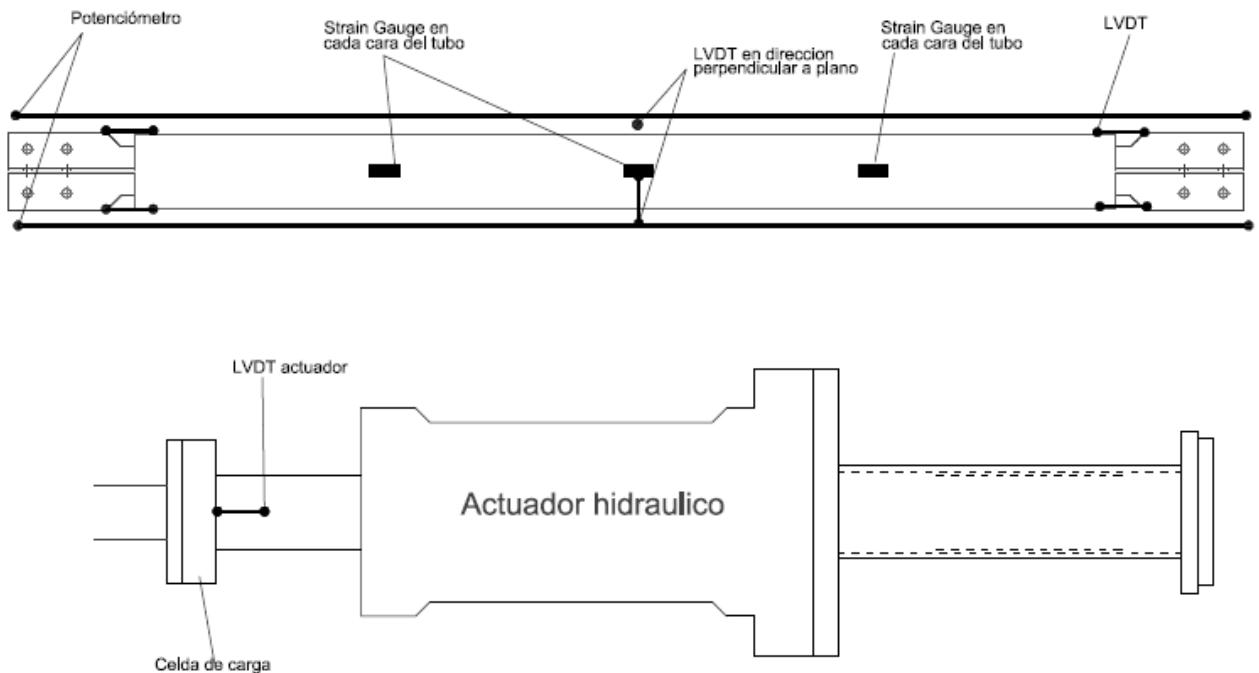


Figura 5. 4 Disposición de instrumentos de medición.

Los dispositivos utilizados en el sistema de medición se detallan a continuación:

Para conectar los distintos sensores al computador se utiliza el Chasis NIcDAQ-9188XT junto con los dispositivos modulares de la serie C de la marca National Instruments los

cuales se escogen dependiendo del tipo y número de sensores. El chásis cumple la función de router para asignar una dirección IP a cada canal además de alimentar eléctricamente todos los sensores. De acuerdo a lo explicado en la sección 2.5 las señales provenientes de los distintos sensores necesitan ser acondicionadas y digitalizadas dependiendo del caso. Los procesos anteriormente mencionados ocurren en cada uno de los módulos individuales, ya que el tipo de acondicionamiento de señal depende exclusivamente del sensor, si se trata de un strain gage o una celda de carga. Para recibir los 12 canales de strain gages instalados se utiliza dos módulos NI 9235 ya que cada módulo tiene un total de solo 8 canales. Este módulo tiene una configuración de un cuarto de puente, parámetro que se debe especificar en el software de adquisición, y un rango de medición de ± 24 mV/V, con una capacidad de muestre de 10000 muestras por segundo por cada canal.



Figura 5. 5 Chasis NI cDAQ-9188XT.

Para recibir la señal proveniente de la celda de carga, y teniendo en cuenta que se desea monitorear en todo momento durante los ensayos el valor de ésta, se utiliza un módulo NI 9237 el cual posee una capacidad de 4 canales. Este módulo posee una terminación de medio puente y puente completo hasta con 10 V de excitación externa. En este módulo se encuentra un acondicionador de señal el cual permite leer directamente en unidades de carga lo cual facilita la ejecución de los ensayos y aporta seguridad en ellos, pero requiere calibración.

Para recibir la señal proveniente de los LVDT y potenciómetros se utiliza un módulo NI9205 el cual consta de 32 canales con una capacidad de toma de datos de 25000 muestras por segundo. El módulo posee una resolución de 16 bits y lee la señal en forma

de voltaje, donde los rangos de medida pueden ser programados en ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V.

