



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS MODOS DE FALLA PREDOMINANTES EN
PERFILES XL DE ACERO ESTRUCTURAL COMO ARRIOSTRAMIENTOS DE
MARCOS ESTRUCTURALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JUAN PABLO SALAS QUINTANILLA

PROFESOR GUÍA:

RICARDO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

RAMÓN MONTECINOS CONCHA

SANTIAGO DE CHILE

2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: JUAN PABLO SALAS QUINTANILLA
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: RICARDO HERRERA MARDONES**

**ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS MODOS DE FALLA PREDOMINANTES EN
PERFILES XL DE ACERO ESTRUCTURAL COMO ARRIOSTRAMIENTOS DE
MARCOS ESTRUCTURALES**

Durante el terremoto del Maule de 2010 en Chile ($M_w = 8,8$) ocurrieron varias fallas no previstas en diagonales de perfiles XL, originadas principalmente a causa de pandeo local de sus alas, pandeo torsional y fractura en sus conexiones. Los objetivos de esta investigación consisten en identificar los principales modos de falla y estudiar el desempeño de perfiles XL de acero estructural ante un historial de desplazamientos cíclico incremental como parte de diagonales de marcos arriostrados, mediante un análisis no lineal en el software de elementos finitos ANSYS Workbench 2020 R2.

Primeramente, se realiza una calibración del esquema de modelación de perfiles XL en el software ANSYS desarrollado por Molina (2014) y Claverie (2016) con los resultados experimentales del estudio de Guerrero (2017), en el que a través de los análisis de sensibilidad del módulo tangente de la curva bilineal de tensión-deformación, nivel de imperfección inicial, mallado de elementos finitos y tipo de formulación entre las regiones de contacto se procede a calibrar estos parámetros en relación con el modo de falla observado en los especímenes y su respuesta histerética.

Posteriormente, se llevan a cabo 13 modelos de pórticos arriostrados en X, 4 modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida y 4 modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única, con riostras XL principalmente conformadas de ángulos laminados e incluyendo algunos perfiles XL plegados. Estos modelos permiten estudiar el modo de pandeo global de las diagonales XL, el plano de pandeo, pandeo local, capacidad a tracción y compresión máxima, degradación de la capacidad a compresión a distintos niveles de deriva de entrepiso, fuerzas solicitantes sobre las placas gusset y curva de histéresis de los pórticos arriostrados.

En torno a una esbeltez local de 8,0 se produce una transición del drift en que se registra la presencia de pandeo local en la riostra XL. En perfiles XL con una λ_L superior exhiben mayoritariamente un pandeo local a un drift de 0,28% (el mínimo observado fue a 0,20%), en tanto que perfiles XL con una λ_L inferior a 8,0 a un drift de 0,39%. Si bien, se produce una mayor capacidad de deformación, el pandeo local ocurre para un drift bastante menor al drift límite para estructuras de acero (clasificación “Otras estructuras”) de la norma NCh2369.Of2003. Por otro lado, al diseñar la conexión de la riostra mediante un diseño por capacidad de las diagonales, se debe considerar una fuerza de diseño respecto a una resistencia axial esperada de las riostras superior a su resistencia nominal.

*Con mucho cariño para
mis padres y hermana.*

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mis padres, Hugo y María Teresa, por habernos dado a mi hermana y a mí la oportunidad y herramientas de emprender nuevas etapas, por todo el cariño y por siempre apoyarme en los momentos difíciles durante el estudio de esta carrera y la realización de este trabajo. Quiero agradecer a mi hermana, Constanza, por todo el apego, apoyo y momentos vividos desde pequeños. Te admiro por siempre cumplir lo que te propones de manera sobresaliente y gracias por todo lo que he aprendido de ti. También agradezco a mi cuñado, Seba, por los buenos momentos y risas, nuevos conocimientos en la música, y por el apoyo y los consejos que me han dado junto a mi hermana para cumplir esta etapa. Estaré eternamente agradecido, ¡son increíbles!

Quiero agradecer al profesor Ricardo Herrera por la oportunidad de poder llevar a cabo mi trabajo de título con él, por todo el apoyo y por guiarme en cada una de las dudas que surgían durante su realización con una gran paciencia, muchas gracias profesor. Agradezco también a los profesores Ramón Montecinos y Juan Felipe Beltrán por aceptar formar parte de la comisión de este trabajo, por su ayuda y por los conocimientos entregados. Agradezco a todos los profesores que han formado parte de mi etapa universitaria y escolar.

A mis abuelitas Ana y Javiera por todo el cariño que siempre me han brindado y a mis abuelos, Luis y Hugo, que desde arriba me entregan su apoyo y protección. Agradezco también a mis innumerables tías, tíos, primas y primos por el bienestar y regocijo durante todos estos años. A Enzo, Coni, Francisco, Javier, Franco, Saúl y Cata por su apoyo, experiencias y viajes vividos y por los que se vendrán.

Agradezco a mis amigos de la universidad por todas las anécdotas, por nunca parar de hacerme reír durante todos estos años y por el mutuo apoyo a lo largo de esta etapa, agradezco la amistad de cada uno de ustedes, y también a mis amigos del Campvs por su apreciada amistad que desde chicos nos conocemos, por mantenernos unidos, por todos los momentos y por todas sus alegrías y apoyo. ¡Sin sus risas esta etapa no hubiera sido lo mismo!

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivos Generales.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Organización de la Memoria de Título.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Marco normativo para el diseño de riostras XL y conexiones de diagonales sísmicas	6
2.1.1. Requisitos de la norma NCh2369.Of2003.....	6
2.1.2. Requisitos de la norma ANSI/AISC 360-16.....	7
2.1.3. Requisitos de la norma ANSI/AISC 341-16.....	12
2.1.4. Requisitos de la norma AISI S100-16.....	18
2.2. Estudios numéricos y experimentales	23
2.2.1. Molina (2014).....	23
2.2.2. Claverie (2016).....	25
2.2.3. Guerrero (2017).....	30
2.2.4. Marsh (1997).....	35
CAPÍTULO 3. CALIBRACIÓN ESQUEMA DE MODELACIÓN CON ENSAYOS EXPERIMENTALES	39
3.1. Análisis de pandeo lineal.....	40
3.1.1. Materiales.....	40
3.1.2. Contacto	40
3.1.3. Mallado	41
3.1.4. Restricciones en apoyos.....	42
3.1.5. Modo de pandeo	42
3.2. Análisis no lineal.....	44
3.2.1. Restricciones en apoyos.....	44
3.2.2. Historial de desplazamientos.....	44
3.2.3. Contacto	45
3.2.4. Materiales.....	46
3.2.5. Imperfección inicial.....	49
3.2.6. Mallado	50
3.2.7. Modo de falla y respuesta histerética numérica vs experimental.....	53
CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DE MARCOS ARRIOSTRADOS.....	62
4.1. Configuración de los marcos estructurales y selección de perfiles XL.....	62
4.2. Diseño de conexiones	65

4.2.1. Conexión de la diagonal	65
4.2.2. Conectores intermedios.....	71
4.3 Análisis de pandeo lineal.....	73
4.3.1. Materiales.....	73
4.3.2. Contacto	73
4.3.3. Mallado	74
4.3.4. Restricciones en apoyos.....	76
4.3.5. Modos de pandeo.....	77
4.4. Análisis no lineal.....	78
4.4.1. Materiales.....	78
4.4.2. Imperfección inicial.....	79
4.4.3. Contacto, mallado y restricciones en apoyos	80
4.4.4. Historial de desplazamientos.....	80
CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
5.1. Esbeltez de las diagonales XL	82
5.2. Modo de falla.....	85
5.2.1. Pandeo global.....	85
5.2.2. Plano de pandeo.....	89
5.2.3. Pandeo local	90
5.3. Capacidad a tracción y compresión máxima	94
5.4. Capacidad a tracción y compresión a distintos niveles de deriva de entrepiso	99
5.5. Fuerza máxima en placas gusset	105
5.6. Desplazamiento fuera del plano de la placa central de los pórticos arriostrados en X	109
5.7. Curva de histéresis de los pórticos arriostrados	112
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	116
6.1. Calibración esquema de modelación de perfiles XL.....	116
6.2. Modelación de perfiles XL como parte de pórticos arriostrados	118
6.2.1. Pandeo global y pandeo local de perfiles XL	118
6.2.2. Capacidad a compresión y tracción de perfiles XL.....	119
6.2.3. Fuerzas solicitantes y diseño sobre las placas gusset	120
6.2.4. Curva de histéresis pórticos arriostrados	122
6.3. Recomendaciones.....	122
6.4. Futuras líneas de investigación	123
BIBLIOGRAFÍA	125
ANEXOS	127
Anexo A. Propiedades geométricas de los perfiles.....	128
Anexo B. Resumen de resultados	130
Anexo C. Análisis de sensibilidad formulación del tipo de contacto en análisis no lineal	136
Anexo D. Dimensiones de placas gusset.....	139

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas del acero obtenidas del ensayo de tracción por Guerrero (2017).	40
Tabla 3.2: Análisis de sensibilidad módulo tangente.....	47
Tabla 3.3: Análisis de sensibilidad imperfección inicial.	49
Tabla 3.4: Análisis de sensibilidad mallado de elementos finitos.	51
Tabla 4.1: Perfiles XL en pórtico arriostrado en X.....	63
Tabla 4.2: Perfiles XL en pórtico arriostrado en V invertida.	63
Tabla 4.3: Perfiles XL en Diagonal única.	63
Tabla 4.4: Límite separación entre conectores intermedios.	72
Tabla 4.5: Propiedades nominales de los materiales.	73
Tabla 4.6: Deriva de entrepiso en cada incremento de la amplitud del historial de desplazamientos cíclico.	81
Tabla 5.1: Longitud y esbelteces de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 [m].	83
Tabla 5.2: Longitud y esbelteces de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 4,25 [m].	84
Tabla 5.3: Longitud y esbelteces de las riostras de los modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida con altura de entrepiso de 2,85 [m].	84
Tabla 5.4: Longitud y esbelteces de las riostras de los modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única con altura de entrepiso de 2,85 [m].	84
Tabla 5.5: Deriva de entrepiso que alcanza a sostener la diagonal XL antes de la ocurrencia de pandeo global y deriva de entrepiso en que se registra el pandeo local.....	91
Tabla 5.5: Deriva de entrepiso que alcanza a sostener la diagonal XL antes de la ocurrencia de pandeo global y deriva de entrepiso en que se registra el pandeo local (continuación).	92
Tabla 5.6: Fuerza de compresión de diagonales XL a distintos niveles de drift.	101
Tabla A.1: Propiedades geométricas de los perfiles XL laminados.	128
Tabla A.2: Propiedades geométricas de los perfiles XL plegados.	128
Tabla A.3: Propiedades geométricas de los perfiles IN utilizados para vigas y columnas.	128
Tabla A.4: Propiedades geométricas de los perfiles doble t utilizados para vigas y columnas en modelo XL 25x36,7 Diagonal única.	129

Tabla B.1: Esbelteces de las diagonales XL, modo de pandeo global, plano de pandeo y pandeo local.....	130
Tabla B.1: Esbelteces de las diagonales XL, modo de pandeo global, plano de pandeo y pandeo local (continuación).	131
Tabla B.2: Resistencia a tracción y compresión y degradación de la capacidad a compresión a distintas derivas de entrepiso.....	132
Tabla B.2: Resistencia a tracción y compresión y degradación de la capacidad a compresión a distintas derivas de entrepiso (continuación).	133
Tabla B.3: Fuerzas solicitantes en cada eje sobre placas gusset.	134
Tabla B.3: Fuerzas solicitantes en cada eje sobre placas gusset (continuación).	135
Tabla C.1: Análisis de sensibilidad módulo tangente – Formulación program controlled.	136
Tabla C.2: Análisis de sensibilidad imperfección inicial – Formulación program controlled.....	136
Tabla C.3: Análisis de sensibilidad módulo tangente – Formulación MPC.	137
Tabla C.4: Análisis de sensibilidad imperfección inicial – Formulación MPC.	137
Tabla C.5: Análisis de sensibilidad módulo tangente – Formulación combinación program controlled y MPC.....	138
Tabla C.6: Análisis de sensibilidad imperfección inicial – Formulación combinación program controlled y MPC.....	138
Tabla D.1: Dimensiones de placas gusset esquinas.....	139
Tabla D.2: Dimensiones de placas gusset centradas al medio de la viga en pórticos arriostrados tipo Chevron.	140

Índice de Figuras

Figura 1.1: Pandeo global de riostras XL durante el terremoto de 2010 Maule, Chile. (a) Producto del pandeo local de las alas. (b) Pandeo torsional. (Montecinos et al., 2012).....	2
Figura 1.2: Sección transversal, ejes principales y ejes geométricos del perfil XL.	3
Figura 2.1: Relación ancho/espesor perfil ángulo. Fuente: NCh2369.Of2003 (INN, 2003).	7
Figura 2.2: Excentricidad de la conexión para perfiles ángulos en cálculo del factor de corte diferido (U). Fuente: Adaptado de AISC 360-16.	11
Figura 2.3: Requerimiento en la conexión de la placa gusset de la diagonal para desarrollar capacidad de rotación. Fuente: Adaptado de AISC 341-16.	17
Figura 2.4: Geometría de la placa de conexión (Molina, 2014).	24
Figura 2.5: Condiciones de borde de desplazamiento y giro del modelo (Claverie, 2016).	26
Figura 2.6: Geometría placas gussets y conectores intermedios (Claverie, 2016).	26
Figura 2.7: Modos de falla por flexión, flexotorsión y torsión (Claverie, 2016).	27
Figura 2.8: Historial de desplazamientos cíclicos (Claverie, 2016).	28
Figura 2.9: Perfiles XL construidos (Guerrero, 2017).	31
Figura 2.10: Modelo 3D montaje experimental (Guerrero, 2017).....	32
Figura 2.11: Montaje experimental (Guerrero, 2017).....	33
Figura 2.12: Historial de desplazamiento cíclico incremental (Guerrero, 2017).	34
Figura 2.13 Perfiles XL ensayados (Guerrero, 2017).	34
Figura 2.14: Nomenclatura ejes principales del perfil XL utilizados por Marsh (Marsh, 1997). .	36
Figura 3.1: Superficie de tipo contact y de tipo target (ANSYS, Inc., 2022c).....	40
Figura 3.2: Elemento tipo SOLID186 homogéneo (ANSYS, Inc., 2022b).	41
Figura 3.3: Superficies donde se definen las restricciones en apoyos.	42
Figura 3.4: Modo de pandeo análisis lineal perfil XL largo (Factor de amplificación: 130).....	43
Figura 3.5: Modo de pandeo análisis lineal perfil XL intermedio (Factor de amplificación: 94). 43	
Figura 3.6: Modo de pandeo análisis lineal perfil XL corto (Factor de amplificación: 27).....	43
Figura 3.7: Historial de desplazamientos cíclicos.	45
Figura 3.8: Curva tensión-deformación con endurecimiento isotrópico bilineal.	47
Figura 3.9: Modo de falla perfil XL corto en función del módulo tangente de la curva tensión-deformación bilineal.	48

Figura 3.10: Mallado de elementos finitos razón 1:300 – Perfil XL corto (Riostra 3).....	52
Figura 3.11: Modo de falla numérico perfil XL largo.	54
Figura 3.12: Modo de falla experimental perfil XL largo (Guerrero, 2017).....	54
Figura 3.13: Curva de histéresis numérica vs experimental perfil XL largo.	55
Figura 3.14: Modo de falla numérico perfil XL intermedio.....	56
Figura 3.15: Modo de falla experimental perfil XL intermedio (Guerrero, 2017).	57
Figura 3.16: Curva de histéresis numérica vs experimental perfil XL intermedio.....	58
Figura 3.17: Modo de falla numérico perfil XL corto.	59
Figura 3.18: Modo de falla experimental perfil XL corto (Guerrero, 2017).....	60
Figura 3.19: Curva de histéresis numérica vs experimental perfil XL corto.	60
Figura 4.1: Pórtico arriostrado en X.	64
Figura 4.2: Pórtico arriostrado en V invertida.	64
Figura 4.3: Pórtico arriostrado en diagonal única.....	65
Figura 4.4: Método de la Fuerza Uniforme (UFM) (Fuente: Tamboli, A., 2017).....	67
Figura 4.5: Distribución de fuerzas para el método de la fuerza uniforme (Fuente: Tamboli, A., 2017).	67
Figura 4.6: Geometría estándar utilizada del gusset.	68
Figura 4.7: Conexión diagonales – viga en pórticos arriostrados tipo V invertida.	69
Figura 4.8: Reducción ancho efectivo de Whitmore.	70
Figura 4.9: Ejemplos de medición separación entre conectores intermedios y separación entre el centroide del conector intermedio y el borde del gusset o placa central.....	72
Figura 4.10: Disposición de conectores intermedios.	73
Figura 4.11: Mallado de elementos finitos pórtico arriostrado.	75
Figura 4.12: Restricciones en apoyos y condiciones de borde en pórtico arriostrado en X.....	76
Figura 4.13: Restricción desplazamiento fuera del plano (eje Z) en las superficies normales al eje Z de las alas de cada columna ubicada en la zona superior de cada columna.....	76
Figura 4.14: Aplicación de fuerza unitaria en el nudo superior izquierdo.	77
Figura 4.15: Ejemplos de primer modo de pandeo.....	78
Figura 4.16: Curva tensión-deformación con endurecimiento isotrópico bilineal.	79
Figura 4.17: Historial de desplazamientos cíclico.....	81

Figura 5.1: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 [m].	85
Figura 5.2: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 4,25 [m].	86
Figura 5.3: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida con altura de entrepiso de 2,85 [m].	86
Figura 5.4: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única con altura de entrepiso de 2,85 [m].	87
Figura 5.5: Modo de pandeo global de la riostra continua de modelos de pórticos arriostrados en X en función de la razón de esbelteces global y local.	87
Figura 5.6: Modo de pandeo global de la riostra discontinua de modelos de pórticos arriostrados en X en función de la razón de esbelteces global y local.	87
Figura 5.7: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida en función de la razón de esbelteces global y local.	88
Figura 5.8: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única en función de la razón de esbelteces global y local.	88
Figura 5.9: Ejemplo pandeo global en torno a eje principal U-U.	89
Figura 5.10: Ejemplo pandeo global en torno a eje geométrico vertical Y-Y.	90
Figura 5.11: Ubicación de la rótula plástica.	94
Figura 5.12: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 [m].	94
Figura 5.13: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 4,25 [m].	95
Figura 5.14: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida.	95
Figura 5.15: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única.	96
Figura 5.16: Razón capacidad a compresión o tracción entre riostras con y sin imperfección inicial.	97
Figura 5.17: Capacidad a compresión en función de la esbeltez global.	97
Figura 5.18: Razón capacidad a compresión o tracción obtenida en ANSYS vs nominal.	98
Figura 5.19: Degradación de la resistencia a compresión de las diagonales XL para cada configuración de pórticos arriostrados.	100

Figura 5.20: Ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados en X.	102
Figura 5.21: Ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados tipo V invertida.....	103
Figura 5.22: Ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados tipo Diagonal única.....	104
Figura 5.23: Sistema de coordenadas para medición de fuerza solicitante en placas gussets.....	105
Figura 5.24: Fuerza máxima solicitante según cada eje en placas gussets – Pórticos arriostrados en X.....	106
Figura 5.25: Fuerza máxima solicitante según cada eje en placas gussets – Pórticos arriostrados tipo V invertida.....	107
Figura 5.26: Fuerza máxima solicitante según cada eje en placas gussets – Pórticos arriostrados tipo Diagonal única.....	108
Figura 5.27: Desplazamiento fuera del plano de la placa central del pórtico arriostrado en X – modelo XL 13x11,8 (altura de entrepiso 3,5 [m])......	110
Figura 5.28: Desplazamiento fuera del plano de la placa central del pórtico arriostrado en X – modelo XL 13x19,0 (altura de entrepiso 3,5 [m])......	111
Figura 5.29: Desplazamiento fuera del plano de la placa central del pórtico arriostrado en X – modelo XL 20x30,1 (altura de entrepiso 4,25 [m])......	111
Figura 5.30: Ejemplos de corte basal vs drift y suma fuerza horizontal diagonales vs drift – Pórticos arriostrados en X.....	113
Figura 5.31: Ejemplos de corte basal vs drift y suma fuerza horizontal diagonales vs drift – Pórticos arriostrados tipo V invertida.....	114
Figura 5.32: Ejemplos de corte basal vs drift y suma fuerza horizontal diagonales vs drift – Pórticos arriostrados tipo Diagonal única.....	115
Figura A.1: Ejes principales y geométricos perfil XL.....	129
Figura A.2: Ejes principales perfil doble t.....	129
Figura D.1: Dimensiones de placa gusset esquina.....	139
Figura D.2: Dimensiones de placa gusset centrada al medio de la viga en pórtico arriostrado tipo Chevron.....	140

Capítulo 1. Introducción

1.1. Motivación

Durante nuestra historia los terremotos han sido una de las grandes fuentes de liberación de energía por parte de la tierra. En particular, el territorio chileno se identifica por una recurrente periodicidad sísmica con altos niveles de magnitud, induciendo importantes demandas de aceleración sobre las estructuras civiles, siendo fundamental el diseño sismorresistente para su buen desempeño ante estas sollicitaciones de modo de asegurar su estabilidad y el resguardo de sus habitantes.

El diseño de obras industriales requiere la protección de vida, así como la continuidad de operación de la industria ante sismos severos, y frente a ello en el sector industrial ha predominado el uso de acero estructural como material de construcción debido a que se caracteriza por su resistencia, ductilidad y facilidad en el montaje. En gran parte de la actividad industrial se utilizan equipos e instalaciones que, para mantener los procesos y servicios esenciales, es necesario que estos y sus anclajes permanezcan fijos de manera de reducir a un tiempo mínimo la paralización de la producción. Para esto, se han adoptado sistemas estructurales como marcos de acero arriostrados, cuyas riostras son los elementos encargados de transmitir alternadamente esfuerzos de compresión y tracción para el control de los desplazamientos laterales de las estructuras industriales. En la práctica chilena algunos de los arriostramientos empleados se componen de perfiles doble T, perfiles cajón y ángulos unidos vértice-vértice (perfil XL).

Durante el terremoto del Maule de 2010 en Chile ($M_w=8,8$) ocurrieron varias fallas no previstas en riostras de perfiles XL. Se observó que estas inestabilidades se originaron principalmente a causa de pandeo local de sus alas, pandeo torsional y fractura en sus conexiones con las columnas como se observa en la Figura 1.1 (Montecinos et al., 2012).



Figura 1.1: Pandeo global de riostras XL durante el terremoto de 2010 Maule, Chile. (a) Producto del pandeo local de las alas. (b) Pandeo torsional. (Montecinos et al., 2012).

Los ángulos dispuestos en XL (Figura 1.2) son perfiles armados a partir de dos ángulos de iguales dimensiones unidos vértice-vértice mediante planchuelas intermedias equiespaciadas a lo largo de la diagonal, conectados a la estructura a través de placas conectoras en los extremos. El perfil XL se destaca por su ventaja de instalación en obra y posterior accesibilidad para la mantención de sus componentes.

Anteriormente en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile se han desarrollado dos estudios numéricos y uno experimental respecto a los modos de falla predominantes en perfiles XL de acero estructural. En el primero de ellos se implementó un análisis mediante elementos finitos estudiando el comportamiento de una amplia gama de perfiles XL ante desplazamientos monótono crecientes como diagonal aislada con condiciones de borde de arriostamiento en cruz de acuerdo con la norma NCh2369.Of2003 (Molina, 2014); más adelante, Claverie (2016) continua esta investigación considerando secciones no esbeltas según NCh2369.Of2003 (INN, 2003), modelando los componentes del perfil por separado (ángulos y conectores) y desarrollando el análisis frente a cargas cíclicas incrementales y diferentes espaciamientos de conectores intermedios. Estos estudios permitieron establecer relaciones entre el modo de falla y las demandas sobre las conexiones con la razón entre los parámetros de esbeltez global y local de las diagonales.

Con la necesidad de verificar los resultados obtenidos, Guerrero (2017) realiza una etapa experimental de 6 especímenes, en la que se ensayan 3 pares de perfiles XL diseñados en base a la normativa AISC (AISC, 2016a, b) conformados por ángulos de iguales dimensiones y misma cantidad de conectores intermedios, variando solamente su longitud de modo de esperar una falla flexural, flexotorsional o torsional según sus parámetros de esbeltez. Sin embargo, los 6 perfiles

XL exhibieron un pandeo flexural con grandes deformaciones fuera del plano junto con una rótula plástica presente en el ala horizontal de un ángulo, entre el conector central y un extremo, sector donde se propaga gradualmente una grieta por fatiga del material. Cabe destacar que los análisis numéricos se diferenciaban de los ensayos experimentales en las restricciones de desplazamiento y giro del conector central, en donde en este último se modelaba la riostra como diagonal aislada.

Este estudio busca continuar de forma numérica el análisis sobre los modos de falla experimentados por perfiles XL, empleando una metodología como arriostramientos parte de diferentes disposiciones en marcos estructurales bajo condiciones de desplazamientos cíclicos incrementales en el programa de elementos finitos ANSYS Workbench 2020 R2 (ANSYS Inc., 2022a). Se pretende extender los antecedentes acerca de los parámetros geométricos de estos perfiles vinculados con su comportamiento y solicitaciones sobre sus conexiones que permitan entregar recomendaciones de diseño orientadas a mejorar su desempeño sísmico y estimar que tan conservador son los resultados determinados con las disposiciones de la normativa AISC 360-16 (AISC, 2016b).

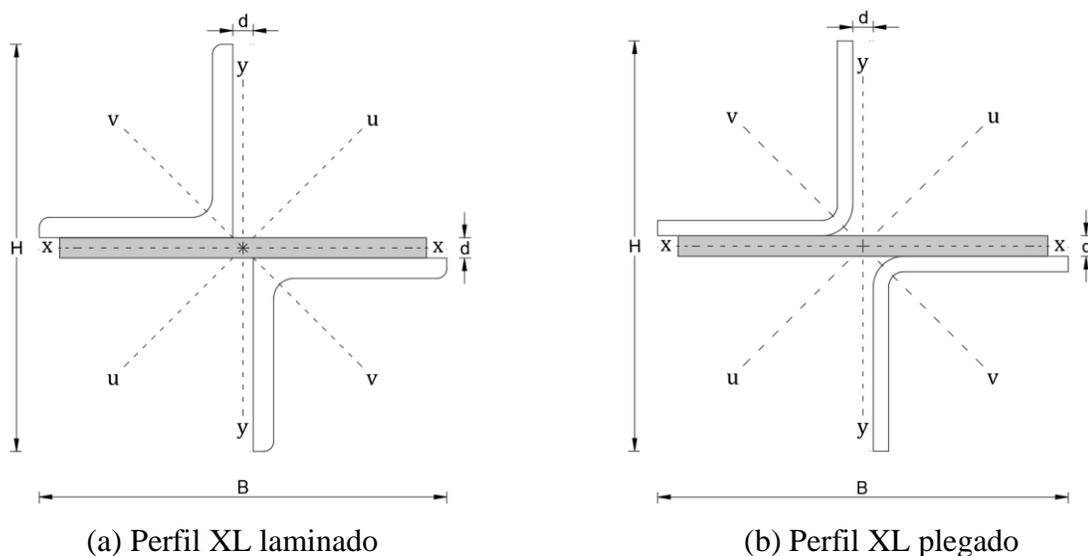


Figura 1.2: Sección transversal, ejes principales y ejes geométricos del perfil XL.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

Identificar los principales modos de falla y estudiar el desempeño de perfiles XL de acero estructural sometidos a deformaciones cíclicas incrementales de compresión y tracción, comúnmente utilizados en la práctica chilena como arriostramientos de marcos en estructuras industriales, a través de un análisis no lineal en el programa de elementos finitos ANSYS (ANSYS Inc., 2022a) como parte de diferentes configuraciones de marcos estructurales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Calibrar un modelo numérico desarrollado por Molina (2014) y Claverie (2016) con los resultados experimentales en el estudio de Guerrero (2017).
- Establecer una relación entre los parámetros de esbeltez de los perfiles con el modo de falla asociado para cada una de las configuraciones de marcos estructurales estudiados.
- Estudiar el comportamiento de los perfiles XL en compresión post pandeo, así como su respuesta inelástica en tracción e identificar las demandas de ductilidad.
- Comparar la resistencia de diseño de los perfiles XL según los criterios de la normativa AISC 360-16 (AISC, 2016b) con respecto a los resultados obtenidos del análisis no lineal en ANSYS (ANSYS Inc., 2022a).
- Identificar deficiencias en la identificación de modos de falla y capacidad de conexiones.
- Estudiar la interacción en el rango no lineal entre las riostras XL parte del mismo marco estructural.

1.3. Organización de la Memoria de Título

El presente trabajo de título se organiza en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2. Marco Teórico:** se revisan las normativas chilena y extranjeras en relación con el diseño de perfiles XL y conexiones de diagonales sísmicas, y se recopilan antecedentes acerca de estudios numéricos y experimentales de perfiles XL desarrollados previamente.
- **Capítulo 3. Calibración Esquema de Modelación con Ensayos Experimentales:** se realiza una calibración del esquema de modelación de perfiles XL en el software ANSYS Workbench desarrollado por Molina (2014) y Claverie (2016) con los resultados experimentales del estudio de Guerrero (2017), en el que se procede a modelar los especímenes ensayados por Guerrero (2017) de modo de calibrar a través de un análisis de sensibilidad los parámetros de módulo tangente de la curva bilineal de tensión-deformación de los materiales, factor de escala de la imperfección inicial del análisis no lineal, mallado de elementos finitos y tipo de formulación entre las regiones de contacto de acuerdo con el modo de falla exhibido de los especímenes y sus respectivas curvas de histéresis.

- **Capítulo 4. Modelación de Marcos Arriostrados:** se presentan las dimensiones y configuraciones de los pórticos arriostrados, selección de los perfiles XL, diseño de conexiones y conectores intermedios, y la modelación de los pórticos arriostrados en cuanto a los materiales, tipo de contacto, mallado de elementos finitos, restricciones en los apoyos, imperfección inicial del análisis no lineal e historial de desplazamientos aplicado, entre otros factores.
- **Capítulo 5. Presentación y Análisis de Resultados:** se muestran los resultados obtenidos y posterior análisis en cuanto a la esbeltez global y local, modos de pandeo global y su plano de pandeo, pandeo local, capacidad a tracción y compresión máxima, degradación de la resistencia a compresión a distintos niveles de drift de las diagonales XL, fuerzas solicitantes sobre las placas gusset, desplazamiento fuera del plano de la placa central de los pórticos arriostrados en X que conecta ambas diagonales, y curva de histéresis de los marcos arriostrados obtenidos de los modelos numéricos.
- **Capítulo 6. Conclusiones y Comentarios:** se redactan las conclusiones de este trabajo a partir de los resultados obtenidos de los modelos numéricos y se presentan algunas futuras líneas de investigación sobre perfiles XL.

Capítulo 2. Marco Teórico

El presente capítulo tiene como objetivo recopilar antecedentes acerca de estudios numéricos y experimentales sobre el comportamiento de perfiles XL desarrollados hasta el momento en Chile y en otros países, y revisar las normativas chilena y estadounidenses de acuerdo con sus disposiciones de diseño de riostras XL, conexiones de diagonales sísmicas y sistemas estructurales de marcos arriostrados concéntricamente.

2.1. Marco normativo para el diseño de riostras XL y conexiones de diagonales sísmicas

2.1.1. Requisitos de la norma NCh2369.Of2003

La norma NCh2369.Of2003 (INN, 2003) establece los criterios y requisitos para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales en Chile, orientada principalmente a estructuras de acero, la cual refleja la práctica empleada por empresas de ingeniería líderes del país.

En el capítulo 8: “Disposiciones especiales para estructuras de acero”, en su sección 8.3.3, se indica que los elementos de sistemas sismorresistentes verticales que trabajen en compresión deben poseer una esbeltez global inferior a:

$$\frac{K \cdot L}{r} \leq 1,5\pi \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.1)$$

Donde,

K: coeficiente de longitud de pandeo.

L: longitud del arriostramiento.

r: radio de giro.

E: módulo de elasticidad.

F_y: tensión de fluencia mínima.

En cuanto a la esbeltez local del elemento, el mismo apartado establece que los arriostramientos deben tener relaciones ancho/espesor menores que el límite λ_r según la Tabla 8.1 de la norma, para no desarrollar pandeo local. En particular, las alas de ángulos laminados o plegados (Figuras 2.1a y 2.1b respectivamente) que conforman perfiles XL deben cumplir con una esbeltez local para cada caso menor que:

$$\text{Ángulos laminados: } \frac{b}{t} \leq 0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.2)$$

$$\text{Ángulos plegados: } \frac{b}{t} \leq 0,37 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.3)$$

Donde,

b: ancho nominal del ala en perfiles ángulos laminados, o distancia desde el borde libre del ala hasta el inicio de la curva de pliegue en perfiles ángulos conformados en frío (ver Figura 2.1).

t: espesor del ala.

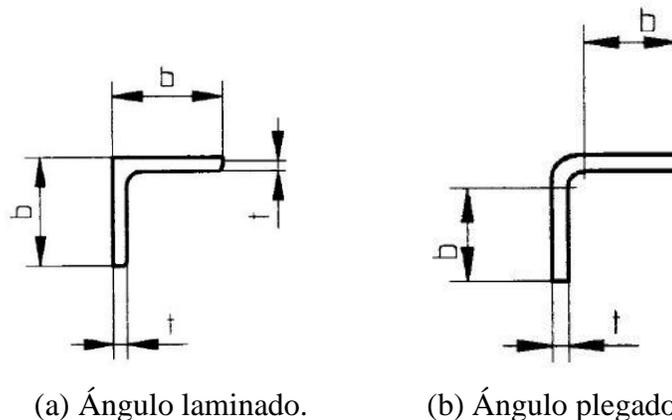


Figura 2.1: Relación ancho/espesor perfil ángulo. Fuente: NCh2369.Of2003 (INN, 2003).

Relativo al diseño de conexiones de diagonales sísmicas, la sección 8.5.2 establece que estas conexiones se deben diseñar para resistir el 100% de la capacidad en tracción de la sección bruta de las diagonales sísmicas. Esta sección considera una tensión de fluencia mínima del material de la diagonal.

2.1.2. Requisitos de la norma ANSI/AISC 360-16

La norma estadounidense ANSI/AISC 360-16: “Specification for Structural Steel Buildings” (AISC, 2016b) establece criterios y disposiciones para el diseño, fabricación y montaje de sistemas de acero estructural. A continuación, se presentan requerimientos dimensionales y disposiciones para determinar la capacidad a compresión de perfiles XL definidas en este código.

El perfil XL al ser un miembro armado, conformado por dos ángulos de iguales dimensiones conectados vértice-vértice a través de planchuelas intermedias equiespaciadas a lo largo de la diagonal, la norma ANSI/AISC 360-16 hace referencia al capítulo E6 respecto al diseño a compresión de perfiles armados.

E6.1 Resistencia a la compresión

La resistencia nominal de compresión de miembros armados se debe determinar según las secciones E3, E4 o E7, sujetas a la siguiente modificación. La esbeltez global del perfil se ve modificada en un eje cuando el modo de pandeo involucra deformaciones relativas que producen esfuerzos de corte en los conectores intermedios entre los componentes individuales, de la siguiente forma (para conectores soldados):

Cuando $\frac{a}{r_i} \leq 40$

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_m = \left(\frac{L_c}{r}\right)_o \quad (2.4)$$

Cuando $\frac{a}{r_i} > 40$

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{L_c}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{K_i a}{r_i}\right)^2} \quad (2.5)$$

Donde,

L_c : largo efectivo del perfil. ($L_c = K \cdot L$)

a : separación entre conectores intermedios.

r_i : radio de giro mínimo del componente individual del miembro armado.

$K_i = 0,86$ para la categoría “otros casos”, en el que perfiles XL recaen en esta clasificación.

Teniendo en consideración que se trabajará con riostras XL con ángulos laminados no esbeltos de acuerdo con la ecuación 2.2, en donde la Tabla B4.1a del código ANSI/AISC 360-16 establece el mismo límite de esbeltez, la resistencia a compresión del miembro armado se determina según los estados límites descritos en las secciones E3: “Pandeo flexural de miembros sin elementos esbeltos” y E4: “Pandeo torsional y flexotorsional de ángulos individuales y miembros sin elementos esbeltos”. El factor de reducción de resistencia (ϕ_c) para determinar la resistencia de diseño a compresión, $\phi_c P_n$, y el factor de seguridad (Ω_c) para determinar la resistencia permisible a compresión, P_n/Ω_c , equivalen a $\phi_c = 0,90$ (LRFD) y $\Omega_c = 1,67$ (ASD) respectivamente.

En base a las secciones E3 y E4, la resistencia nominal a la compresión se calcula según la siguiente expresión:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2.6)$$

Donde,

P_n : resistencia nominal a compresión.

F_{cr}: tensión crítica.

A_g: área bruta del perfil.

La tensión crítica (F_{cr}) viene dada por el menor valor determinado por los estados límites de pandeo flexural, flexotorsional y torsional.

E3. Pandeo flexural de miembros sin elementos esbeltos

Cuando $\frac{L_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \quad (2.7)$$

Cuando $\frac{L_c}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = 0,877 F_e \quad (2.8)$$

Donde F_e corresponde al esfuerzo elástico de pandeo flexural global determinado según:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \quad (2.9)$$

E4. Pandeo torsional y flexotorsional de ángulos individuales y miembros sin elementos esbeltos

La sección E4 establece que F_{cr} se determina con las mismas expresiones que el apartado E3 (ecuaciones 2.7 y 2.8), sin embargo, F_e se define como el esfuerzo elástico de pandeo torsional o flexo-torsional, en el que para elementos doblemente simétricos torciéndose en torno a su centro de corte queda expresado por:

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{L_{cz}^2} + GJ\right) \frac{1}{I_x + I_y} \quad (2.10)$$

Donde,

C_w: constante de alabeo del perfil.

L_{cz}: largo efectivo del perfil para pandeo en torno al eje longitudinal de este.

G: módulo de elasticidad de corte.

J: constante torsional del perfil.

I_x, I_y: momento de inercia respecto a los ejes principales.

E6.2 Requisitos dimensionales

Entre algunos requisitos dimensionales, la relación de esbeltez definida por la separación entre conectores y el radio de giro mínimo de un ángulo individual, a/r_i , no debe exceder de las 3/4 partes de la esbeltez global gobernante del perfil XL.

Por otro lado, la resistencia a tracción de los elementos se determina según el capítulo D del código ANSI/AISC 360-16.

D2. Resistencia a tracción

La resistencia de diseño a tracción, $\phi_t P_n$, y la resistencia permisible a tracción, P_n/Ω_t , de los elementos en tracción corresponde al menor valor obtenido de acuerdo con los estados límites de fluencia en tracción de la sección bruta y fractura en tracción de la sección neta.

(a) Fluencia en tracción de la sección bruta

$$P_n = F_y A_g \quad (2.11)$$

Donde,

Pn: resistencia nominal a tracción.

El factor de reducción de resistencia equivale a $\phi_t = 0,90$ (LRFD) y el factor de seguridad equivale a $\Omega_t = 1,67$ (ASD).

(b) Fractura en tracción de la sección neta

$$P_n = F_u A_e \quad (2.12)$$

Donde,

Pn: resistencia nominal a tracción.

Fu: tensión de rotura mínima.

Ae: área neta efectiva determinada según la sección D3.

El factor de reducción de resistencia equivale a $\phi_t = 0,75$ (LRFD) y el factor de seguridad equivale a $\Omega_t = 2,00$ (ASD).

D3. Área neta efectiva

El área bruta del perfil, A_g , y el área neta, A_n , de elementos en tracción se debe determinar de acuerdo con las disposiciones de la sección B4.3.

El área neta efectiva de elementos en tracción se determina según la siguiente expresión:

$$A_e = A_n U \quad (2.13)$$

Donde,

An: área neta.

U: factor de corte diferido (*shear lag*) determinado según la Tabla D3.1.

Para los ángulos del perfil XL que se encuentran conectados a la placa gusset por pernos o por soldaduras longitudinales en combinación con soldaduras transversales, el factor de corte diferido (U) se determina según el caso 2 de la Tabla D3.1.

El caso 2 corresponde a todos los miembros en tracción, excepto secciones HSS, donde la carga de tracción es transmitida por sólo algunos pero no todos los elementos de la sección transversal por pernos o por soldaduras longitudinales en combinación con soldaduras transversales. Para el caso de perfiles ángulos, se permite utilizar el caso 8.

De acuerdo con el caso 2, el factor de corte diferido se determina según la siguiente ecuación:

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \quad (2.14)$$

Donde,

\bar{x} : excentricidad de la conexión (Figura 2.2).

l: longitud de la conexión.

El caso 8 corresponde a ángulos simples y dobles, e indica que, si el factor U es calculado según el caso 2, se permite utilizar el mayor valor. En base al caso 8, cuando se utilicen cuatro o más pernos por línea en la dirección de carga, el factor U equivale a 0,80; y cuando se utilicen tres pernos por línea en la dirección de carga (con menos de tres pernos por línea en la dirección de carga, utilizar el caso 2), el factor U equivale a 0,60.

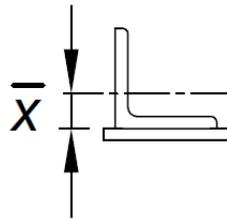


Figura 2.2: Excentricidad de la conexión para perfiles ángulos en cálculo del factor de corte diferido (U). Fuente: Adaptado de AISC 360-16.

2.1.3 Requisitos de la norma ANSI/AISC 341-16

El código ANSI/AISC 341-16: “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings” (AISC, 2016a) es la actual norma vigente del ANSI/AISC que establece los requerimientos de diseño sísmico de estructuras de acero y conexiones en sistemas sismorresistentes (SFRS, por sus siglas en inglés).

Disposiciones de diseño para marcos ordinarios arriostrados concéntricamente (OCBF, por sus siglas en inglés) y marcos especiales arriostrados concéntricamente (SCBF, por sus siglas en inglés) se detallan en los capítulos F1 y F2 del código AISC 341-16 respectivamente. Los requerimientos definidos en el capítulo F de este código son además de los requeridos por el código AISC 360-16 y el código de construcción aplicable (AISC, 2016a).

Los marcos ordinarios arriostrados concéntricamente (OCBF) se definen por el código, en el capítulo F1, como marcos arriostrados por diagonales concéntricamente conectadas, los cuales se espera que proporcionen una capacidad limitada de deformación inelástica en sus elementos y conexiones (AISC, 2016a).

F1.5a Requerimientos básicos en sistemas OCBF

Las diagonales deben satisfacer los requerimientos de la sección D1.1 para elementos moderadamente dúctiles.

Para diagonales de sistemas OCBF, el código establece en la Tabla D1.1 los límites de esbeltez en la relación ancho/espesor de los elementos moderadamente dúctiles, para prevenir pandeo local. En particular las alas de ángulos laminados de elementos moderadamente dúctiles deben cumplir con una esbeltez local inferior a:

$$\frac{b}{t} \leq 0,40 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \quad (2.15)$$

Donde,

R_y : razón entre la tensión de fluencia esperada y la tensión de fluencia mínima del material (F_y).

F1.5b Esbeltez global en sistemas OCBF

La esbeltez global de diagonales de pórticos arriostrados en V o V-invertida debe cumplir la siguiente expresión:

$$\frac{L_c}{r} \leq 4 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.16)$$

La sección F1.6a establece la resistencia requerida para las conexiones de los arriostramientos en sistemas OCBF.

F1.6a Conexiones de diagonales en sistemas OCBF

La resistencia requerida de las conexiones de los arriostramientos se debe determinar utilizando la carga sísmica de sobrerresistencia.

Excepción: La resistencia requerida de la conexión de la diagonal no necesita exceder lo siguiente:

(a) En tracción, la resistencia esperada en tracción de la diagonal, dividida por α_s . Luego, queda expresado por:

$$R_y F_y A_g / \alpha_s \quad (2.17)$$

Donde,

α_s : factor de ajuste del nivel de fuerza LRFD-ASD. $\alpha_s = 1,0$ para LRFD y $\alpha_s = 1,5$ para ASD.

(b) En compresión, la resistencia esperada en compresión de la riosra, dividida por α_s . Se permite considerar el menor valor entre:

$$R_y F_y A_g / \alpha_s \quad (2.18)$$

y:

$$\frac{1,1 F_{cre} A_g}{\alpha_s} \quad (2.19)$$

Donde, la tensión crítica esperada (F_{cre}) se determina del capítulo E del AISC 360-16, utilizando las ecuaciones para F_{cr} , excepto que la tensión de fluencia esperada, $R_y F_y$, se usa en lugar de F_y . El largo del arriostramiento usado para la determinación de F_{cre} no debe exceder la distancia entre extremos de la diagonal.

(c) Cuando perforaciones sobremedidas son utilizadas, la resistencia requerida para el estado límite de deslizamiento no necesita exceder el efecto de la carga sísmica basado en

las combinaciones de carga sin sobrerresistencia según lo estipulado en el código de construcción aplicable.

La carga sísmica de sobrerresistencia se define como el efecto de la carga sísmica horizontal incluyendo sobrerresistencia determinada utilizando el factor de sobrerresistencia, Ω_o , y aplicado según se establece en las combinaciones de carga del código de construcción aplicable (AISC, 2016a).

Los marcos especiales arriostrados concéntricamente (SCBF) se definen por el código, en el capítulo F2, como marcos arriostrados por diagonales concéntricamente conectadas, los cuales se espera que proporcionen una capacidad de deformación inelástica significativa principalmente a través del pandeo de la diagonal en compresión y fluencia de la diagonal en tracción (AISC, 2016a).

F2.5a Requerimientos básicos en sistemas SCBF

Las columnas, vigas y arriostramientos deben cumplir con los requerimientos de la sección D1.1 para elementos altamente dúctiles. Puntales en sistemas MT-SCBF (marcos especiales concéntricamente arriostrados de varios niveles, por sus siglas en inglés) deben cumplir con los requerimientos de la sección D1.1 para elementos moderadamente dúctiles.

Para diagonales de sistemas SCBF, el código estipula en la Tabla D1.1 los límites de esbeltez en la relación ancho/espesor de los elementos altamente dúctiles, para prevenir pandeo local. En particular, las alas de ángulos laminados de elementos altamente dúctiles deben cumplir con una esbeltez local inferior a:

$$\frac{b}{t} \leq 0,32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \quad (2.20)$$

En la sección F2.5b se indican requisitos respecto a la esbeltez global de diagonales, diseño de conectores intermedios para perfiles armados y requerimientos respecto al área neta efectiva de la diagonal.

F2.5b Arriostramientos diagonales en sistemas SCBF

F2.5b(a) Esbeltez global

Los arriostramientos deben poseer una relación de esbeltez global $L_c/r \leq 200$.

F2.5b(b) Conectores intermedios

La relación de esbeltez definida por la separación entre conectores y el radio de giro mínimo de un ángulo individual, a/r_i , no debe exceder de las 2/5 partes de la esbeltez global gobernante del perfil XL.

La suma de la resistencia de corte de los conectores deben ser al menos la resistencia a tracción de cada elemento individual. El espaciamiento entre conectores debe ser uniforme. Al menos se deben disponer dos conectores en el miembro armado. Los conectores no deben ubicarse dentro del cuarto central de la longitud libre de la riostra.

Cuando el modo de pandeo de las riostras no involucra esfuerzos de corte en los conectores intermedios entre los componentes individuales, el diseño de los conectores intermedios no necesita cumplir con esta sección.

En los modelos del presente trabajo se pretende simular una conexión soldada entre los conectores intermedios y los ángulos que conforman el perfil XL. En cuanto a la disposición correspondiente a que los conectores intermedios no deben ubicarse dentro del cuarto central de la longitud libre de la riostra, los modelos no cumplen esta condición. El comentario de la sección F2.5b indica que los conectores apernados no se permiten en la ubicación antes mencionada ya que la presencia de perforaciones puede causar fracturas prematuras en esta zona producto de la formación de una rótula plástica luego de que la riostra ha pandeado (AISC, 2016a).

Ahora bien, de la sección F2.5b(b) se interpreta que no se permite disponer tanto conectores intermedios apernados como soldados en la ubicación anterior, sin embargo, el comentario de la sección F2.5b hace referencia sólo a conectores intermedios apernados, con lo cual no queda claro si esta condición se debe cumplir para ambos casos (conectores intermedios apernados o soldados).

Por otra parte, a diferencia de los marcos especiales concéntricamente arriostrados (SCBF), las disposiciones para marcos ordinarios concéntricamente arriostrados (OCBF) no consideran requisitos adicionales para conectores intermedios respecto al código AISC 360-16.

F2.5b(c) Área neta efectiva

El área neta efectiva de la diagonal no debe ser inferior a su área bruta. Cuando elementos de refuerzo en las diagonales sean utilizados, las siguientes disposiciones aplican:

(1) La tensión de fluencia mínima especificada del refuerzo debe ser equivalente al menos a la tensión de fluencia mínima de la riostra.

(2) Las conexiones del refuerzo a la diagonal deben poseer la resistencia suficiente para desarrollar la resistencia esperada del refuerzo en cada lado de una sección reducida.

La sección F2.6c establece la resistencia requerida en tracción, compresión y flexión para las conexiones de los arriostramientos de sistemas SCBF. A continuación se presentan las disposiciones de diseño estipuladas por el código AISC 341-16 basadas en un diseño por capacidad.

F2.6c Conexiones de diagonales en sistemas SCBF

F2.6c.1 Resistencia requerida en tracción

La resistencia requerida en tracción debe ser la menor entre las siguientes:

(a) La resistencia esperada en tracción de la riostra, dividida por α_s . Luego, queda expresado por:

$$R_y F_y A_g / \alpha_s \quad (2.21)$$

(b) La máxima carga, indicada por análisis, que puede ser transferida al arriostramiento por el sistema.

F2.6c.2 Resistencia requerida en compresión

La resistencia esperada en compresión de la riostra, definida en la sección F2.3., dividida por α_s . Se permite considerar el menor valor entre:

$$R_y F_y A_g / \alpha_s \quad (2.22)$$

y:

$$\frac{F_{cre} A_g}{0,877 \alpha_s} \quad (2.23)$$

F2.6c.3 Acomodación del pandeo de la riostra

Las conexiones de las diagonales deben ser capaces de resistir las fuerzas flexurales o las rotaciones impuestas producto del pandeo de la riostra. Se considera que las conexiones que satisfacen cualquiera de las siguientes disposiciones cumplen este requisito:

(a) Resistencia requerida a flexión. Las conexiones diseñadas para resistir las fuerzas flexurales impuestas por el pandeo de la riostra deben poseer una resistencia flexural igual a la resistencia esperada en flexión de la riostra multiplicada por 1.1 y dividida por α_s . La resistencia esperada en flexión de la riostra debe determinarse como $R_y M_p$ de la riostra en torno al eje crítico de pandeo. Luego, la resistencia requerida a flexión queda expresada por:

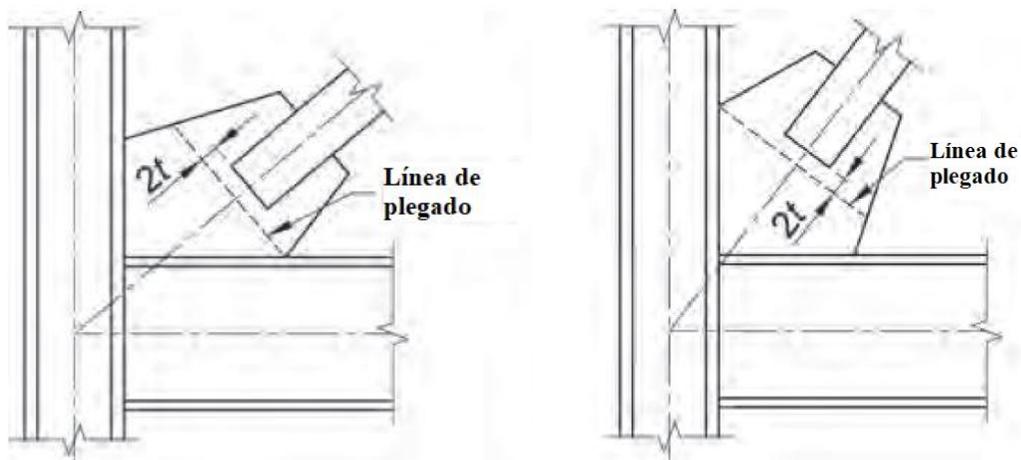
$$\frac{1,1R_y M_p}{\alpha_s} \quad (2.24)$$

Donde,

M_p : Momento de flexión plástico de la riostra.

(b) Capacidad de rotación. El código establece que las conexiones diseñadas para resistir las rotaciones impuestas producto del pandeo de la diagonal deben poseer suficiente capacidad de rotación para acomodar la rotación requerida proveniente del desplazamiento de diseño de entrepiso. En donde, rotaciones inelásticas de la conexión son permitidas.

En el comentario de la sección F2.6c de la norma (AISC, 2016a), se describe que según los estudios de Astaneh-Asl et al. (1986), proporcionar una distancia de 2 veces el espesor de la placa gusset, medida desde donde finaliza la riostra a la línea perpendicular de plegado de la placa (Figura 2.3), es recomendable para que la conexión tenga suficiente capacidad de rotación. También se menciona que, en la práctica, es recomendable considerar una distancia levemente mayor, por ejemplo, $2t + 25$ mm (t = espesor de la placa gusset) de modo de proveer una tolerancia en la construcción.



t = espesor de la placa gusset

Figura 2.3: Requerimiento en la conexión de la placa gusset de la diagonal para desarrollar capacidad de rotación. Fuente: Adaptado de AISC 341-16.

F2.6c.4 Placas Gusset

Para el pandeo fuera del plano de la diagonal, las soldaduras que unen la placa gusset directamente al ala de la viga o columna deben poseer suficiente resistencia de corte igual a:

$$0.6R_y F_y t_p / \alpha_s \times \text{la longitud de la unión} \quad (2.25)$$

Donde, t_p corresponde al espesor del gusset.

Excepción: Alternativamente, estas soldaduras se pueden diseñar para poseer suficiente resistencia para resistir las fuerzas en los bordes de la placa gusset correspondientes a la fuerza del arriostramiento especificada en la sección F2.6c.2 combinada con la resistencia flexural en el eje débil del gusset determinada en presencia de estas fuerzas.

2.1.4. Requisitos de la norma AISI S100-16

El código AISI S100-16: “North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structure Members” establece disposiciones para el diseño de estructuras de acero conformadas en frío.

Para calcular la resistencia a compresión de perfiles XL conformados a partir de ángulos plegados en frío, la norma AISI S100-16 hace referencia a la sección I1.2 de acuerdo con perfiles armados.

I1.2 Miembros compuestos de dos secciones en contacto sujetos a compresión

La resistencia nominal de compresión de miembros armados se debe determinar según la sección E2, sujeto a la siguiente modificación. La esbeltez global del perfil se ve modificada en un eje cuando el modo de pandeo involucra deformaciones relativas que producen esfuerzos de corte en los conectores intermedios entre los componentes individuales, de la siguiente forma:

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{L_c}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \quad (2.26)$$

Entre algunos requisitos dimensionales, la relación de esbeltez definida por la separación entre conectores y el radio de giro mínimo de un ángulo individual, a/r_i , no debe exceder 1/2 de la esbeltez global gobernante del perfil XL.

El factor de reducción de resistencia (ϕ_c) y el factor de seguridad (Ω_c) para determinar la resistencia disponible a compresión ($\phi_c P_{ne}$ o P_{ne}/Ω_c) según la sección E2, equivalen a $\phi_c = 0,85$ (LRFD) y $\Omega_c = 1,80$ (ASD) respectivamente.

En base a la sección E2, la resistencia nominal a la compresión se calcula según la siguiente expresión:

$$P_{ne} = F_n A_g \quad (2.27)$$

Donde,

P_{ne} : resistencia nominal a la compresión.

F_n : tensión nominal de compresión.

A_g : área bruta de la sección transversal del perfil.

En que la tensión nominal de compresión (F_n) se calcula según:

Cuando $\lambda_c \leq 1,5$

$$F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (2.28)$$

Cuando $\lambda_c > 1,5$

$$F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (2.29)$$

Donde λ_c equivale a:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad (2.30)$$

En que F_{cre} viene dado por el menor valor entre la tensión de pandeo elástico global flexural, flexo-torsional o torsional.

E2.1 Secciones no sujetas a pandeo torsional o flexo-torsional

La sección E2.1 establece que la tensión elástica de pandeo flexural se determina según:

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2.31)$$

E2.2 Secciones con doble o simple simetría sujetas a pandeo torsional o flexo-torsional

La sección E2.2 establece que F_{cre} para elementos con doble simetría sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional se determina según:

$$F_{cre} = \sigma_t \quad (2.32)$$

Donde σ_t equivale a:

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left(GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right) \quad (2.33)$$

Donde,

A: área bruta de la sección transversal del perfil.

r_o : radio polar de giro de la sección transversal con respecto al centro de corte.

K_t : longitud efectiva del perfil para torsión.

L_t : longitud no arriostrada del miembro en compresión para torsión.

La sección E3 “Pandeo Local en Interacción con la Fluencia y el Pandeo Global” indica que todos los miembros se deben verificar para una potencial reducción en su resistencia disponible debido a la interacción de la fluencia o pandeo global con el pandeo local (AISI, 2016). Esta reducción se puede considerar mediante cualquiera de estos dos métodos: Método del Ancho Efectivo (sección E3.1) o el Método de Fuerza Directa (sección E3.2). Para el presente trabajo se consideró el Método de Fuerza Directa, en el que para miembros sin agujeros la resistencia nominal, P_{nl} , para pandeo local se sigue el apartado E3.2.1. El factor de reducción de resistencia (ϕ_c) y el factor de seguridad (Ω_c) para determinar la resistencia disponible a compresión ($\phi_c P_{nl}$ o P_{nl}/Ω_c) según la sección E3, equivalen a $\phi_c = 0,85$ (LRFD) y $\Omega_c = 1,80$ (ASD) respectivamente.

E3.2.1 Miembros sin agujeros (Método de Fuerza Directa)

Cuando $\lambda_l \leq 0,776$

$$P_{nl} = P_{ne} \quad (2.34)$$

Cuando $\lambda_l > 0,776$

$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne} \quad (2.35)$$

Donde,

λ_l equivale a:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{crl}}} \quad (2.36)$$

P_{crl} : Carga crítica elástica de pandeo local, determinada de acuerdo con el Apéndice 2:

$$P_{crl} = A_g F_{crl} \quad (2.37)$$

Donde,

F_{crl} : Menor tensión de pandeo local entre todos los elementos de la sección transversal:

$$F_{crl} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad (2.38)$$

Donde,

k: Coeficiente de pandeo de la placa según el Apéndice 1 para diferentes tipos de elementos y condiciones de apoyo, en donde para elementos no atiesados sujetos a compresión uniforme corresponde a $k = 0,43$.

t: espesor del elemento.

μ : Razón de Poisson del acero.

w: Ancho plano del elemento.

Por otro lado, de acuerdo con la sección B4, cuando se utilice el Método del Ancho Efectivo o Método de Fuerza Directa presentados en los capítulos E hasta H, para utilizar los factores de seguridad o resistencia previstos en estos capítulos se debe cumplir con los límites detallados en la sección B4.1 (AISI, 2016). De acuerdo con la Tabla B4.1-1 del código AISI S100-16 los elementos no atiesados en compresión deben cumplir con que la razón entre el ancho plano del elemento no atiesado y el espesor del elemento, d/t , debe ser menor o igual que 60. Además, la tensión de fluencia nominal del acero debe ser inferior a 552 MPa y 655 MPa en relación con los métodos de Método del Ancho Efectivo y Método de Fuerza Directa respectivamente. Adicionalmente, se señala que elementos no atiesados en compresión con una razón $d/t > 30$ es probable que tengan deformaciones notables antes de desarrollar su resistencia completa.

Por otra parte, la resistencia a tracción de los elementos se determina según el capítulo D del código AISI S100-16, en donde la resistencia disponible a tracción ($\phi_t T_n$ o T_n/Ω_t) corresponde al menor valor obtenido de acuerdo con las secciones D2 y D3, en donde se establecen las resistencias nominales a tracción y los correspondientes factores de resistencia y seguridad. La resistencia nominal a tracción debe estar limitada también por la resistencia de la conexión de los elementos en tracción, la cual se determina de acuerdo con las disposiciones del capítulo J.

D2 Fluencia de la sección bruta

La resistencia nominal a tracción, T_n , debido a la fluencia de la sección bruta se determina según la siguiente expresión:

$$T_n = A_g F_y \quad (2.39)$$

El factor de reducción de resistencia equivale a $\phi_t = 0,90$ (LRFD) y el factor de seguridad equivale a $\Omega_t = 1,67$ (ASD).

D3 Fractura de la sección neta

La resistencia nominal a tracción, T_n , debido a la fractura de la sección neta se determina según la siguiente expresión:

$$T_n = A_n F_u \quad (2.40)$$

Donde,

A_n : área neta de la sección transversal.

El factor de reducción de resistencia equivale a $\phi_t = 0,75$ (LRFD) y el factor de seguridad equivale a $\Omega_t = 2,00$ (ASD).

Referente al estado límite de fractura por tracción de la conexión descrito en la sección J6.2 del apartado J6 Fractura del capítulo J del código AISI S100-16, se establece que la resistencia nominal a la fractura por tracción, P_{nt} , se determina según la siguiente expresión:

$$P_{nt} = F_u A_e \quad (2.41)$$

Donde,

A_e : área neta efectiva sujeta a tracción. ($A_e = U_{sl} A_{nt}$)

U_{sl} : factor de corte diferido (*shear lag factor*) determinado según la Tabla J6.2-1

A_{nt} : área neta sujeta a tracción (perpendicular a la fuerza), excepto como se indica en la Tabla J6.2-1.

El factor de resistencia para conexiones soldadas equivale a $\phi_t = 0,60$ (LRFD) y para conexiones apernadas $\phi_t = 0,65$ (LRFD). El factor de seguridad para conexiones soldadas equivale a $\Omega_t = 2,50$ (ASD) y para conexiones apernadas $\Omega_t = 2,22$ (ASD). Factores de resistencia para otros tipos de conexiones se indican en la Tabla J6-1.

El apartado J6 indica que las disposiciones establecidas en esta sección se deben aplicar cuando el espesor de la parte conectada más delgada es de 3/16 in. (4,76 mm) o menos. En cambio, para conexiones en donde el espesor de la parte conectada más delgada es mayor que 3/16 in. (4,76 mm), se debe aplicar las disposiciones del código ANSI / AISC 360 por ejemplo en el caso de Estados Unidos (el código de diseño varía entre países).

Relativo al diseño de conexiones para elementos estructurales de acero conformados en frío, en cuanto a conexiones soldadas (sección J2) o apernadas (sección J3), el código AISI S100-16 indica que cuando el espesor de la parte conectada más delgada es mayor que 3/16 in. (4,76 mm), se debe aplicar las disposiciones del código ANSI / AISC 360 por ejemplo en el caso de Estados Unidos. En el presente trabajo el menor espesor entre las partes a conectar (correspondiente a los ángulos que conforman el perfil XL en este caso) es de 6 mm.

2.2 Estudios numéricos y experimentales

2.2.1. Molina (2014)

Molina (2014) implementó un análisis mediante elementos finitos de una amplia gama de perfiles XL ante desplazamientos monótono crecientes a través de un análisis no lineal de tipo pushover utilizando el software ANSYS Workbench. Sus objetivos eran identificar los modos de falla predominantes en este tipo de riostras de dimensiones y largos comúnmente utilizados en la práctica, comparar los resultados del análisis no lineal de ANSYS con el modo de pandeo y resistencia de los perfiles según el código AISC 360-10 y los estudios para perfiles de doble ángulo desarrollados por Marsh (1997), y estimar las solicitaciones sobre las conexiones.

Se estudió un total de 180 perfiles XL de acero estructural de calidad ASTM A36 de longitudes de 1.5, 2.5, 5.0 y 10.0 metros considerando secciones esbeltas y no esbeltas según NCh2369.Of2003.

Las diagonales se modelaron como riostras aisladas con condiciones de borde de arriostramiento en cruz. Para ello, la geometría se basaba en un perfil XL conectado en los extremos por una placa de largo igual a dos veces la altura total de la riostra y la altura de la placa excedía en 20 mm la zona superior e inferior del perfil completo (Figura 2.4), donde un extremo se encontraba restringido en todas las direcciones al desplazamiento y rotación, mientras que el otro apoyo estaba libre de desplazarse sólo axialmente. En el centro de la diagonal de modo de simular la conexión con el otro arriostramiento cruzado, se impuso la condición de borde de permitir sólo la deformación longitudinal axial, restringiendo todos los otros grados de libertad de rotación y desplazamiento. Los conectores intermedios se dispusieron en los cuartos de la longitud de la riostra y poseían un ancho de 10 mm y espesor igual a las placas de conexión de los extremos.

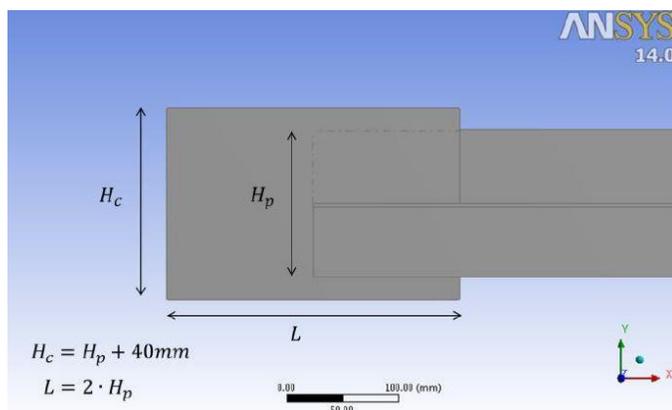


Figura 2.4: Geometría de la placa de conexión (Molina, 2014).

Primeramente se realizó un análisis estático para identificar el modo de falla en cada modelo, obteniéndose principalmente un pandeo flexural, flexotorsional o torsional del perfil, para luego en el análisis no lineal aplicar una imperfección inicial a la riostra en función del modo de pandeo observado según criterios indicados en la AISC Code of Standard Practice.

Molina (2014) define un parámetro dado por la razón entre la esbeltez global y la esbeltez local del elemento permitiendo relacionar el comportamiento de los perfiles y las solicitaciones sobre las conexiones con las propiedades geométricas del perfil XL, de la siguiente forma:

$$\frac{\lambda_{Global}}{\lambda_{Local}} = \frac{\max(\lambda_m, \lambda_v)}{b/t} \quad (2.42)$$

Donde,

λ_{Global} : esbeltez global de la diagonal XL.

λ_{Local} : esbeltez local de la diagonal XL.

λ_m, λ_v : esbeltez global de la riostra según ejes principales del perfil XL.

Los principales resultados y conclusiones obtenidos por Molina (2014) se mencionan a continuación:

- Los modos de falla resultantes del análisis no lineal en ANSYS y las expresiones desarrolladas por Marsh (1997) son consistentes respecto al diseño del código AISC 360-10, donde aproximadamente un 3% de los modelos diferían en el modo de pandeo exhibido (flexural, flexotorsional o torsional).
- Existe una tendencia entre el modo de falla asociado con la razón de esbeltez global y local del perfil. Diagonales con menor razón $\lambda_{Global}/\lambda_{Local}$ tienden a fallar por torsión, mientras que a mayor valor se exhibe un pandeo flexural. Precisamente, perfiles con una razón de

esbeltez global y local menor a 4 se pandearon por torsión, entre 4 y 5 se presentó una falla por flexotorsión y sobre 5 se produce una transición hacia un pandeo flexural. Dado que en el caso del código AISC, los modos de falla flexotorsional y torsional se encasillan en una misma expresión, la transición entre pandeo flexotorsional o torsional con el pandeo flexural se produce en torno a un único valor, esto es para una razón de esbelteces cercano a 5.

- Las solicitaciones sobre las conexiones que actúan perpendiculares al eje longitudinal de la diagonal muestran una reducción en su magnitud para mayores razón de esbelteces.
- La distribución de las fuerzas sobre las caras de la placa de conexión del extremo puede variar en función del modo de pandeo exhibido. Las riostras con falla torsional tienden a presentar una división equitativa entre la fuerza hacia cada superficie, mientras que los perfiles que fallan por flexión sobrecargan una cara de la placa de conexión por sobre la otra.

2.2.2. Claverie (2016)

Claverie (2016) continua el estudio numérico sobre los modos de falla predominantes en perfiles XL de acero estructural iniciado por Molina (2014), incorporando un análisis no lineal de tipo pushover ante solicitación cíclica incremental mediante modelos de elementos finitos en el software ANSYS (ANSYS Workbench 15), e integrando nuevos detallamientos en la modelación.

Se implementó un total de 74 elementos, donde el rango de altura es de 80 a 400 mm, espesor entre 4 a 16 mm, largos entre 3 a 6 m, secciones no esbeltas según la norma NCh2369.Of2003, y considerando dos espaciamentos de conectores intermedios, en los cuartos y octavos de la longitud de la diagonal. Las planchas y perfiles consideran un acero de calidad ASTM A36 modelado por una ley constitutiva bilineal con módulo de elasticidad post-fluencia de 10.000 MPa.

Los objetivos planteados eran estudiar una tendencia que relacione los parámetros de esbeltez de la riostra XL con el modo de falla presentado, determinar la resistencia a tracción y la degradación de la capacidad a compresión del perfil para diferentes demandas de ductilidad, estimar las fuerzas sobre las conexiones de los extremos y el conector central, y analizar el efecto del espaciamento de los conectores intermedios en el modo de falla y transmisión de esfuerzos en los elementos.

En cuanto a la modelación, las condiciones de borde de desplazamiento y giro en las placas de conexión y conector central buscan simular un arriostramiento en cruz, al igual que en el estudio de Molina (2014). En la Figura 2.5 se observan los nodos en los cuales se aplican las restricciones, donde una de las placas de conexión (etiqueta A) se encuentra empotrada, y el conector central (etiqueta B) y la placa del otro extremo (etiqueta C) sólo están libre de desplazamiento longitudinal.

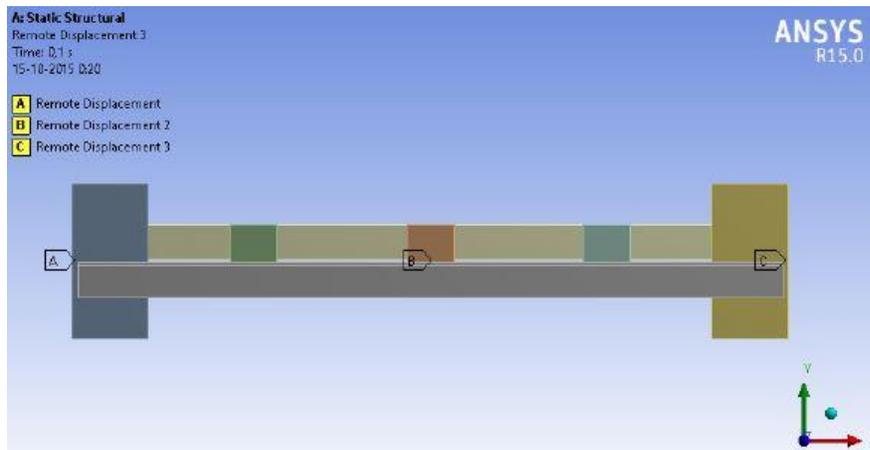


Figura 2.5: Condiciones de borde de desplazamiento y giro del modelo (Claverie, 2016).

Relativo al diseño de las conexiones (Figura 2.6), la geometría de las placas de conexión de los extremos consistía en un largo igual a la altura del perfil XL más dos veces el espesor de la placa, de modo que se pueda desarrollar plastificación en esta en caso de ser necesario, y una altura dada por el ancho de Whitmore para conexiones soldadas. Para los conectores intermedios se consideró un largo de $2/3$ de la altura del perfil basado en recomendaciones del Manual de diseño para ángulos estructurales L-AZA (2004).

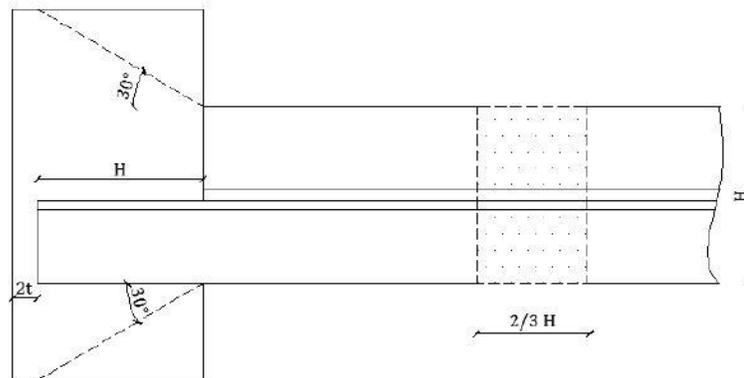
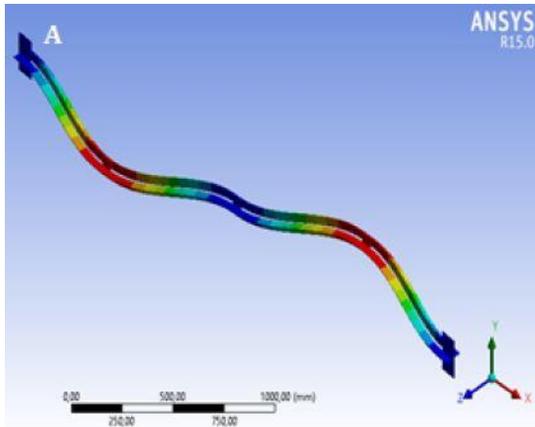


Figura 2.6: Geometría placas gussets y conectores intermedios (Claverie, 2016).

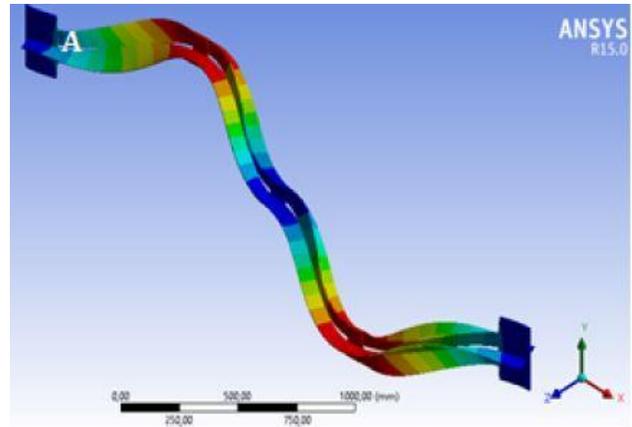
Con el objetivo de estimar las tensiones en las superficies de interacción entre los distintos componentes que conforman la riostra, Claverie (2016) modeló los ángulos, placas gusset y conectores intermedios por separado y asignando propiedades de contacto entre los componentes. Se utilizó un contacto de tipo pegado o bonded en el software ANSYS Workbench 15, en el cual no se producen desplazamientos relativos ni separación entre las piezas, procurando representar la unión soldada entre los elementos.

En la etapa de análisis elástico primeramente se obtiene la carga crítica de pandeo del perfil mediante el análisis de pandeo elástico del software ANSYS, el cual entrega la carga crítica como un múltiplo de la fuerza de compresión aplicada, por lo que se aplicó una fuerza de 1 N en el

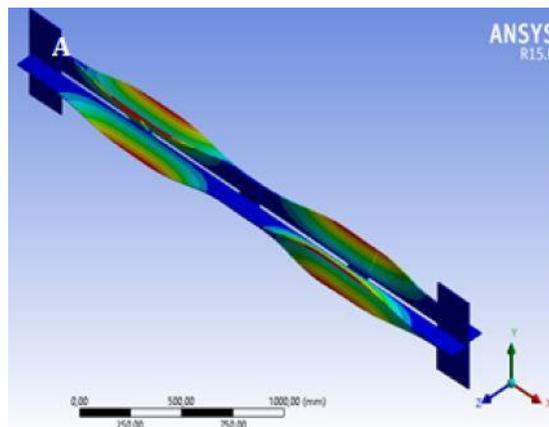
extremo C (Figura 2.5). El modo de falla asociado se identificó a través de un análisis visual del pandeo de la riostra y la distribución de esfuerzos, donde se registraron tipos de pandeo flexural, flexotorsional y torsional como se observa en la Figura 2.7.



(a) Falla por flexión.
(Factor de amplificación: 150).



(b) Falla por flexotorsión.
(Factor de amplificación: 300).



(c) Falla por torsión (Factor de amplificación: 77).

Figura 2.7: Modos de falla por flexión, flexotorsión y torsión (Claverie, 2016).

Posteriormente se llevó a cabo el análisis no lineal a través de una metodología de tipo pushover ante sollicitación cíclica incremental y desplazamiento monótono creciente. La imperfección inicial de cada modelo viene dada en función del modo de pandeo presentado. El nivel de imperfección inicial asignado es de 5 mm, el cual se determinó mediante un análisis de sensibilidad utilizando 4 modelos de la misma sección transversal y espaciado de conectores (en los cuartos de la diagonal) pero variando su largo, en el que se establecía la deformación requerida para iniciar la fluencia del perfil.

Luego, el historial de desplazamiento aplicado es el de la Figura 2.8, donde Claverie (2016) consideró el desplazamiento máximo como el desplazamiento de techo de diseño del marco (Δ_{bm}), considerando $\Delta_{bm} = 4\delta_y$ en base a las recomendaciones de NEHRP Recommended Seismic Provisions (2009), donde δ_y es el desplazamiento de fluencia de la riostra. Durante la ejecución, en caso de que algunos elementos sobrepasen la tensión de rotura del acero, se definió como criterio de interrupción del análisis cuando se alcanza un factor de seguridad de 0.92, con el fin de poder obtener una mejor correlación con la fractura del perfil.

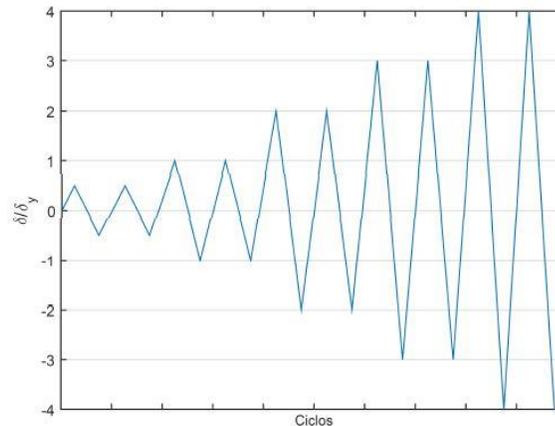


Figura 2.8: Historial de desplazamientos cíclicos (Claverie, 2016).

Finalmente, las principales conclusiones fueron:

- Se presenta una tendencia que vincula los modos de falla con la razón entre la esbeltez global y local del perfil, parámetro empleado por Molina (2014). Perfiles con una razón de esbelteces inferior a 6 fallaron por torsión, los referentes al rango entre 6 y 10 exhibieron un pandeo flexotorsional, mientras que para una razón de esbelteces sobre 10 fallaron por flexión. La transición entre los modos de falla torsional y flexotorsional fue más explícita en virtud de la deformada y distribución de tensiones evidenciadas en estos perfiles. En cambio, la transición entre flexión y flexotorsión fue menos distinguible, particularmente para razón de esbelteces entre 8 y 10.
- Las riostras que fallaron por torsión y que poseían una relación de esbelteces inferior a 4 manifestaron un desempeño favorable, pues su resistencia a la compresión prácticamente no disminuye para mayores demandas de deformación, presentan mayor ductilidad y también se ven reducidas las sollicitaciones sobre las conexiones en relación a su capacidad de fluencia. Además, los perfiles en este rango no desarrollaron una rótula plástica en la mitad de los largos no arriostrados, en contraste con las riostras con una razón de esbelteces superior a 4.

- Respecto al plano de falla, éste variaba al incrementar el número de conectores intermedios. Cuando el espaciamiento es un cuarto de la longitud de la riostra el pandeo se manifestaba en torno al eje U-U (Figura 1.2). Al reducir el espaciamiento hacia L/8 el perfil se vuelve menos esbelto en el eje U-U, permaneciendo por debajo a los valores para el otro eje principal (V-V). No obstante, para estos casos el pandeo se expuso en torno al eje geométrico vertical (Y-Y), lo que se relaciona por la gran cercanía entre conectores intermedios, donde al tratarse de placas tienden a curvarse en torno al eje que define su largo mayor.
- Claverie (2016) destaca que en general los parámetros estudiados pueden vincularse con los modos de pandeo dada la gran tendencia que estos muestran en función de la razón de esbeltez del perfil, sin embargo, no todas las variables dependen principalmente del modo de falla. Algunos ejemplos son la resistencia máxima a tracción y compresión del perfil; o el nivel de ductilidad y las solicitaciones normalizadas en las placas de conexión que manifestaron una relación con el modo de falla y la presencia o no de deformaciones laterales.
- Relativo a la ductilidad del perfil, las diagonales donde los conectores intermedios se distanciaban entre sí en los octavos de largo del perfil, veían reducida su ductilidad en un 20% en promedio. En general, los perfiles que fallaron por flexotorsión mostraron los menores niveles de ductilidad para ambos espaciamientos de conectores, en tanto que los con falla torsional evidenciaron alta capacidad de deformación en el rango inelástico, fundamentalmente para una razón de esbeltez inferior a 4. Por su parte, en los perfiles que fallaron por flexión, se obtuvo una media de 56% de mayor ductilidad cuando los conectores se distancian L/4 entre sí en comparación a un espaciamiento de L/8.
- La presencia de pandeo local en las alas de los ángulos se observó en ciertos casos al aumentar el número de conectores, principalmente en perfiles que mostraron una falla flexotorsional. El pandeo local se registró cuando la relación ancho/espesor de las alas de los ángulos superaban el valor $0,36\sqrt{E/F_y}$, el cual corresponde a un 80% del límite de esbeltez local de la norma NCh2369.Of2003.
- Para efecto del diseño de conexiones por capacidad, los valores para la fuerza de tracción máxima que puede transmitir el arriostamiento fue siempre mayor a la carga dada por la fluencia de la sección, resultando en aproximadamente un 110% de $F_y A_g$ para perfiles que fallaron por flexión o flexotorsión, y hasta una capacidad de 130% de $F_y A_g$ para perfiles con falla torsional. Por otro lado, la resistencia a la compresión varió entre un 40% y un 120% de la carga de fluencia de la sección.
- En cuanto a la degradación de la respuesta a compresión del perfil, se indica que es probable que exista una sobrevaloración en la resistencia obtenida dado que en el historial de

desplazamiento impuesto el perfil alcanza primeramente la fluencia, con lo que experimenta un grado de endurecimiento previo a pandearse. Por otro lado, todos los perfiles cuya relación de esbeltez era superior a 4 registraron una disminución de la resistencia a la compresión para mayores demandas de ductilidad, donde en promedio, en los ciclos previo a la falla esta resistencia se reduce cercano a un 60% de la resistencia máxima a la compresión. La disminución fue ligeramente menor en diagonales cuyo espaciamiento de conectores fue de $L/8$, sin embargo para esta distancia entre conectores la capacidad de deformación inelástica fue menor.

- Respecto a las solicitaciones sobre las conexiones, considerando los ejes descritos en la Figura 2.5, éstas incrementaron al comparar el análisis de desplazamiento cíclico incremental con el de desplazamiento monótono creciente, fundamentalmente en el eje Z de la unión entre el ángulo y la placa, y para el eje X del conector central.
- En general, las solicitaciones sobre las conexiones son mayores en los ejes X y Z en la conexión con la placa gusset y en el eje X del conector central, tendiendo a aumentar para los modos de pando flexural y flexotorsional. Por otra parte, las fuerzas en el eje Y de las placas de los extremos y en los ejes Y y Z del conector central son notablemente menores, donde el mayor valor obtenido es de un 8% de la carga de fluencia.
- Al disminuir el espaciamiento de conectores intermedios a los octavos de la longitud de la diagonal varían las solicitaciones sobre las conexiones. Para la placa gusset, en promedio, se ven aumentadas las fuerzas en un 8% en el eje X, y un 37% en el eje Z; en tanto que en el eje Y disminuyen un 6%. Para el conector central, en promedio, las solicitaciones aumentan en un 130% en el eje X, un 30% en el eje Y, y un 14% en el eje Z.

2.2.3. Guerrero (2017)

Guerrero (2017) llevo a cabo un estudio experimental sobre los modos de falla predominantes en perfiles XL de acero estructural ante cargas monotónicas y cíclicas incrementales, con el objetivo de corroborar los análisis desarrollados mediante elementos finitos en el software ANSYS en los estudios realizados por Molina (2014) y Claverie (2016), establecer una tendencia entre la razón de esbeltez global-local del perfil y el modo de falla asociado, y obtener relaciones entre la ductilidad del perfil y el modo de falla presentado.

Los ensayos se efectuaron en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, donde se ensayaron 3 pares de especímenes de riostras XL. Éstas se componían de dos ángulos de iguales dimensiones unidos por planchas intermedias soldadas distanciadas entre sí en los cuartos de la longitud de la diagonal, y en los extremos conectados por soldadura a una placa gusset. Los ángulos del perfil XL se componían de un acero estructural de calidad A270ES según la norma NCh203.Of2006,

mientras que las placas base, gussets y conectores intermedios de un acero ASTM A36. El electrodo de soldadura corresponde a un AWS E70xx en base a AISC 360-16. En cuanto al tipo de acero, los estudios numéricos mencionados se diferencian en que todas las piezas del perfil y las conexiones se basaban en una curva tensión-deformación bilineal de acero estructural de calidad ASTM A36.

Todos los perfiles poseían la misma sección transversal, variando solamente su largo de manera que la razón de esbeltez global-local del perfil clasifique como falla torsional, flexotorsional y flexural según los resultados obtenidos por Claverie (2016). Para ello, en base al cálculo de la razón de esbeltez de acuerdo con las normativas NCh2369.Of2003 y AISC 360-16, se escogió el perfil XL 100 x 4 (dos veces la dimensión del ala de los ángulos componentes [mm] x espesor de los ángulos componentes [mm]) según la notación utilizada por Guerrero (2017), con longitudes de pandeo de 984 mm, 1784 mm y 2584 mm, a los cuales se les denominó perfil “corto”, “intermedio” y “largo”, respectivamente. En la Figura 2.9 se muestran los 3 pares de perfiles XL fabricados.



Figura 2.9: Perfiles XL contruidos (Guerrero, 2017).

Para el diseño de las placas gusset, se utilizaron las disposiciones de diseño del código AISC 341-16 para marcos especiales concéntricamente arriostrados (SCBF) y el criterio de ancho de Whitmore (1952), con el fin de que la placa gusset no entre en fluencia ni se pandee previo a la riostra y que sea capaz de transmitir las cargas del perfil.