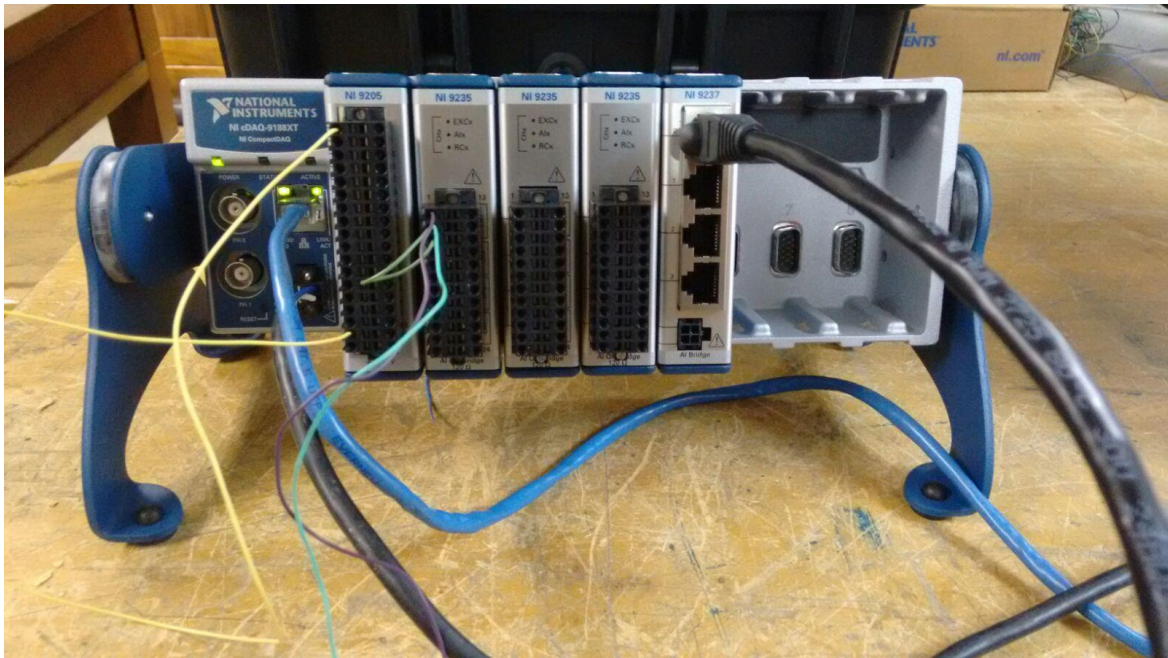


Figura 5. 6 Módulos de serie C conectados a cDAQ 9188XT.

5.3.1. Programa LabVIEW de adquisición de datos.

LabVIEW es un lenguaje de programación el cual permite al usuario generar los códigos en forma de diagramas de bloque, y funciona en base a objetos virtuales. El programa permite controlar cada uno de los parámetros de los distintos módulos como escoger el tipo de puente, fijar los rangos de medición de voltaje y escoger la frecuencia de muestreo de acuerdo a las necesidades de cada ensayo. El programa genera dos tipos de salida, una visual a través del panel frontal, y la otra hacia un archivo excel ordenado de forma matricial con los datos de tiempo, posición, deformación y fuerza.

5.4. Calibración del sistema de control P

Como se ha mencionado es de suma importancia tanto como para un aspecto de seguridad como de precisión durante los ensayos ajustar el parámetro de la ganancia del sistema de control. Dicho parámetro dependerá de las variables dinámicas propias de cada ensayo, en este caso depende de la velocidad a la que se pretende operar el actuador hidráulico. Para encontrar un valor de la ganancia adecuado se recomienda

realizar pruebas experimentales con los mismos historiales de carga y desplazamiento que se ocuparán durante los ensayos.

6. Montaje y ensayo de prueba.

6.1. Montaje sistema estructural.

De manera general las instalaciones de los elementos estructurales se dividen en 2 tareas fundamentales. La primera corresponde a la instalación de elementos anclados a la losa del laboratorio la cual se realizó mediante barras de acero de 32mm las cuales fueron post tensadas con gatos hidráulicos. La segunda tarea corresponde a la unión de todos los elementos que deben ser unidos mediante conexiones apernadas.

6.1.1. Anclaje de Apoyos del sistema de ensayo.

Los apoyos del sistema de ensayo fueron anclados a la losa del laboratorio. Cada apoyo consta de cuatro perforaciones las cuales coinciden con las perforaciones de la losa, por lo tanto se utilizaron 4 barras de 32 mm por cada apoyo para fijarlos a la losa. El procedimiento de post tensado se realizó gracias a una viga rígida la cual se posicionó sobre cada uno de los apoyos del sistema de ensayo, donde por motivos de espacio la operación fue desarrollada tensando las barras de dos en dos tal como se muestra en la figura 6.1, con el objetivo que los elementos se mantuviesen estables sin caer en estados de carga no deseables ni generar un mecanismo producto de la aplicación de altas cargas de tensado. Se aplicaron 17 ton por cada barra suponiendo de manera conservadora 2 ton de pérdida de carga de post tensado de acuerdo a las hipótesis de cálculo. Para que el gato hidráulico fuese capaz de tomar la barra se utilizó una barra auxiliar la cual fue unida mediante una copla mecánica.



Figura 6. 1 Post tensado de barras de anclaje.

6.1.2. Apriete uniones apernadas.

Para el caso de uniones apernadas el apriete está controlado por el tipo de unión considerada. En el caso de los pernos que unen el prototipo con el sistema de ensayo la conexión está diseñada como conexión de deslizamiento crítico, la cual considera la fricción entre placas conectadas debido a la carga aplicada en los pernos por medio del apriete con llave de torque u otro método. El torque utilizado depende según el diámetro y tipo de perno. En este caso todos los pernos utilizados corresponden al tipo A 325.



Figura 6. 2 Detalle de uniones apernadas.

6.2. Ensayo de prueba.

Con el objetivo de probar el sistema estructural, el sistema de aplicación de carga y el sistema de control y adquisición de datos se realizó un ensayo de prueba con un prototipo de riostra de pandeo restringido la cual sufrió defectos de fabricación que sin embargo no impiden realizar un ensayo de prueba. En este caso el control del ensayo y aplicación de carga se realizó de acuerdo a lo establecido en la sección 2.2, sin embargo, el desplazamiento fue controlado de forma manual mediante la lectura del LVDT ubicado en el actuador hidráulico.