Durante los ensayos, la aplicación del historial de desplazamientos se realiza mediante un actuador hidráulico de capacidad de carga de 100 tonf, el cual incorpora una celda de carga que registra la fuerza aplicada. Las mediciones de la deformación del perfil, giro de la sección transversal y desplazamientos fuera del plano se efectúan a través de instrumentos LVDT (Linear Variable Differential Transformers) e inclinómetros. En la Figura 2.10 se muestra el modelo 3D del montaje experimental y en la Figura 2.11 el montaje experimental del perfil XL corto desarrollado por Guerrero (2017).

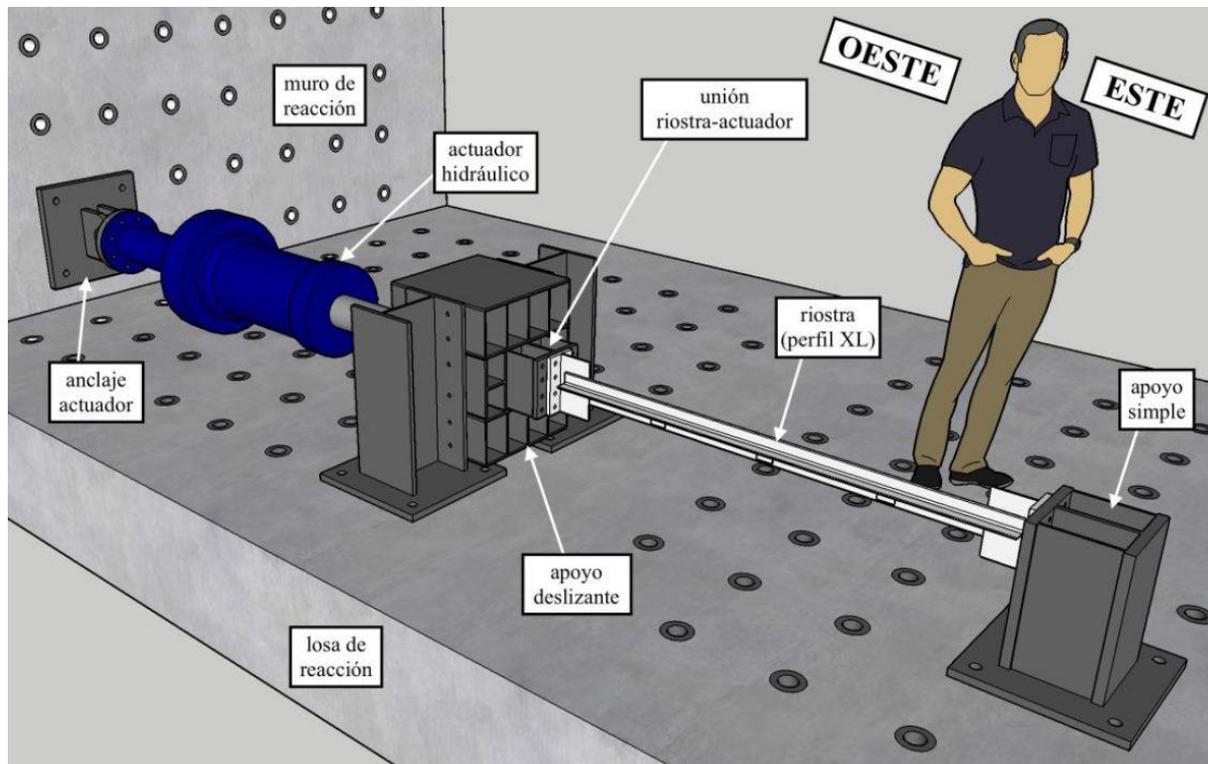
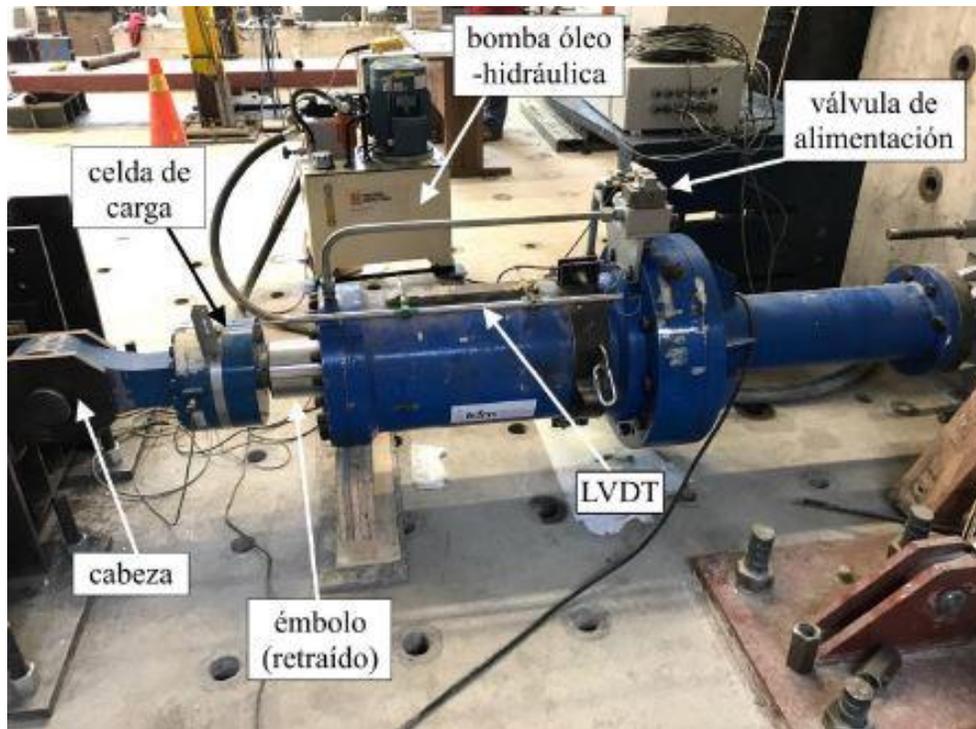
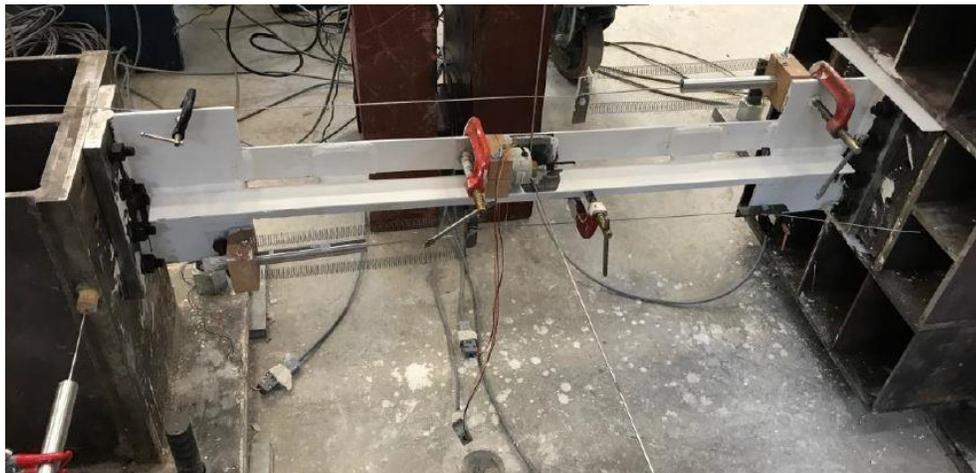


Figura 2.10: Modelo 3D montaje experimental (Guerrero, 2017).



(a) Actuador Hidráulico.



(b) Perfil XL corto.

Figura 2.11: Montaje experimental (Guerrero, 2017).

El historial de desplazamientos aplicado para los ensayos ante sollicitación cíclica incremental (Figura 2.12) es similar al implementado por Claverie (2016), donde la diagonal inicialmente se encuentra traccionada y el desplazamiento máximo es de 4 veces el desplazamiento de fluencia del perfil, pero aplicando los cambios de que se deben realizar dos ciclos por cada nivel del desplazamiento de fluencia del perfil, y en caso de completar el historial y la riostra aún no ha fallado, se siguen los ciclos al mismo grado de deformación hasta que se manifieste alguna falla. La velocidad de deformación inducida es de 5 mm/min.

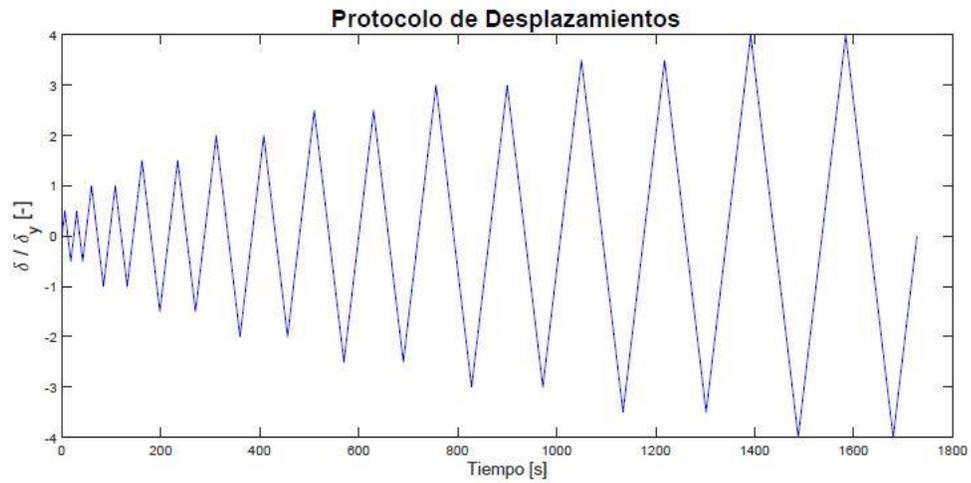


Figura 2.12: Historial de desplazamiento cíclico incremental (Guerrero, 2017).

En los perfiles ensayados frente a ciclos de amplitud constante, el desplazamiento máximo establecido es de 4 veces el desplazamiento de fluencia del perfil igualmente, y la finalización del ensayo se realiza bajo el mismo método.

En la Figura 2.13 se pueden observar los 3 pares de perfiles XL ensayados, donde a la izquierda de cada par se ubica el perfil ensayado ante un historial cíclico de amplitud variable.



Figura 2.13 Perfiles XL ensayados (Guerrero, 2017).

A partir de los ensayos experimentales, las conclusiones obtenidas fueron:

- Todos los especímenes exhibieron un modo de pandeo flexural preponderantemente en torno al eje geométrico vertical (eje Y-Y), con lo cual no se cumple la correlación entre el modo de falla y la razón de esbelteces global y local estudiada por Claverie (2016). Cabe destacar que las restricciones de movimiento y giro del conector central no son iguales entre ambos estudios, pues en los ensayos de Guerrero (2017) no se impide el desplazamiento ni giro del conector central asimilándose más a una riostra como diagonal aislada; mientras que Claverie (2016) simulaba un arriostamiento en X.
- Los perfiles XL se clasificaban como esbeltos localmente y durante los ensayos se evidenció la presencia de pandeo local en el ala horizontal de uno de los ángulos, ubicado entre el conector central y uno de los conectores intermedios.
- Los especímenes lograron grandes desplazamientos fuera del plano y longitudinal, presentando una falla dúctil. Durante los últimos ciclos se inicia la propagación de una grieta en el ala horizontal de uno de los ángulos, sin embargo, no se observa una falla frágil.
- En cuanto a la capacidad a compresión de las riostras, en todos los casos la resistencia experimental sobrepasa la resistencia calculada según el código AISC 360-16 utilizando los datos del ensayo de materiales, y los especímenes intermedio y largo superan la resistencia esperada. En todos los perfiles se observa una gran degradación de la resistencia a compresión post-pandeo.
- La resistencia a tracción experimental de las riostras no sobrepasa la resistencia calculada con la tensión de fluencia del ensayo de materiales, pero sí logra ser al menos el 90% de esta última.
- La mayor disipación de energía de los perfiles se produce cuando estos se encuentran trabajando en compresión.

2.2.4. Marsh (1997)

Marsh (1997) en el marco de su investigación “Design of Single and Multiple Angle Columns and Beams”, estudia analíticamente los modos de pandeo en flexión, torsión y una combinación de ambos, a los que se encuentran susceptibles secciones de acero estructural de ángulos simples y varias combinaciones de ángulos dobles como elementos tipo columna, y ecuaciones para el diseño de estos perfiles son sugeridas en este estudio.

En la determinación de una carga crítica de pandeo, donde la teoría predice una fuerza en función del esfuerzo elástico de pandeo, el autor señala que es necesario considerar el rango inelástico entre la fluencia y el comportamiento elástico, e incorporar la influencia de imperfecciones del perfil.

El esfuerzo elástico de pandeo viene expresado por:

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2.43)$$

Donde,

E: Módulo Elástico.

λ : Esbeltez, la cual depende de la geometría, las condiciones de borde de apoyo y la distribución de tensiones en el perfil.

En particular, para una disposición de ángulos en estrella (perfil XL), en la Figura 2.14 se muestra la nomenclatura utilizada para los ejes principales U-U y W-W de este estudio.

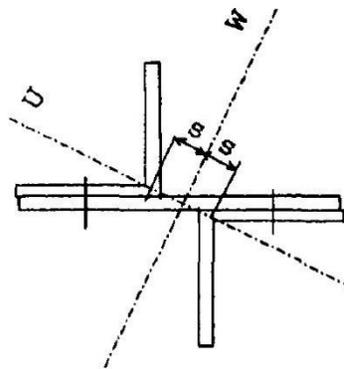


Figura 2.14: Nomenclatura ejes principales del perfil XL utilizados por Marsh (Marsh, 1997).

Para ángulos dobles que conforman un perfil XL, con un espaciamiento “h” entre conectores intermedios, el autor propone las siguientes expresiones para la carga crítica y esbeltez para los diferentes modos de pandeo:

Para flexión en torno al eje U-U:

$$P_u = \frac{2\pi^2 EA}{\lambda_u^2} \quad (2.44)$$

$$\lambda_u = \frac{KL}{r_u} = \frac{2,4KL}{b} \quad (2.45)$$

Donde,

P_u : carga axial de pandeo elástico para pandeo en torno al eje U-U.

λ_u : esbeltez en torno al eje U-U.

K: Factor de longitud efectiva.

r_u : radio de giro del perfil en torno al eje U-U

b: ancho nominal del ángulo del perfil XL.

Para flexión en torno al eje W-W se debe modificar la esbeltez:

$$P_{wv} = \frac{2\pi^2 EA}{\lambda_{wv}^2} \quad (2.46)$$

$$\lambda_{wv} = \sqrt{\lambda_w^2 + \lambda_v^2} \quad (2.47)$$

Donde,

$$\lambda_w = \frac{KL}{r_w} \quad (2.48)$$

$$\lambda_v = \frac{Kh}{r_v} \quad (2.49)$$

$$r_w = \sqrt{r_v^2 + (u_o + s)^2} \quad (2.50)$$

P_{wv} : carga axial de pandeo elástico para pandeo en torno al eje W-W, con la esbeltez modificada.

λ_{wv} : esbeltez modificada en torno al eje W-W.

r_w : radio de giro en el eje W.

r_v : radio de giro del miembro individual.

h: separación entre conectores intermedios.

u_o : distancia desde el centro de corte al centroide del ángulo individual.

s: distancia desde el centroide del miembro armado a la intersección de las líneas medias de las alas del ángulo.

Para pandeo torsional:

$$P_t = \frac{2\pi^2 EA}{\lambda_t^2} \quad (2.51)$$

$$\lambda_t = \frac{5,1b}{t} \quad (2.52)$$

Donde,

P_t : carga axial de pandeo elástico para pandeo torsional.

λ_t : esbeltez del perfil para pandeo torsional.

t: espesor del ala del perfil XL.

Luego, la carga crítica será gobernada por la mayor de las esbelteces: λ_u , λ_{vv} , y λ_t .

Capítulo 3. Calibración esquema de modelación con ensayos experimentales

Se lleva a cabo una calibración del procedimiento de modelación en elementos finitos en el software ANSYS Workbench realizado en las investigaciones de Molina (2014) y Claverie (2016) para el estudio de perfiles XL, respecto a los resultados experimentales de estas riostras en el estudio de Guerrero (2017). Estos estudios se presentan en la sección 2.2 del presente documento.

El esquema de modelación consiste en primer lugar de un análisis de pandeo lineal y, luego, de un análisis no lineal de las diagonales XL mediante los sistemas de análisis Eigenvalue Buckling y Static Structural de ANSYS Workbench. Primeramente, se deben definir las propiedades mecánicas y las curvas tensión-deformación de los materiales, el tipo de contacto entre las superficies de los distintos elementos (ángulos, conectores intermedios y placas gusset), mallado de elementos finitos y restricciones de los grados de libertad en los apoyos. En el análisis de pandeo lineal se aplica una carga unitaria de compresión y a través de un análisis de valores y vectores propios se obtienen las cargas críticas y los modos de pandeo de la riostra respectivamente.

El análisis no lineal requiere de una imperfección inicial de la diagonal debido a un problema de bifurcación en la orientación del modo de falla. Para ello, la imperfección inicial se asigna en función de un factor de escala del primer modo de pandeo de la diagonal en el análisis de vectores propios. Posteriormente, se aplica un historial de desplazamientos y se procede a resolver el modelo no lineal, el cual considera la no linealidad del material, no linealidad geométrica, entre otros factores como lo puede ser la asignación de tipos de contacto no lineales.

Guerrero (2017) lleva a cabo ensayos experimentales de 3 pares de perfiles XL sometidos ante un historial de desplazamientos cíclico de amplitud incremental o constante. Los especímenes correspondían al perfil XL 10x6,11 (altura [cm] x peso [kgf/m]) conformado a partir de ángulos laminados (acero estructural A270ES) unidos mediante conectores intermedios (acero estructural ASTM A36) soldados distanciados entre sí en los cuartos de la longitud de la riostra, y el perfil se encontraba soldado a una placa gusset (acero estructural ASTM A36) en los extremos. Los 3 pares de perfiles XL se diferenciaban en su largo, con longitudes de pandeo de 964 mm, 1764 mm y 2564 mm, denominados perfil “corto”, “intermedio” y “largo”, respectivamente, de modo que en relación con su razón de esbeltez global y local se espere un modo de falla torsional, flexotorsional y flexural según los resultados obtenidos en el estudio de Claverie (2016). Sin embargo, todos los especímenes exhibieron un modo de pandeo flexural en torno a su eje geométrico vertical, junto con la presencia de una rótula plástica próxima al conector intermedio central, entre este y uno de los conectores vecinos, en donde se produce un pandeo local en el ala horizontal de uno de los ángulos del perfil XL.

3.1. Análisis de pandeo lineal

3.1.1. Materiales

Los ángulos de los perfiles XL ensayados en la etapa experimental se componen de acero estructural de calidad A270ES, en tanto que los conectores intermedios y las placas gusset de acero ASTM A36. Se utiliza el promedio de los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción efectuado por Guerrero (2017) para cada material, presentadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas del acero obtenidas del ensayo de tracción por Guerrero (2017).

Acero Estructural	E [MPa]	Fy [MPa]	Fu [MPa]
A270ES	223127	316	421
ASTM A36	204674	347	470

3.1.2. Contacto

El tipo de contacto asignado entre las regiones de contacto de los distintos componentes es de tipo *bonded*, con el cual no se permite deslizamiento o separación entre las superficies de contacto (ANSYS, Inc., 2022c), asimilando la conexión soldada de los componentes de los especímenes.

Además, para cada región de contacto se debe definir una superficie de tipo *contact* y la otra de tipo *target* (Figura 3.1). Las superficies de tipo *contact* están restringidas para que no penetren la superficie *target*. Sin embargo, los elementos de tipo *target* pueden penetrar a través de la superficie *contact* (ANSYS, Inc., 2022a). Ya que los materiales de los componentes de los especímenes son de similar rigidez, para determinar que superficie es de tipo *contact* o *target* se realiza en función del mallado, asignando para la superficie de mallado más fino la opción *contact*, según las recomendaciones del documento ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide (ANSYS, Inc., 2022a).

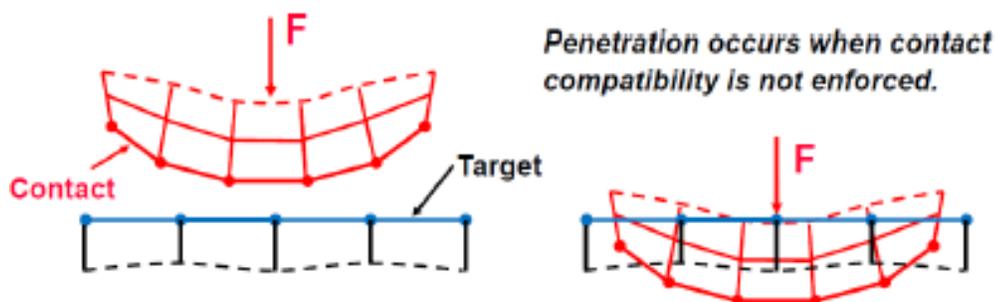


Figura 3.1: Superficie de tipo *contact* y de tipo *target* (ANSYS, Inc., 2022c).

Con el objetivo de evitar una compenetración entre los cuerpos en contacto, se deben establecer ecuaciones que relacionen ambas superficies. Para generar una compatibilidad en las regiones de contacto el software ANSYS Workbench ofrece diversos métodos de solución denominados “Formulations” en inglés. A menudo escoger el método de contacto es complicado, con lo que es recomendable, cuando sea posible, escoger la opción de que el tipo de formulación en una región de contacto sea controlado por el programa, de acuerdo con el documento ANSYS Mechanical User’s Guide (ANSYS, Inc., 2022c).

En línea con el esquema de modelación de los trabajos anteriores, para el análisis de pandeo lineal se utiliza la formulación internal multipoint constraint (MPC), la cual añade ecuaciones de restricción de modo de vincular los desplazamientos entre las superficies de contacto, siendo una manera eficiente de generar una compatibilidad entre regiones de contacto de tipo *bonded*, además de soportar efectos producto de grandes deformaciones (ANSYS, Inc., 2022c). Luego, para el análisis no lineal se realiza un análisis de sensibilidad del tipo de contacto considerando una formulación de tipo MPC, controlada por el programa y una combinación entre ambas, descrito en la sección 3.2.3.

3.1.3. Mallado

Los cuerpos sólidos (ángulos, gussets, placas y conectores intermedios) de los modelos se componen de elementos finitos tridimensionales tipo *SOLID186* (Figura 3.2), el cual está definido por 20 nodos y considera tres grados de libertad por nodo (desplazamientos en las direcciones x, y, z), junto con un comportamiento de desplazamiento cuadrático (ANSYS, Inc., 2022b). Entre sus ventajas se encuentra que soporta plasticidad y grandes deformaciones y capacidades de esfuerzos del material.

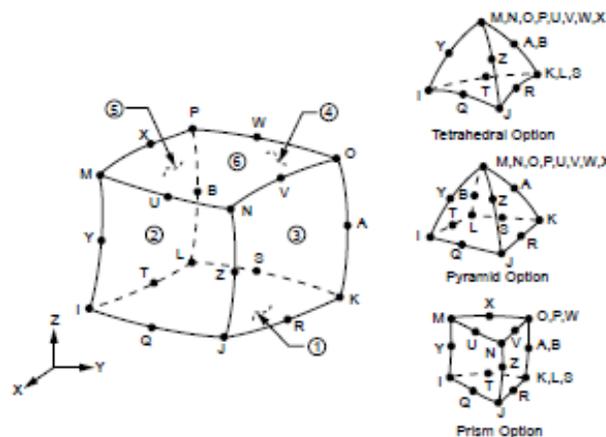


Figura 3.2: Elemento tipo SOLID186 homogéneo (ANSYS, Inc., 2022b).

Para determinar el tamaño del elemento finito se sigue el procedimiento empleado en el estudio de Claverie (2016) y se procede a realizar un análisis de sensibilidad del mallado descrito en la sección 3.2.6 del presente trabajo.

3.1.4. Restricciones en apoyos

Se definen los grados de libertad traslacionales y rotacionales restringidos en los apoyos. En la Figura 3.3 se muestra el modelo en ANSYS del perfil XL corto a modo de ejemplo, en el que los apoyos corresponden a las superficies exteriores de las placas de ambos extremos (etiquetas B y C).

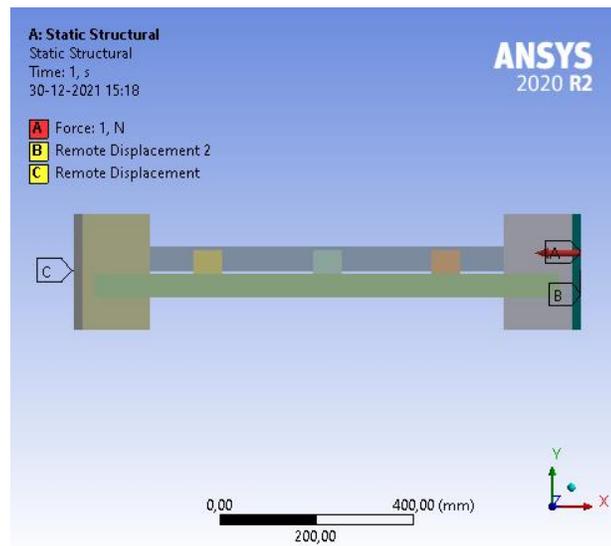


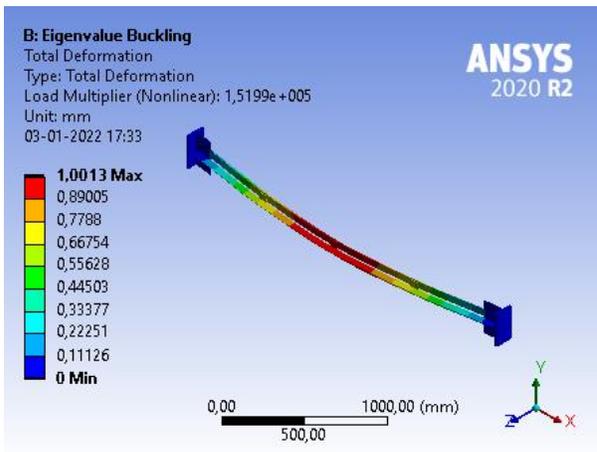
Figura 3.3: Superficies donde se definen las restricciones en apoyos.

En el apoyo C se restringen todos los grados de libertad de desplazamiento y rotación. Por otro lado, el apoyo B corresponde al extremo cercano al actuador hidráulico y, a diferencia del apoyo C, se permite el desplazamiento longitudinal (eje X) de modo de permitir la deformación axial de la riostra.

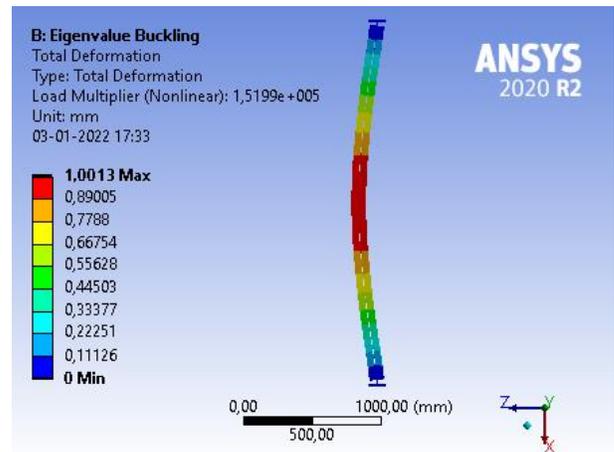
Por otra parte, en el apoyo B se aplica una fuerza unitaria en compresión, para luego realizar el análisis de pandeo lineal y obtener los modos de pandeo de las diagonales. (etiqueta A de la Figura 3.3).

3.1.5. Modo de pandeo

Se aplica una fuerza de compresión de magnitud 1 N en el apoyo B (Figura 3.3) y se obtienen los modos de pandeo de la riostra. Se extrae el primer modo pandeo, el cual posteriormente define la imperfección inicial asignada al perfil para el análisis no lineal. En la Figuras 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran el primer modo de pandeo para el perfil largo, intermedio y corto respectivamente.

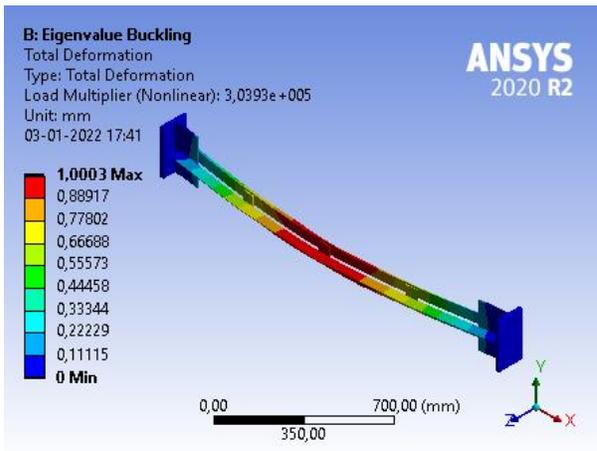


(a) Vista isométrica.

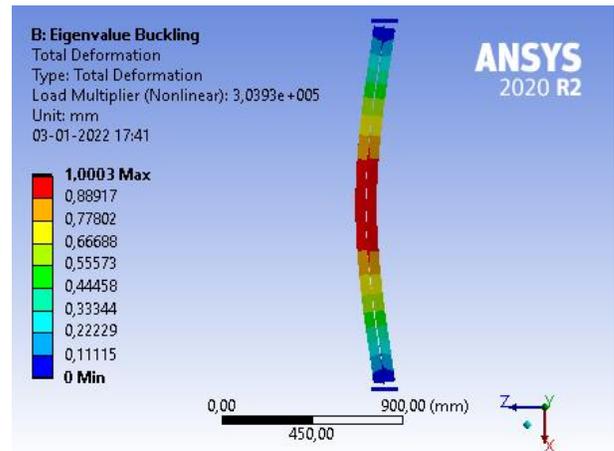


(b) Vista superior.

Figura 3.4: Modo de pandeo análisis lineal perfil XL largo (Factor de amplificación: 130).

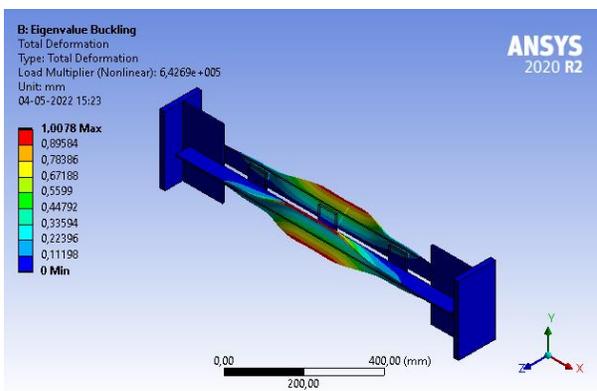


(a) Vista isométrica.

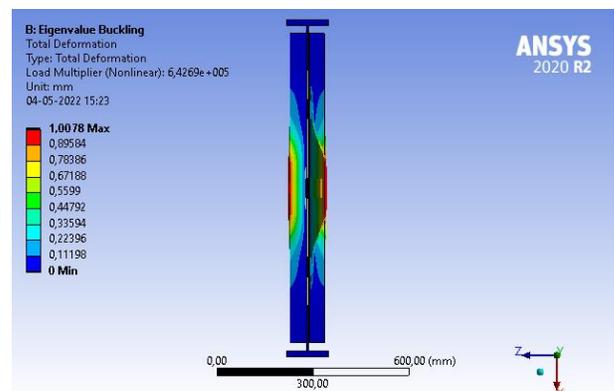


(b) Vista superior.

Figura 3.5: Modo de pandeo análisis lineal perfil XL intermedio (Factor de amplificación: 94).



(a) Vista isométrica.



(b) Vista superior.

Figura 3.6: Modo de pandeo análisis lineal perfil XL corto (Factor de amplificación: 27).

Para los perfiles largo e intermedio (Figuras 3.4 y 3.5) se obtiene un modo de pandeo flexural y, por otra parte, el perfil corto exhibe un modo de pandeo torsional (Figura 3.6). El modo de pandeo de los perfiles coincide con lo esperado según el código AISC 360-16.

Luego de realizar los análisis de sensibilidad descritos en la sección 3.2 del presente documento, las riostras exhiben un modo de pandeo global en flexión fuera del plano pandeándose en torno a su eje geométrico vertical (eje Y-Y) similar a lo observado en los ensayos experimentales. Cabe destacar que para el caso del perfil XL corto en los primeros ciclos del historial de desplazamientos se observa una componente torsional y, luego, el pandeo flexural se presenta hacia los ciclos finales. Dicho esto, el modo de pandeo obtenido para la diagonal del análisis de vectores propios no necesariamente representa el modo de falla una vez finalizado el análisis no lineal.

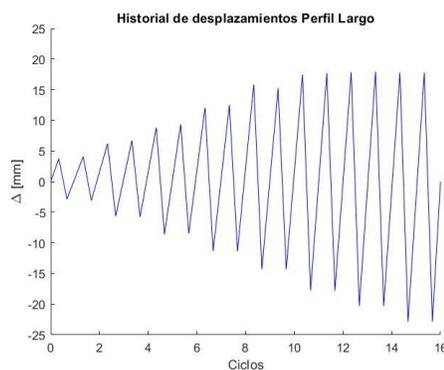
3.2. Análisis no lineal

3.2.1. Restricciones en apoyos

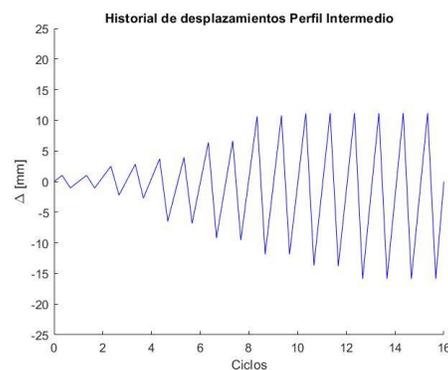
Las restricciones de los grados de libertad en los apoyos de la riostra se mantienen respecto al análisis de pandeo lineal.

3.2.2. Historial de desplazamientos

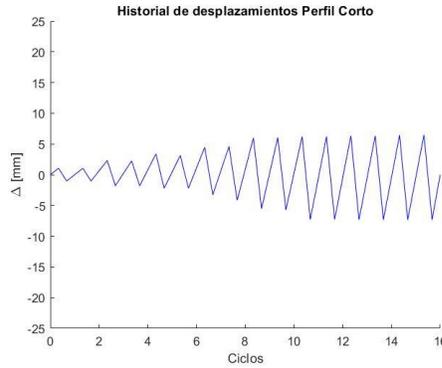
Se aplica el historial de desplazamientos obtenido a partir de la curva histerética modificada de los datos registrados por el actuador hidráulico en el ensayo experimental de cada perfil. Guerrero (2017) en su estudio ajusta la curva de histéresis obtenidas debido a que durante el ensayo se registran desplazamientos longitudinales del apoyo simple y, además, la pendiente de la curva histerética en los primeros instantes del ensayo es bastante menor a la esperada, lo que se pudo deber a una imperfección de la perforación de la pieza que va anclada a la cabeza del actuador hidráulico. En la Figura 3.7 se presenta el historial de desplazamientos cíclico aplicado para cada riostra en el software ANSYS Workbench.



(a) Perfil XL Largo.



(b) Perfil XL Intermedio.



(c) Perfil XL Corto.

Figura 3.7: Historial de desplazamientos cíclicos.

3.2.3. Contacto

Para el análisis no lineal se mantiene el tipo de contacto *bonded* entre las regiones de contacto, sin embargo, se procede a estudiar tres configuraciones de la formulación asignada a estas regiones. La primera de ellas consiste en que la formulación sea controlada por el programa, en segundo lugar, que la formulación sea de tipo MPC y, por último, la última configuración consiste en una combinación entre controlada por el programa y MPC.

Al ingresar la geometría del modelo al programa, por defecto este determina automáticamente las superficies de tipo contact o target entre los cuerpos. En algunas regiones de contacto se intercambia esta opción mediante la herramienta *flip contact / target* de modo de coincidir con el criterio descrito en la sección 3.1.2 para asignar las superficies de tipo contact o target. Luego, para la última configuración mencionada anteriormente, durante el análisis no lineal a las superficies de contacto a las cuales se les intercambia la asignación de contact o target se les asigna una formulación controlada por el programa, y a las demás superficies de contacto se les asigna una formulación de tipo MPC.

Para cada una de estas configuraciones se realiza un análisis de sensibilidad del módulo tangente de la curva bilineal y factor de escala de la imperfección inicial (siguiendo la metodología descrita en las secciones 3.2.4 y 3.2.5 respectivamente), cuyos resultados se detallan en el Anexo C. Para las tres configuraciones la capacidad a tracción y compresión respecto al ensayo experimental sigue el mismo comportamiento, sin embargo, cuando se asigna entre las regiones de contacto las configuraciones de una formulación uniforme como controlada por el programa o de tipo MPC, en algunas configuraciones del análisis de sensibilidad, para los perfiles largo e intermedio se obtienen dos rótulas plásticas próximas al conector central del perfil XL ubicadas simétricamente respecto al centro de la diagonal (a diferencia del espécimen experimental en el cual se produce solo una rótula plástica próxima al conector intermedio central) y, en particular, con estas dos configuraciones no se logra obtener un pandeo global flexural para el perfil corto de acuerdo con

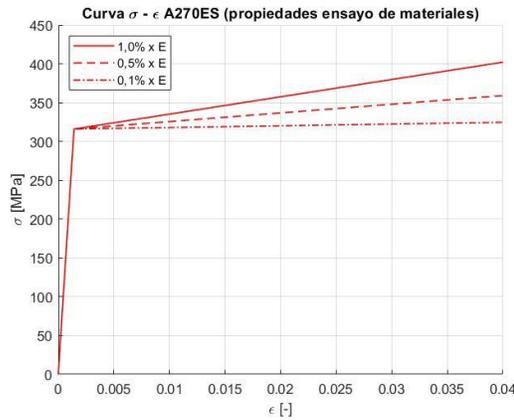
el análisis de sensibilidad realizado. Por otra parte, para la última configuración cuando se utiliza una combinación entre una formulación controlada por el programa y MPC, durante los análisis de sensibilidad para los perfiles XL largo e intermedio se obtiene un modo de falla similar al ensayo experimental, y para el perfil corto se logra obtener un modo de pandeo global flexural hacia los ciclos finales con un nivel de imperfección inicial de $L/200$ y un módulo tangente del 1,0% del Módulo de Young registrado en los ensayos de materiales.

Puesto que con la configuración cuando se asigna una combinación entre una formulación controlada por el programa y de tipo MPC se obtiene un modo de falla de mayor similitud al ensayo experimental, a continuación se presentan los análisis de sensibilidad de módulo tangente de la curva bilineal, factor de escala de la imperfección inicial, mallado de elementos finitos y comparación entre el modo de falla numérico vs experimental utilizando esta configuración.

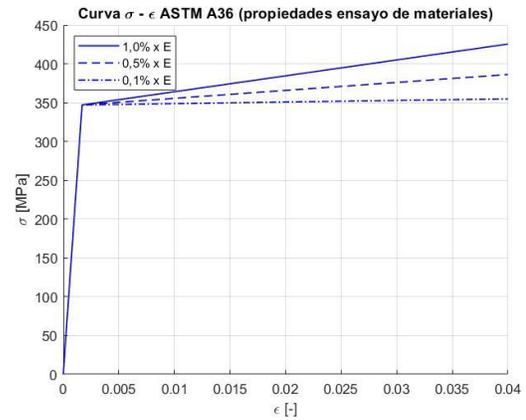
3.2.4. Materiales

Para implementar la no linealidad del material en la modelación se utiliza una curva tensión-deformación bilineal para el acero y se procede a realizar un análisis de sensibilidad de la pendiente post-fluencia. Se estudian tres valores del módulo tangente equivalentes a un 0,1%, 0,5% y 1,0% del Módulo de Young registrado en el ensayo de materiales. La tensión de fluencia de cada material corresponde a la obtenida del ensayo de tracción (Tabla 3.1).

En la Figura 3.8 (a y b) se muestran las curvas tensión-deformación bilineal según los 3 niveles del módulo tangente en estudio para los aceros de calidad A270ES y ASTM A36 respectivamente. Posteriormente, en la Tabla 3.2 se presentan la variación de la capacidad a tracción, junto con el modo de falla observado, y su comparación con los resultados experimentales de los perfiles largos, intermedios y cortos para los distintos niveles de la pendiente post-fluencia de la curva bilineal. El análisis de la Tabla 3.2 considera un factor de escala de la imperfección inicial de $L/200$ para los perfiles XL largo y corto, y de $L/1000$ para el perfil XL intermedio. El análisis de sensibilidad de la imperfección inicial se describe posteriormente en la sección 3.2.5 del presente documento.



(a) A270ES.



(b) ASTM A36.

Figura 3.8: Curva tensión-deformación con endurecimiento isotrópico bilineal.

Tabla 3.2: Análisis de sensibilidad módulo tangente.

Perfil XL 10x6,11	Módulo tangente	Modo de falla	Capacidad tracción numérica [tonf]	Capacidad numérica / experimental [-] Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	0,1% x E	Flexión y PL	24,04	1,05
	0,5% x E	Flexión y PL	24,20	1,05
	1,0% x E	Flexión y PL	24,32	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	0,1% x E	Flexión y PL	23,98	0,99
	0,5% x E	Flexión y PL	24,34	1,00
	1,0% x E	Flexión y PL	24,34	1,00
Riostra 3 (L = 964 mm)	0,1% x E	Flexión y PL*	24,24	1,00
	0,5% x E	FT y PL	25,44	1,05
	1,0% x E	Flexión y PL	25,47	1,05

FT: Pandeo global flexotorsional. PL: Pandeo local.

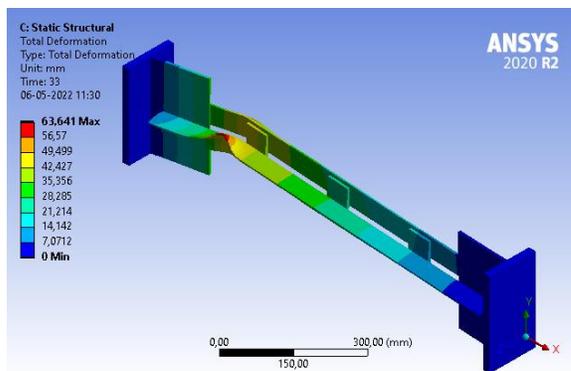
* Ubicación de la rótula plástica en uno de los conectores intermedios próximo al gusset.

A partir de los resultados de la Tabla 3.2 se observa que, al aumentar la pendiente post-fluencia de la curva bilineal, incrementa la capacidad a tracción del perfil. En general, una magnitud del 0,1% o 0,5% del módulo tangente sigue con mayor precisión a la resistencia experimental de los especímenes.

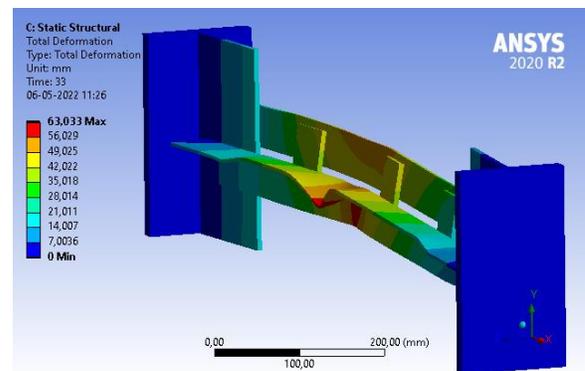
Para los perfiles largo e intermedio un módulo tangente del 0,5% se asimila de mejor manera ya que en los últimos ciclos en tracción de las respectivas curvas de histéresis, las cuales se presentan en la sección 3.2.7 del presente documento, las riostras exhiben una degradación de la capacidad a tracción similar a los ensayos experimentales. Por otro lado, relativo al modo de falla, independiente de los valores del módulo tangente en estudio, los perfiles largo e intermedio mantienen un modo de pandeo global flexural y ubicación de la rótula plástica, zona en donde se concentran grandes deformaciones y se observa la presencia de pandeo local de una de las alas

horizontales de uno de los ángulos del perfil XL, próxima al conector central, similar a los ensayos experimentales. Asimismo, la comparación entre el modo de falla experimental y numérico de los perfiles se analiza en la sección 3.2.7 del presente documento.

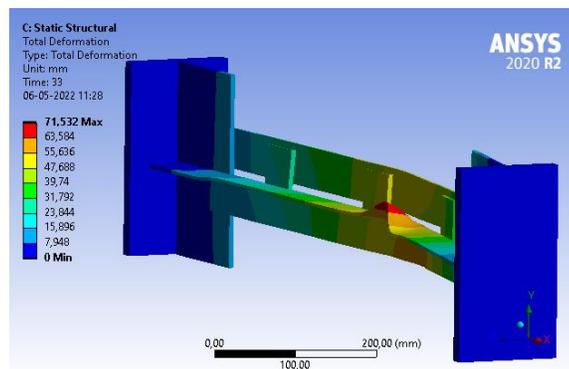
En particular, para el perfil corto se observa una variación del modo de falla entre los tres valores del módulo tangente. Para una magnitud del módulo tangente del 0,1% del Módulo de Young, el perfil XL corto exhibe un pandeo global flexural (hacia los ciclos finales) y una rótula plástica ubicada en uno de los conectores intermedio próximo al gusset con la presencia de pandeo local en el ala horizontal de uno de los ángulos del perfil XL (Figura 3.9a). Por otra parte, para un módulo tangente equivalente a 1,0% del Módulo de Young, igualmente se produce un pandeo global en flexión (en los últimos ciclos) y pandeo local de un ala horizontal, sin embargo, la ubicación de la rótula plástica es próxima al conector intermedio central, entre este y uno de los conectores vecinos (Figura 3.9c), modo de falla de mayor similitud al observado experimentalmente. Por último, para un módulo tangente del 0,5% del Módulo de Young, se observa un pandeo flexotorsional del perfil XL corto (Figura 3.9b). Cabe destacar que durante los primeros ciclos el perfil XL corto presenta una componente de pandeo global torsional.



(a) Módulo tangente de 0,1% x E



(b) Módulo tangente de 0,5% x E



(c) Módulo tangente de 1,0% x E

Figura 3.9: Modo de falla perfil XL corto en función del módulo tangente de la curva tensión-deformación bilineal.

3.2.5. Imperfección inicial

Se realiza un análisis de sensibilidad del nivel de imperfección inicial asignado para cada perfil en función de su longitud, comparando la capacidad a compresión y tracción obtenida numéricamente, junto con el modo de falla, respecto a los resultados experimentales (Tabla 3.3). Se estudian 4 niveles de imperfección inicial: L/200, L/500, L/1000 y L/1500. A modo de comparación, la norma NCh428:2017 (INN, 2017) establece que para elementos rectos que trabajen en compresión, ya sea un perfil estructural estándar o compuesto, la variación en la rectitud debe ser menor o igual a 1/1000 de la longitud axial entre los puntos a soportar lateralmente; por otro lado, el Catálogo Técnico de Productos Edición 2019 de AZA (AZA, 2019) indica que su deformación lateral inicial máxima para perfiles ángulos laminados es de $6,5 \times L/1500$ (equivalente a L/230), referente a las tolerancias de rectilineidad.

De acuerdo con el análisis de sensibilidad del módulo tangente de la curva bilineal descrito en la sección 3.2.4 del presente documento, para los perfiles XL largo e intermedio se asigna un módulo tangente equivalente a un 0,5% del Módulo de Young registrado experimentalmente para cada material y para el perfil XL corto de un 1,0% del Módulo de Young registrado experimentalmente para cada material.

Tabla 3.3: Análisis de sensibilidad imperfección inicial.

Perfil XL 10x6,11	Imperfección inicial		Modo de falla	Capacidad compresión numérica [tonf]	Capacidad tracción numérica [tonf]	Capacidad numérica / experimental [-]	
	Nivel	Deformación [mm]				Compresión	Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	L / 200	12,82	Flexión y PL	11,09	24,20	1,09	1,05
	L / 500	5,13	Flexión y PL	11,66	24,27	1,15	1,06
	L / 1000	2,56	Flexión y PL	12,24	24,28	1,21	1,06
	L / 1500	1,71	Flexión y PL	12,90	24,28	1,27	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	L / 200	8,82	Flexión y PL	14,03	23,74	0,76	0,98
	L / 500	3,53	Flexión y PL	17,66	24,26	0,95	1,00
	L / 1000	1,76	Flexión y PL	18,85	24,34	1,02	1,00
	L / 1500	1,18	Flexión y PL	19,14	24,36	1,03	1,01
Riostra 3 (L = 964 mm)	L / 200	4,82	Flexión y PL	22,02	25,47	1,01	1,05
	L / 500	1,93	FT y PL	22,52	27,08	1,04	1,12
	L / 1000	0,96	FT y PL	22,72	27,25	1,05	1,12
	L / 1500	0,64	FT y PL	22,86	26,60	1,05	1,10

Para las tres riostras se observa que la capacidad a tracción sigue una disposición a disminuir a un mayor nivel de la imperfección inicial asignada. En los casos de los perfiles largo e intermedio la capacidad a tracción varía ligeramente para las magnitudes de imperfección inicial en estudio, en el que para el perfil largo la resistencia a tracción se mantiene entre un 5% y un 6% superior a la resistencia registrada experimentalmente, y para el perfil intermedio se obtiene una resistencia a tracción de mayor similitud hacia los valores L/500 y L/1000 de la imperfección inicial, con un

error inferior al 1%. Para el perfil corto se observa una mayor variación de la resistencia a tracción, por ejemplo, de un aumento de la sobrerresistencia a tracción de un 5% a un 12% entre los niveles L/200 y L/500 respecto a la resistencia a tracción del ensayo. Por otro lado, la capacidad a compresión de igual modo sigue una tendencia a disminuir al asignar una mayor imperfección inicial, pero presentando una mayor variación en general.

En el caso del perfil largo (riostra 1) se obtiene una mayor exactitud respecto a los resultados experimentales al asignar un nivel de imperfección inicial de L/200, con una sobrerresistencia del 9% y 5% para la capacidad a compresión y tracción respectivamente.

Para el perfil intermedio (riostra 2) se obtiene una mayor exactitud con una imperfección inicial de L/1000, con la cual la capacidad a compresión numérica es un 2% superior a la capacidad experimental y la resistencia a tracción numérica posee un error inferior al 1% de la resistencia experimental.

Por último, para el perfil corto (riostra 3) con una imperfección inicial de L/200 se presenta una mayor exactitud respecto a la capacidad a compresión y tracción experimental, en el que la sobrerresistencia numérica es de un 1% y un 5% respectivamente. Cabe destacar que en el caso del perfil corto, para una imperfección inicial de L/200 se obtiene un modo de pandeo global en flexión (similar al ensayo experimental) y para factores de escala inferiores de la imperfección inicial se obtiene un pandeo global flexotorsional.

3.2.6. Mallado

Para el mallado de elementos finitos también se procede a realizar un análisis de sensibilidad relativo al tamaño de cada perfil. La dimensión del elemento finito sólido se determina siguiendo el procedimiento descrito en el estudio de Claverie (2016). Este consiste en designar una razón entre el área de una cara del sólido (b^2) aproximado este al caso cúbico y el área longitudinal proyectada del perfil (longitud (L) x altura (H) de la riostra) para determinar el tamaño del elemento finito de la diagonal XL, además, en las placas gusset y conectores intermedios se realiza un refinamiento del mallado considerando un tamaño del 50% del elemento finito de la riostra, con el fin de estimar con una mayor precisión las fuerzas internas en estos. En el presente estudio se analizan las razones 1/300, 1/500 y 1/1000. En la Tabla 3.4 se presenta una comparación del número de nodos y las capacidades a compresión y tracción para los diferentes niveles de mallado.

Tabla 3.4: Análisis de sensibilidad mallado de elementos finitos.

Perfil XL 10x6,11	Mallado		Modo de falla	Capacidad compresión numérica [tonf]	Capacidad tracción numérica [tonf]	Capacidad numérica / experimental [-]	
	Nivel	Cantidad de nodos				Compresión	Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	1 : 300	15831	Flexión y PL	11,09	24,20	1,09	1,05
	1 : 500	26317	Flexión y PL	11,09	24,21	1,09	1,06
	1 : 1000	44783	Flexión y PL	11,18	24,20	1,10	1,05
Riostra 2 (L = 1764 mm)	1 : 300	15632	Flexión y PL	18,85	24,34	1,02	1,00
	1 : 500	27082	Flexión y PL	18,95	24,37	1,02	1,01
	1 : 1000	48994	Flexión y PL	18,84	24,37	1,02	1,01
Riostra 3 (L = 964 mm)	1 : 300	20516	Flexión y PL	22,02	25,47	1,01	1,05
	1 : 500	34858	Flexión y PL	21,94	25,78	1,01	1,06
	1 : 1000	75827	Flexión y PL	22,04	25,88	1,01	1,07

A partir de los resultados presentados en la Tabla 3.4, se observa que al realizar un mallado más fino del modelo según el tamaño de elementos finitos en estudio, la capacidad a compresión y tracción de los perfiles XL varía en poca magnitud, entre 1 y 2 puntos porcentuales para los perfiles. Además, el modo de falla se mantiene. Sin embargo, el tiempo computacional en resolver el modelo aumenta considerablemente al refinar el mallado.

En la Figura 3.10 se muestra a modo de ejemplo un mallado de elementos finitos para el perfil XL corto considerando una razón de 1:300.

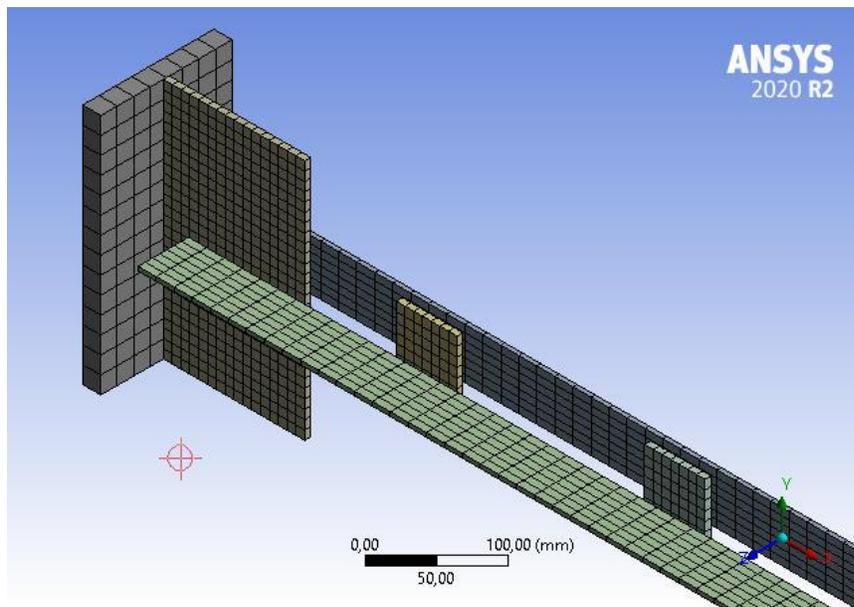
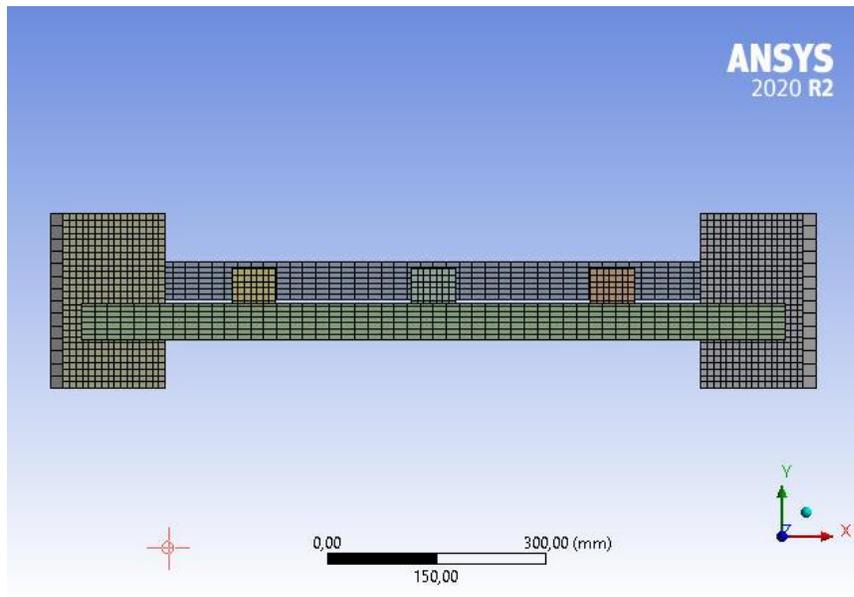


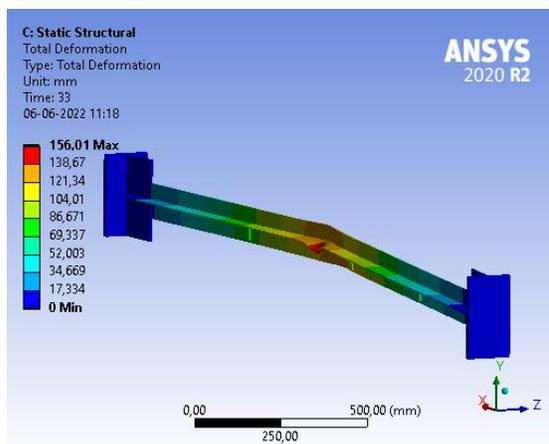
Figura 3.10: Mallado de elementos finitos razón 1:300 – Perfil XL corto (Riostra 3).

3.2.7. Modo de falla y respuesta histerética numérica vs experimental

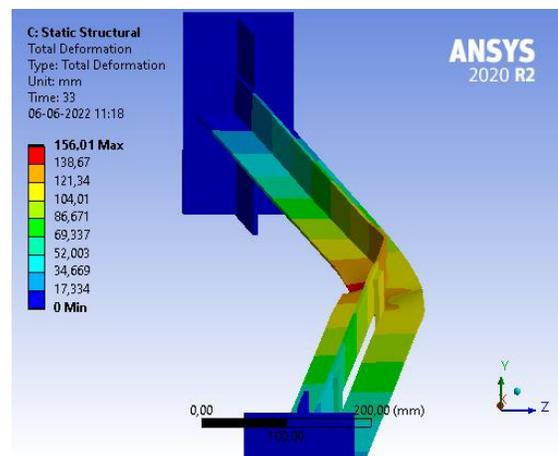
3.2.7.1. Perfil XL Largo

Para el análisis del perfil XL largo, de acuerdo con los análisis de sensibilidad realizados anteriormente, se utiliza un módulo tangente del 0,5% del Módulo de Young registrado en el ensayo de materiales, un nivel de imperfección inicial de $L/200$ (12,82 mm) y una razón para el mallado de elementos finitos de 1:300.

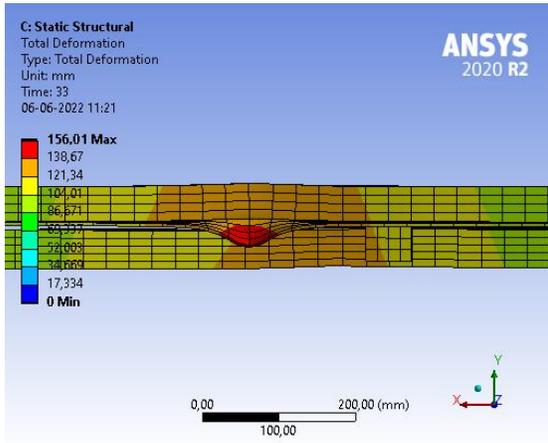
El modelo numérico del perfil XL largo exhibe un modo de falla (Figura 3.11) similar al ensayo experimental (Figura 3.12), esto es un pandeo global en flexión en torno al eje geométrico vertical (eje Y-Y) del perfil con una gran deformación fuera del plano, junto con la presencia de una rótula plástica producto de un pandeo local ubicado entre el conector intermedio central y uno de los conectores intermedios, pero más próxima a la planchuela central, con lo que se observa que el modelo numérico logra capturar el fenómeno de pandeo local. Sin embargo, a diferencia del ensayo experimental en el que se produce la fractura del ala horizontal del ángulo superior del perfil XL producto de la fatiga del material en la zona del pandeo local (Figura 3.12c), el modelo numérico elaborado no reproduce esta acción. Por otro lado, similar al ensayo experimental, hacia los últimos ciclos se produce un fenómeno el cual Guerrero (2017) denomina pandeo en tracción en el que debido al pandeo global en flexión y grandes deformaciones fuera del plano del perfil, se produce la fluencia del ala horizontal del ángulo cuyas fibras trabajan en tracción, en la misma posición relativa a la rótula plástica del ángulo contrario y, posteriormente, cuando se realiza la descompresión de la diagonal para iniciar el desplazamiento objetivo en tracción, se genera este pandeo en tracción para acomodar la rectitud original de la diagonal.



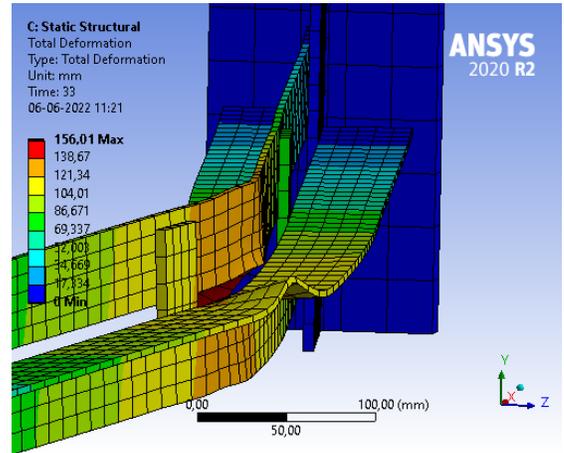
(a) Vista isométrica



(b) Pandeo global



(c) Pandeo local

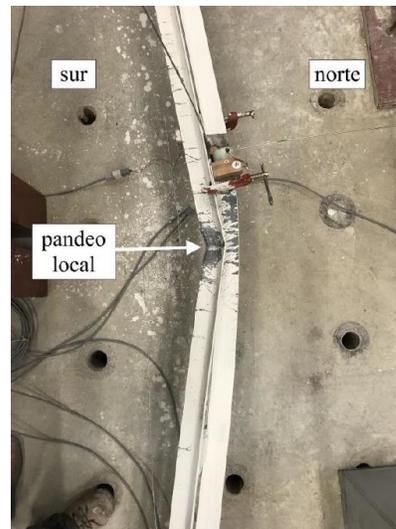


(d) Pandeo en tracción

Figura 3.11: Modo de falla numérico perfil XL largo.



(a) Pandeo global



(b) Pandeo local



(c) Fractura del ala horizontal del ángulo superior del perfil XL



(d) Pandeo en tracción.

Figura 3.12: Modo de falla experimental perfil XL largo (Guerrero, 2017).

En la Figura 3.13 se comparan las curvas de histéresis obtenida del modelo numérico respecto a los datos obtenidos la celda de carga y el instrumento LVDT del actuador hidráulico en el ensayo experimental.

La capacidad a tracción numérica es de 24,20 tonf, con una sobrerresistencia del 5% en comparación al espécimen ensayado. En la Figura 3.13, en la zona de tracción, se obtiene una mayor similitud en los ciclos intermedios y finales relativo al ensayo experimental, en cambio, en los primeros ciclos en tracción se tiene una sobrerresistencia del perfil, lo que puede deberse a una diferencia entre la tensión de fluencia del espécimen respecto al promedio de los datos del ensayo de materiales utilizados en el modelo numérico.

Por otro lado, la capacidad a compresión numérica es de 11,09 tonf, siendo un 9% superior al resultado experimental. En la Figura 3.13, en general, se observa una degradación de la resistencia a compresión similar entre ambas curvas de histéresis, sin embargo, en los primeros ciclos la curva numérica se observa desplazada respecto al resultado experimental.

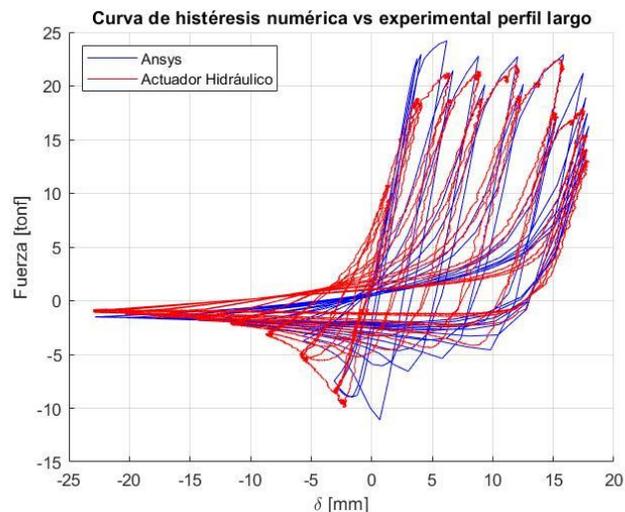


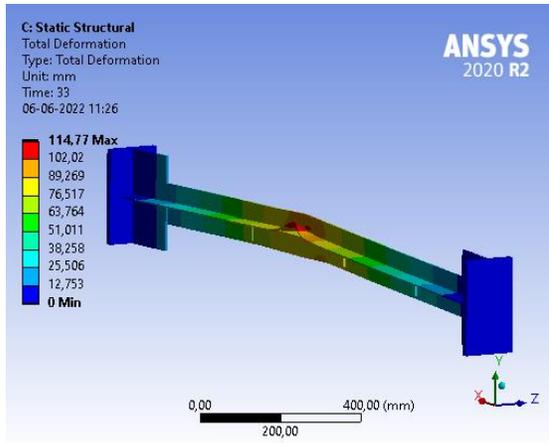
Figura 3.13: Curva de histéresis numérica vs experimental perfil XL largo.

3.2.7.2. Perfil XL Intermedio

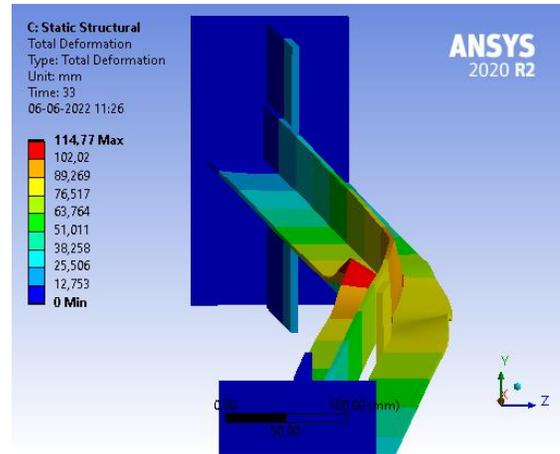
En el caso del perfil XL intermedio (Figura 3.14) se utiliza un módulo tangente del 0,5% del Módulo de Young obtenido del ensayo de materiales, un factor de escala de imperfección inicial de $L/1000$ (1,76 mm) y una razón para el mallado de elementos finitos de 1:300.

Para este perfil mediante el modelo numérico también se obtiene un modo de falla por pandeo global en flexión junto con una rótula plástica debido a un pandeo local en el ala horizontal de uno de los ángulos entre el conector central y uno de los conectores intermedios y, además, el pandeo

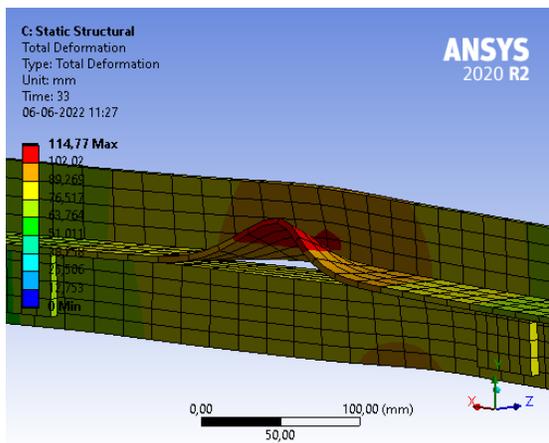
en tracción en la misma posición relativa que la rótula plástica, pero en el ángulo contrario, similar al modo de falla del espécimen experimental (Figura 3.15). El plano de pandeo de igual forma se produce en torno al eje geométrico vertical (eje Y-Y) de la riostra y la deformación fuera del plano es menor con relación al perfil XL largo ensayado.



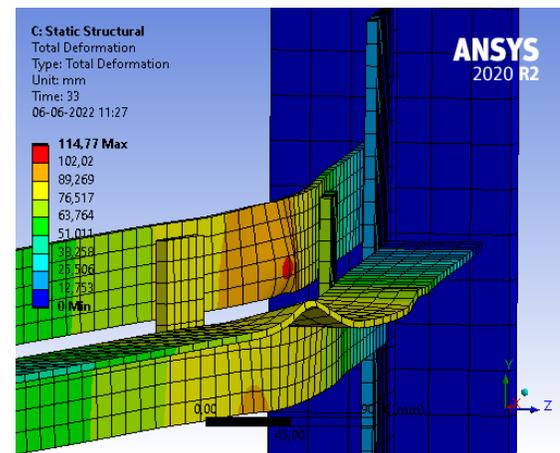
(a) Vista isométrica



(b) Pandeo global

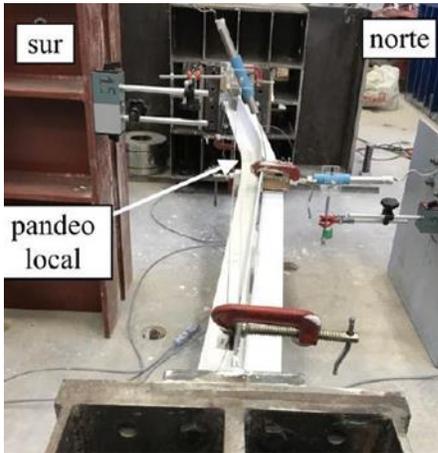


(c) Pandeo local



(d) Pandeo en tracción

Figura 3.14: Modo de falla numérico perfil XL intermedio.



(a) Pandeo global



(b) Ubicación relativa de la rótula plástica y el pandeo en tracción.



(c) Pandeo local



(d) Fractura del ala horizontal del ángulo superior del perfil XL.

Figura 3.15: Modo de falla experimental perfil XL intermedio (Guerrero, 2017).

La comparación entre la curva de histéresis resultante del modelo numérico y según los registros de la celda de carga y el instrumento LVTD del actuador hidráulico del ensayo experimental se muestra en la Figura 3.16.

En cuanto a la capacidad a tracción del perfil intermedio, en el modelo numérico se obtiene un máximo valor de 24,34 tonf, con una diferencia inferior al 1% respecto al ensayo experimental. Similar al comportamiento del modelo numérico del perfil largo, en la curva histerética del perfil intermedio (Figura 3.16), en la zona de tracción, respecto al ensayo experimental se obtiene un resultado más cercano en los ciclos intermedios y finales en tracción, mientras que en los primeros ciclos se obtiene una sobrerresistencia de la riostra.

Por otra parte, la capacidad a compresión numérica es de 18,85 tonf, el cual es un 2% superior al registro experimental. En la Figura 3.16, se observa que la degradación de la resistencia a compresión de la curva numérica es semejante respecto al ensayo experimental, aunque en los últimos ciclos la curva numérica tiende a poseer mayor capacidad.

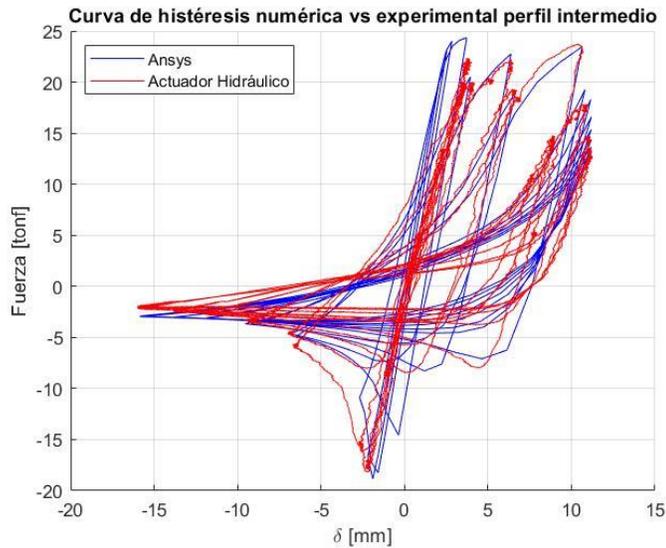


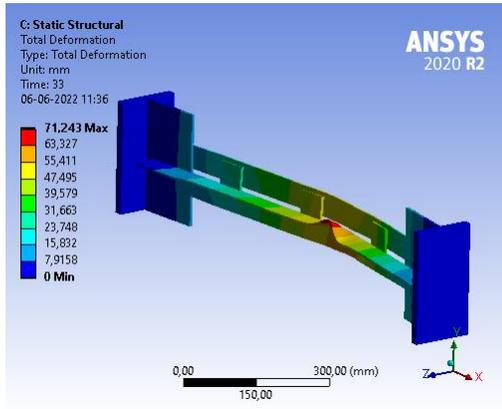
Figura 3.16: Curva de histéresis numérica vs experimental perfil XL intermedio.

3.2.7.3. Perfil XL Corto

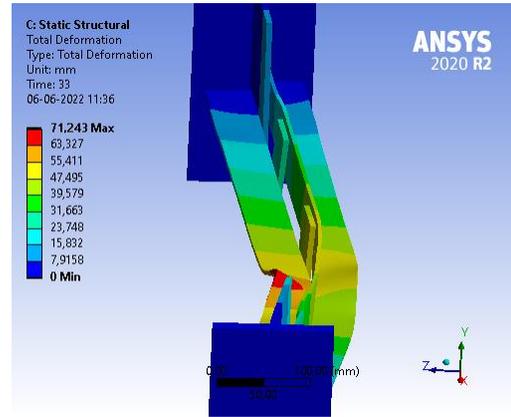
En el análisis del perfil XL corto se utiliza un módulo tangente equivalente a un 1,0% del Módulo de Young registrado en el ensayo de materiales, un nivel de imperfección inicial de $L/200$ (4,82 mm) y una razón para el mallado de elementos finitos de 1:300.

A partir del modelo numérico del perfil XL corto (Figura 3.17) se obtiene un modo de falla hacia los ciclos finales de pandeo global en flexión junto con la presencia de un pandeo local en el ala horizontal de uno de los ángulos del perfil XL ubicado entre el conector intermedio central y uno de los conectores intermedios y también se observa el pandeo en tracción en la misma posición relativa que la rótula plástica, pero del ángulo contrario en el cual se observa la rótula plástica.

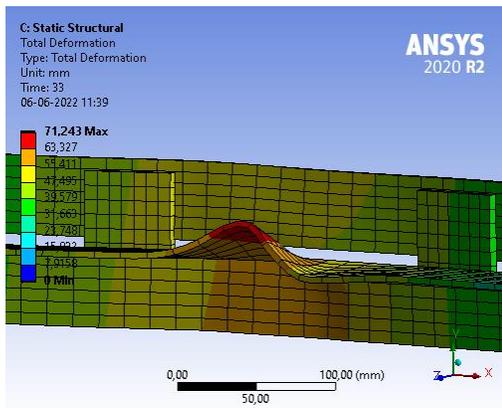
En los primeros ciclos la diagonal exhibe una rotación de su sección transversal observándose un pandeo global inicial torsional, para luego pandear globalmente en flexión en torno al eje geométrico vertical (eje Y-Y) del perfil, pero con una deformación fuera del plano menor relativo al perfil largo e intermedio. A diferencia del modelo numérico, durante el ensayo experimental de este perfil (Figura 3.18) no se observó una rotación de la sección transversal notoria, en donde los valores máximos de rotación sobrepasaron ligeramente los $2,0^\circ$, indicando la nula componente torsional en el pandeo como señala Guerrero (2017). Por otro lado, el modelo del perfil XL corto, al igual que en los casos anteriores, no logra capturar hacia los ciclos los finales la grieta que se propaga en el ala horizontal del ángulo en el que se produce la rótula plástica como el espécimen experimental.



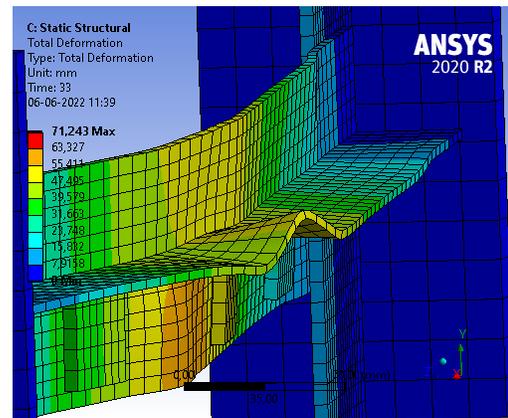
(a) Vista isométrica



(b) Pandeo global



(c) Pandeo local

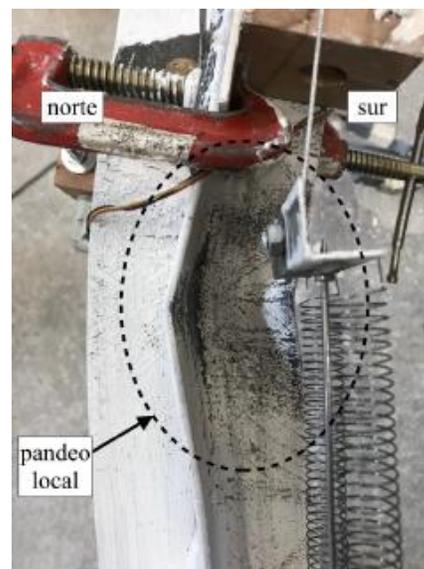


(d) Pandeo en tracción

Figura 3.17: Modo de falla numérico perfil XL corto.



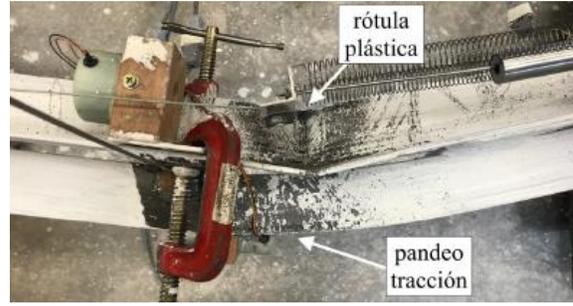
(a) Pandeo global.



(b) Pandeo local.



(c) Fractura del ala horizontal del ángulo superior del perfil XL.



(d) Ubicación relativa de la rótula plástica y el pandeo en tracción.

Figura 3.18: Modo de falla experimental perfil XL corto (Guerrero, 2017).

En la Figura 3.19 se muestra la comparación entre la curva de histéresis del modelo numérico respecto a los datos experimentales.

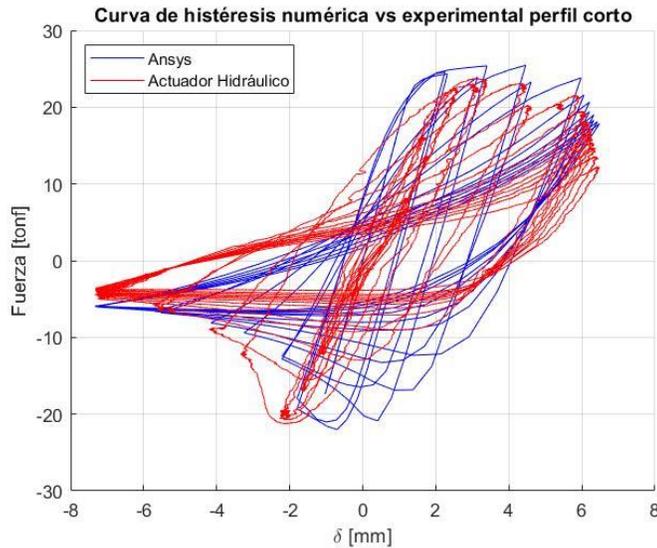


Figura 3.19: Curva de histéresis numérica vs experimental perfil XL corto.

La capacidad a tracción numérica es de 25,47 tonf correspondiente a una sobrerresistencia de un 5% relativo a la resistencia máxima experimental del perfil XL corto. Esta sobrerresistencia se relaciona con el valor del módulo tangente asignado para este perfil ($1,0\% \times E$), el cual proporciona un endurecimiento en tracción adicional. En la Figura 3.19 en la zona en que el perfil se encuentra trabajando en tracción, si bien la curva de histéresis numérica sigue una tendencia similar en cuanto a la degradación de la resistencia a tracción, se observa que la capacidad a tracción del modelo numérico se encuentra sobre la capacidad a tracción del espécimen ensayado en todos los ciclos.

La capacidad a compresión numérica es de 22,02 tonf y es notoriamente mayor en comparación a los perfiles largos e intermedio, resultado esperado considerando la menor esbeltez global del perfil

corto. En los primeros ciclos en compresión se observa que la curva histerética numérica se encuentra desplazada horizontalmente, al igual que en el perfil largo. El nivel de la degradación a compresión sigue una tendencia similar que la curva de histéresis experimental en los diferentes grados de demandas de ductilidad, aunque el modelo numérico registra una menor carga en los ciclos intermedios y una carga superior hacia los últimos ciclos en compresión. Por otro lado, luego de alcanzar la deformada en tracción durante los ciclos del historial de desplazamientos y cuando el perfil comienza a trabajar en compresión, el modelo numérico experimenta una mayor carga respecto a la curva experimental.

Capítulo 4. Modelación de marcos arriostrados

4.1. Configuración de los marcos estructurales y selección de perfiles XL

En primer lugar, se establecen las configuraciones y dimensiones de los pórticos arriostrados concéntricamente, buscando implementar sistemas estructurales y longitudes de las riostras comúnmente presente en la práctica. Se utilizan marcos arriostrados de único nivel de tipo: En X, V invertida (Chevron) y Diagonal única. En las dos primeras estructuraciones el pórtico posee un único vano, mientras que para la configuración en diagonal única el pórtico posee dos vanos de modo que a la vez que una riostra trabaja en compresión, la otra lo hace en tracción.

Preferiblemente en el diseño de marcos arriostrados las riostras se disponen comprendiendo un ángulo entre 30° y 60° respecto a la horizontal, de lo contrario, se generan esfuerzos internos en las riostras o en el marco que son desproporcionados y también se puede dificultar la construcción de las conexiones entre las riostras y el marco (Crisafulli, 2018). Para el presente trabajo las diagonales comprenden un ángulo de 45° respecto a la horizontal para los pórticos arriostrados en X y Diagonal única, y un ángulo de 53° respecto a la horizontal para pórticos arriostrados tipo V invertida. Se escogen alturas de entrepiso de 2,85 m para los pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única, y de 3,5 m y 4,25 m para los pórticos arriostrados en X.

En cuanto a la selección de los arriostramientos, se trabaja principalmente con un catálogo de perfiles XL compuestos de ángulos laminados de acero estructural de calidad A270ES e incorporando perfiles XL de ángulos plegados de acero estructural ASTM A36. Por otra parte, las columnas, vigas, atiesadores y placas gusset son de calidad de acero estructural ASTM A36. En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se presentan los perfiles XL a utilizar y la altura de entrepiso de los marcos para los respectivos modelos para cada configuración de los pórticos arriostrados. La nomenclatura de los perfiles XL corresponde a: “XL altura [cm] x peso [kgf/m]” y las propiedades geométricas se presentan en la sección Anexo A.

Se verifica que los perfiles cumplan con los límites de esbeltez de la norma NCh2369.Of2003. Esto es, el límite de esbeltez global según la ec. 2.1 y con los límites de esbeltez local para ángulos laminados (ec. 2.2) y ángulos plegados (ec. 2.3) según corresponda.

Tabla 4.1: Perfiles XL en pórtico arriostrado en X.

Perfiles XL Laminados		Perfiles XL Plegados
hpiso = 3,5m	hpiso = 4,25m	hpiso = 4,25m
XL 13x11,8		XL 20x23,5
XL 13x15,5		XL 25x36,7
XL 13x19,0		
XL 16x19,3	XL 16x19,3	
XL 16x23,7	XL 16x23,7	
XL 16x28,1	XL 16x28,1	
	XL 20x30,1	
	XL 20x35,7	

Tabla 4.2: Perfiles XL en pórtico arriostrado en V invertida.

Perfiles XL Laminados	Perfiles XL Plegados
hpiso = 2,85m	hpiso = 2,85m
XL 13x11,8	XL 20x23,5
XL 13x15,5	
XL 16x19,3	

Tabla 4.3: Perfiles XL en Diagonal única.

Perfiles XL Laminados	Perfiles XL Plegados
hpiso = 2,85m	hpiso = 2,85m
XL 13x11,8	XL 20x23,5
XL 16x19,3	XL 25x36,7

Las configuraciones de las riostras en X consideran una altura de entrepiso de 3,5 m y 4,25 m para perfiles XL laminados y una altura de entrepiso de 4,25 m para perfiles XL plegados. La longitud de las diagonales (L) se considera como el largo total de la riostra continua como se observa en la Figura 4.1. Para las columnas se escoge un perfil IN 50x132 y para las vigas un perfil IN 60x139.

El apartado 8.3.4 de la norma NCh2369.Of2003 (INN, 2003) establece que las diagonales en pórticos arriostrados en X se deben conectar en el punto de cruce. Por otra parte, para efecto del cálculo de la esbeltez global de la riostra, dicho punto se podrá considerar fijo en la dirección perpendicular al plano de las diagonales para los efectos de determinar la longitud de pandeo de la pieza, cuando una de las diagonales sea continua.

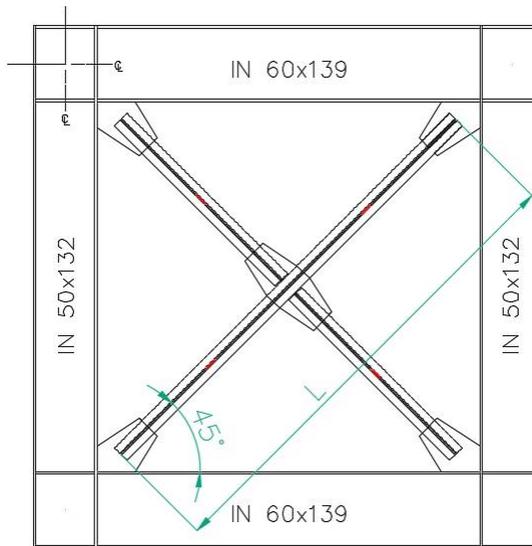


Figura 4.1: Pórtico arriostrado en X.

Los pórticos arriostrados tipo V invertida (Figura 4.2) poseen una altura de entrepiso de 2,85 m y, en particular para esta configuración, las diagonales comprenden un ángulo de 53° con respecto a la horizontal como se menciona previamente. Se escoge un perfil IN 50x132 para las columnas de los pórticos en V invertida y para las vigas se utiliza un perfil IN 60x139.

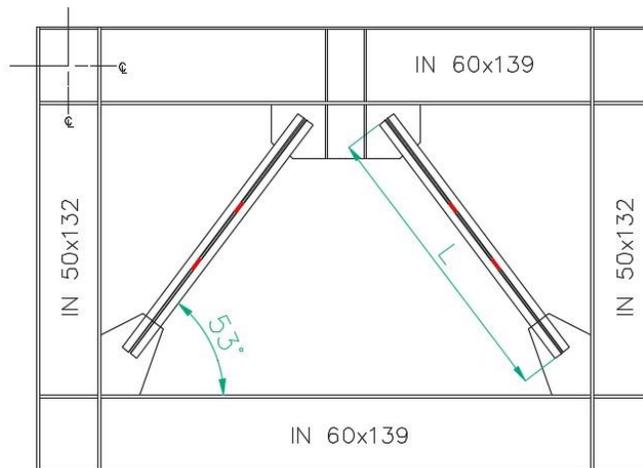


Figura 4.2: Pórtico arriostrado en V invertida.