6.2.1. Instrumentación.

Para el ensayo de prueba se utilizó la celda de carga y el LVDT ubicado en el actuador hidráulico cuya lectura permitió controlar los desplazamientos aplicados en la probeta. En el programa de adquisición de datos se ingresaron las constantes propias de calibración de cada uno de los instrumentos. Además, antes de realizar el ensayo se fijaron en cero las variables de carga y desplazamiento.

6.2.2. Observaciones y resultados.

En la fase de tracción no se observó un comportamiento extraño por parte de la probeta o en el ensayo, sin embargo, en los primeros ciclos de la fase de tracción se observó cierta fricción entre la probeta y el apoyo deslizante, la cual en los últimos ciclos se redujo. Tanto para tracción como para compresión se alcanzaron cargas de 20 ton, lo cual valida el comportamiento de la riostra como de pandeo restringido, pese a que posee defectos de fabricación. Con respecto a la integridad de las conexiones estas se mantuvieron estables durante todo el ensayo. Se observaron pequeñas deformaciones permanentes en las placas de conexión de 5 mm, que unen la probeta con el resto del sistema de ensayo. Estas deformaciones pueden explicarse en el hecho que la probeta presento cierta curvatura antes de ser ensayada, la cual indujo la dirección de deformación de y pandeo en los ciclos de compresión.

Como mejora se remplazará una placa ubicada en el apoyo deslizante por otra de menor espesor para permitir al actuador hidráulico desplazarse con más holgura al interior del apoyo deslizante y reducir la fricción que ocurre en la fase de compresión.

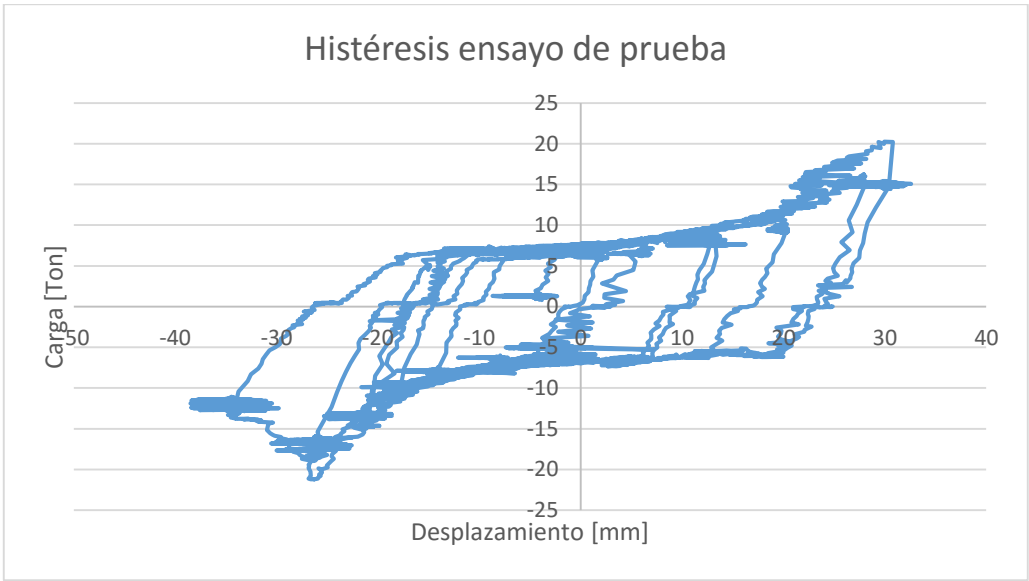


Figura 6. 3 Histéresis ensayo de prueba

Aunque existió fricción en la fase de compresión se verifica que el apoyo deslizante cumple con la característica de restringir el movimiento fuera del plano del extremo del BRB que se produce en la fase de compresión.



Figura 6. 4 Probeta durante el ensayo y soporte de LVDT.

7. Discusión y conclusiones

7.1. Discusión

Los parámetros más importantes a evaluar de este sistema de ensayo son la estabilidad de los apoyos y su rigidez, por lo que se debe cuantificar la deformación de las estructuras resistentes para compararlas con las deformaciones esperadas teóricamente. Por otra parte se deben hacer evaluaciones al comportamiento del apoyo deslizante o móvil, verificando que exista una baja fuerza friccional entre contactos y que efectivamente se restrinja el movimiento de las probetas fuera del plano en los puntos del apoyo.

Con respecto a los requerimientos de carga y desplazamiento si bien se han establecido de acuerdo a la norma, quien realice los ensayos tiene la libertad de aplicar otro tipo de sollicitaciones tales como ensayos monotónicos o aumentar la amplitud y número de ciclos para evaluar la estabilidad de distintas probetas.

7.2. Conclusiones

El diseño del sistema de ensayo es satisfactorio si se compara con otros sistemas de ensayo uniaxial, principalmente si es comparado con el sistema de ensayo utilizado por Black et al (2000). Ambos sistemas comparten el mismo mecanismo de aplicación de carga y poseen estructuras de apoyo similares, con distinta escala de fuerzas y desplazamientos pero manteniendo proporcionalidad de tamaño entre sus estructuras de apoyo y anclaje.

Si bien el sistema de ensayo no cuenta con la capacidad de someter el espécimen a altas demandas rotacionales para el estudio de conexiones, es suficiente para poder caracterizar o validar el comportamiento de una probeta para determinar los parámetros β y ω , que son los que finalmente determinan si una riostra puede denominarse como de pandeo restringido, lo que finalmente permite someter a prueba ya sea nuevos materiales o riostras con diferente sección transversal para obtener diseños más eficientes y económicos ya sea en términos de desempeño estructural o en términos de facilidades constructivas.

7.3. Limitaciones del sistema y posibles mejoras

Como ya se ha señalado durante el desarrollo de la memoria, la principal limitación del sistema de ensayo corresponde a la incapacidad de generar demandas rotacionales en los extremos de cada probeta. Para estudios más profundos acerca del comportamiento de las conexiones se puede materializar un ensayo de tipo subestructura el cual puede llevarse a cabo aprovechando las estructuras del laboratorio como el muro de reacción, ubicando cada probeta de manera diagonal y aplicando la carga en la base. Esta modificación requiere el recambio de algunas partes de la instalación estructural pero corresponde a una alternativa viable pensando en una segunda etapa para el sistema de ensayo. Además es posible aumentar la velocidad de los ensayos para aplicar registros sísmicos y evaluar efectos dinámicos aumentando el caudal de la bomba que alimenta el actuador hidráulico y mejorando el sistema de control pasando de un controlador P a un sistema de control más apropiado para efectos dinámicos como PI o PID.

Bibliografía.

1. Nacif H., D. E. 2008 Diseño de Sistema de ensayo para probetas en esfuerzo de flexo-compresión, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
2. Bravo H., M. A. 2013 Estudio analítico experimental de perfiles T soldados sometidos a carga cíclica, tesis para optar al grado de Magister en ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
3. American Institute of Steel Construction AISC, Seismic provisions for Structural Steel Buildings, 2010.
4. American Institute of Steel Construction AISC, Specification for Structural Steel Buildings, 2010.
5. FEMA 450 (2004). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures Part1: Provisions, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
6. Black, C., Makris, N., and Aiken, I. (2002). "Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces," in PEER Report 2002/08, University of California, Berkeley, Berkeley.
7. Takeuchi, T., Ozaki, H., Matsui, R., Sutcu, F., Out-of-plane stability of buckling-restrained braces including moment transfer capacity. Earthquake engineering and structural dynamics, 2013.
8. Tsai KC, Hsiao PC. Pseudo-dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame-Part II: seismic performance of bucklingrestrained braces and connections. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2008; 37:1099–1115.
9. Cancelado, R. A., Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas, 2012. Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogota D.C., Colombia.
10. Sabelli, R., Lopez, W., Design of buckling-restrained braced frames 2004, The Steel Conference, Modern steel construction magazine.

11. Christopoulos, A. S., Improved Seismic performance of Buckling Restrained Braced Frames, 2005.
12. Mahin, S., Uriz, P., Aiken, I., Field, C., Ko, E., Seismic performance of Buckling restrained braced frame systems. 13th World conference of earthquake engineering Vancouver, Canada, 2004.
13. Merrit, S., Uang, C., Benzoni, G., Subbassemblage testing of Corebrace Buckling restrained braces. Final report to Corebrace. 2003.
14. Hussain, S., Van Benschoten, P., Al Satari, M., Lin, S., Buckling Restrained Braced Frame Structures: Analysis, design and approval issues. Nippon Steel news No 333. September 2005.

Anexo

1. Memorias de cálculo

Diseño de elementos

Diseño de conexión apernada BRB-Placa Gusset

Acero ASTM A36 $E = 2100 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \right]$; $F_y = 2.53 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \right]$; $F_u = 4.06 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \right]$

Solicitaciones

La fuerza máxima esperada corresponde a la capacidad del actuador hidráulico la cual es $P_{max} = 25 \text{ [tonf]}$. Esta fuerza corresponde a la carga axial que se transmitirá por medio de las probetas ensayadas

Factor de mayoración carga axial:

$$F_{ax} = 1.5$$

Con lo anterior la carga para la cual se diseña la conexión corresponde a 37.5 [tonf]

Se propone una conexión de tipo friccional con 8 pernos de 5/8" A325

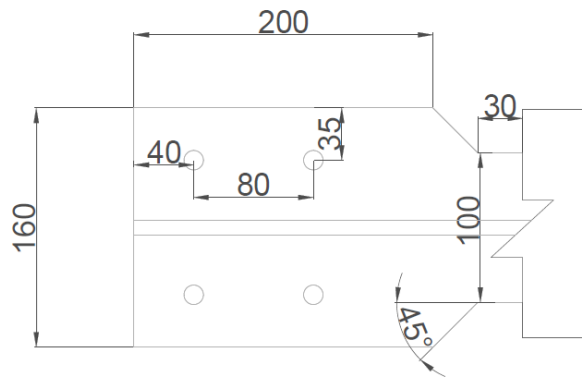


Figura 7. 1: Dimensiones de extremo de BRB

Resistencia por perno:

$$R_n = \mu \cdot D_u \cdot h_f \cdot T_b \cdot n_s$$

Donde:

μ : Coeficiente de fricción, se considera $\mu = 0.3$

D_u : Multiplicador que refleja la razón entre la pretensión media del perno instalado y la pretensión mínima específica, $D_u = 1.13$

h_f : Factor para rellenos $h_f = 1$

T_b : Tracción mínima del conector (Tabla TJ.3)

n_s : Número de planos de deslizamiento, $n_s = 2$

Finalmente se obtiene una resistencia $R_n = 5.84 \frac{\text{tonf}}{\text{perno}}$

Número de pernos en la conexión

$N_p = P_{max} \cdot \frac{F_{ax}}{\phi \cdot R_n} = 6.41$ Donde se ha considerado $\phi = 1$, entonces se determina aproximar a 8 el número de pernos en la conexión.