En pórticos arriostrados tipo Chevron, al realizar un análisis por capacidad local de las riostras, en el momento que una diagonal ha pandeado y se encuentra en su resistencia post-pandeo (30% de la resistencia esperada en compresión de la riostra de acuerdo con el código AISC 341-16) mientras que la otra diagonal está fluyendo en tracción, se genera una diferencia en la componente vertical de las fuerzas en el nudo central de la viga donde se conectan las riostras. A partir de este efecto se desarrolla una importante sollicitación flexural en la viga, además, de un eventual pandeo debido a la suma de la componente horizontal de las fuerzas.

La sección 8.6.6 de la norma prNCh2369 (2018) indica que en pórticos arriostrados tipo V o V invertida, la viga debe ser continua en la conexión con los arriostramientos y se debe diseñar considerando que las diagonales no constituyen un apoyo vertical para cargas gravitacionales. Por otro lado, la viga se debe diseñar para resistir una carga transversal (dirección fuera del plano de las diagonales) ubicada en el punto de unión con la riostra comprimida, igual al 2% de la capacidad esperada en compresión de dicha diagonal.

Los pórticos con riostras en diagonal única (Figura 4.3) poseen 2 vanos y consideran una altura de entrepiso de 2,85 m. Para las columnas se escoge el perfil IN 50x132 y para las vigas el perfil IN 60x139. En particular para el modelo con diagonales XL 25x36,7, en el análisis de pandeo lineal se observa una falla en compresión producto del pandeo del alma de la viga superior izquierda del pórtico, con lo que se decide para este modelo aumentar el espesor del alma de las vigas y columnas desde 8 mm a 14 mm y 12 mm respectivamente, de modo que el alma clasifique como compacta según la tabla B4.1 del código AISC 360-16. Al realizar este cambio no se exhibe una falla en compresión de la viga en el análisis de pandeo lineal, sino que se observa un pandeo de la diagonal en compresión.

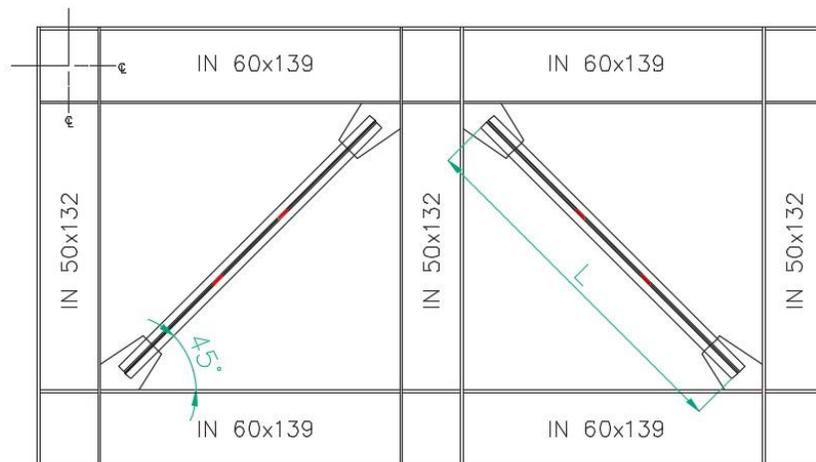


Figura 4.3: Pórtico arriostrado en diagonal única.

4.2. Diseño de conexiones

4.2.1. Conexión de la diagonal

Las fuerzas de diseño de las conexiones de la riostra se determinan según las disposiciones establecidas en el código AISC 341-16 para conexiones de diagonales sísmicas en sistemas SCBF. En este trabajo se utilizan las cargas de diseño estimadas en base a un análisis por capacidad de la resistencia esperada de las riostras, estas disposiciones se describen en la sección 2.1.3 del presente documento. La resistencia requerida en tracción, compresión y flexión de las placas gusset se listan a continuación:

- Resistencia requerida en tracción: La resistencia esperada en tracción de la riostra, expresada por: $R_y F_y A_g / \alpha_s$. En el caso de perfiles XL plegados, el factor R_y adquiere el valor de 1,3 según la Tabla A3.1 del código AISC 341-16, pues se refiere a planchas de acero ASTM A36. Para perfiles XL formados a partir de ángulos laminados de acero A270ES el factor R_y se considera igual a 1,27. Este último valor se determina en base al máximo valor de R_y obtenido en el ensayo de materiales realizado en el estudio de Guerrero (2017).
- Resistencia requerida en compresión: La resistencia esperada en compresión de la riostra. Se permite considerar el menor valor entre $R_y F_y A_g / \alpha_s$ y $F_{cre} A_g / (0,877 \alpha_s)$.
- Acomodación del pandeo de la riostra: Las conexiones de las diagonales deben ser capaces de resistir las fuerzas flexurales o las rotaciones impuestas inducidas por el efecto del pandeo global de la riostra.

La geometría de los gusset se origina en función del Método de la Fuerza Uniforme (UFM, por sus siglas en inglés), el cual permite determinar la distribución de las fuerzas provenientes de la riostra en la conexión. Este método presenta una expresión que relaciona el ángulo que describe la riostra con la vertical con la ubicación de los centroides de ambos bordes del gusset adyacentes al pórtico, de modo que no exista momento solicitante en las interfaces gusset-columna, gusset-viga y viga-columna (Tamboli, 2017).

Las dimensiones α y β en las Figuras 4.4 y 4.5 describen la ubicación de los centroides de la interface gusset-viga y gusset-columna, respectivamente. Estas dimensiones deben satisfacer la siguiente expresión tal que no se generen momentos:

$$\alpha - \beta \cdot \tan \theta = e_B \cdot \tan \theta - e_C \quad (4.1)$$

Donde,

α : Distancia desde el borde del ala o alma de la columna hacia el centroide del borde gusset-viga.

β : Distancia desde el borde del ala de la viga hacia el centroide del borde gusset-columna.

θ : Ángulo entre el eje centroidal de la riostra y la vertical.

e_B : La mitad de la altura de la viga.

e_C : La mitad de la altura de la columna. Notar que cuando se conecta el gusset con el alma de la columna, e_C se aproxima a cero.

Las fuerzas solicitantes en la conexión indicadas en las Figuras 4.4 y 4.5 son:

P: Tracción o compresión solicitante para la conexión de la diagonal.

R: Corte solicitante para la conexión de la viga.

A: Tracción o compresión solicitante para la conexión de la viga.

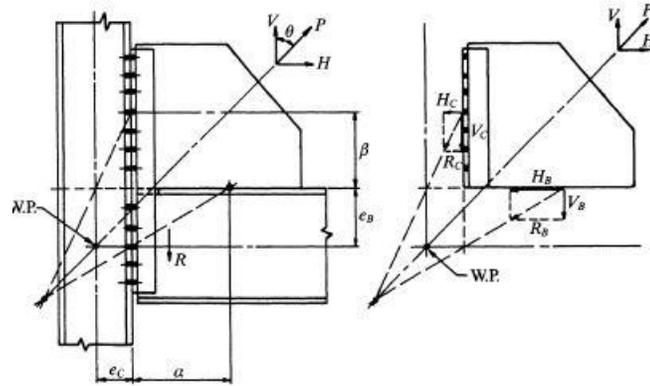


Figura 4.4: Método de la Fuerza Uniforme (UFM) (Fuente: Tamboli, A., 2017).

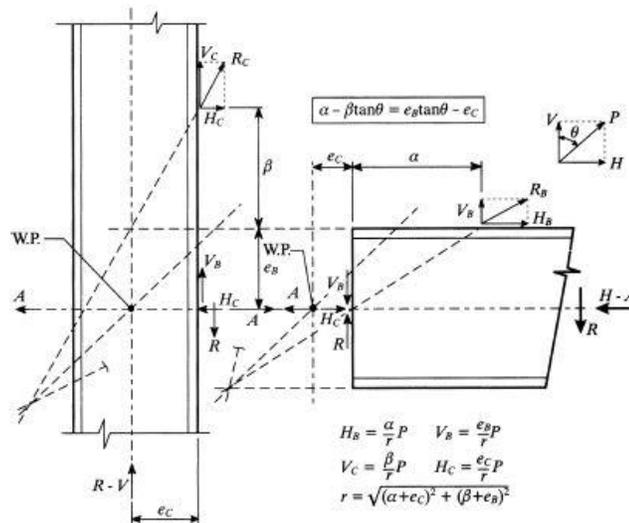


Figura 4.5: Distribución de fuerzas para el método de la fuerza uniforme (Fuente: Tamboli, A., 2017).

La descomposición de las fuerzas en la conexión indicadas en las figuras según el método de la fuerza uniforme son las siguientes:

H: Componente horizontal de la fuerza P.

V: Componente vertical de la fuerza P.

H_B : Corte solicitante en la interfaz gusset-viga.

V_B : Fuerza axial solicitante en la interfaz gusset-viga.

H_C : Fuerza axial solicitante en la interfaz gusset-columna.

V_C : Corte solicitante en la interfaz gusset-columna.

Las fuerzas en las interfaces gusset-viga y gusset-columna se determinan según las siguientes ecuaciones:

$$H_B = \frac{\alpha}{r} P \quad (4.2)$$

$$V_B = \frac{e_B}{r} P \quad (4.3)$$

$$H_C = \frac{e_C}{r} P \quad (4.4)$$

$$V_C = \frac{\beta}{r} P \quad (4.5)$$

Donde, $r = \sqrt{(\alpha + e_C)^2 + (\beta + e_B)^2}$

Las fuerzas solicitantes para la conexión viga-columna son las siguientes:

Carga solicitante de corte: $R \pm V_B$

Carga solicitante axial: $A \pm H_C$

La geometría estándar de los gusset que conectan la riostra a la intersección viga-columna se muestra en la Figura 4.6, donde se proporciona una distancia de 2 veces el espesor de la placa gusset, medida desde donde finaliza la riostra en su eje centroidal hacia la línea perpendicular de plegado de la placa, de acuerdo con la recomendación indicada en el código AISC 341-16 (Figura 2.3) para que el gusset posea suficiente capacidad de rotación para acomodar la rotación requerida proveniente del pandeo global de la riostra, fuera del plano del pórtico en este caso. Además, se procura que los ejes de la diagonal, viga y columna coincidan en el punto de trabajo de modo que no se generen excentricidades en la conexión.

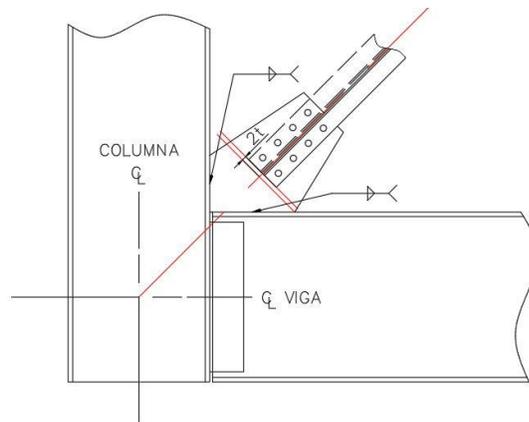


Figura 4.6: Geometría estándar utilizada del gusset.

Para la placa gusset que conecta las diagonales a la viga en pórticos arriostrados tipo V invertida (Figura 4.7) se provee una distancia vertical de 6 veces el espesor de la placa gusset, medida desde el borde del ala inferior de la viga hasta la parte superior de las diagonales y se disponen atiesadores de igual espesor que el gusset. De acuerdo con Roeder et al. (2011), proveer una distancia vertical de 6 veces el espesor de la placa gusset para esta conexión conducen a placas gusset de menor espesor, más compactas y permite incrementar la capacidad de deformación inelástica del sistema. Adicionalmente, este espacio libre retrasa el inicio del desgarro de la soldadura que une el gusset y la viga, reduce daños extras a la viga y facilita la construcción de la conexión.

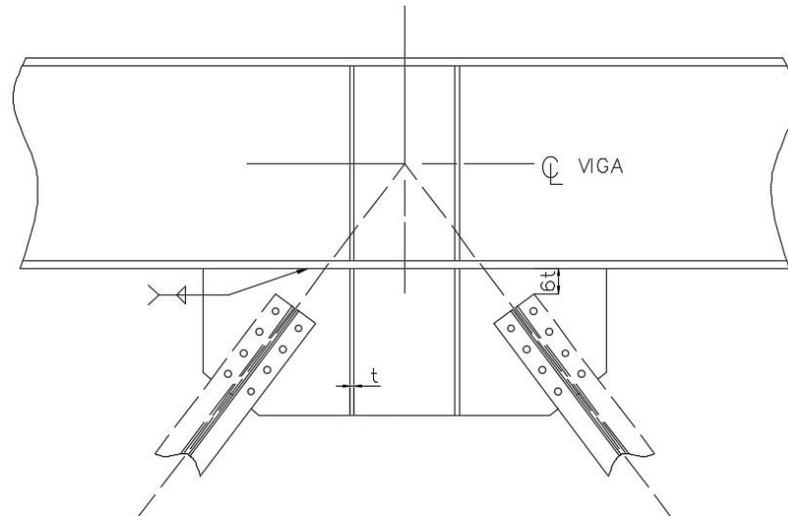


Figura 4.7: Conexión diagonales – viga en pórticos arriostrados tipo V invertida.

Con el objetivo de establecer las dimensiones de las conexiones, la conexión entre la riostra y el gusset se considera mediante pernos de alta resistencia ASTM A325 tipo aplastamiento con hilo no excluido del plano de corte, y la unión entre el gusset hacia las interfaces gusset-viga y gusset-columna a través de soldadura de filete con una resistencia de clasificación del metal de relleno de FE70xx. Luego, se procede a verificar los estados límites que actúan sobre los elementos a conectar, los elementos de conexión y los conectores.

Cabe destacar que en los modelos elaborados en ANSYS Workbench no se incluyen los pernos ni soldaduras en la modelación. Para la conexión entre los distintos cuerpos se utiliza el tipo de contacto *bonded* del software, como se menciona más adelante en la sección 4.3.2 del presente documento.

En caso de incluir los pernos de alta resistencia en la modelación, a través de condiciones de borde como la herramienta *Bolt Pretension* presentada en el documento ANSYS Mechanical User's Guide (ANSYS, Inc., 2022c), en ANSYS Workbench se puede otorgar una tracción interna a estos, con el objetivo de cumplir con la pretensión indicada en la sección 8.5.6 de la norma NCh2369.Of2003, la cual establece que los pernos de alta resistencia se deben colocar con la

pretensión indicada para uniones de deslizamiento crítico (INN, 2003), cuya pretensión se detalla en la Tabla J3.1 del código AISC 360-16 (70% de la resistencia mínima de rotura del perno). Para asegurar la debida pretensión, los pernos de alta resistencia se pueden dividir según su método de apriete: perno de alta resistencia estándar, el cual debe ser apretado con llave de torque calibrada; perno de tensión controlada (TC); y perno con golilla con Indicación de Tensión Directa (DTI) (Ibañez, 2019).

En cuanto a la sección de Whitmore en el gusset, en ciertos modelos esta no se alcanza a desarrollar completamente, con lo que para estos casos se considera una sección de Whitmore reducida de manera que su centroide coincida con el centroide de la riostra de acuerdo con una de las alternativas para cuando el centro de la sección de Whitmore se encuentra desplazada señalada por Ibañez (2019), como se muestra en la Figura 4.8.

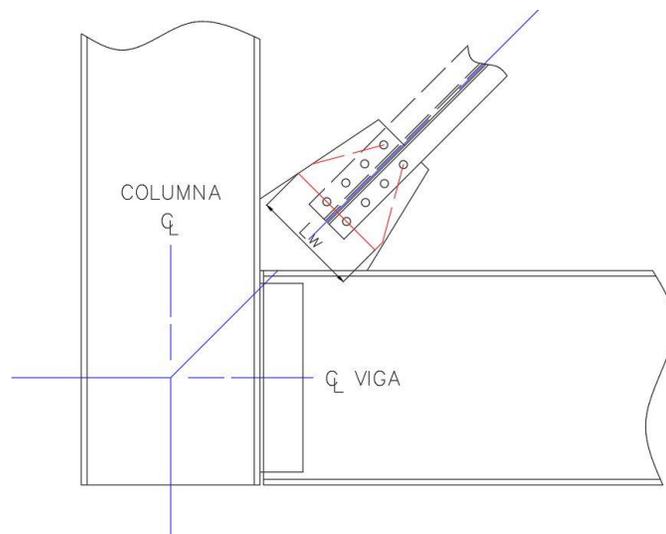


Figura 4.8: Reducción ancho efectivo de Whitmore.

Las características de los diseños de las conexiones se resumen a continuación:

- Las disposiciones de las líneas de plegado de “2t” (AISC, 2016a) y “6t” (Roeder et al, 2011) de las placas gusset de las esquinas y centrada al medio de la viga de los pórticos tipo Chevron, respectivamente, se aplican con el fin de permitir la acomodación del pandeo de las diagonales.
- Las dimensiones del gusset cumplen con la ecuación 4.1 de modo que no se generen solicitaciones de momento en las interfaces gusset-viga y gusset-columna (Tamboli, 2017).
- Las fuerzas de diseño de las conexiones de las diagonales se determinan mediante un diseño por capacidad de las riostras (AISC, 2016a), según se describe anteriormente en esta sección.
- Los pernos se consideran de alta resistencia de calidad ASTM A325 tipo aplastamiento con hilo no excluido del plano de corte.

- Los pernos que conectan la riostra al gusset se diseñan para prevenir una falla por corte producto de transmitir las fuerzas axiales provenientes de la diagonal a la placa gusset (AISC, 2016b).
- Se verifica el espaciamiento máximo y mínimo entre pernos y distancia máxima y mínima a los bordes según AISC 360-16 (AISC, 2016b), y el espaciamiento entre pernos y distancia al borde de acuerdo con recomendaciones por motivos constructivos según señala Ibañez (2019). Por otro lado, se detallan los pernos de acuerdo con el diámetro máximo y gramil indicado de catálogos de perfiles XL para ángulos laminados y plegados.
- Se verifican los estados límites de bloque de corte y aplastamiento y desgarre de la perforación en las diagonales XL (AISC, 2016b). Para las diagonales propiamente tal no se verifican los estados límites de fluencia del área bruta y fractura del área neta efectiva para la fuerza de diseño de la resistencia esperada en tracción de la diagonal ($R_y F_y A_g$) de acuerdo con el código AISC 341-16 cuando la sección se ha reducido o cuando el área neta se ve reducida producto del retardo de corte. La sección F2.5b del código AISC 341-16 requiere que el área neta efectiva de la riostra sea mayor o igual que el área gruesa de esta, sin embargo, las diagonales XL de los modelos no cuentan con un refuerzo que permita satisfacer esta disposición. Cabe destacar que los estados límites de fluencia de la sección bruta o fractura de la sección neta de la diagonal pueden gobernar ante las fuerzas de diseño dada por una combinación de cargas o la máxima fuerza que el sistema le puede transmitir.
- Las placas gusset se diseñan para prevenir la fluencia de la sección bruta, fractura de la sección neta y el pandeo de esta (AISC, 2016b). Se verifican los estados límites de bloque de corte y aplastamiento y desgarre de la perforación en los gusset (AISC, 2016b).
- En las interfaces gusset-columna y gusset-viga se verifican los esfuerzos de corte y axial de la placa gusset (AISC, 2016b).
- Las soldaduras en las interfaces gusset-columna y gusset-viga se diseñan como soldadura de filete con una resistencia de clasificación del material de relleno de FE70xx. Se verifica la resistencia de las soldaduras y cumplir con los tamaños límite según el código AISC 360-16 (AISC, 2016b).
- Se verifican los estados límite de fluencia local del alma, arrugamiento del alma, pandeo local del ala, pandeo lateral del alma y corte del alma (AISC, 2016b), producto de fuerzas concentradas provenientes de la conexión de la diagonal sobre las columnas y vigas.

4.2.2. Conectores intermedios

La altura de los conectores intermedios se considera de forma que sea al menos la altura total del perfil XL menos 4 veces la dimensión del filete de soldadura, en tanto que su longitud se selecciona tal que sea al menos $2/3$ de la altura del conector, en base a recomendaciones indicadas en el Manual de Diseño para Ángulos Estructurales L-AZA (Vergara del Pozo, 2004). Además, se deben disponer por lo menos 2 planchuelas intermedias en el perfil XL.

Por otra parte, la separación entre los conectores intermedios del perfil XL se encuentra limitada por la razón entre: la esbeltez definida por la separación entre conectores y el radio de giro mínimo

de un ángulo individual (a/r_i), y la esbeltez global gobernante del perfil compuesto (λ_G). En la Tabla 4.4 se muestra la cota superior para el porcentaje que representa a/r_i sobre λ_G que debe cumplir la separación entre conectores intermedios según los códigos de diseño AISC 360-16, AISC 341-16 y AISI S100-16.

Tabla 4.4: Límite separación entre conectores intermedios.

Código de Diseño	$\frac{a/r_i}{\lambda_G}$
AISC 360-16	75%
AISC 341-16	40%
AISI S100-16	50%

En la Figura 4.9 se muestra la forma de medición de la separación entre conectores intermedios (“a”) a emplear en el presente estudio. Para la distancia entre conectores intermedios esta dimensión se mide entre los centroides de estos, y cuando se requiere establecer la separación entre el conector intermedio más próximo al gusset y este último, la distancia a utilizar es entre el centroide del conector intermedio y el borde del gusset. Para los modelos de pórticos arriostrados, las diagonales XL conformadas por ángulos laminados cumplen al menos con la separación según el código AISC 360-16, en tanto que las diagonales XL conformadas por ángulos plegados cumplen al menos con la separación indicada en el código AISI S100-16.

Respecto a la ubicación de los conectores intermedios, estos no cumplen con el requisito para marcos SCBF de que no deben ubicarse dentro del cuarto central de la longitud libre de la riostra, aunque sí con los requisitos para marcos OCBF del código AISC 341-16, los cuales no consideran requerimientos adicionales en relación con el código AISC 360-16 referente a conectores intermedios.

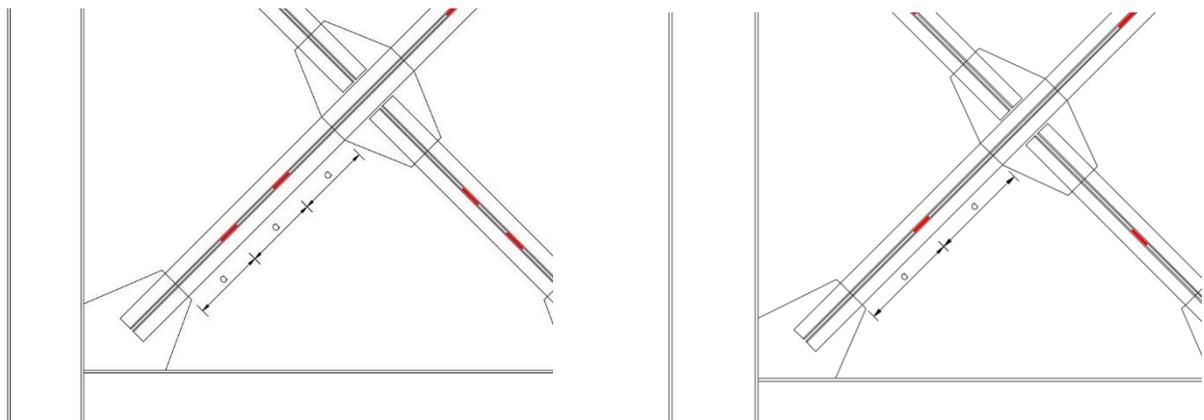
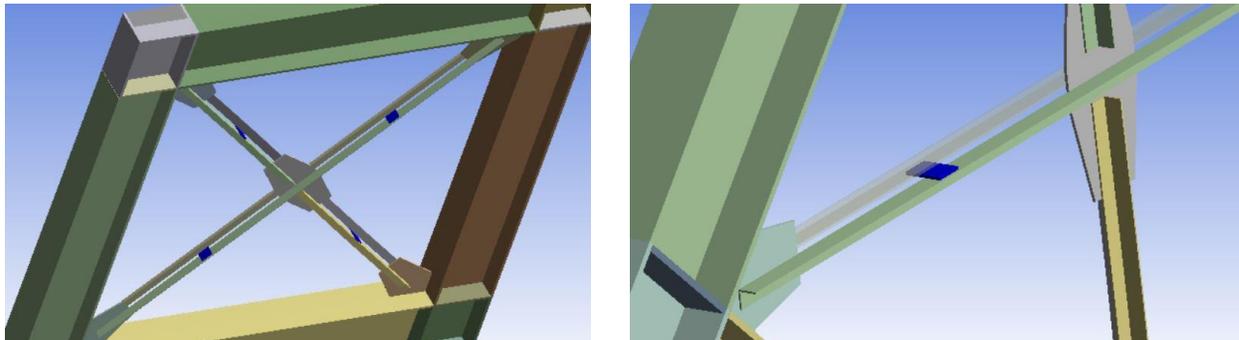


Figura 4.9: Ejemplos de medición separación entre conectores intermedios y separación entre el centroide del conector intermedio y el borde del gusset o placa central.

Los conectores intermedios se disponen de manera que el plano correspondiente a la cara de mayor área de estos sea ortogonal al plano que define la cara de mayor área del gusset (Figuras 4.9 y 4.10), ya que dada la capacidad de rotación esperada del gusset fuera del plano y que las propiedades de ambos ejes geométricos del perfil XL son iguales, se espera que las diagonales se pandeen principalmente fuera del plano del pórtico.



(a) Vista en 3D.

(b) Vista en 3D y ángulo superior del perfil XL con un 40% de transparencia.

Figura 4.10: Disposición de conectores intermedios.

4.3 Análisis de pandeo lineal

4.3.1. Materiales

Los ángulos que conforman perfiles XL laminados consideran un acero estructural de calidad A270ES, mientras que para los ángulos plegados, columnas, vigas, gussets, atiesadores y planchuelas intermedias se utiliza un acero ASTM A36. Las propiedades nominales de ambos materiales se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Propiedades nominales de los materiales.

Acero Estructural	ρ [kgf/m ³]	E [MPa]	Fy [MPa]	Fu [MPa]
A270ES	7850	200000	270	420
ASTM A36	7850	200000	250	400

4.3.2 Contacto

De manera similar al tipo de contacto definido en la sección 3.1.2 del presente documento para los modelos de riostras aisladas, en los modelos de pórticos arriostrados el tipo de contacto asignado entre las superficies de los distintos cuerpos es de tipo *bonded* y se sigue el mismo procedimiento para determinar las superficies de tipo *contact* y *target*. Sin embargo, a diferencia de una

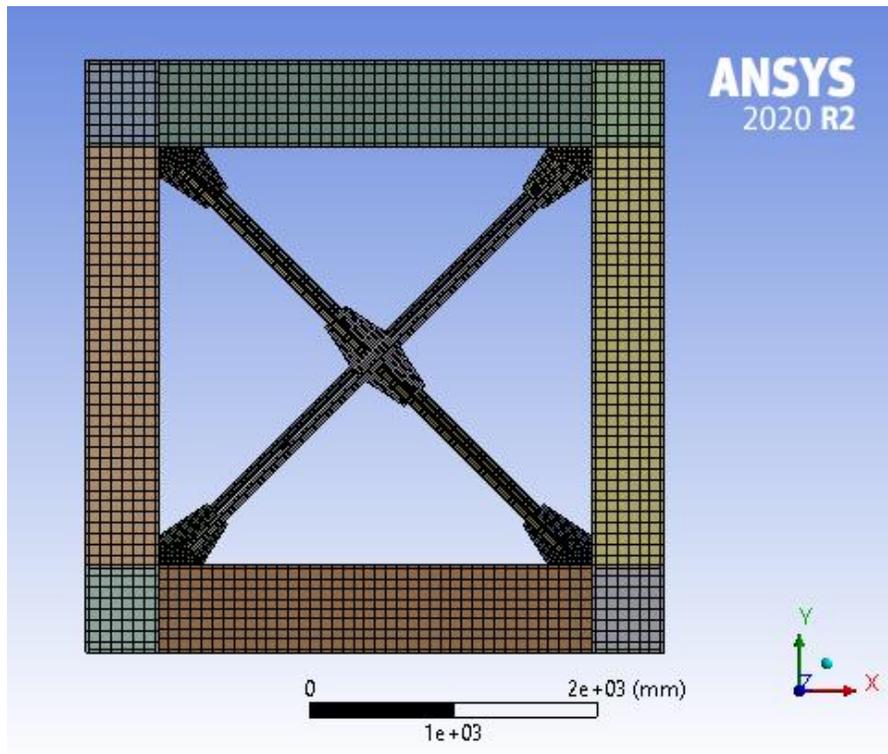
formulación de tipo MPC, se escoge como controlada por el programa debido a problemas de convergencia.

4.3.3. Mallado

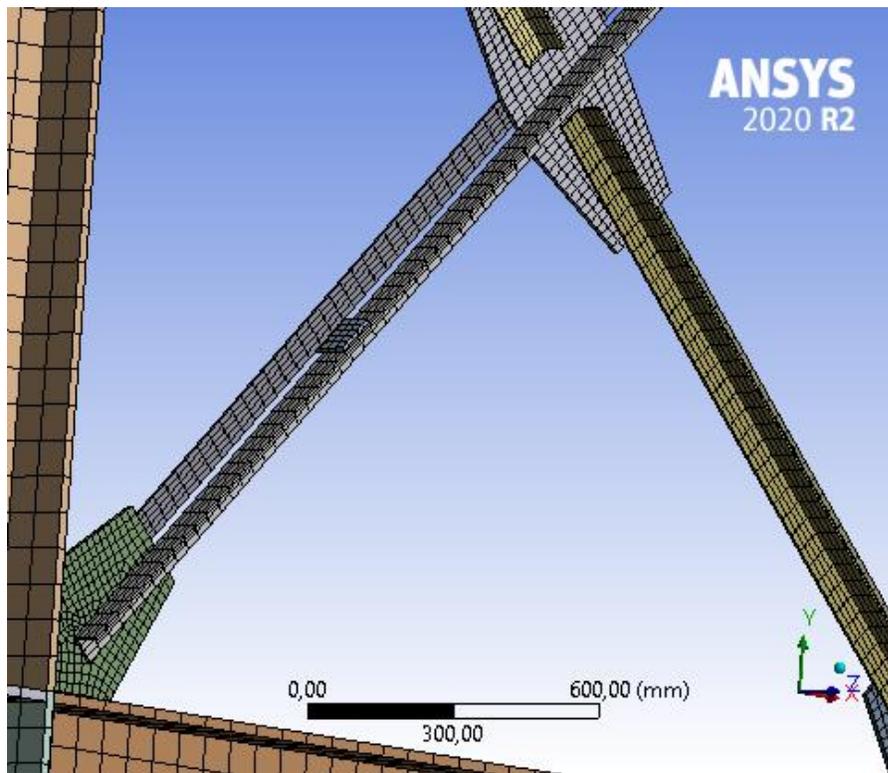
El nivel del mallado de elementos finitos se determina en base al análisis de sensibilidad de la sección 3.2.6 del presente documento. De acuerdo con esta la razón de 1/300 entre el área de una cara del sólido de elemento finito aproximado este al caso cúbico y el área longitudinal proyectada del perfil es la óptima considerando tiempo computacional y precisión de la solución.

Luego, se escoge el nivel 1/300 para determinar el tamaño del mallado de las riostras del pórtico y también se realiza un refinamiento del mallado en las placas gusset y conectores intermedios para los cuales se considera un tamaño del 50% del elemento finito de la riostra. Para las columnas, vigas, atiesadores y zonas de unión viga-columna el tamaño del elemento finito se determina como la razón de 1/300 entre el área de una cara del sólido de elemento finito aproximado este al caso cúbico y el área longitudinal proyectada de la columna.

En la Figura 4.11 se muestra un ejemplo del mallado de elementos finitos para un modelo de pórtico arriostrado en X.



(a) Vista frontal



(b) Vista 3D

Figura 4.11: Mallado de elementos finitos pórtico arriostrado.

4.3.4. Restricciones en apoyos

A continuación, se presentan las restricciones en apoyos y condiciones de borde de los modelos utilizando el pórtico arriostrado en X como ejemplo, aunque estas restricciones y condiciones de borde son extrapolables a los modelos de pórticos arriostrados en V invertida y diagonal única igualmente.

En la cara basal de las columnas (apoyos C y D de la Figura 4.12) se restringen todos los grados de libertad de desplazamiento y rotación, exceptuando la rotación en el plano (R_z) del marco de acuerdo con el sistema de coordenadas de la Figura 4.12.

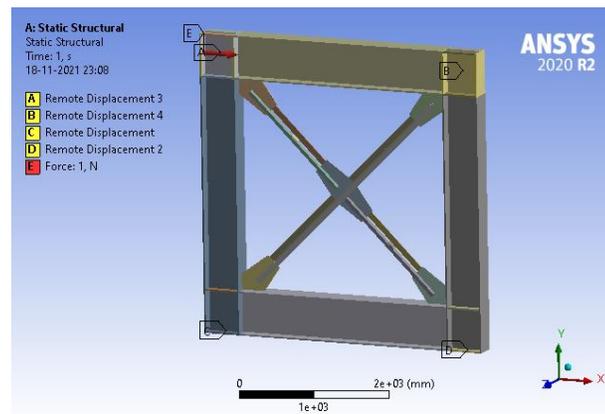
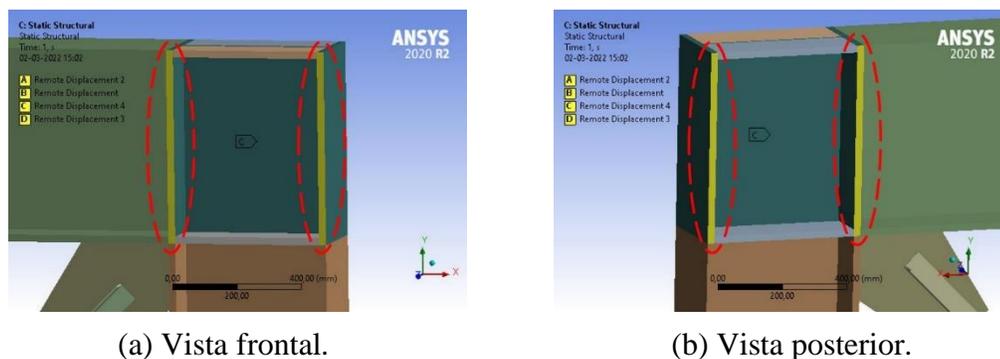


Figura 4.12: Restricciones en apoyos y condiciones de borde en pórtico arriostrado en X.

Al examinar el primer modelo, luego del análisis de pandeo lineal, se observa un pandeo torsional en una de las columnas, con lo cual se obtiene un modo de pandeo distinto al esperado dado por el pandeo de la riostra en compresión. Para corregir este efecto se restringen los desplazamientos fuera del plano (eje Z) de las 4 superficies normales al eje Z de las alas de cada columna ubicadas en la zona superior de cada pórtico a modelar. En la Figura 4.13 se muestra una vista frontal y posterior de una intersección viga-columna donde se observan estas superficies.



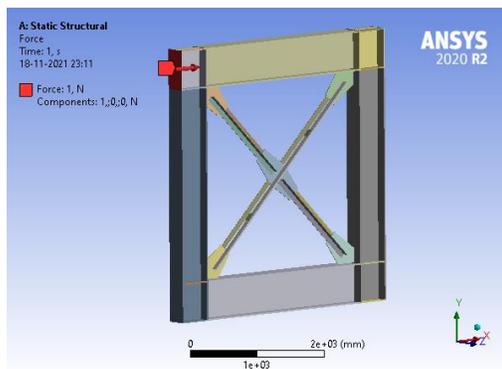
(a) Vista frontal.

(b) Vista posterior.

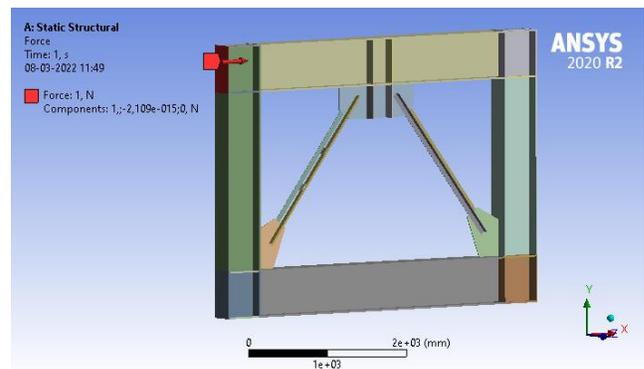
Figura 4.13: Restricción desplazamiento fuera del plano (eje Z) en las superficies normales al eje Z de las alas de cada columna ubicada en la zona superior de cada columna.

4.3.5. Modos de pandeo

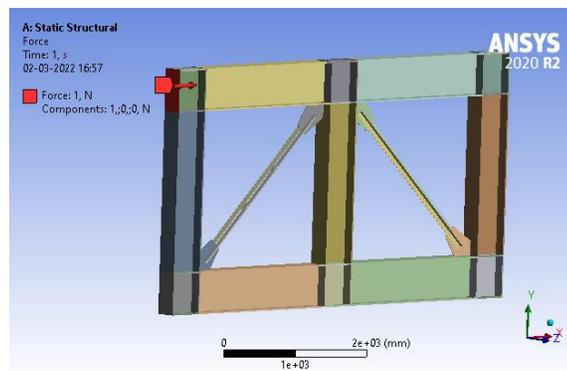
Se aplica una carga de 1 N en sentido horizontal positivo al eje x en el nudo superior izquierdo (Figura 4.14), específicamente en la cara externa del ala de la columna izquierda, y se procede a obtener el primer modo de pandeo del sistema expresado por el pandeo de la riostra discontinua en en el caso de los pórticos arriostrados en X (Figura 4.15a) y por el pandeo de la riostra ubicada a la derecha de los pórticos arriostrados en V invertida y Diagonal única como se observa en las Figura 4.15b y Figura 4.15c respectivamente, coincidente a lo esperado de acuerdo con el sentido de la carga aplicada. El primer modo de pandeo posteriormente define la imperfección inicial asignada al sistema para el análisis no lineal (Figura 4.15). En los modelos de pórticos arriostrados el primer modo de pandeo se manifiesta por un pandeo flexural, por un pandeo flexotorsional o un pandeo local focalizado principalmente en uno de los ángulos del perfil XL (Figura 4.15d).



(a) Modelo pórtico arriostrado en X

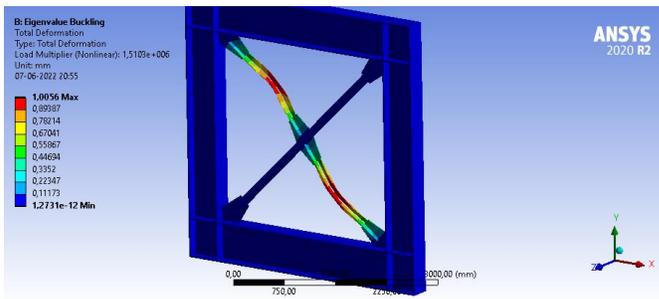


(b) Modelo pórtico arriostrado tipo V invertida.

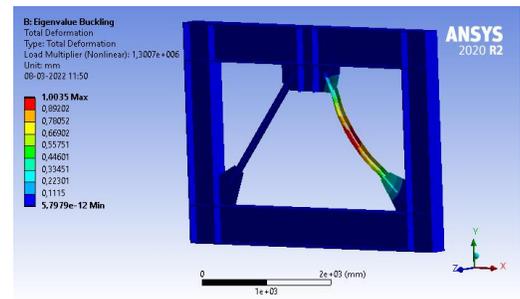


(c) Modelo pórtico arriostrado tipo diagonal única.

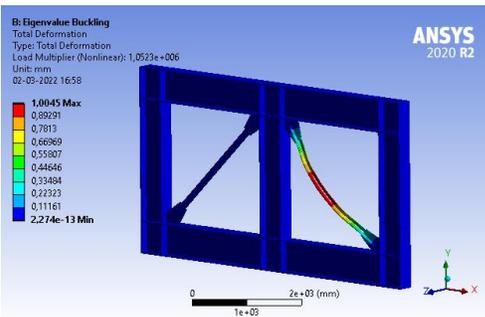
Figura 4.14: Aplicación de fuerza unitaria en el nudo superior izquierdo.



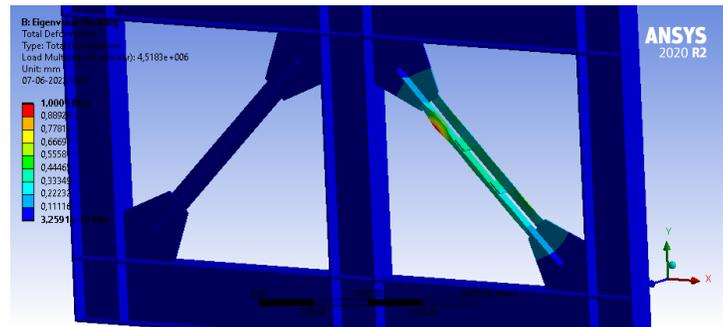
(a) Primer modo de pandeo flexotorsional -
Modelo pórtico arriostrado en X
(Factor de amplificación: 200)



(b) Primer modo de pandeo flexural -
Modelo pórtico arriostrado tipo V invertida
(Factor de amplificación: 360)



(c) Primer modo de pandeo flexural -
Pórtico arriostrado tipo diagonal única.
(Factor de amplificación: 300)



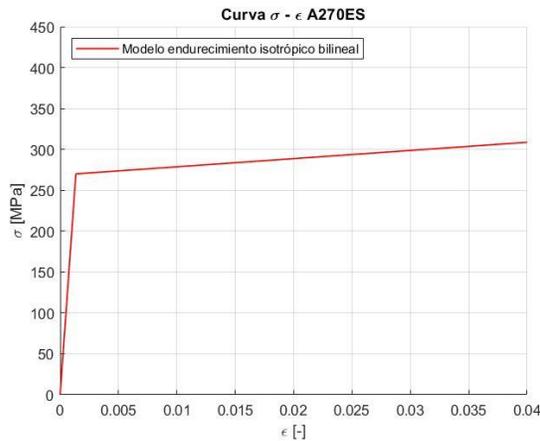
(d) Primer modo de pandeo local
Pórtico arriostrado tipo diagonal única
(Factor de amplificación: 60)

Figura 4.15: Ejemplos de primer modo de pandeo.

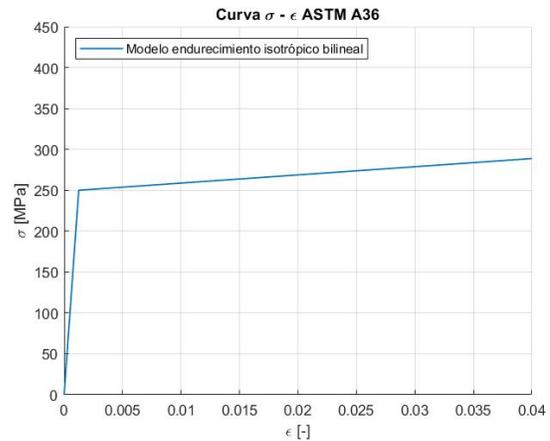
4.4. Análisis no lineal

4.4.1. Materiales

Para ambas calidades de acero A270ES y ASTM A36 se considera una respuesta del material dado por una curva tensión-deformación bilineal, en el que la pendiente post-fluencia se considera como 1.000 MPa, equivalente a un 0,5% del Módulo de Young nominal del acero, determinado según el análisis de sensibilidad de la sección 3.2.1 del presente documento. En la Figura 4.16 se muestran las curvas tensión-deformación bilineal de ambos materiales, considerando la tensión de fluencia mínima especificada para cada acero en la Tabla 4.5.