Fuerza por perno:

$$F_{perno} = P_{max} \cdot \frac{F_{ax}}{N_p} = 4.68[\text{tonf}]$$

Chequeo Aplastamiento:

$$\phi R_n = (0.75) \cdot (2.4) \cdot (t_{BRB}) \cdot (d_p) \cdot (F_u) = 11.6 [\text{tonf}] > F_{perno};$$

Chequeo Tearthrough:

$$\phi R_n = (0.75) \cdot (1.2) \cdot (S_c - D_p) \cdot (t_{BRB}) \cdot (F_u) = 22.6 [\text{tonf}] > F_{perno};$$

Chequeo Tearout:

$$\phi R_n = (0.75) \cdot (1.2) \cdot (S_c - 0.5D_p) \cdot (t_{BRB}) \cdot (F_u) = 25.9 [\text{tonf}] > F_{perno};$$

Chequeo fluencia en la sección de cruz:

$$\phi R_n = (0.9) \cdot (F_y) \cdot (t_{BRB}) \cdot 2(B_e - 2D_p - t_{BRB}) = 51.9 [\text{tonf}] > P_{max} \cdot F_{ax};$$

Chequeo fractura en la sección de cruz

$$\phi R_n = (0.75) \cdot (F_u) \cdot (t_{BRB}) \cdot 2(B_e - 2D_p - t_{BRB}) = 69.4 [tonf] > P_{max} \cdot F_{ax};$$

2. Placas de conexión BRB- Placa Gusset

Número de placas: $n_{pla} = 8$

Ancho de placa: $w_{pla} = 65 [mm]$

Espesor de placa: $t_{pla} = 5[mm]$

Chequeo fluencia:

$$\phi R_n = (0.9) \cdot (F_y) \cdot (w_{pla} - D_p) \cdot t_{pla} \cdot n_{pla} = 42.2 [tonf] > P_{max} \cdot F_{ax};$$

Chequeo fractura:

$$\phi R_n = (0.75) \cdot (F_u) \cdot (w_{pla} - D_p) \cdot t_{pla} \cdot n_{pla} = 57.24 [tonf] > P_{max} \cdot F_{ax};$$

Chequeo bloque de corte:

$$A_{gv} = t_{pla} \cdot 16 \cdot S_c = 64 [cm^2]$$

$$A_{nv} = A_{gv} - 4 \cdot 1.5 \cdot D_p \cdot t_{pla} = 58.6 [cm^2]$$

$$A_{gt} = 8 \cdot 0.5 \cdot w_{pla} \cdot t_{pla} = 13 [cm^2]$$

$$A_{nt} = A_{gt} - 8 \cdot 0.5 \cdot D_p \cdot t_{pla} = 9.4 [cm^2]$$

Por lo tanto, ϕR_n es el menor valor entre:

$$\phi [0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt}] = 121.7 [tonf] \text{ (Fluencia por corte / fractura por tracción)}$$

$$\phi [0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_y \cdot A_{gt}] = 158 [tonf] \text{ (Fractura por corte / fluencia por tracción)}$$

$$\phi [0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt}] = 162.8 [tonf] \text{ (Fractura por corte / fractura por tracción)}$$

Donde se ha considerado $\phi = 0.75$

Por lo tanto se obtiene $\phi R_n = 121.7 [tonf] > P_{max} \cdot F_{ax};$

3. Diseño de placa Gusset

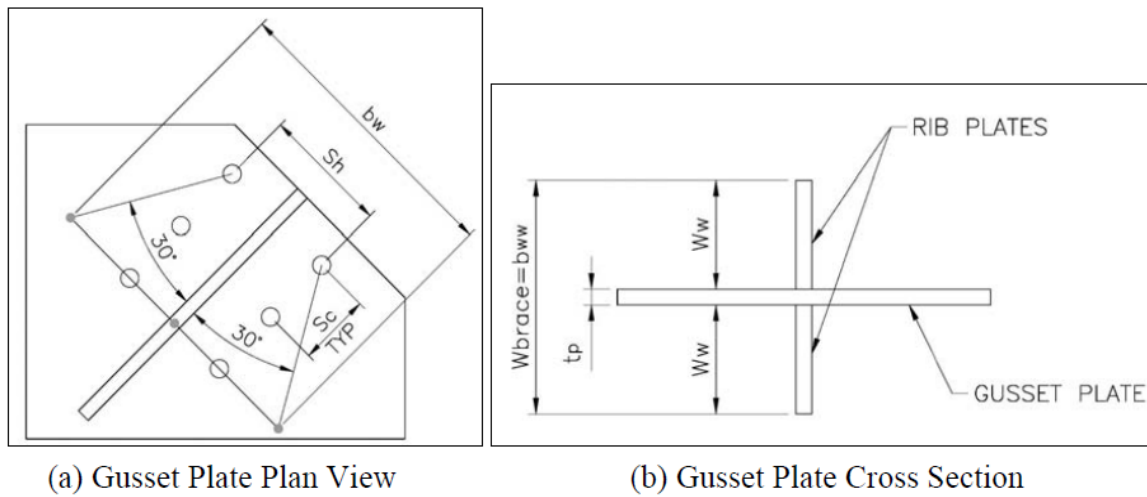


Figura 7. 2: Parámetros de cálculo de resistencia según método de Whitmore.

$$W_w = 75 \text{ [mm]};$$

$$b_{ww} = 2W_w + t_g = 160 \text{ [mm]}$$

$$b_{ww\text{eff}} = b_{ww} - 2 \cdot D_p = 124 \text{ [mm]}$$

$$b_w = S_h + 2 \cdot \tan(30^\circ) \cdot S_c = 182 \text{ [mm]}$$

$$b_w\text{eff} = b_w - 2 \cdot D_p = 146 \text{ [mm]}$$

Chequeo fluencia placa gusset:

$$\phi R_n = (0.9) \cdot (F_y) \cdot t_g \cdot (b_{ww\text{eff}} + b_w\text{eff}) = 61.5 \text{ [tonf]} > P_{max} \cdot F_{ax};$$

Chequeo resistencia a pandeo (Método de Thornton):

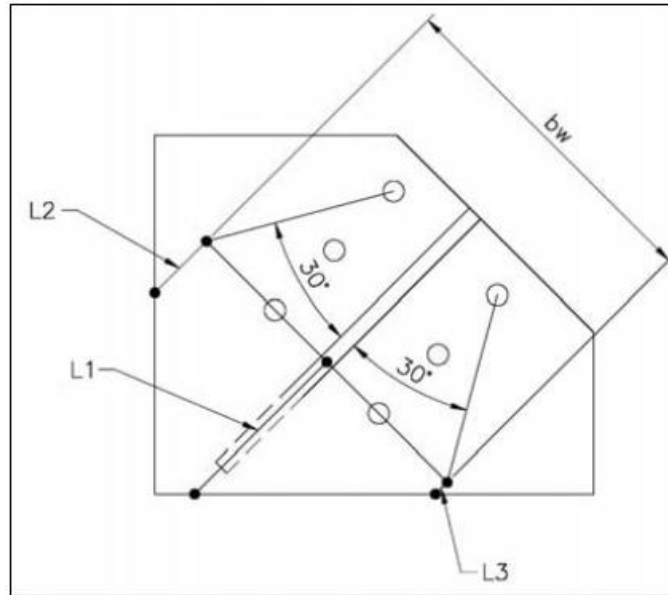


Figura 7. 3: Parámetros para el cálculo de resistencia al pandeo según Thornton.

$$l_t = \min(L2, \frac{L1 + L2 + L3}{3}) = 80 \text{ [mm]}$$

$$\lambda_t = 0.65 \cdot l_t \cdot \frac{\sqrt{12 \cdot \frac{F_y}{E}}}{\pi \cdot t_g} = 0.199$$

$$A_t = t_g \cdot b_w = 18.24 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Chequeo resistencia al pandeo:

$$\phi P_{cr} = 0.85 \cdot 0.658^{\lambda_t^2} \cdot A_t \cdot F_y = 38.57 \text{ [tonf]} > P_{max} \cdot F_{ax}$$

Sin embargo debido a que el factor de utilización es cercano a 1 para este caso se incluye la resistencia adicional otorgada por las placas gusset en el sentido perpendicular ya que hasta ahora en el cálculo no se han considerado

$$A_{t2} = t_g \cdot b_w + (B_e - t_g) \cdot t_g = 33.2 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\phi P_{cr2} = (0.85) \cdot 0.658^{\lambda_t^2} \cdot A_{t2} \cdot F_y = 70.3 \text{ [tonf]} > P_{max} \cdot F_{ax}$$

Diseño apoyo fijo

Se propone como apoyo fijo una viga con forma de “doble T” orientada con el eje fuerte en la dirección de la carga axial del ensayo.

Para estimar la deformación de la probeta ensayada se considera una riostra de 3 metros de largo con una disposición en un marco como se muestra en la figura X.

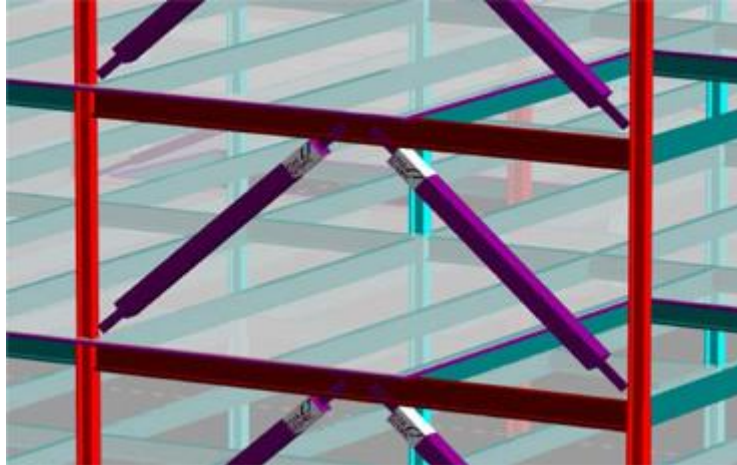


Figura 7. 4: Disposición de BRB

A Partir del largo de la riostra y suponiendo un ángulo de esta con la horizontal de 45° se puede estimar una altura de piso $h_{piso} = \frac{L_{BRB}}{\sqrt{2}} = 2.121 [m]$

Como desplazamiento de piso de diseño se considera el 1% de la altura, esto es

$$s_{drift} = 2.121 [cm]$$

Finalmente de acuerdo a los protocolos de carga de ensayos especificados en AISC 314, se espera una deformación máxima del BRB para 2 veces el desplazamiento de piso de diseño, esto es

$$\Delta_{BRB} = 2 \cdot s_{drift} \cdot \sin(45^\circ) = 3 [cm]$$

Para el apoyo debe cumplirse que la deformación debido a la máxima sollicitación no sea superior al 1% de la deformación esperada para el BRB. Se calculará la deformación debido a la carga máxima del actuador para el apoyo fijo usando el programa SAP 2000.

La carga será aplicada a los 50 cm de altura de viga de manera conservadora aunque el eje del BRB que es por donde se transmite la carga se encuentra a 40 cm del suelo.

Se prueba el perfil HN 30 x 180 del catálogo de perfiles soldados de CINTAC, el cual tiene las siguientes propiedades geométricas.