(a) A270ES.



(b) ASTM A36.

Figura 4.16: Curva tensión-deformación con endurecimiento isotrópico bilineal.

4.4.2. Imperfección inicial

El nivel de imperfección inicial se determina en base al estándar ASTM A6/A6M - 17a (Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling, 2017). Para el caso de perfiles ángulos, la variación permitida de la rectitud del perfil (en pulgadas) se determina del siguiente modo:

- Si la mayor dimensión de la sección transversal es inferior a 3 pulgadas: la variación permitida de la rectitud es 1/4 de pulgada si la longitud del perfil es menor o igual que 5 pies, o $1/4 \times (\text{número de pies de longitud total}/5)$ en pulgadas.
- Si la mayor dimensión de la sección transversal es igual o superior a 3 pulgadas: la variación permitida de la rectitud es $1/8 \times (\text{número de pies de longitud total}/5)$ en pulgadas.

Como se menciona en la sección 4.3.5 del presente documento, la imperfección inicial del análisis no lineal se asigna en función del primer modo de pandeo del pórtico, expresado principalmente por el modo de pandeo de la riostra discontinua en el caso de pórticos arriostrados en X y por el pandeo de la riostra ubicada a la derecha en los pórticos arriostrados en V invertida y Diagonal única. Luego, el valor numérico calculado de la variación permitida de la rectitud del perfil se utiliza como el factor de escala de la imperfección inicial asignada en ANSYS.

A modo de comparación, cuando la mayor dimensión de la sección transversal de las diagonales XL de los modelos es inferior a 3 pulgadas, se asigna una imperfección inicial equivalente a $L/240$; y cuando la mayor dimensión de la sección transversal de las diagonales XL de los modelos es igual o superior a 3 pulgadas, se asigna una imperfección inicial equivalente a $L/480$. Luego, el nivel de imperfección inicial a asignar es inferior a la tolerancia de rectilineidad para perfiles

ángulos del Catálogo Técnico de Productos Edición 2019 de AZA de 6,5 x L/1500 (equivalente a L/230) (AZA, 2019), aunque mayor a la variación en la rectitud permitida por la norma NCh428:2017 correspondiente a 1/1000 de la longitud axial entre los puntos a soportar lateralmente (INN, 2017).

4.4.3. Contacto, mallado y restricciones en apoyos

El tipo de contacto, nivel de mallado de elementos finitos, condiciones de borde y las restricciones de los grados de libertad en los apoyos se mantienen respecto al análisis de pandeo lineal.

4.4.4. Historial de desplazamientos

Se aplica un historial de desplazamiento cíclico incremental según recomendaciones del documento FEMA 461 (Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, 2007). El historial de desplazamiento considera 13 incrementos (o pasos) de la amplitud de deformación, llevándose a cabo 2 ciclos por cada amplitud.

El nivel de deformación se define en función de la deriva o drift de entrepiso del pórtico. La deformación objetivo máxima (Δ_m) se considera igual a una deriva de entrepiso del 1,5%. La amplitud a_{i+1} del paso $i+1$ (no de cada ciclo, dado que cada paso contiene dos ciclos) se determina según la siguiente expresión:

$$a_{i+1} = 1,4a_i \quad (4.6)$$

Donde a_i es la amplitud de deformación del paso previo.

Luego, la amplitud del paso 13 equivale a $a_{13} = \Delta_m$ y la amplitud inicial (o primer incremento) a $a_1 = 0,018\Delta_m$. FEMA 461 (2007) recomienda la realización de 10 o más incrementos y, específicamente, se escoge una cantidad de 13 incrementos de modo que la amplitud de deformación del último paso coincida con la deformación objetivo máxima (Δ_m) según la ecuación 4.6.

En la Figura 4.17 se muestra el historial de desplazamientos a aplicar y en la Tabla 4.6 se detalla la deriva de entrepiso objetivo de cada paso.

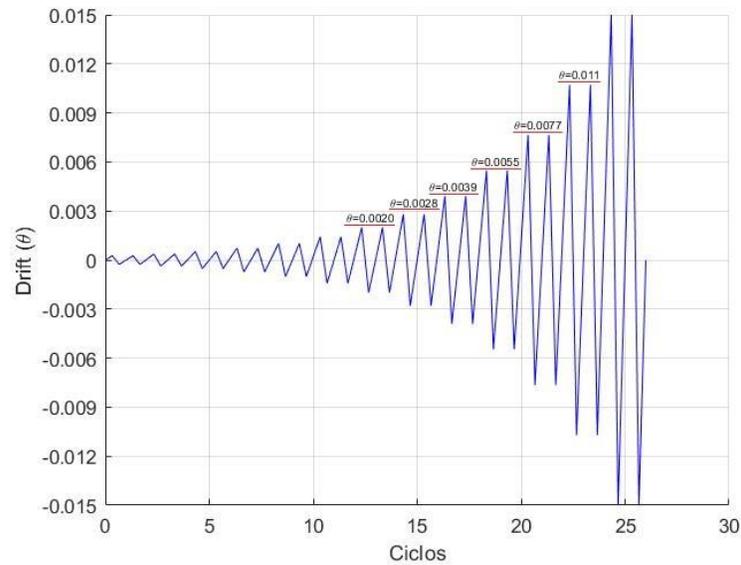


Figura 4.17: Historial de desplazamientos cíclico.

Tabla 4.6: Deriva de entrepiso en cada incremento de la amplitud del historial de desplazamientos cíclico.

Paso	Cantidad de Ciclos	Drift (θ)
1	2	0,00026
2	2	0,00037
3	2	0,00052
4	2	0,00073
5	2	0,0010
6	2	0,0014
7	2	0,0020
8	2	0,0028
9	2	0,0039
10	2	0,0055
11	2	0,0077
12	2	0,011
13	2	0,015

Además, FEMA 461 (2007) indica que al menos seis ciclos se deben haber desarrollado antes de observar el primer daño en los elementos. El código AISC 341-16 en el comentario de la sección F2.2 señala que se puede esperar que las diagonales en pórticos arriostrados concéntricamente fluyan y se pandeen para drifts entre 0,3% y 0,5%, luego de acuerdo con el historial de desplazamientos detallado en la Tabla 4.6 es esperable que se desarrollen al menos seis ciclos antes de observar la primera falla en los modelos.

Capítulo 5. Presentación y Análisis de Resultados

5.1. Esbeltez de las diagonales XL

A continuación, se presentan la longitud, esbeltez global y local, y la razón $(a/r_i)/\lambda_G$ ligada a la separación entre conectores intermedios de las riostras XL de los modelos en estudio para cada configuración de marco estructural arriostrado (X, V invertida y Diagonal única) detallados en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4. Los modelos en que al final de su designación se incluye la anotación (P) corresponden a perfiles XL conformados a partir de ángulos plegados.

Se verifica que las diagonales XL cumplan con el límite de esbeltez global (ecuación 2.1) según la norma NCh2369.Of2003 y con los límites de esbeltez local para ángulos laminados o plegados según corresponda (ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente) de la norma NCh2369.Of2003. Respecto a la separación de los conectores intermedios, se verifica que la razón $(a/r_i)/\lambda_G$ cumpla con el límite superior de los códigos AISC 360-16 y AISI S100-16 (indicados en la Tabla 4.4) para ángulos laminados y plegados respectivamente.

Los límites de esbeltez global para diagonales de acero estructural de calidad A270ES (ec. 5.1) y ASTM A36 (ec. 5.2) según la norma NCh2369.Of2003 (ecuación 2.1) equivalen a:

$$\lambda_{G_{A270ES}} = \frac{K \cdot L}{r} \leq 1,5\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{F_{y_{A270ES}}}} = 128,3 \quad (5.1)$$

$$\lambda_{G_{ASTM A36}} = \frac{K \cdot L}{r} \leq 1,5\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{F_{y_{ASTM A36}}}} = 133,3 \quad (5.2)$$

Los límites de esbeltez local para perfiles ángulos laminados de acero estructural A270ES (ec. 5.3) y perfiles plegados de acero estructural ASTM A36 (ec. 5.4) según la norma NCh2369.Of2003, y ángulos laminados según el código AISC 341-16 (considerando elementos altamente dúctiles y un factor $R_y = 1,27$, ec 5.5) que conforman perfiles XL, corresponden a:

$$\text{Ángulo laminado (A270ES, NCh2369.Of2003): } \lambda_{L_{NCh2369.Of2003}} = \frac{b}{t} \leq 0,45 \sqrt{\frac{E}{F_{y_{A270ES}}}} = 12,2 \quad (5.3)$$

$$\text{Ángulo plegado (ASTM A36, NCh2369.Of2003): } \lambda_{L_{NCh2369.Of2003}} = \frac{b}{t} \leq 0,37 \sqrt{\frac{E}{F_{y_{ASTM A36}}}} = 10,5 \quad (5.4)$$

$$\text{Ángulo laminado (A270ES, AISC 341-16): } \lambda_{L_{AISC 341-16}} = \frac{b}{t} \leq 0,32 \sqrt{\frac{E}{R_{y_{A270ES}} F_{y_{A270ES}}}} = 7,7 \quad (5.5)$$

En cada configuración de pórticos arriostrados con su respectiva altura de entrepiso, perfiles de mayor área poseen una menor longitud puesto que requieren de conexiones de mayores dimensiones. En el caso de pórticos arriostrados en X, el largo de las diagonales se mide como el largo total de la riostra continua (Figura 4.1) y en las configuraciones tipo V invertida y Diagonal única el largo de las diagonales corresponde al largo total del perfil XL (Figura 4.2 y 4.3 respectivamente), como se menciona en la sección 4.1 del presente documento.

Tabla 5.1: Longitud y esbelteces de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 [m].

Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Riostra	(a/ri) / λ_G
XL 13x11,8	3710	88,2	10,8	8,2	Continua	62%
					Discontinua	52%
XL 13x15,5	3710	87,9	8,1	10,9	Continua	60%
					Discontinua	48%
XL 13x19,0	3700	87,9	6,5	13,5	Continua	58%
					Discontinua	43%
XL 16x19,3	3490	57,1	10,0	5,7	Continua	63%
					Discontinua	51%
XL 16x23,7	3330	55,0	8,0	6,9	Continua	55%
					Discontinua	44%
XL 16x28,1	3250	54,2	6,7	8,1	Continua	50%
					Discontinua	39%

Tabla 5.2: Longitud y esbelteces de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 4,25 [m].

Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Riostra	(a/ri) / λ_G
XL 16x19,3	4760	92,7	10,0	9,3	Continua Discontinua	63% 53%
XL 16x23,7	4700	91,3	8,0	11,4	Continua Discontinua	61% 51%
XL 16x28,1	4560	87,7	6,7	13,1	Continua Discontinua	58% 48%
XL 20x30,1	4260	55,5	10,0	5,6	Continua Discontinua	62% 46%
XL 20x35,7	4260	56,0	8,3	6,7	Continua Discontinua	54% 40%
XL 20x23,5 (P)	4400	61,1	10,5	5,8	Continua Discontinua	42% 36%
XL 25x36,7 (P)	4300	47,0	10,5	4,5	Continua Discontinua	39% 45%

Tabla 5.3: Longitud y esbelteces de las riostras de los modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida con altura de entrepiso de 2,85 [m].

Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Riostra	(a/ri) / λ_G
XL 13x11,8	2270	98,7	10,8	9,1	Izquierda Derecha	44% 44%
XL 13x15,5	2160	87,9	8,1	10,9	Izquierda Derecha	43% 43%
XL 16x19,3	2070	67,6	10,0	6,8	Izquierda Derecha	42% 42%
XL 20x23,5 (P)	2030	51,2	10,5	4,9	Izquierda Derecha	41% 41%

Tabla 5.4: Longitud y esbelteces de las riostras de los modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única con altura de entrepiso de 2,85 [m].

Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Riostra	(a/ri) / λ_G
XL 13x11,8	2790	122,7	10,8	11,4	Izquierda Derecha	47% 47%
XL 16x19,3	2580	84,4	10,0	8,4	Izquierda Derecha	47% 47%
XL 20x23,5 (P)	2430	61,3	10,5	5,8	Izquierda Derecha	46% 46%
XL 25x36,7 (P)	2320	46,8	10,5	4,5	Izquierda Derecha	40% 40%

5.2. Modo de falla

5.2.1. Pandeo global

En los modelos en estudio se observan modos de pandeo global de flexión y flexotorsión. En las Figuras 5.1 y 5.2 se presentan los modos de pandeo para pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 m y 4,25 m respectivamente, mientras que en la Figuras 5.3 y 5.4 los modos de pandeo para pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única respectivamente.

Para pórticos arriostrados en X se registran principalmente pandeos globales de tipo flexural y flexotorsional, en donde para la riostra discontinua en todos los modelos se observa un pandeo global en flexión, mientras que para la riostra continua un pandeo global flexotorsional o flexural.

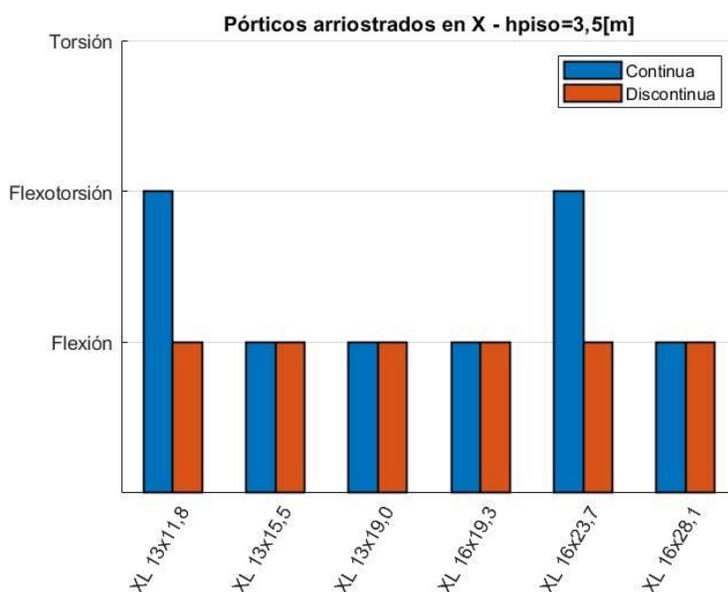


Figura 5.1: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 [m].

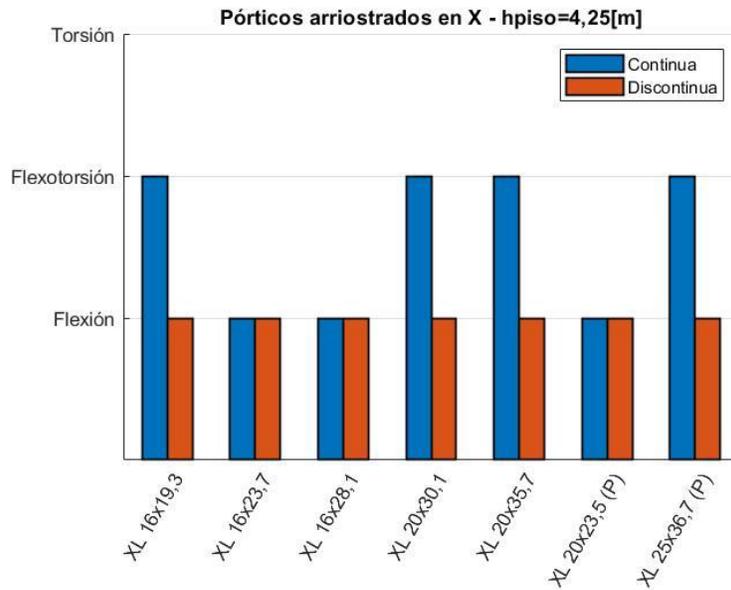


Figura 5.2: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 4,25 [m].

En los modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida (Figura 5.3) y Diagonal única (Figura 5.4) se observa que ambas riostras del pórtico pandean globalmente en flexión.

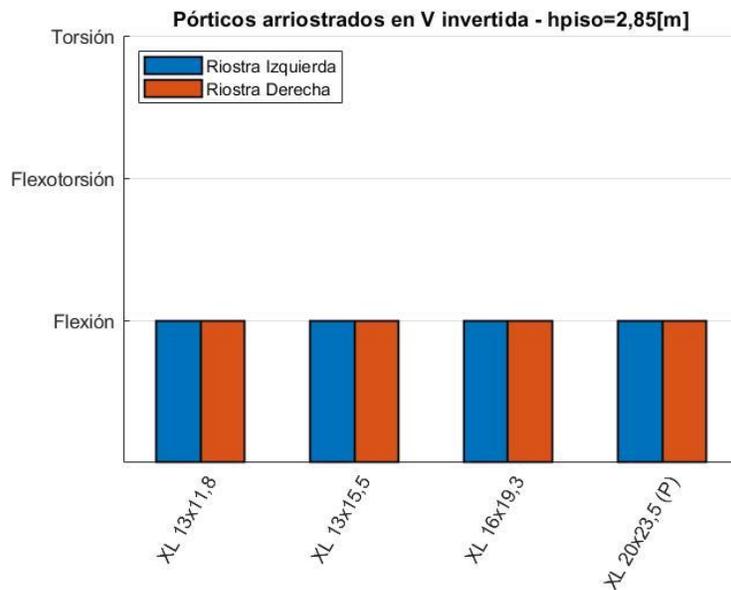


Figura 5.3: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida con altura de entrepiso de 2,85 [m].

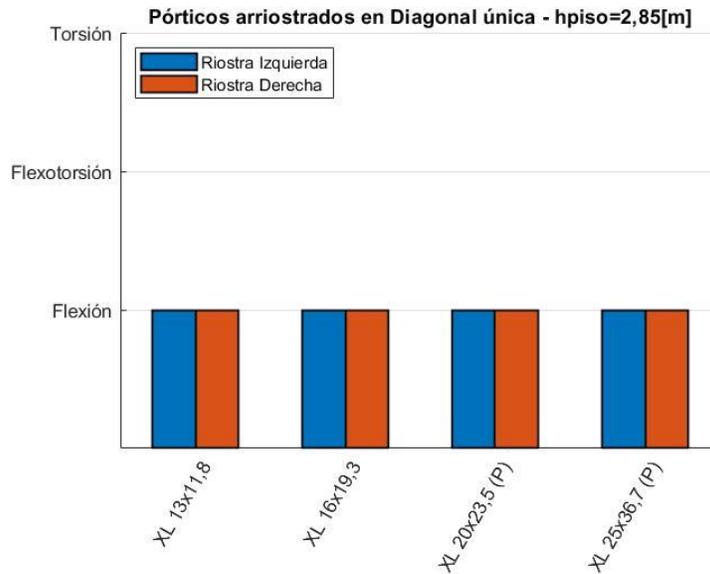


Figura 5.4: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única con altura de entrepiso de 2,85 [m].

En las Figuras 5.5 y 5.6 se presenta el modo de falla de la riostra continua y discontinua en pórticos arriostrados en X respectivamente en función del parámetro λ_G/λ_L , correspondiente al cociente entre la esbeltez global y local de cada perfil XL.

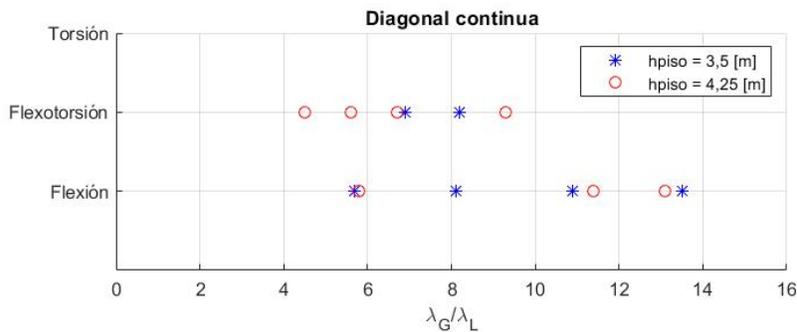


Figura 5.5: Modo de pandeo global de la riostra continua de modelos de pórticos arriostrados en X en función de la razón de esbelteces global y local.

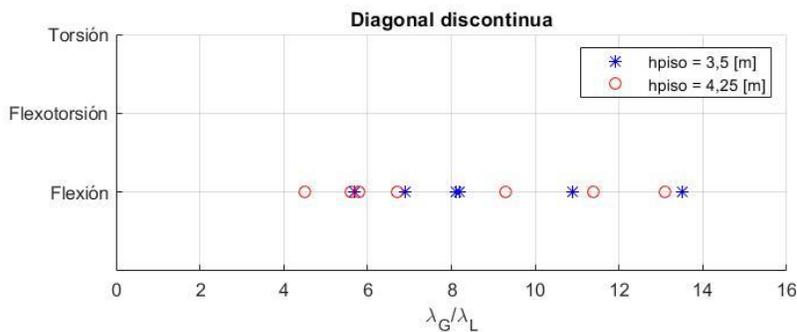


Figura 5.6: Modo de pandeo global de la riostra discontinua de modelos de pórticos arriostrados en X en función de la razón de esbelteces global y local.

En la Figura 5.5 se observa que la diagonal continua de los pórticos arriostrados en X tiende a presentar un pandeo flexotorsional para menores valores del parámetro λ_G/λ_L (en general para valores inferiores a 10 de λ_G/λ_L), aunque no es posible establecer un valor de transición ya que para menores magnitudes de λ_G/λ_L la diagonal continua exhibe en algunos modelos un pandeo flexural. Por otro lado, para la diagonal discontinua (Figura 5.6) se observa un pandeo flexural independiente de la razón entre la esbeltez global y local del perfil. El pandeo flexotorsional en la diagonal continua se puede deber, en adición de las propiedades geométricas del perfil, a una menor rigidez torsional que la placa central que une ambas riostras otorga a la diagonal continua en comparación a la diagonal discontinua, o que la aplicación de la imperfección inicial en compresión se aplica a la diagonal discontinua.

Para las configuraciones de pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única, el modo de pandeo en función de la razón de esbelteces se muestra en las Figura 5.7 y 5.8 respectivamente. En estos casos, se registra que los modelos de diagonales XL se pandean globalmente en flexión independientemente del parámetro λ_G/λ_L , para el rango de la razón de esbelteces en estudio.

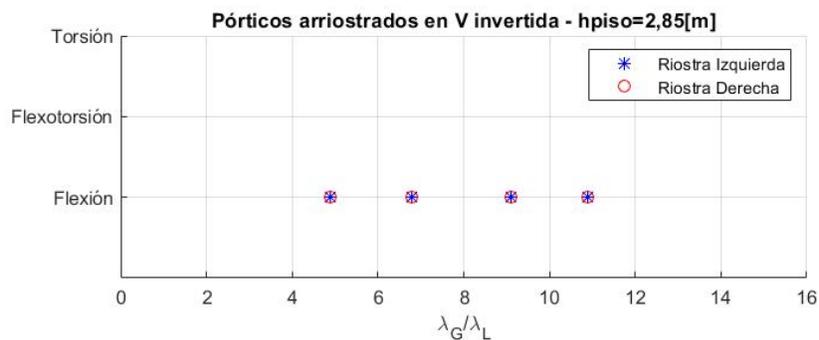


Figura 5.7: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida en función de la razón de esbelteces global y local.

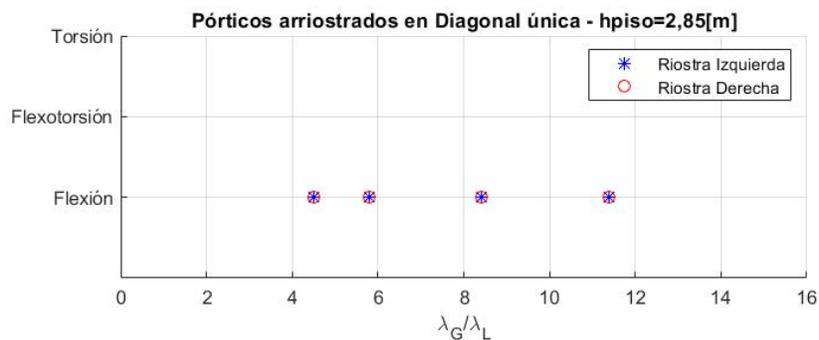


Figura 5.8: Modo de pandeo global de las riostras de modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única en función de la razón de esbelteces global y local.

5.2.2. Plano de pandeo

En los modelos de diagonales XL se observa en algunos casos pandeo global en torno a su eje principal U-U y en otros casos estas se pandean globalmente en torno a su eje geométrico vertical Y-Y (el cual refiere a un pandeo fuera del plano del pórtico según la disposición de las riostras), de acuerdo con la notación de los ejes de la sección transversal de la Figura 1.2.

Para el caso de pórticos arriostrados en X, la diagonal discontinua exhibe en todos los modelos un pandeo global flexural en torno a su eje geométrico vertical Y-Y. En cuanto a la diagonal continua, cuando esta falla por flexión se observa en cinco modelos un pandeo en torno al eje principal U-U y en dos modelos un pandeo en torno al eje Y-Y; por otra parte, cuando la riostra continua falla por flexotorsión, se tienen tres modelos que evidencian un pandeo en torno al eje U-U y tres modelos en torno al eje Y-Y.

En pórticos arriostrados tipo V invertida la riostra izquierda en todos estos casos evidencia un pandeo en torno al eje principal U-U, mientras que la riostra derecha en tres modelos se observa un pandeo en torno al eje geométrico Y-Y y en un modelo un pandeo en torno al eje U-U. En los modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única para la riostra izquierda en dos modelos se observa un pandeo en torno al eje U-U y en otros dos modelos un pandeo en torno al eje Y-Y. Por otro lado, la riostra derecha exhibe en tres modelos un pandeo en torno al eje geométrico Y-Y y en un modelo un pandeo en torno al eje U-U.

Al comparar el plano de pandeo con el parámetro $(a/r_i)/\lambda_G$, ligado a la separación entre conectores intermedios, con los registros presentes no es posible establecer una relación entre el plano de pandeo y la separación entre los conectores intermedios.

En las Figuras 5.9 y 5.10 se muestran ejemplos de diagonales que pandean globalmente en torno al eje principal U-U y eje geométrico vertical Y-Y, respectivamente.

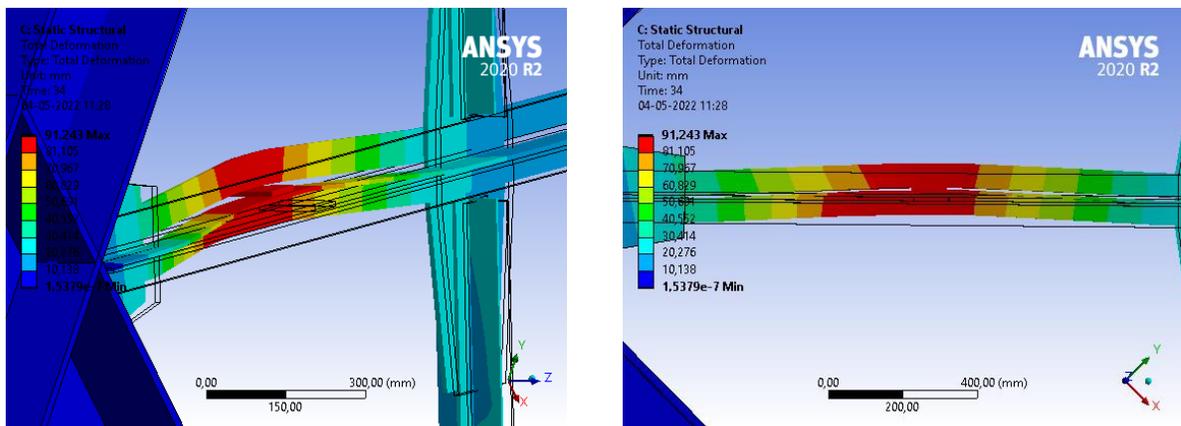


Figura 5.9: Ejemplo pandeo global en torno a eje principal U-U.

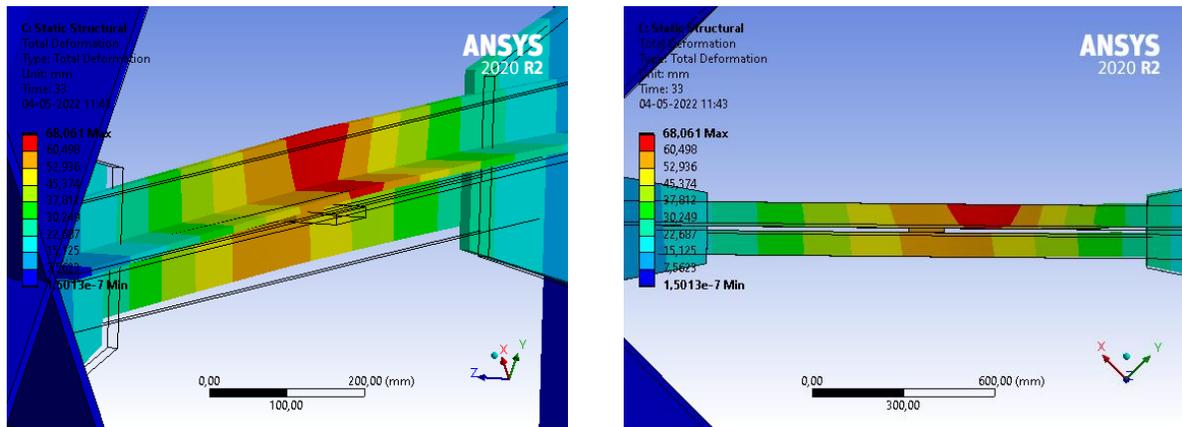


Figura 5.10: Ejemplo pandeo global en torno a eje geométrico vertical Y-Y.

5.2.3. Pandeo local

Para analizar el pandeo local de las diagonales XL, se procede primeramente de manera visual a determinar en qué instante se produce un pliegue en una de las alas de los ángulos que conforman el perfil XL, para luego registrar la deriva de entrepiso en que se produce el pandeo local en la diagonal. Adicionalmente, se registra la razón entre la deformación fuera del plano de la riostra en el momento en que se produce el pandeo local (dz) y el largo no soportado lateralmente de la diagonal (Lb).

Por otro lado, a modo de comparación, también se registra la máxima deriva de entrepiso que alcanza a sostener la diagonal XL antes de que inicie el pandeo global. A diferencia del análisis visual para el caso de pandeo local, para el pandeo global se determina en que instante la diagonal alcanza su máxima resistencia a compresión y se registra el máximo drift que alcanza a sostener la diagonal.

En la Tabla 5.5 se presentan los resultados obtenidos, en la cual también se detalla el modelo en análisis, configuración de pórtico arriostrado, riostra continua y discontinua o izquierda y derecha (correspondientes a las riostras sin y con imperfección inicial respectivamente), y la esbelteces global y local de las diagonales XL.

Tabla 5.5: Deriva de entrepiso que alcanza a sostener la diagonal XL antes de la ocurrencia de pandeo global y deriva de entrepiso en que se registra el pandeo local.

Modelo	Tipo arriostramiento	Riostra	λG	λL	$\lambda G / \lambda L$	Pandeo Global Drift [%]	Pandeo Local Drift [%]	dz / Lb [%]
XL 13x11,8	X (hplano=3,5m)	Continua	88,2	10,8	8,2	0,20	0,28	3,4
		Discontinua				0,20	0,28	2,7
XL 13x15,5	X (hplano=3,5m)	Continua	87,9	8,1	10,9	0,20	0,39	5,1
		Discontinua				0,20	0,28	3,5
XL 13x19,0	X (hplano=3,5m)	Continua	87,9	6,5	13,5	0,28	0,55	6,5
		Discontinua				0,28	0,39	5,5
XL 16x19,3	X (hplano=3,5m)	Continua	57,1	10,0	5,7	0,20	0,39	3,5
		Discontinua				0,20	0,28	2,1
XL 16x23,7	X (hplano=3,5m)	Continua	55,0	8,0	6,9	0,28	0,39	4,0
		Discontinua				0,28	0,28	3,1
XL 16x28,1	X (hplano=3,5m)	Continua	54,2	6,7	8,1	0,28	0,55	6,0
		Discontinua				0,28	0,39	3,3
XL 16x19,3	X (hplano=4,25m)	Continua	92,7	10,0	9,3	0,20	0,28	2,6
		Discontinua				0,20	0,28	3,1
XL 16x23,7	X (hplano=4,25m)	Continua	91,3	8,0	11,4	0,20	0,55	7,3
		Discontinua				0,20	0,39	5,3
XL 16x28,1	X (hplano=4,25m)	Continua	87,7	6,7	13,1	0,20	0,55	6,2
		Discontinua				0,20	0,39	4,4
XL 20x30,1	X (hplano=4,25m)	Continua	55,5	10,0	5,6	0,20	0,28	1,4
		Discontinua				0,20	0,28	3,3
XL 20x35,7	X (hplano=4,25m)	Continua	56,0	8,3	6,7	0,20	0,39	3,8
		Discontinua				0,20	0,28	3,1
XL 20x23,5 (P)	X (hplano=4,25m)	Continua	61,1	10,5	5,8	0,14	0,28	2,7
		Discontinua				0,14	0,20	1,3
XL 25x36,7 (P)	X (hplano=4,25m)	Continua	47,0	10,5	4,5	0,20	0,28	1,3
		Discontinua				0,20	0,28	1,1
XL 13x11,8	V inv (hplano=2,85m)	Izquierda	98,7	10,8	9,1	0,20	0,28	2,0
		Derecha				0,20	0,28	2,4
XL 13x15,5	V inv (hplano=2,85m)	Izquierda	87,9	8,1	10,9	0,20	0,39	3,4
		Derecha				0,20	0,28	2,5
XL 16x19,3	V inv (hplano=2,85m)	Izquierda	67,6	10,0	6,8	0,20	0,28	1,6
		Derecha				0,20	0,28	1,7
XL 20x23,5 (P)	V inv (hplano=2,85m)	Izquierda	51,2	10,5	4,9	0,14	0,28	1,1
		Derecha				0,14	0,20	0,6

Tabla 5.5: Deriva de entrepiso que alcanza a sostener la diagonal XL antes de la ocurrencia de pandeo global y deriva de entrepiso en que se registra el pandeo local (continuación).

Modelo	Tipo arriostramiento	Riostra	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Pandeo Global Drift [%]	Pandeo Local Drift [%]	dz / Lb [%]
XL 13x11,8	DU (hpiso=2,85m)	Izquierda	122,7	10,8	11,4	0,14	0,39	3,8
		Derecha				0,14	0,28	2,9
XL 16x19,3	DU (hpiso=2,85m)	Izquierda	84,4	10,0	8,4	0,14	0,39	1,8
		Derecha				0,14	0,28	2,2
XL 20x23,5 (P)	DU (hpiso=2,85m)	Izquierda	61,3	10,5	5,8	0,20	0,28	1,5
		Derecha				0,20	0,28	1,7
XL 25x36,7 (P)	DU (hpiso=2,85m)	Izquierda	46,8	10,5	4,5	0,20	0,28	1,2
		Derecha				0,20	0,28	0,7

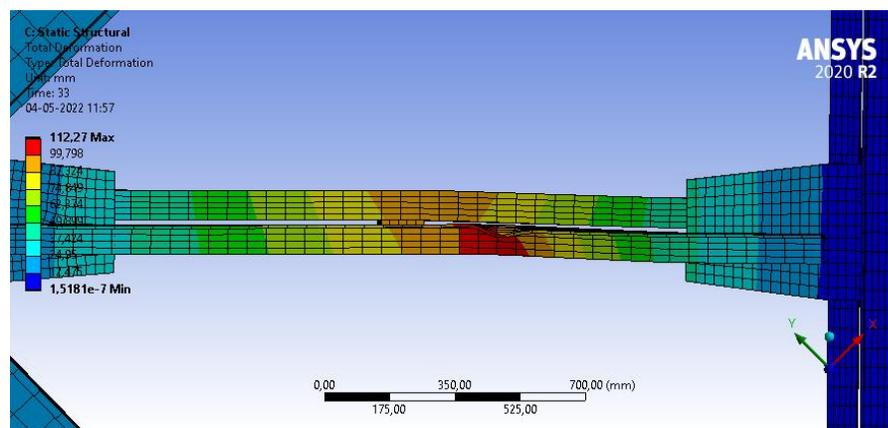
Referente a la Tabla 5.5, el pandeo global de las diagonales XL se produce mayoritariamente entre los drift de 0,20% y 0,28% de acuerdo con el historial de desplazamiento aplicado, aunque en ciertos casos entre los drift de 0,14% y 0,20% y en otros casos entre los drift de 0,28% y 0,39% (un mayor detalle de la resistencia máxima y degradación de la capacidad a compresión de las diagonales XL se presenta en las secciones 5.3 y 5.4 del presente documento respectivamente). Refiriéndose a las diagonales XL con imperfección inicial, se produce una transición en torno a una esbeltez local de 8,0 del drift en que se observa el pandeo local. En diagonales XL con una esbeltez local superior a 8,0 se registra la presencia de pandeo local a un drift de 0,28%, y en dos modelos en particular con perfiles XL plegados (modelos de pórtico arriostrado en X y tipo V invertida) con una λ_L de 10,5 la diagonal con imperfección inicial exhibe un pandeo local a un drift de 0,20%. Por otro lado, en las diagonales XL con imperfección inicial y con una esbeltez local inferior a 8,0 se registra un pandeo local a un drift de 0,39%. Dos modelos poseen diagonales con una λ_L de 8,0 y respecto a la diagonal con imperfección inicial, en un caso se observa un pandeo local a un drift de 0,28% y en el otro a un drift de 0,39%. Si bien, las diagonales XL con imperfección inicial y una λ_L inferior a 8,0 poseen una mayor capacidad de deformación, el pandeo local se manifiesta para un drift bastante menor a la deriva de entrepiso límite para estructuras de acero (clasificación “Otras estructuras”) según la norma NCh2369.Of2003 correspondiente a un 1,50%.

Una esbeltez local de 8,0 es un 4% superior al límite de esbeltez local del código AISC 341-16 considerando elementos altamente dúctiles y ángulos laminados de acero estructural A270ES con un factor $R_y = 1,27$ (ecuación 5.5) y, por otra parte, representa un 65% del límite de esbeltez local de la norma NCh2369.Of2003 para ángulos laminados de acero estructural A270ES (ecuación 5.3). En el caso de ángulos plegados, una esbeltez local de 8,0 corresponde a un 79% del límite de esbeltez local de la norma NCh2369.Of2003 para ángulos plegados de acero estructural ASTM A36 (ecuación 5.4). Cabe destacar que los ángulos plegados en análisis poseen una λ_L de 10,5, valor límite según NCh2369.Of2003.

Por otro lado, el pandeo local en la diagonal sin imperfección inicial se manifiesta, en un 62% de los modelos aproximadamente, para la siguiente amplitud de la deriva de entrepiso del historial desplazamientos en comparación a la diagonal con imperfección inicial.

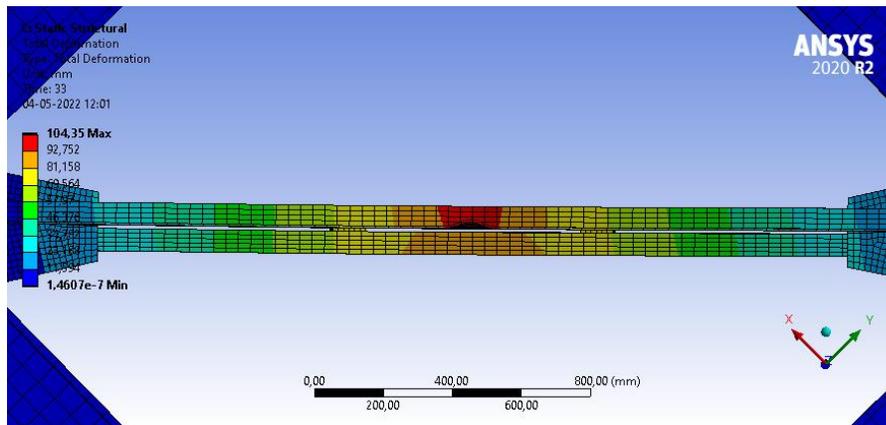
La deformación fuera del plano de la riostra en el momento en que se observa el pandeo local varía entre un 1,1% y un 7,3% aproximadamente del largo no soportado lateralmente de la diagonal en pórticos arriostrados en X y entre un 0,6% y un 3,8% en pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única.

El pandeo local se observa principalmente en el ala horizontal de uno de los ángulos del perfil XL, aunque también llegando a afectar el ala vertical del mismo ángulo. La ubicación de la rótula plástica, zona en donde se concentran grandes deformaciones y se origina el pandeo local, para las diagonales con imperfección inicial de pórticos arriostrados en X mayoritariamente se ubica próximo al conector intermedio, entre este y la placa central que une a ambas riostras (Figura 5.11a); en el caso de las diagonal con imperfección inicial de los modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única la rótula plástica se ubica en cinco modelos entre los dos conectores intermedios (Figura 5.11b) y en tres modelos próximo a un conector intermedio y el gusset. Para la diagonal sin imperfección inicial de pórticos arriostrados en X la rótula plástica se ubica en algunos casos próxima al conector intermedio, entre este y la placa central que une ambas riostras, y en otros casos próximo a uno de los conectores intermedios, pero entre este y la placa gusset. Por otro parte, en el caso de la diagonal sin imperfección inicial de los pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única la rótula plástica se ubica generalmente próxima a un conector intermedio y el gusset.



(a) Rótula plástica ubicada próxima al conector intermedio, entre este y la placa central.

Ej.: Pórtico arriostrado en X.



(b) Rótula plástica ubicada entre los dos conectores intermedios.

Ej.: Pórtico arriostrado tipo Diagonal única.

Figura 5.11: Ubicación de la rótula plástica.

5.3. Capacidad a tracción y compresión máxima

A continuación, se registran las capacidades a tracción y compresión máxima de las diagonales XL obtenidas según los modelos en ANSYS para cada modelo de las configuraciones de los marcos arriostrados. En las Figuras 5.12 y 5.13 se muestran las capacidades a tracción y compresión máxima para los modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 m y 4,25 m respectivamente, y en las Figuras 5.14 y 5.15 para las diagonales XL de pórticos arriostrados tipo V invertida y tipo Diagonal única respectivamente.

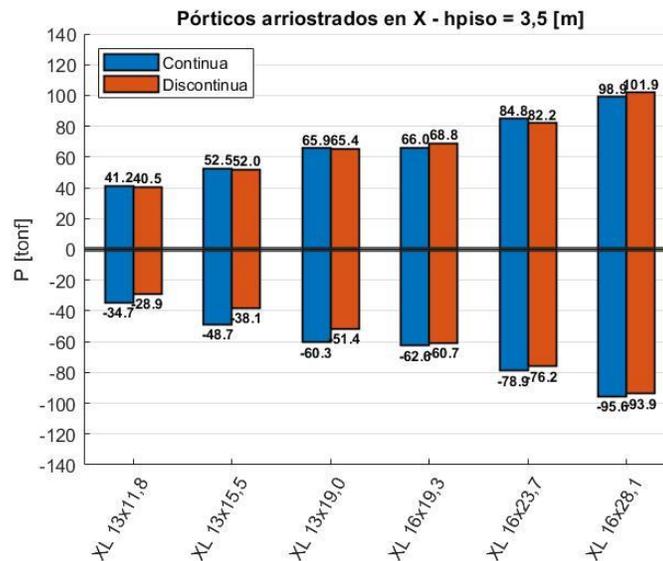


Figura 5.12: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 3,5 [m].

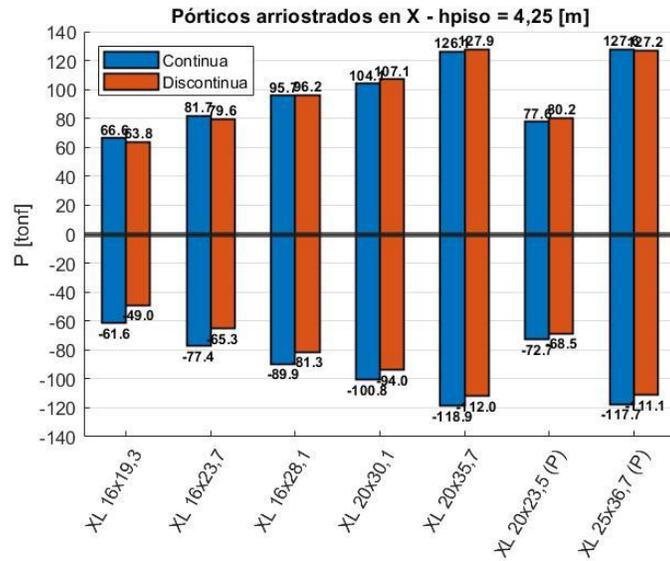


Figura 5.13: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados en X con altura de entrepiso de 4,25 [m].

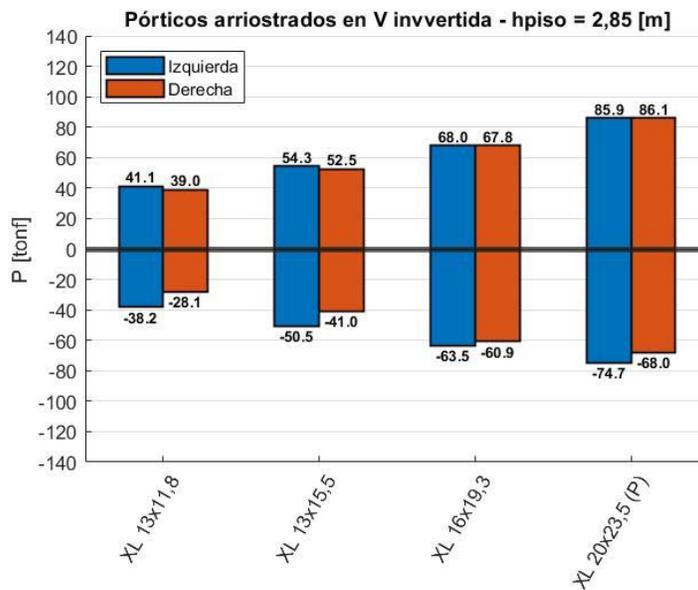


Figura 5.14: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida.

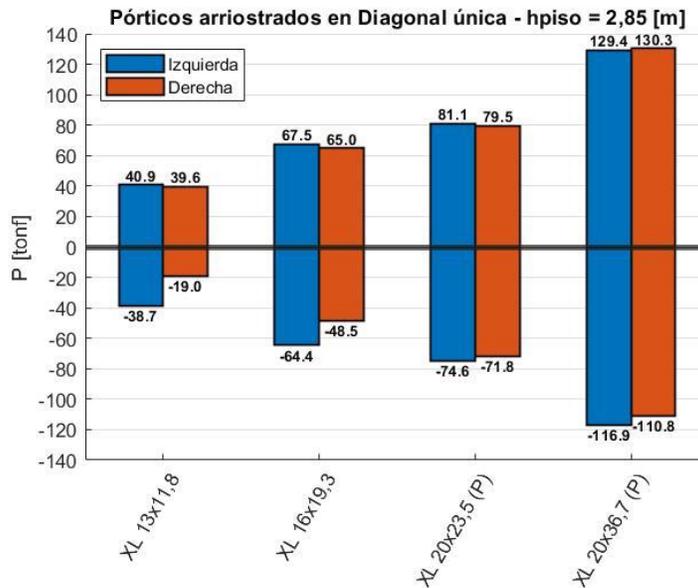


Figura 5.15: Capacidad a tracción y compresión máxima de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados tipo Diagonal única.

En las Figuras anteriores se distinguen las capacidades a compresión y tracción máxima para la riostra continua y discontinua de pórticos arriostrados en X, y riostra izquierda y derecha para las otras configuraciones.

En las Figuras 5.16 (a y b) se comparan las capacidades a compresión y tracción en función de la esbeltez global entre las diagonales continua y discontinua e izquierda y derecha de cada modelo respectivamente. Cabe destacar que la imperfección inicial en compresión se le asigna a la riostra discontinua para pórtico arriostrados en X y riostra derecha para las demás configuraciones.

Respecto a la resistencia máxima a compresión, en la Figura 5.16a se observa que, a una mayor razón de esbeltez global, la diferencia entre la resistencia máxima a compresión entre las diagonales que se le aplica o no la imperfección inicial tiende a crecer, siendo siempre menor la capacidad a compresión de la riostra a la cual se le aplica la imperfección inicial. Para una λ_G inferior a 70 se tiene que la resistencia máxima a compresión de la diagonal a la cual se le aplica la imperfección inicial en compresión es entre un 90% y 98% de la resistencia de la diagonal sin imperfección inicial y, luego para mayores valores de la esbeltez global, la diferencia de la capacidad a compresión entre ambas diagonales se incrementa con mayor rapidez a un mayor valor de λ_G , obteniéndose la mayor diferencia para la diagonal XL cuya λ_G es de 122,7, donde la capacidad a compresión para la riostra a la cual se le aplica la imperfección inicial en compresión es de un 49% de la capacidad a compresión de la diagonal sin imperfección inicial.

En cuanto a la capacidad a tracción, en la Figura 5.16b se observa que para una razón de esbeltez global inferior a 70, en algunos modelos se obtiene una sobre o sub-resistencia de la resistencia

máxima a tracción cercana al 5% para la diagonal a la cual se le aplica la imperfección inicial en compresión respecto a la otra diagonal. Para una λ_G superior a 70, en la mayoría de los casos, se obtiene una menor capacidad a tracción para la diagonal a la cual se le asigna la imperfección inicial en compresión, con hasta una sub-resistencia de la resistencia máxima a tracción en torno al 7% y una sobre-resistencia cercana al 1% en comparación con la diagonal sin imperfección inicial.

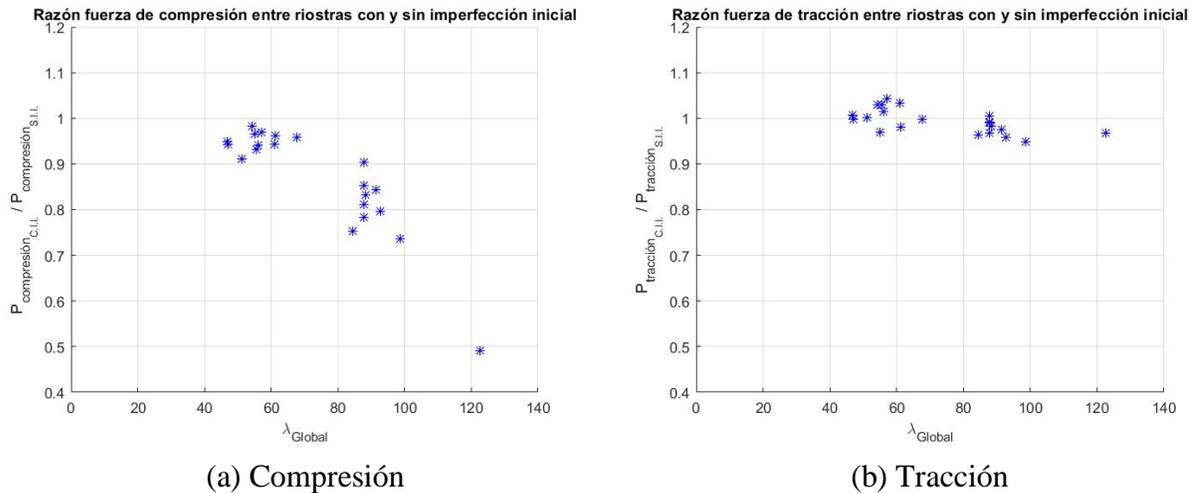


Figura 5.16: Razón capacidad a compresión o tracción entre riostras con y sin imperfección inicial.

En la Figura 5.17 se muestra la resistencia máxima a compresión obtenida en ANSYS en función de la esbeltez global de las diagonales XL, distinguiéndose en los colores azul y rojo la riostra con o sin imperfección inicial respectivamente. Además, se incluye una regresión potencial para ambos grupos de datos. Se observa que la resistencia máxima a compresión obtenida de las diagonales estudiadas varía entre 19 tonf y 120 tonf aproximadamente, en el que la capacidad a compresión de la riostra a la cual se le asigna la imperfección inicial es siempre menor a la riostra sin imperfección inicial, de acuerdo con los resultados de la Figura 5.16a.

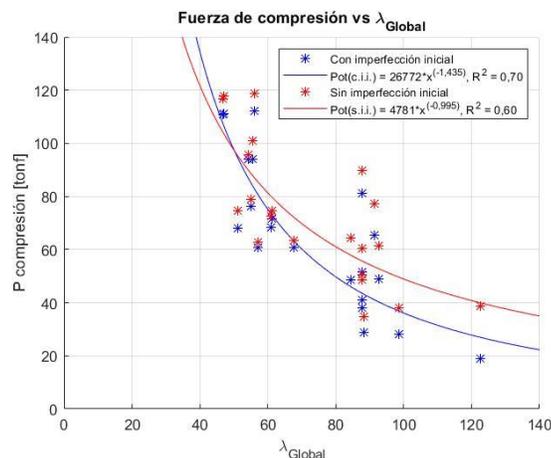


Figura 5.17: Capacidad a compresión en función de la esbeltez global.

Por otro lado, en las Figuras 5.18 (a y b) se compara la resistencia a compresión y tracción de las diagonales XL con y sin imperfección inicial en relación con la resistencia nominal según los códigos de diseño AISC 360-16 o AISI S100-16 según corresponda en función de la esbeltez global, respectivamente.

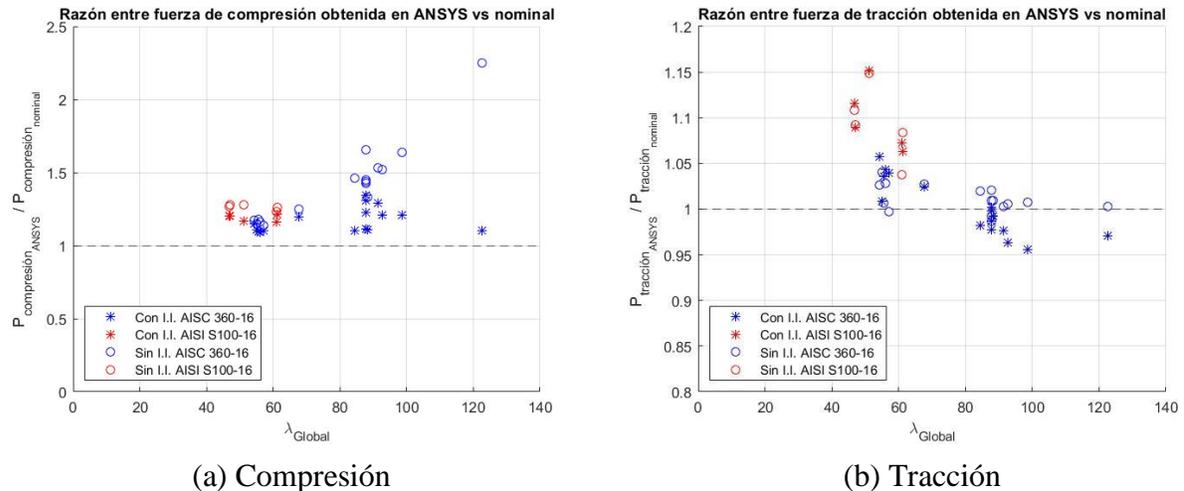


Figura 5.18: Razón capacidad a compresión o tracción obtenida en ANSYS vs nominal.

En la Figura 5.18a se observa que la resistencia a compresión obtenida en ANSYS de las diagonales con y sin imperfección inicial es siempre mayor que la resistencia nominal a compresión de estas. A una mayor esbeltez global la capacidad a compresión de las riostras sin imperfección inicial tiende a crecer monótonicamente en comparación a la capacidad nominal, llegando a un valor de 2,25 veces respecto a la capacidad a compresión nominal, en cambio, la resistencia máxima a compresión de las riostras con imperfección inicial se mantiene por debajo de 1,3 veces aproximadamente la resistencia a compresión nominal.

Una menor capacidad a compresión de una de las riostras de cada modelo se debe a que en el análisis de vectores propios, la imperfección inicial en compresión se asigna solamente a la diagonal discontinua en pórticos arriostrados en X y a la diagonal ubicada a la derecha en pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única, en cambio, la otra diagonal se deforma en tracción en el análisis de vectores propios, en el que su deformación fuera del plano es nula. Además, el factor de escala de la imperfección inicial también incide en el valor de la resistencia máxima a compresión obtenida en el modelo.

Respecto a la resistencia máxima a tracción, en la Figura 5.18b se observa que las mayores razones entre la capacidad a tracción obtenida en ANSYS respecto a la capacidad a tracción nominal se obtienen para una menor esbeltez global, con un valor máximo de 1,15 aproximadamente para esta razón. Luego, para mayores valores de λ_G esta razón tiende a disminuir y, en general, la capacidad máxima a tracción de las diagonales con imperfección inicial se encuentra por debajo de la

capacidad nominal, alcanzando hasta un valor de un 96% aproximadamente de la resistencia nominal. Aunque, en dos modelos las riostras sin imperfección inicial de igual modo ven su resistencia máxima a tracción inferior a la nominal, independiente del valor de la esbeltez global.

En los modelos en que la capacidad a tracción de las diagonales sea inferior a su resistencia a tracción nominal se puede deber a un error en la medición de la fuerza axial de las riostras en ANSYS o a la tolerancia entre la diferencia de la fuerza axial externa e interna de los pórticos arriostrados en las diferentes iteraciones para la solución de los modelos, entre otros factores.

5.4. Capacidad a tracción y compresión a distintos niveles de deriva de entrepiso

A continuación, se estudia la degradación de la capacidad a compresión y la respuesta histerética de las diagonales XL de los modelos de pórticos arriostrados.

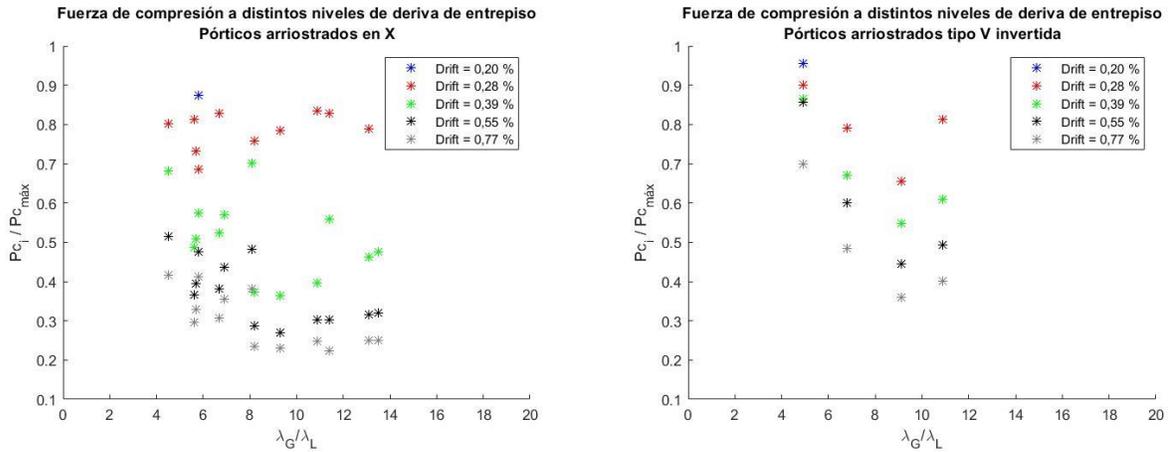
Para analizar la disminución de la capacidad a compresión de las riostras, se procede a registrar su fuerza axial en compresión a diferentes niveles de deriva de entrepiso luego de que el perfil ha alcanzado su resistencia máxima a compresión.

La selección de los niveles de drift de entrepiso se realiza en función del historial de desplazamientos cíclico, el cual posee dos ciclos por cada incremento de la amplitud de deformación como se presenta en la sección 4.4.4 del presente documento, sin embargo, para un cierto incremento de la amplitud de deformación se registra la capacidad a compresión en la máxima deriva de entrepiso del primer ciclo en el que la diagonal a la cual se le aplica la imperfección inicial en compresión se encuentra trabajando a compresión.

Primeramente, se registra la capacidad a compresión al siguiente incremento de la deriva de entrepiso del historial de desplazamiento luego de que la diagonal ha alcanzado su resistencia máxima a compresión. En general, para los modelos en estudio entre los drift de 0,20% y 0,28% del historial de desplazamientos cíclico las diagonales XL alcanzan su resistencia máxima a compresión, aunque en ciertos casos entre los drift de 0,14% y 0,20% las riostras alcanzan su resistencia máxima en compresión, y en otros casos particulares entre un drift de 0,28% y 0,39%. Luego, se registra también la capacidad a compresión a los niveles de deriva de entrepiso de 0,39%, 0,55% y 0,77%, valores que coinciden con los incrementos de la amplitud de deformación del historial de desplazamientos.

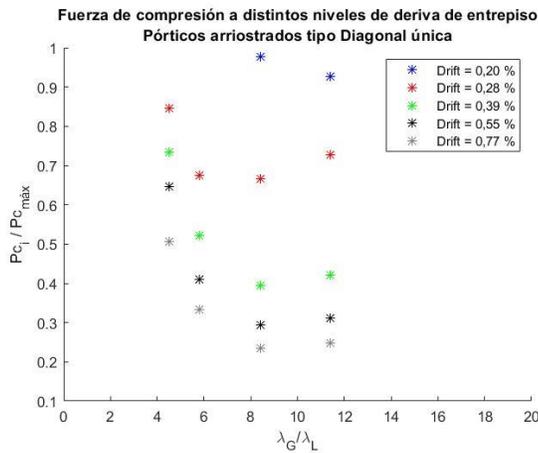
En la Figura 5.19 (a, b y c) se muestra la capacidad a compresión a distintos niveles de drift normalizada por la resistencia máxima a compresión obtenida en ANSYS en función de la relación

de esbelteces, λ_G/λ_L , de las diagonales XL a la cuales se le aplica la imperfección inicial en compresión para cada configuración de pórticos arriostrados.



(a) Pórticos arriostrados en X.

(b) Pórticos arriostrados tipo V invertida.



(c) Pórticos arriostrados tipo Diagonal única.

Figura 5.19: Degradación de la resistencia a compresión de las diagonales XL para cada configuración de pórticos arriostrados.

En la Tabla 5.6 se muestra el promedio y desviación estándar de la capacidad a compresión de las diagonales XL respecto a su resistencia a compresión máxima obtenida en ANSYS para los distintos niveles de drift estudiados para cada configuración de pórticos arriostrados.

Tabla 5.6: Fuerza de compresión de diagonales XL a distintos niveles de drift.

Drift	Pórtico arriostrado en X		Pórtico arriostrado V inv.		Pórtico arriostrado D. única	
	Pci / P _{cmax} Promedio	σ (Des. Estándar)	Pci / P _{cmax} Promedio	σ (Des. Estándar)	Pci / P _{cmax} Promedio	σ (Des. Estándar)
0,20%	0,87	-	0,96	-	0,95	0,04
0,28%	0,79	0,05	0,79	0,10	0,73	0,08
0,39%	0,51	0,11	0,67	0,14	0,52	0,15
0,55%	0,37	0,08	0,60	0,18	0,42	0,16
0,77%	0,30	0,07	0,49	0,15	0,33	0,13

A partir de los resultados de la Tabla 5.6, se puede ver que a una deriva de entrepiso de 0,20% el promedio de la capacidad a compresión relativo a su resistencia máxima varía entre un 87% a 96% considerando todas las configuraciones de pórtico arriostrado. Más adelante, para un drift de 0,39%, el promedio disminuye a valores entre un 51% a 67%, acercándose a una capacidad a compresión de la mitad de la resistencia máxima de la diagonal. Por último, para un drift de 0,77%, el promedio se encuentra entre un 30% y un 49%.

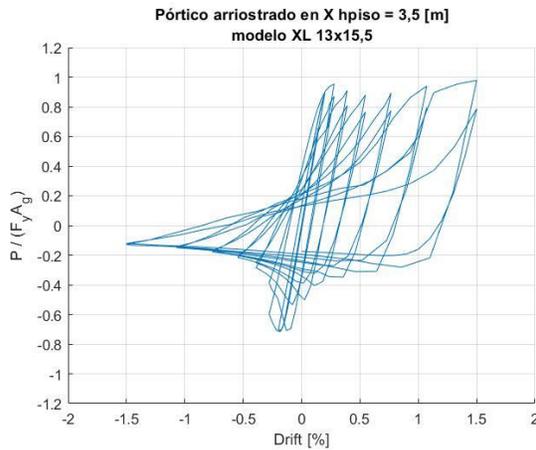
Luego, los perfiles comienzan a degradar su capacidad a compresión para derivas de entrepiso mucho menores al drift de 1,5%, deformación máxima del historial de desplazamientos cíclico aplicado y deriva de entrepiso límite establecida en la sección 6.3 de la norma NCh2369.Of2003 en la clasificación “Otras estructuras” (en que estructuras de acero recaen en esta clasificación) en particular, aunque un drift mayor puede ser permitido si se demuestra que una deformación mayor puede ser tolerada por los componentes estructurales y los no estructurales. Además, el punto 6.4 de la norma NCh2369.Of2003 establece que el efecto P-Delta se debe considerar cuando las deformaciones sísmicas excedan una deriva de entrepiso de un 1,5%.

Por otra parte, en el comentario de la sección F2.2 del código AISC 341-16 se indica que se espera que las diagonales de marcos arriostrados concéntricamente fluyan y comiencen a pandearse para derivas de entrepiso entre un 0,30% y 0,50%.

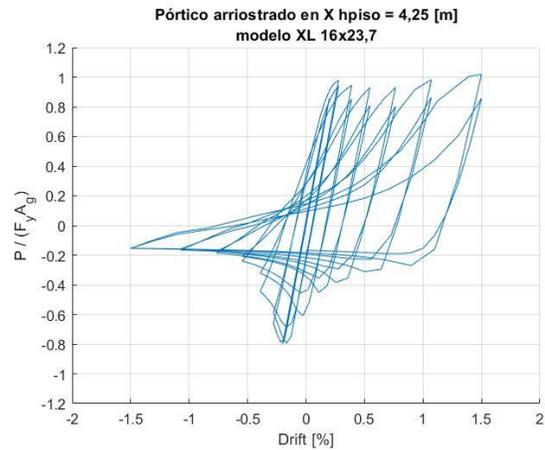
A continuación, se muestran ejemplos de curvas de histéresis obtenidas en ANSYS de las diagonales XL, normalizadas por la resistencia nominal de fluencia en tracción de la sección bruta de la riostra, en el que las Figuras se agrupan según modelos de pórticos arriostrados en X, tipo V invertida y tipo Diagonal única.

En la Figura 5.20 se muestran ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados en X, donde se presentan dos ejemplos de riostras que pandean globalmente en flexión y dos ejemplos de riostras que pandean globalmente en flexotorsión. En estos gráficos se puede ver la rápida degradación de la capacidad a compresión de los perfiles en los niveles de deriva de entrepiso analizados previamente. A un drift del 1,5% la capacidad a compresión de las diagonales

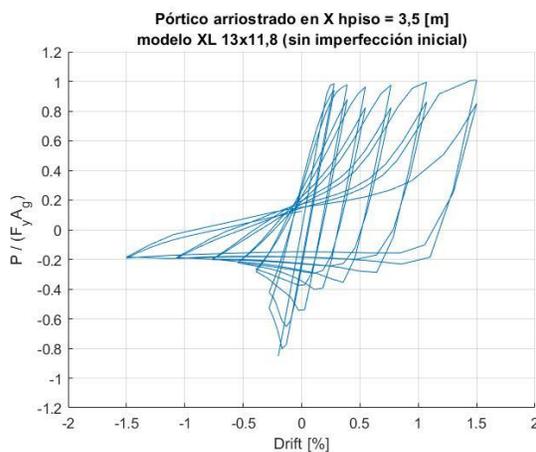
varía entre un 10% y 20% de la resistencia nominal de fluencia en tracción de la sección bruta de estas. Por otro lado, en la zona de tracción se observa un leve incremento entre la capacidad a tracción cuando se alcanza la fluencia del material y la resistencia máxima a tracción obtenida en ANSYS, nivel del endurecimiento a tracción el cual depende de la magnitud del módulo tangente de la curva de tensión-deformación bilineal asignada para el material. Asimismo, la degradación de la capacidad a tracción también depende de la magnitud del módulo tangente. Cabe destacar que en los ejemplos de modelos de diagonales XL, en ciertos modelos la capacidad máxima a tracción obtenida es ligeramente inferior a la resistencia nominal a tracción de las riostras.



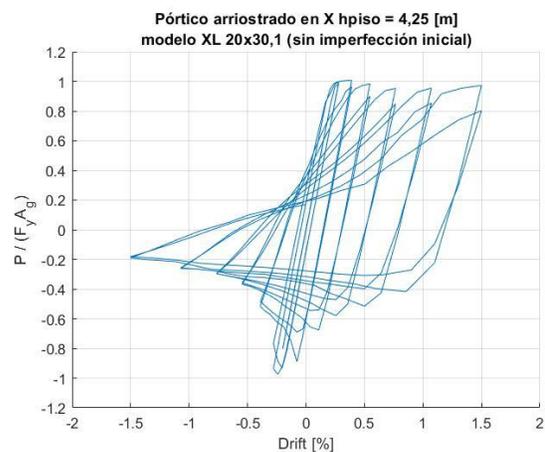
(a) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 3,5 m).
Modelo XL 13x15,5 – Diagonal discontinua
Pandeo global flexural



(b) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 4,25 m).
Modelo XL 16x23,7 – Diagonal discontinua
Pandeo global flexural



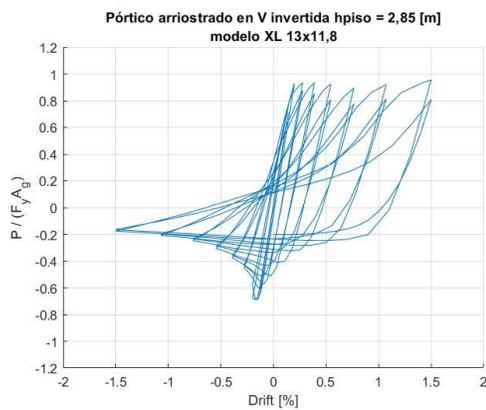
(c) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 3,5 m)
Modelo XL 13x11,8 – Diagonal continua
Pandeo global flexotorsional



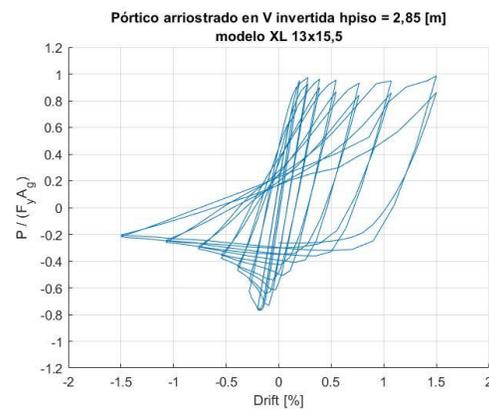
(d) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 4,25 m).
Modelo XL 20x30,1 – Diagonal continua
Pandeo global flexotorsional

Figura 5.20: Ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados en X.

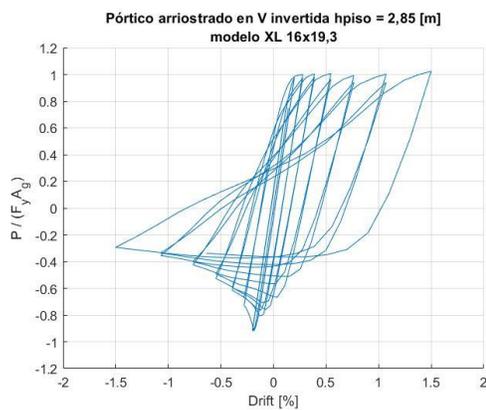
En la Figura 5.21 se presentan ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados tipo V invertida, donde en este caso las riostras pandean globalmente en flexión. En cuanto a la degradación de la capacidad a compresión y endurecimiento a tracción, se observa un comportamiento similar a los ejemplos de la Figura 5.20. En particular para el ejemplo del modelo XL 20x23,5 (P) (Figura 5.21d), la degradación de la capacidad a compresión es de menor rapidez entre un drift del 0,20% y 0,77% en comparación a los otros modelos, lo cual se ejemplifica en la Figura 5.19b en donde el modelo ubicado a la izquierda (cuya razón de esbelteces es de 4,9) exhibe una mayor capacidad a compresión relativo a su resistencia máxima a compresión obtenida en ANSYS, y a un drift del 1,5% la capacidad a compresión de la diagonal XL de este modelo es de un 40% aproximadamente de la resistencia nominal de fluencia en tracción de la sección bruta de la diagonal.



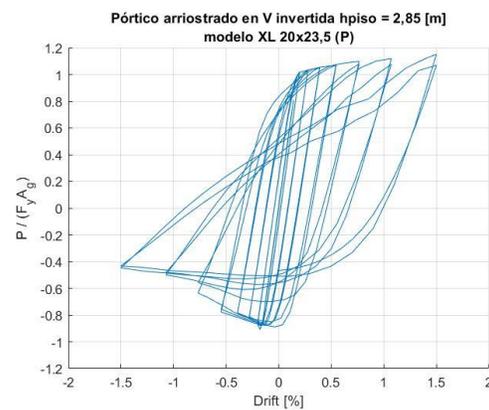
(a) Pórtico arriostrado tipo V invertida.
Modelo XL 13x11,8
Pandeo global flexural



(b) Pórtico arriostrado tipo V invertida.
Modelo XL 13x15,5
Pandeo global flexural



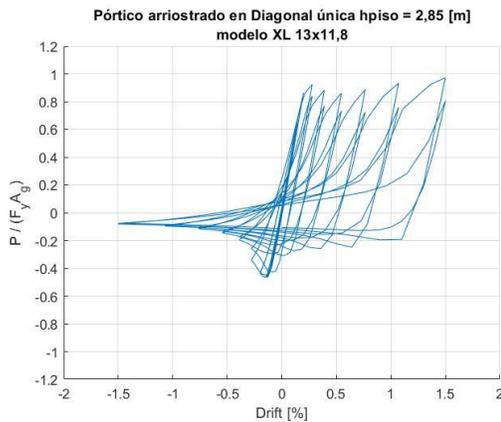
(c) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 4,25 m).
Modelo XL 16x19,3
Pandeo global flexural



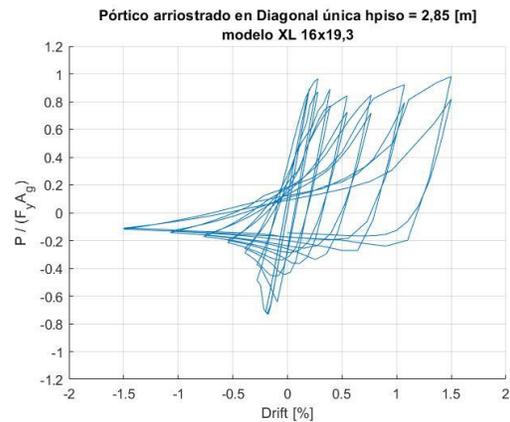
(d) Pórtico arriostrado tipo V invertida.
Modelo XL 20x23,5 (P)
Pandeo global flexural

Figura 5.21: Ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados tipo V invertida.

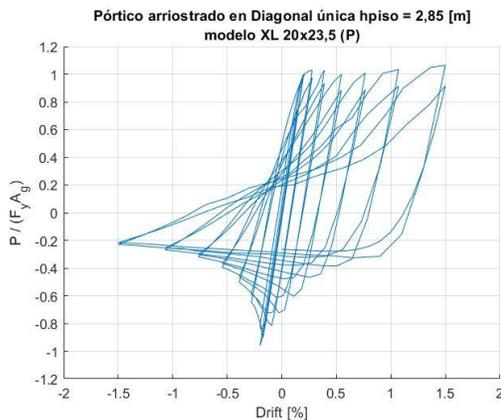
Por otro lado, en la Figura 5.22 se muestran ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados tipo Diagonal única, en donde las riostras pandean globalmente en flexión. Se observa una respuesta semejante respecto a la degradación de la resistencia a compresión y endurecimiento a tracción en comparación a los modelos presentados previamente. Similar al caso de pórticos arriostrados tipo V invertida, se destaca el modelo XL 25x36,7 (P) (Figura 5.22d) cuya degradación de la capacidad a compresión es de menor rapidez relativo a los otros modelos de la Figura 5.22, lo que se ejemplifica en la Figura 5.19c en el modelo cuya razón de esbelteces global y local es de 4,5, y a un drift del 1,5% la resistencia a compresión de la diagonal XL de este modelo es del orden de un 30% de la resistencia nominal de fluencia en tracción de la sección bruta de la riostra.



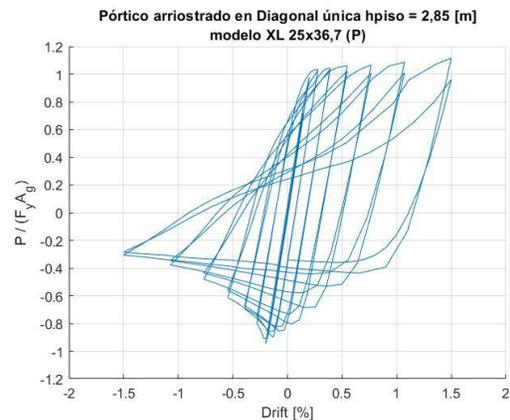
(a) Pórtico arriostrado Diagonal única.
Modelo XL 13x11,8
Pandeo global flexural



(b) Pórtico arriostrado Diagonal única.
Modelo XL 16x19,3
Pandeo global flexural



(c) Pórtico arriostrado Diagonal única.
Modelo XL 20x23,5 (P)
Pandeo global flexural



(d) Pórtico arriostrado Diagonal única.
Modelo XL 25x36,7 (P)
Pandeo global flexural

Figura 5.22: Ejemplos de curvas de histéresis para diagonales XL de pórticos arriostrados tipo Diagonal única.

5.5. Fuerza máxima en placas gusset

Se procede a estudiar la fuerza máxima solicitante en la conexión placa gusset – diagonal, tanto en la dirección axial de la riostra como en los ejes ortogonales a esta. En la Figura 5.23 se muestra el sistema de ejes coordenados para medir la fuerza solicitante en la placa gusset, en el que el eje Y es colindante con el eje longitudinal de la riostra (fuerzas axiales) y los ejes X y Z corresponden a las fuerzas ortogonales dentro y fuera del plano respectivamente.

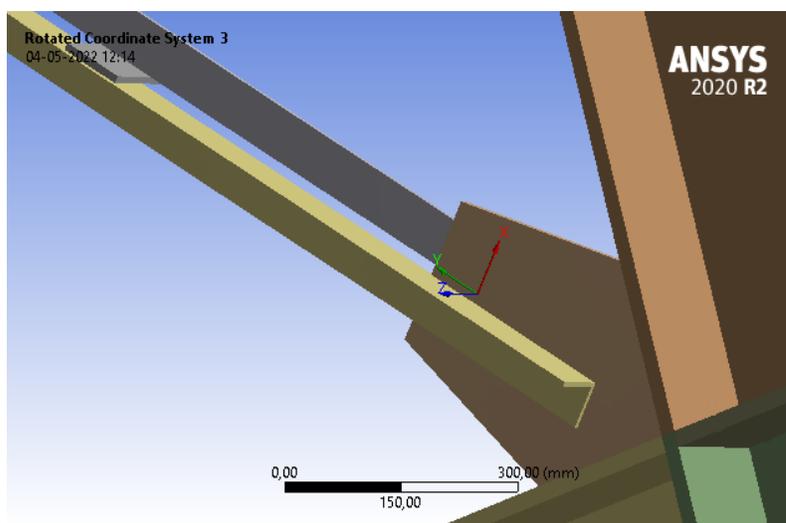


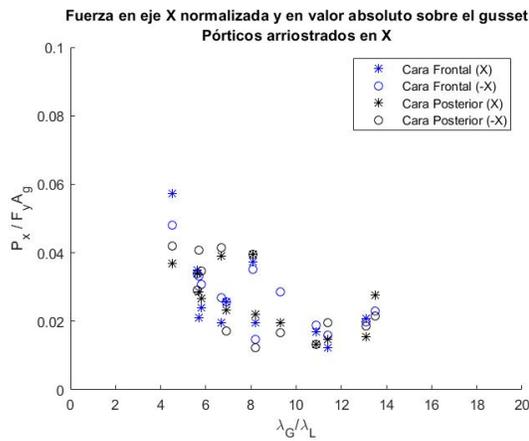
Figura 5.23: Sistema de coordenadas para medición de fuerza solicitante en placas gussets.

Se registran las fuerzas solicitantes en las placas gusset de cada modelo de pórticos arriostrados y, luego, se obtiene la fuerza máxima según cada eje (fuerzas axiales y ortogonales) entre todas las placas gusset de cada modelo. Para la fuerza en el eje Y se registra la fuerza máxima de tracción o compresión solicitante, para el eje X la fuerza máxima solicitante en la cara frontal y posterior por separado del gusset y para el eje Z la fuerza máxima solicitante en la cara frontal y posterior del gusset correspondiente a cuando los ángulos que conforman el perfil XL tienden a despegarse de la placa gusset. Para este último caso no se considera la componente de la fuerza Z que tiende a aplastar el ángulo del perfil XL contra la placa gusset debido a la buena resistencia al aplastamiento del acero.

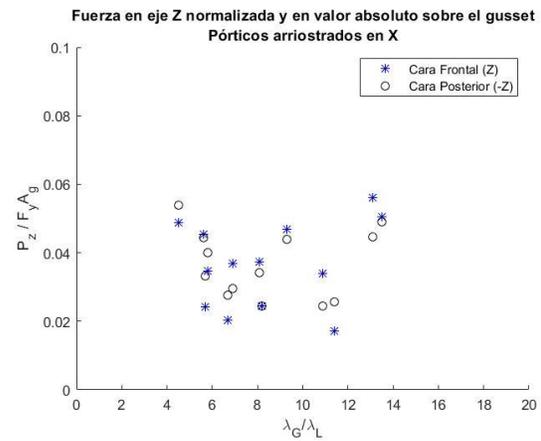
En las Figuras 5.24, 5.25 y 5.26 se presentan las fuerzas máximas solicitantes axiales de tracción y compresión (eje Y) y ortogonales dentro y fuerza del plano (ejes X y Z) en las placas gusset de los modelos de pórticos arriostrados en X, tipo V invertida y Diagonal única respectivamente.

En estas Figuras se muestra la fuerza solicitante respectiva en función de la razón de esbelteces (λ_G/λ_L) de la riostra, donde los gráficos superior izquierdo y derecho refieren a la fuerza máxima solicitante en los ejes X y Z, respectivamente, normalizada respecto a la resistencia nominal de fluencia en tracción de la sección bruta de la diagonal ($F_y \cdot A_g$), el gráfico inferior izquierdo a la

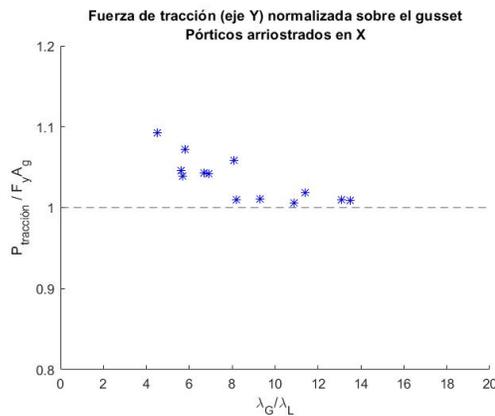
fuerza máxima solicitante de tracción normalizada respecto a la resistencia nominal de fluencia en tracción de la sección bruta de la diagonal, y el gráfico inferior derecho la fuerza máxima solicitante de compresión normalizada respecto a la resistencia nominal de compresión de la riostra.



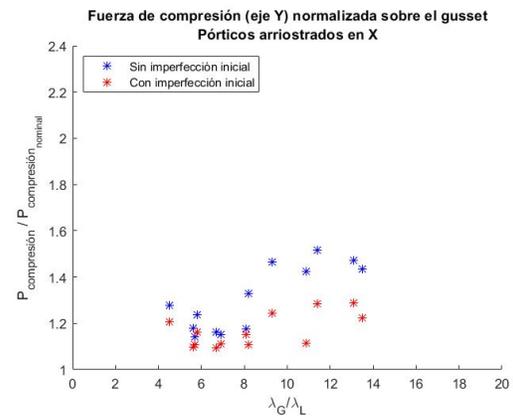
(a) Fuerza en eje X normalizada por $F_y \cdot A_g$



(b) Fuerza en eje Z normalizada por $F_y \cdot A_g$

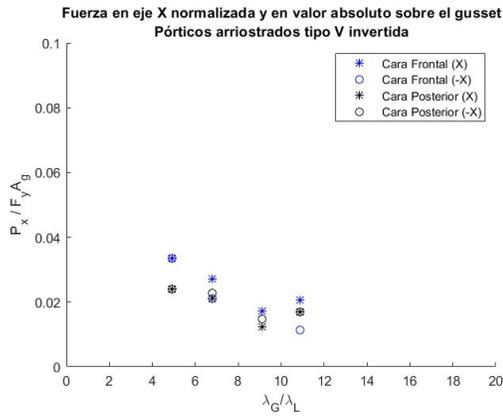


(c) Fuerza de tracción normalizada por $F_y \cdot A_g$

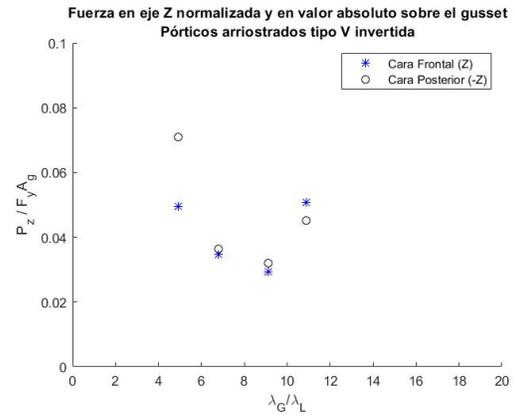


(d) Fuerza de compresión normalizada por resistencia a compresión nominal.

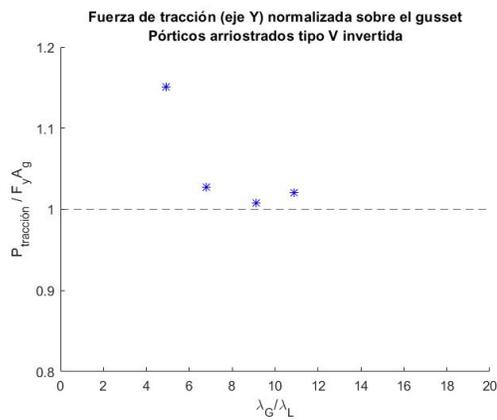
Figura 5.24: Fuerza máxima solicitante según cada eje en placas gussets – Pórticos arriostrados en X.