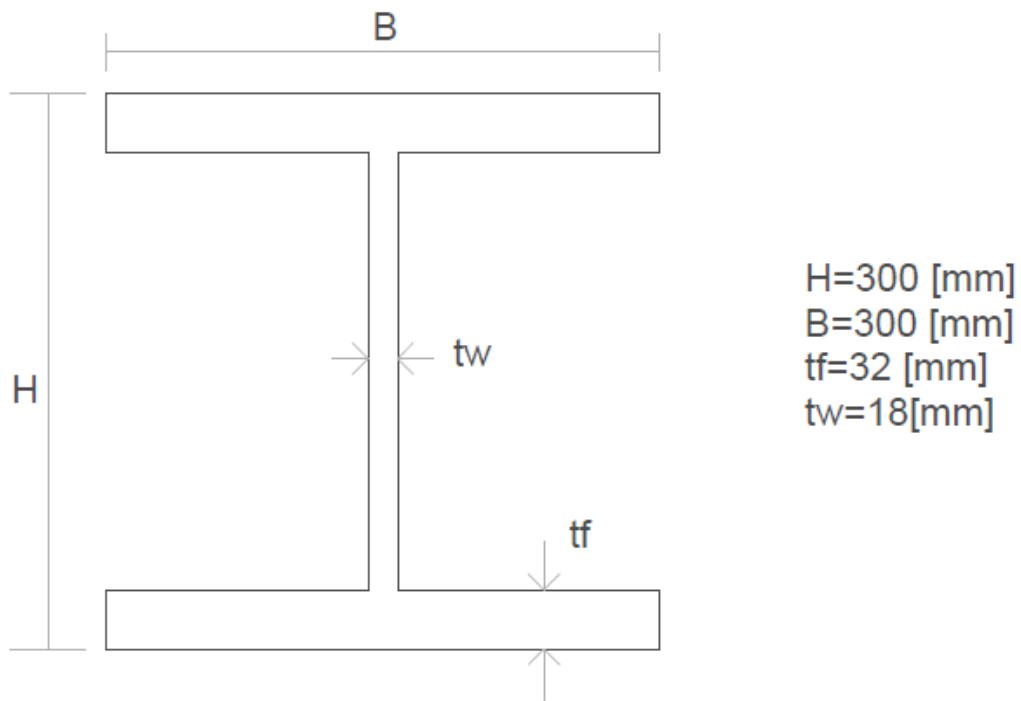


Figura 7. 5: Dimensiones apoyo fijo.

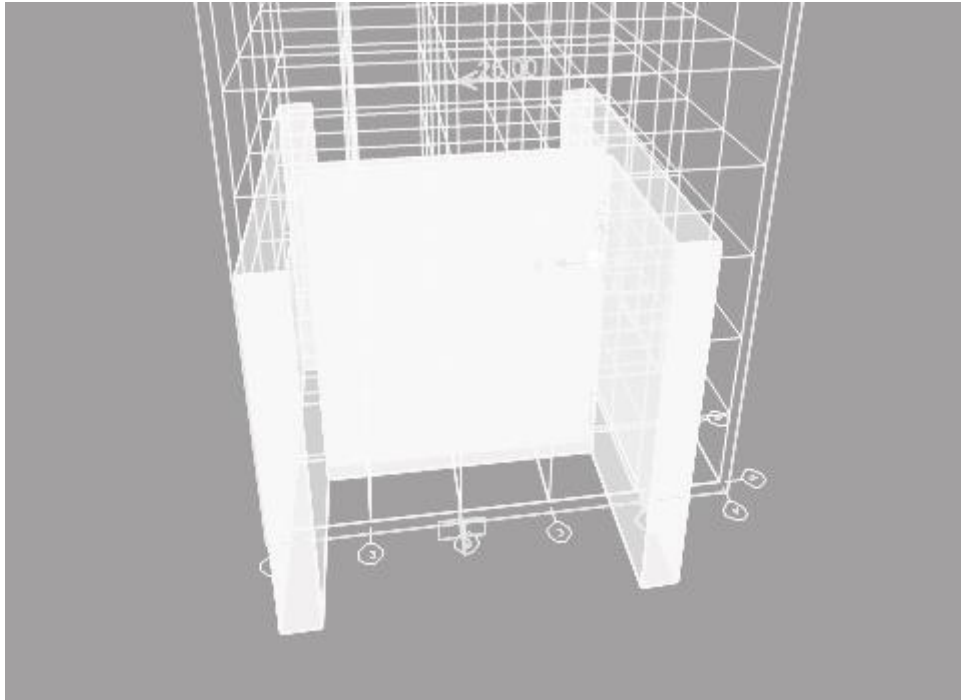


Figura 7. 6: Modelación de viga apoyo fijo en SAP 2000.

Para la carga aplicada el desplazamiento máximo corresponde a 0.047 [cm] lo cual supera el 1% de la deformación máxima esperada para el BRB, por lo tanto se cumplen las condiciones para que la columna HN 30 x 180 sea el apoyo del extremo fijo para el ensayo. Por lo anterior se deben incorporar atiesadores que trabajen en conjunto con el alma del perfil, debido a que la mayoría de la deformación en la columna se produce por esfuerzo de corte.

Para este apoyo se debe tener la consideración de realizar los chequeos del capítulo J sección 10 de AISC 360

Chequeo movimiento local del ala (Sección J10.1)

$$t_{fl} = 32 [mm]$$

$$t_{we} = 16 [mm]$$

$$\phi = 0.9$$

$$\phi R_n = 0.9 \cdot 6.25 \cdot F_y \cdot t_{fl}^2 = 145.7 [tonf] > P_{max} \cdot F_{ax}$$

Chequeo fluencia local del alma (Sección J10.2)

$k = 40 [mm]$; Distancia desde la cara externa del ala hasta el filete de soldadura.

$l_b = 240$ [mm]; Altura de la placa gusset

$$\phi = 1.0$$

$$\phi R_n = F_y \cdot t_w \cdot (5k + l_b) = 137.6 \text{ [tonf]} > P_{max} \cdot F_{ax}$$

Chequeo crippling local del alma

$$\phi = 0.75$$

$$\phi R_n = 0.8t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{l_b}{d} \right) \cdot \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_y \cdot t_f}{t_w}} = 163 \text{ [tonf]} > P_{max} \cdot F_{ax}$$

Diseño conexión apernada de apoyo fijo a la losa

La losa a la cual se conecta el apoyo fijo posee perforaciones espaciadas a 40 [cm] en los ejes N-S, y E-W. Se propone una conexión con 4 pernos donde el centro de gravedad de la columna de apoyo coincida con el de los pernos.

Corte debido a la carga del actuador

$$V_{max} = P_{max} \cdot \frac{F_{ax}}{4} = 9.375 \text{ [tonf]}$$

Tracción debida al momento

Se considera como brazo de palanca la altura el eje del BRB, la cual corresponde a 40 [cm].

$$M_{max} = P_{max} \cdot F_{ax} \cdot h_{eje} = 15 \text{ [tonf} \cdot \text{m]}$$

Distancia del centro de gravedad de los pernos al extremo

$$c_t = 20 \text{ [cm]}$$

Inercia de la conexión

$$I_c = 4 \cdot c_t^2 = 1.6 \cdot 10^3 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$T_{max} = M_{max} \cdot \frac{c_t}{2 \cdot I_c} = 14.06 \text{ [tonf]}$$

Se propone usar barras de anclaje post tensadas tipo GEWI de 32 [mm] de diámetro.

$$A_{Barras} = \pi \cdot \frac{\phi_P^2}{4} = 8.042 [cm^2]$$

El acero utilizado en las barras de anclaje tiene las siguientes propiedades:

$$F_{nt} = 5.62 \left[\frac{tonf}{cm^2} \right] \quad F_{nv} = 3.372 \left[\frac{tonf}{cm^2} \right]$$

Donde F_{nt} corresponde al valor de fluencia a tracción y F_{nv} corresponde a la resistencia al corte y se calcula como $F_{nv} = 0.6 \cdot F_{nt}$

Efecto combinado de tracción y corte J3.7

Formula J3-3a

$$\phi = 0.75$$

Tensión de trabajo por corte directo

$$f_{vcd} = \frac{V_{max}}{A_{perno}} = 1.184 \left[\frac{tonf}{cm^2} \right]$$

$$F_{nt}' = 1.3F_{nt} - \frac{F_{nt} \cdot f_{vcd}}{\phi \cdot F_{nv}} = 4.716 [tonf]$$

$$T_{adm} = F_{nt}' \cdot A_{perno} = 37.92 [tonf]$$

Por otra parte la resistencia al corte debe ser mayor a la demanda de corte por perno lo cual si se cumple.

La resistencia admisible a tracción debe ser mayor a la suma de la carga de tracción por momento en cada perno sumada a la carga correspondiente al pretensado.

Escogiendo una carga de pretensado de 15 [ton] se cumple que la resistencia a tracción es mayor que la suma de las cargas ya mencionadas

$$T_{adm} = 37.92 [tonf] > T_{max} + T_{Pret} = 29.06 [ton]$$

Diseño y cálculo de conexiones soldadas

Conexión de la columna de apoyo fijo a la losa:

Se materializará la unión de la columna de apoyo fijo por medio de una placa de espesor 3 cm soldada por todo el contorno a la columna, donde a su vez por esta placa se conectarán los pernos calculados en la sección anterior.

Geometría.

Perfil de apoyo HN 30 x 180.

Inercia de la soldadura:

$$I_{sold} = 2 \cdot \left[1 \cdot (B - t_w) \cdot \left(\frac{H}{2} - t_f \right)^2 + 1 \cdot B \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^2 + 1 \cdot \frac{(H - 2t_f)^3}{12} \right] = 2.36 \cdot 10^4 [cm^3]$$

Largo total de soldadura

$$L_{sold} = 2 \cdot (H - 2t_f) + 2 \cdot B + 2 \cdot (B - t_w) = 164 [cm]$$

Solicitaciones

Corte:

$$f_{vt} = P_{max} \cdot \frac{F_{ax}}{L_{sold}} = 0.229 \left[\frac{tonf}{cm} \right]$$

Momento:

$$M_p = P_{max} \cdot F_{ax} \cdot h_{eje} = 1500 [tonf \cdot cm]$$

$$f_{mt} = M_p \cdot \frac{H}{I_{sold}} = 0.953 \left[\frac{tonf}{cm} \right]$$

$$f_{total} = \sqrt{f_{vt}^2 + f_{mt}^2} = 0.98 \left[\frac{tonf}{cm} \right]$$

Utilizando un filete de espesor 10mm con electrodo E70xx se tiene la siguiente resistencia

$$\phi R_n = 1.563 \left[\frac{tonf}{cm} \right] > f_{total}$$

Soldadura Placa Gusset – Atiesadores

Solo sollicitación por corte

Se tienen 4 cordones de 20 [cm] de largo.

$$L_{sold2} = 80 [cm]$$

$$f_{v2} = P_{max} \cdot \frac{F_{ax}}{L_{sold2}} = 0.469 \left[\frac{tonf}{cm} \right]$$

Utilizando filete de soldadura de espesor 8mm con electrodo E70xx se tiene la siguiente resistencia

$$\phi R_n = 1.251 \left[\frac{tonf}{cm} \right] > f_{total}$$

Soldadura extremo gusset- Placa de apoyo a ala doble T

$$L_{sold3} = 11.5 \cdot 8 = 92 [cm]$$

$$f_{v3} = P_{max} \cdot \frac{F_{ax}}{L_{sold3}} = 0.4 \left[\frac{tonf}{cm} \right]$$

Utilizando filete de soldadura de espesor 8mm con electrodo E70xx se tiene la siguiente resistencia

$$\phi R_n = 1.251 \left[\frac{tonf}{cm} \right] > f_{total}$$

Índice de parámetros

d_p : Diámetro perno

D_p : Diámetro perforación

S_c : Distancia entre dos pernos según el eje longitudinal del BRB

B_e : Ancho de paleta BRB en el extremo donde se conecta a placa gusset

t_{BRB} : Espesor de BRB

t_g : Espesor de placa Gusset

t_{pla} : Espesor de placa de unión entre riostra y Gusset