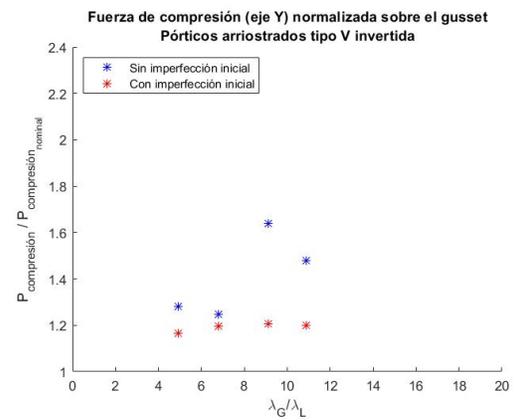
(a) Fuerza en eje X normalizada por $F_y \cdot A_g$



(b) Fuerza en eje Z normalizada por $F_y \cdot A_g$

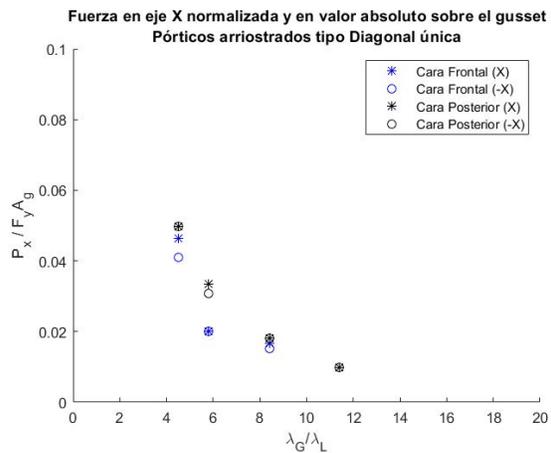


(c) Fuerza de tracción normalizada por $F_y \cdot A_g$

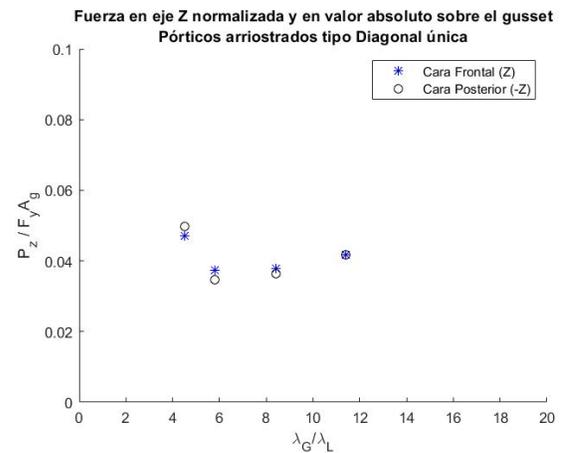


(d) Fuerza de compresión normalizada por resistencia a compresión nominal.

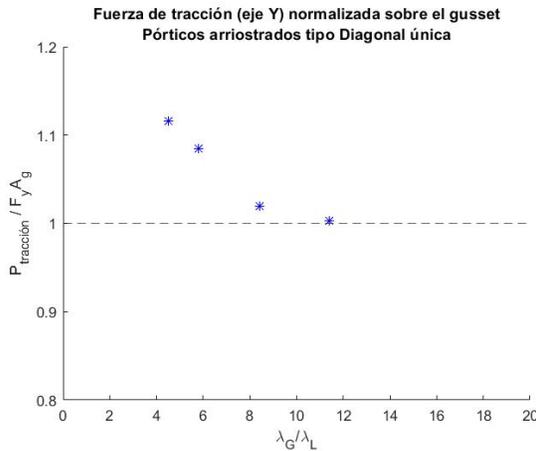
Figura 5.25: Fuerza máxima solicitante según cada eje en placas gussets – Pórticos arriostrados tipo V invertida.



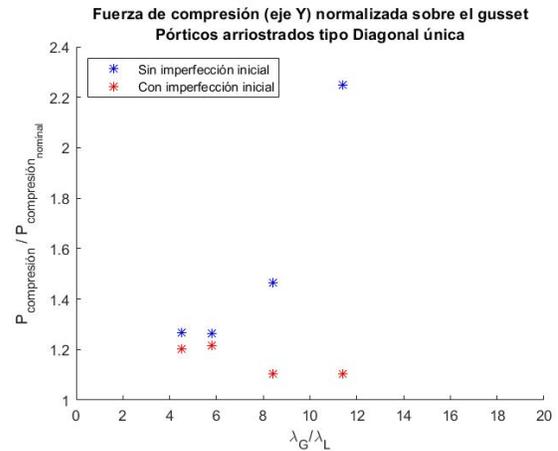
(a) Fuerza en eje X normalizada por $F_y \cdot A_g$



(b) Fuerza en eje Z normalizada por $F_y \cdot A_g$



(c) Fuerza de tracción normalizada por $F_y \cdot A_g$



(d) Fuerza de compresión normalizada por resistencia a compresión nominal.

Figura 5.26: Fuerza máxima solicitante según cada eje en placas gussets – Pórticos arriostrados tipo Diagonal única.

En el primer gráfico de las Figuras 5.24, 5.25 y 5.26 se observa que la fuerza máxima solicitante en el eje X en cada cara del gusset (cara frontal y posterior) es inferior a un 5,8% de la resistencia nominal a tracción de la diagonal, y esta fuerza tiende a aumentar para menores valores del parámetro λ_G/λ_L . Respecto a la fuerza máxima solicitante en el eje Z (gráfico superior derecho de las Figuras anteriores), esta se encuentra por debajo de un 7,2% de la resistencia nominal a tracción de la diagonal, aunque en este caso no se observa una tendencia creciente relativo a la razón de esbelteces.

Por otra parte, la fuerza máxima solicitante de tracción entre todos los modelos es de un 115% de la resistencia nominal a tracción de la diagonal XL, observándose una tendencia creciente hacia menores valores de la razón λ_G/λ_L , especialmente para valores de λ_G/λ_L menores que 6. Para mayores valores de la razón de esbelteces la sollicitación a tracción sobre la placa gusset es similar a la resistencia nominal a tracción de la riostra, aunque en todos los modelos se observa que esta sollicitación es mayor a $F_y \cdot A_g$.

La sollicitación a tracción máxima sobre el gusset depende de la resistencia a tracción máxima experimentada por la diagonal, la cual se encuentra en función de la tensión de fluencia del material, el endurecimiento manifestado en tracción y el área de la sección transversal del perfil. Luego, cuando la diagonal posee una tensión de fluencia superior a la mínima especificada para el material y/o un endurecimiento en tracción, la sollicitación a tracción sobre la conexión es superior a la resistencia nominal a tracción de la diagonal. Para ello, es recomendable amplificar la fuerza de diseño a tracción sobre el gusset, por ejemplo, mediante el factor R_y que considera el código AISC 341-16. A partir de los resultados obtenidos, la sollicitación máxima a tracción sobre el gusset es de 1,15 veces la resistencia nominal a tracción de la diagonal XL, sin embargo, es importante

mencionar que los modelos consideran una tensión de fluencia mínima para el acero y un módulo tangente del 0,5% del Módulo de Young del acero en la curva de tensión-deformación bilineal.

En cuanto a la fuerza máxima solicitante a compresión sobre los gussets que conectan la riostra con imperfección inicial, no se presenta una tendencia creciente respecto al parámetro λ_G/λ_L . Para las diferentes configuraciones de pórticos arriostrados la fuerza máxima solicitante a compresión sobre estos gussets varía entre un 110% y un 130% de la resistencia a compresión máxima de la diagonal XL.

Por otro lado, respecto a la fuerza máxima solicitante a compresión sobre los gussets que conectan la riostra sin imperfección inicial, se observa que, en general, a mayores valores de λ_G/λ_L esta es de mayor magnitud, siendo en todos los modelos superior la resistencia nominal a compresión de las diagonales XL. Por debajo de un valor de 8 del parámetro λ_G/λ_L , la solicitación a compresión sobre estos gussets varía entre 114% y 130% de la resistencia nominal a compresión de la riostra. Por otra parte, a mayores valores de la razón de esbelteces, para pórticos arriostrados en X, la solicitación a compresión sobre el gusset varía entre 117% y 152% de la resistencia nominal a compresión de la riostra; en pórticos arriostrados tipo V invertida se tiene un modelo cuya solicitación es de 164% aproximadamente de la resistencia nominal a compresión de la riostra; y en el caso de pórticos arriostrados tipo diagonal única, se tiene un modelo cuya solicitación a compresión sobre el gusset es de un 225% de la resistencia nominal a compresión de la diagonal.

Las diferencias respecto a la fuerza máxima de compresión sobre los gussets que conectan a las diagonales con y sin imperfección inicial asignada en el análisis de vectores propios, se condicen con los resultados presentados en la Figura 5.18a, en la cual se grafica para ambas riostras con y sin imperfección inicial la razón entre la capacidad a compresión obtenida en ANSYS relativo a la resistencia nominal a compresión de las diagonales XL, en el que la capacidad a compresión de los modelos es siempre superior a la nominal.

Luego, a partir de los resultados obtenidos, al momento de diseñar las conexiones entre las diagonales y el pórtico mediante un diseño por capacidad de las riostras, se debe considerar una resistencia esperada a tracción y compresión de las riostras superior a su resistencia nominal.

5.6. Desplazamiento fuera del plano de la placa central de los pórticos arriostrados en X

Se procede a analizar el desplazamiento fuera del plano del marco de la placa central de los pórticos arriostrado en X que conecta a ambas diagonales. En las Figuras 5.27 y 5.28 se muestra el desplazamiento fuera del plano en función de los ciclos del historial de desplazamiento de la placa

central de dos modelos de altura de entrepiso de 3,5 [m], mientras que en la Figura 5.29 un ejemplo de un modelo de altura de entrepiso de 4,25 [m] respectivamente.

En cada una de estas Figuras, el primer gráfico muestra el desplazamiento fuera del plano de la placa central (dZ) en función de los ciclos del historial de desplazamientos, el cual posee un total de 26 ciclos; en el segundo gráfico se muestra la fuerza axial de la diagonal continua (P) del pórtico arriostrado en X en función de los ciclos del historial de desplazamiento; y en el gráfico inferior el desplazamiento fuera del plano de la placa central versus la fuerza axial de la diagonal continua.

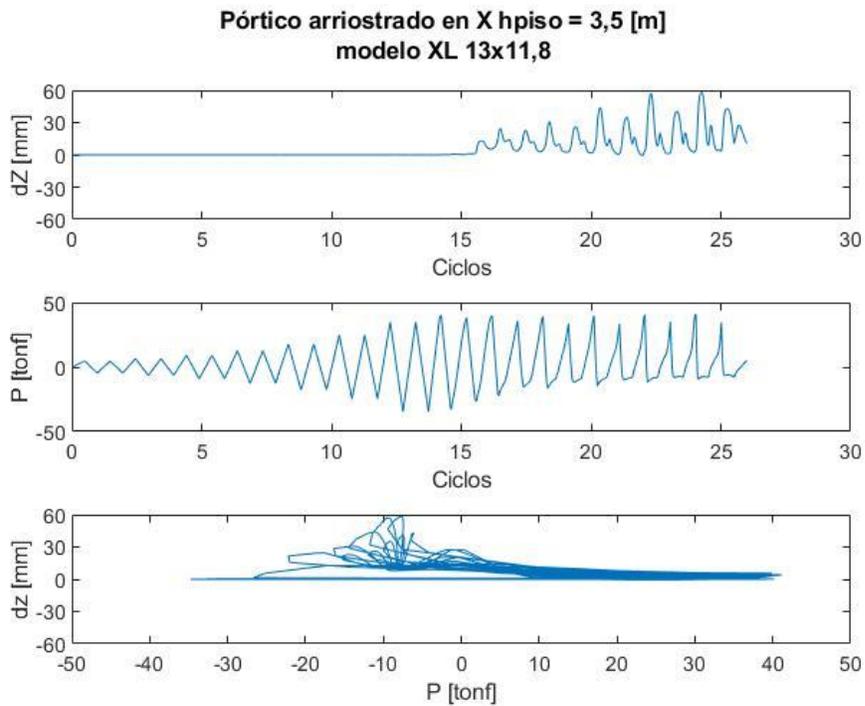


Figura 5.27: Desplazamiento fuera del plano de la placa central del pórtico arriostrado en X – modelo XL 13x11,8 (altura de entrepiso 3,5 [m]).

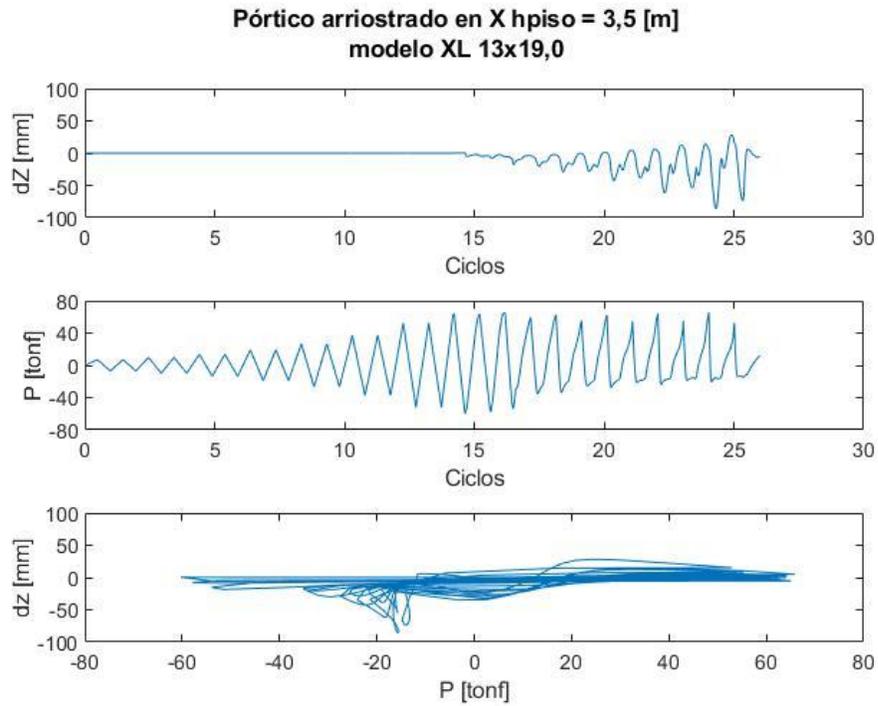


Figura 5.28: Desplazamiento fuera del plano de la placa central del pórtico arriostrado en X – modelo XL 13x19,0 (altura de entrepiso 3,5 [m]).

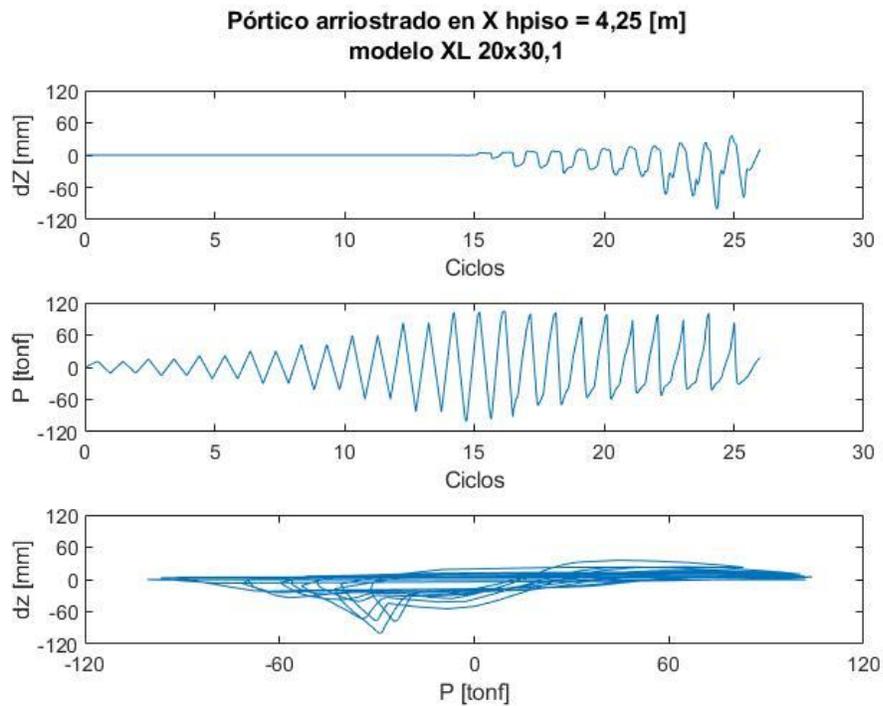


Figura 5.29: Desplazamiento fuera del plano de la placa central del pórtico arriostrado en X – modelo XL 20x30,1 (altura de entrepiso 4,25 [m]).

A partir de los resultados de las Figuras 5.27, 5.28 y 5.29, se observa que el desplazamiento fuera del plano de la placa central de pórticos arriostrados en X es prácticamente nulo hasta el momento en que la diagonal alcanza su resistencia máxima en compresión. Luego, una vez que la riostra comienza a pandearse y a disminuir su capacidad a compresión, la placa central se desplaza fuera del plano predominantemente en un sentido, aumentando este desplazamiento a mayores derivas de entrepiso y la estabilidad de las diagonales en este punto de apoyo se ve reducida.

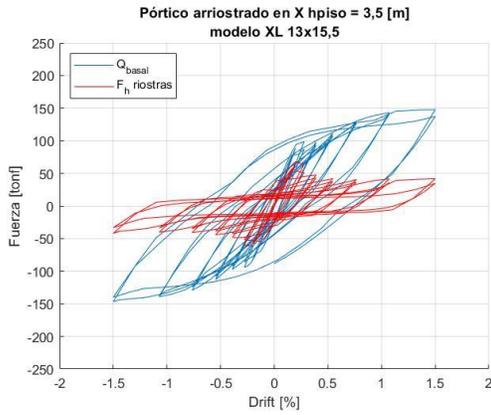
Por otro lado, del gráfico inferior de desplazamiento fuera del plano de la placa central en función de la fuerza axial de la riostra continua de las Figuras 5.27, 5.28 y 5.29, se observa que las mayores magnitudes del desplazamiento fuera del plano de la placa central se producen cuando la riostra continua trabaja a compresión. Esto se puede deber a que la riostra continua se encuentra conectada por el centro de la placa central y luego cuando la riostra continua trabaja en tracción le otorga mayor estabilidad a la placa en comparación a la riostra discontinua que se conecta hacia los extremos de la placa central. Aunque, en las Figuras 5.28 y 5.29 cuando la riostra continua trabaja en tracción también se observan desplazamientos fuera del plano de la placa central, pero de menor magnitud.

La norma NCh2369.Of2003 (INN, 2003) en el capítulo 8, sección 8.3.4, establece que las riostras en pórticos arriostrados en X se deben conectar en el punto de cruce y que este punto se podrá considerar fijo en la dirección perpendicular al plano de las diagonales para los efectos de determinar la longitud de pandeo de la diagonal, cuando una de las diagonales sea continua. Luego, los resultados de las Figuras 5.27, 5.28 y 5.29 condicen esta disposición de la norma NCh2369.Of2003 mientras las diagonales no hayan alcanzado su resistencia máxima en compresión. Por otra parte, la sección 8.3.6 de la norma NCh2369.Of2003 indica que el esfuerzo sísmico en las diagonales comprimidas, debe ser menor o igual al 80% de la capacidad resistente definida en la especificación de diseño de acero.

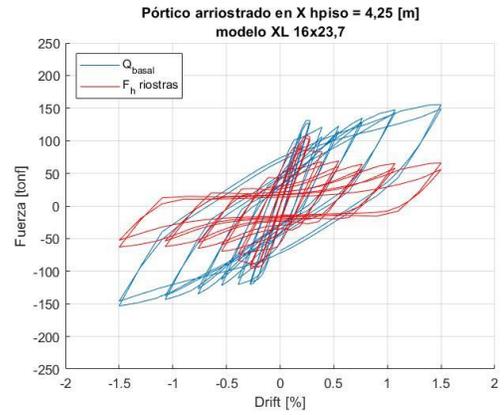
5.7. Curva de histéresis de los pórticos arriostrados

En los modelos se observa que en los ciclos donde se alcanza una deriva de entrepiso de 1,5% las columnas y/o vigas fallan por corte y se requiere de una mayor cantidad de iteraciones para la convergencia de los modelos o en algunos no se logra convergencia en estos ciclos.

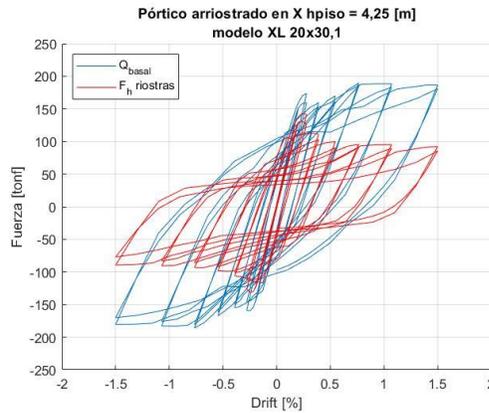
A continuación, se presentan ejemplos de gráficos de corte basal de los pórticos arriostrados en función del drift (línea azul), y en rojo la suma de la componente horizontal de las fuerzas de las diagonales en función del drift, en donde las Figuras 5.30, 5.31 y 5.32 se agrupan según pórticos arriostrados en X, V invertida y Diagonal única, respectivamente.



(a) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 3,5 m).
Modelo XL 13x15,5

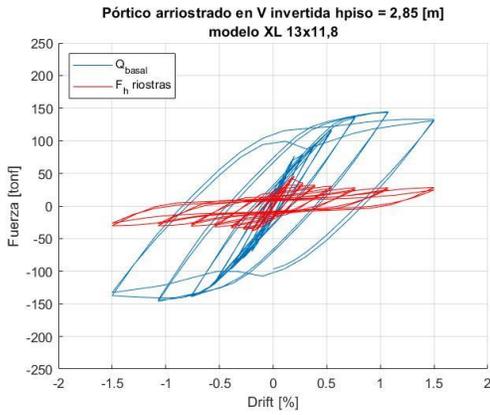


(b) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 4,25 m).
Modelo XL 16x23,7

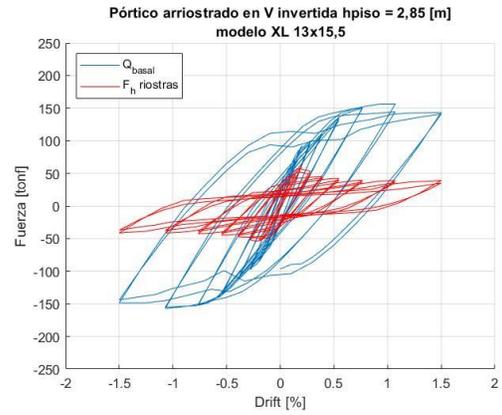


(c) Pórtico arriostrado en X (hpiso = 4,25 m).
Modelo XL 20x30,1

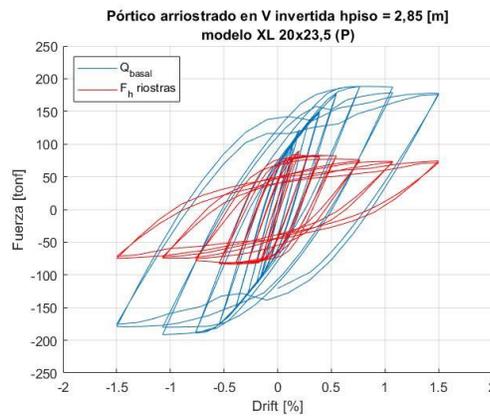
Figura 5.30: Ejemplos de corte basal vs drift y suma fuerza horizontal diagonales vs drift – Pórticos arriostrados en X.



(a) Pórtico arriostrado tipo V invertida.
Modelo XL 13x11,8

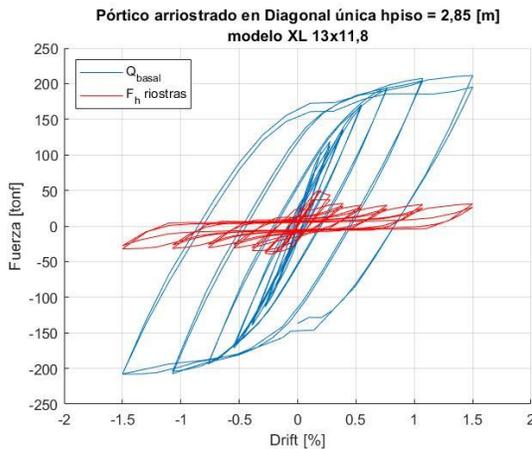


(b) Pórtico arriostrado tipo V invertida.
Modelo XL 13x15,5

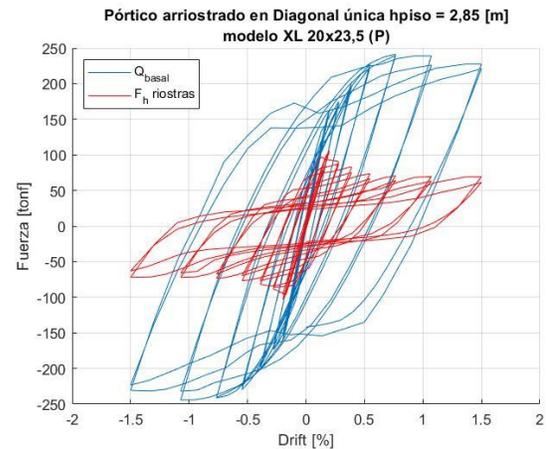


(c) Pórtico arriostrado tipo V invertida.
Modelo XL 20x23,5 (P)

Figura 5.31: Ejemplos de corte basal vs drift y suma fuerza horizontal diagonales vs drift – Pórticos arriostrados tipo V invertida.



(a) Pórtico arriostrado Diagonal única.
Modelo XL 13x11,8



(b) Pórtico arriostrado Diagonal única.
Modelo XL 20x23,5 (P)

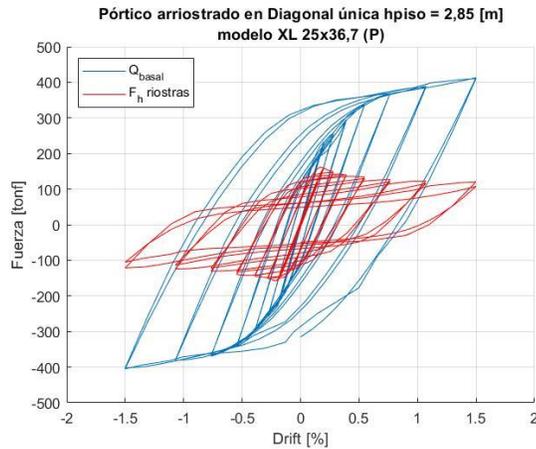


Figura 5.32: Ejemplos de corte basal vs drift y suma fuerza horizontal diagonales vs drift – Pórticos arriostrados tipo Diagonal única.

A partir de los resultados de las Figuras 5.30, 5.31 y 5.32, se observa que a mayores derivas de entrepiso aumenta el corte basal del pórtico arriostrado, tendencia esperada ya que se requiere de una mayor magnitud de la fuerza horizontal externa para deformar el pórtico y, por otro lado, a un mayor drift el aporte de la componente horizontal de las diagonales disminuye.

La disminución de la contribución de la suma de la fuerza horizontal de las riostras se debe a la disminución de su rigidez dado por un menor valor del módulo tangente en comparación al módulo de Young según la curva tensión-deformación de los materiales y, por otra parte, debido al pandeo y degradación de la capacidad a compresión de las diagonales. Luego, el mayor aporte a la fuerza horizontal de las riostras viene dado por la diagonal que se encuentra trabajando en tracción.

Por otro lado, en la conexión viga-columna materializada en los modelos se generan esfuerzos de momento, además de fuerzas de corte y axiales, asimilándose más a una conexión de momento que, junto con la gran altura e inercia de las vigas mayor a las columnas, tiende a restringir las rotaciones en las intersecciones viga-columna, generándose grandes esfuerzos flexurales y de corte en las columnas y vigas que conforman los pórticos arriostrados.

Capítulo 6. Conclusiones y Comentarios

Los objetivos de este trabajo consisten en identificar los principales modos de falla y estudiar el desempeño de perfiles XL de acero estructural sometidos a un historial de desplazamientos cíclico incremental, mediante un análisis no lineal como parte de configuraciones de pórticos arriostrados en X, V invertida (Chevron) y Diagonal única en el software de elementos finitos ANSYS Workbench 2020 R2.

Los modelos de pórticos arriostrados concéntricos buscaban implementar sistemas estructurales y longitud de las diagonales comúnmente presente en la práctica. Las riostras XL variaban su largo entre 2,0 m y 4,8 m, donde estas comprendían un ángulo con respecto a la horizontal de 45° para los pórticos arriostrados en X y Diagonal única, y de 53° para pórticos arriostrados tipo Chevron.

6.1. Calibración esquema de modelación de perfiles XL

La primera etapa de este trabajo, correspondiente a una calibración del esquema de modelación de perfiles XL en el software ANSYS Workbench desarrollado por Molina (2014) y Claverie (2016) con los resultados experimentales de diagonales XL aisladas del estudio de Guerrero (2017), permitió indagar y calibrar parámetros que influyen en el modo de falla y respuesta histerética de los perfiles XL, de modo de acercarse al exhibido por los especímenes experimentales. Estos parámetros refieren al módulo tangente de la curva bilineal de tensión-deformación, factor de escala de la imperfección inicial del análisis no lineal, mallado de elementos finitos y tipo de formulación de las regiones de contacto entre las superficies de los distintos cuerpos (ángulos, conectores intermedios y placas gusset).

El módulo tangente (o pendiente post-fluencia) de la curva bilineal permite ajustar la capacidad máxima a tracción en relación con el endurecimiento a tracción desarrollado por el perfil y, hacia los ciclos finales de la curva de histéresis, calibrar la degradación de la resistencia a tracción. En los primeros ciclos en tracción se observa una sobrerresistencia de los perfiles, lo cual se puede deber a una diferencia entre la tensión de fluencia de los especímenes respecto al promedio de los datos del ensayo de materiales utilizados en los modelos numéricos. En particular para el perfil XL corto, el módulo tangente influyó también en el modo de pandeo global (flexotorsional o flexural) hacia los ciclos finales y en la ubicación de la rótula plástica a lo largo del perfil.

El nivel de imperfección inicial del análisis no lineal incide en la resistencia máxima a tracción y compresión de las diagonales, aunque con un mayor efecto en la última de estas. A un mayor factor de escala de la imperfección inicial disminuye la resistencia a compresión y, en general, se tiene una resistencia a tracción levemente menor. Por otra parte, la degradación de la resistencia a

compresión de los perfiles sigue una tendencia similar al de la curva de histéresis experimental, aunque respecto al peak de la capacidad a compresión, en los primeros ciclos de los perfiles largo y corto en particular se observa que la curva numérica se encuentra desplazada respecto al registro experimental. Por otro lado, para el perfil XL corto se observan modos de pandeo en flexotorsión o flexión hacia los ciclos finales, en donde para el mayor nivel de imperfección inicial del análisis de sensibilidad ($L/200$) se exhibe un pandeo global flexural en los últimos ciclos similar al observado en los ensayos experimentales, aunque es importante mencionar que en los primeros ciclos se observa una importante componente torsional.

Respecto al análisis de refinamiento del mallado de elementos finitos, el modo de falla de los perfiles se mantiene y las resistencias a tracción y compresión varían ligeramente para los tres niveles en estudio, sin embargo, el tiempo computacional en resolver el modelo aumenta considerablemente al asignar un mallado más fino.

Referente al tipo de formulación entre las regiones de contacto, para el análisis no lineal se procedió a variar esta entre que fuera del tipo program controlled, MPC (internal multipoint constraint) o una combinación entre ambas, en el que para esta última configuración dependía asignar una formulación program controlled si fuese necesario intercambiar las superficies de contacto entre tipo contact o target. Para cada una de estas configuraciones se realizó los análisis de sensibilidad del módulo tangente y nivel de imperfección inicial, donde la resistencia a tracción y compresión de los perfiles siguió la misma tendencia al modificar estas variables. En relación con los perfiles XL largo e intermedio se mantiene el modo de pandeo global flexural pero en algunos casos de los análisis de sensibilidad del módulo tangente e imperfección inicial se observaron diferencias entre la cantidad de rótulas plásticas (1 o 2) en la diagonal entre los distintos tipos de formulación y, en particular para el perfil XL corto, se observó diferencias en el modo de pandeo global y ubicación de la rótula plástica. Si bien, cuando se utilizó una combinación en un mismo modelo de que algunas regiones de contacto fuesen del tipo program controlled o MPC, en el caso de los perfiles largo e intermedio se mantuvo una rótula plástica similar al ensayo experimental durante los análisis de sensibilidad del módulo tangente e imperfección inicial, el criterio para asignar el tipo de formulación para cada región de contacto resulta ser ambiguo y requiere de mayor estudio. De acuerdo con el documento ANSYS Mechanical Users Guide (ANSYS, Inc., 2022c), frecuentemente escoger el método de contacto es complicado, con lo que es recomendable, cuando sea posible, escoger la opción de que el tipo de formulación en una región de contacto sea controlado por el programa (program controlled).

A partir de los análisis de sensibilidad de estos parámetros, al aplicar ciertas magnitudes y configuraciones entre estos parámetros los tres perfiles XL exhibieron un modo de falla similar al de los especímenes ensayados (aunque cabe destacar el pandeo torsional en los primeros ciclos del perfil XL corto), esto es un pandeo global flexural en torno al eje geométrico vertical (Y-Y) y la presencia de un pandeo local en el ala horizontal de uno de los ángulos del perfil XL, en donde la rótula plástica se ubica próxima al conector intermedio central, entre este y uno de los conectores

intermedios vecinos. Es importante mencionar que en los ensayos experimentales se observa la propagación de una grieta en el ala horizontal de uno de los ángulos del perfil XL producto de la fatiga de este, sin embargo, este comportamiento no se logra reproducir en los modelos numéricos construidos. Por otra parte, cabe destacar que es recomendable la continuación de ensayos experimentales que permitan proseguir la calibración de los parámetros antes mencionados u otros adicionales que pudiesen influenciar el modo de falla de los perfiles y su respuesta histerética.

6.2. Modelación de perfiles XL como parte de pórticos arriostrados

6.2.1. Pandeo global y pandeo local de perfiles XL

En los modelos de perfiles XL como parte de diagonales de los pórticos arriostrados se observaron modos de falla en flexión y flexotorsión. En los modelos de pórticos arriostrados en X, la diagonal continua tiende a presentar un pandeo flexotorsional para valores inferiores a 10 de la razón entre su esbeltez global y local (λ_G/λ_L) y un pandeo flexural para valores superiores de esta razón, sin embargo, no es posible establecer un valor de transición puesto que en algunos modelos cuyas diagonales poseen un valor de λ_G/λ_L menor que 10 en la diagonal continua de igual modo se observa un pandeo flexural. Por su parte, la diagonal discontinua exhibe un pandeo global en flexión independiente de su razón de esbelteces global y local. El pandeo flexotorsional observado en algunos modelos para la riostra continua se puede deber también a una menor rigidez torsional que la placa que une ambas diagonales otorga a la riostra continua relativo a la riostra discontinua, o a la asignación de la imperfección inicial en compresión durante el análisis de pandeo lineal.

En el caso de los modelos de pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única, se observa que ambas riostras de los pórticos se pandean globalmente en flexión independientemente del parámetro λ_G/λ_L , en el que la razón de esbelteces se ubica entre 4,5 y 11,4 para estos modelos.

Referente al plano de pandeo, se observa que las diagonales XL en algunos casos pandean globalmente en torno a su eje principal U-U y en otros casos en torno a su eje geométrico vertical Y-Y. En pórticos arriostrados en X la riostra discontinua se pandea en flexión en torno al eje Y-Y; mientras que la diagonal continua tanto para cuando falla por flexión o flexotorsión presenta un pandeo en torno al eje U-U o en torno al eje Y-Y. Para los pórticos arriostrados tipo V invertida y Diagonal única se observa que la diagonal con imperfección inicial, en general, se pandea en torno al eje Y-Y. Respecto a la diagonal sin imperfección inicial de estos modelos, en el caso de pórticos arriostrados tipo V invertida esta riostra exhibe un pandeo en torno al eje U-U; y en el caso de pórticos arriostrados tipo Diagonal única, en algunos casos un pandeo en torno al eje U-U y en otros casos en torno al eje Y-Y. Al comparar el eje de pandeo con la separación entre conectores intermedios no se logra evidenciar una relación entre ambos parámetros de acuerdo con la cantidad de registros obtenidos.

El pandeo global de las diagonales XL inicia entre los drift de 0,14% a 0,39%, aunque mayoritariamente entre los drift de 0,20% y 0,28%. En cuanto al pandeo local, se produce una transición en torno a una esbeltez local de 8,0 de la deriva de entrepiso en que se registra un pandeo local en la diagonal. En las riostras XL con imperfección inicial con una esbeltez local superior a este valor mayoritariamente se observa un pandeo local a un drift de 0,28%, aunque en dos modelos en particular con una λ_L de 10,5 la diagonal con imperfección inicial exhibe un pandeo local a un drift de 0,20%. Por otro lado, en las riostras XL con imperfección inicial y con una esbeltez local inferior a 8,0 se observa el pandeo local a un drift de 0,39%. Si bien, una menor razón ancho-espesor de las alas de los ángulos del perfil XL otorga una mayor capacidad de deformación, el pandeo local de las diagonales XL se manifiesta para un drift bastante menor a la deriva de entrepiso límite para estructuras de acero (clasificación “Otras estructuras”) correspondiente a un 1,50% acorde al punto 6.3 de la norma NCh2369.Of2003.

Una esbeltez local de 8,0 es un 4% superior al límite de esbeltez local del código AISC 341-16 para perfiles ángulos de elementos de alta ductilidad y acero A270ES (con $R_y=1,27$) y, por otro lado, un 65% del límite de esbeltez local para ángulos laminados de acero A270ES según la norma NCh2369.Of2003. Respecto a los ángulos plegados, una λ_L de 8,0 representa un 79% del límite de esbeltez local de la norma NCh2369.Of2003 para estos perfiles considerando un acero estructural ASTM A36, aunque cabe destacar que los perfiles XL plegados en estudio poseen una λ_L de 10,5 (valor límite según NCh2369.Of2003 para ángulos plegados que conforman perfiles XL), con lo que no se analiza un amplio rango de esbeltez local para estos casos. A diferencia del límite de esbeltez local de NCh2369.Of2003, el código AISC341-16 considera en el cálculo un factor inferior y, además, el parámetro R_y multiplica a la tensión de fluencia mínima, con lo que considera una sobrerresistencia del material. Luego, es recomendable la ejecución de ensayos experimentales de perfiles XL con un amplio rango de esbeltez local de manera de calibrar el límite de esbeltez local hacia una razón ancho-espesor que otorgue una mayor ductilidad al perfil XL.

A modo de comparación, el código AISC 341-16 (AISC, 2016a) señala que se espera que las diagonales de marcos arriostrados concéntricamente fluyan y comiencen a pandear para drifts entre 0,30% y 0,50%. Además, en terremotos severos los arriostramientos podrían sufrir deformaciones axiales posteriores al pandeo de 10 a 20 veces su deformación de fluencia. Para sobrevivir a deformaciones cíclicas de gran magnitud sin fallas prematuras, los arriostramientos y sus conexiones deben estar debidamente detallados.

6.2.2. Capacidad a compresión y tracción de perfiles XL

Relativo a la resistencia a compresión, a una mayor esbeltez global la diferencia entre la capacidad máxima a compresión entre las diagonales con y sin imperfección inicial se incrementa, siendo siempre inferior la resistencia a compresión de la riostra a la cual se le aplica la imperfección inicial.

Por otro lado, la capacidad máxima a compresión de las diagonales XL con y sin imperfección inicial en todos los modelos se encuentra por sobre la resistencia nominal a compresión según los códigos de diseño AISC 360-16 o AISI S100-16 (para ángulos laminados o plegados respectivamente). A una mayor esbeltez global la resistencia a compresión de las diagonales sin imperfección inicial tiende a crecer monotónicamente relativo a la resistencia nominal, alcanzando hasta un valor de 2,25 veces de la resistencia nominal a compresión, en cambio, la capacidad máxima a compresión de las diagonales con imperfección inicial en comparación con la resistencia nominal se observa independiente de la esbeltez global y se mantiene por debajo de 1,3 veces aproximadamente la resistencia nominal a compresión.

En cuanto a la degradación de la resistencia a compresión de estas diagonales, a una deriva de entrepiso del 0,20% el promedio de la capacidad a compresión respecto a su resistencia máxima varía entre un 87% a 96%, para un drift del 0,39% el promedio varía entre un 51% a 67% y, por último, a un drift del 0,77%, el promedio disminuye a valores entre 30% y 49%.

Respecto a la resistencia a tracción, al comparar la capacidad a tracción entre ambas riostras parte de un mismo modelo, en ciertos casos se obtiene una resistencia superior y en otros inferior de la diagonal a la cual se le asigna la imperfección inicial en compresión en relación con la otra diagonal independiente de la esbeltez global, con hasta una diferencia del 7% aproximadamente. Por otra parte, las mayores razones entre la resistencia a tracción obtenida de las diagonales en los modelos respecto a la resistencia nominal a tracción resultan para una menor esbeltez global, alcanzando una sobrerresistencia del 15%. En algunos casos, independiente de la esbeltez global, ocurre que para una de las diagonales de los modelos (con o sin imperfección inicial) se obtiene una resistencia a tracción inferior a la nominal, alcanzando hasta un valor de un 96% de la resistencia nominal, aunque para esbelteces globales mayores esto tiende a producirse para la diagonal con imperfección inicial. Esta diferencia se puede deber a un error en la medición de la fuerza axial de las diagonales o a la tolerancia entre la diferencia de la fuerza axial externa e interna de los pórticos arriostrados en las iteraciones para la convergencia de los modelos, entre otros factores.

6.2.3. Fuerzas solicitantes y diseño sobre las placas gusset

En cuanto al registro de las fuerzas solicitantes sobre las placas gusset, la fuerza máxima de tracción respecto a la resistencia nominal a tracción de la diagonal XL entre todos los modelos es de un 115% de esta última, en el que se observa una tendencia creciente hacia menores valores del parámetro λ_G/λ_L y siendo en todos los casos superior a $F_y A_g$. Por otro lado, la fuerza máxima solicitante de compresión sobre los gussets que conectan la diagonal con imperfección inicial se encuentra entre un 110% y 130% de la resistencia nominal a compresión de la riostra XL y no se presenta una tendencia creciente respecto a la razón λ_G/λ_L . La fuerza máxima solicitante de compresión sobre los gusset que conectan la diagonal sin imperfección inicial es siempre mayor respecto a la diagonal con imperfección inicial, siguiendo la misma tendencia respecto a la

capacidad en compresión medida de estas riostras. Por último, las fuerzas solicitantes ortogonales al eje longitudinal de la riostra sobre cada cara de la placa gusset (frontal y posterior) son de baja magnitud en relación con la resistencia nominal a tracción de la diagonal XL, encontrándose por debajo de un 7% de $F_y A_g$. La fuerza solicitante ortogonal dentro del plano del marco tiende a aumentar para menores valores de λ_G/λ_L , en tanto que la fuerza solicitante ortogonal fuera del plano del marco se observa independiente del parámetro λ_G/λ_L .

Puesto que las fuerzas solicitantes de tracción y compresión sobre la conexión de la diagonal son superiores a la resistencia nominal de esta, al diseñar esta conexión mediante un diseño por capacidad de las diagonales, se debe considerar una fuerza de diseño de tracción y compresión mayor a la nominal de las riostras, por ejemplo, a través del factor R_y que considera el código AISC 341-16. Cabe destacar que los modelos de pórticos arriostrados consideran una tensión de fluencia mínima del material y un módulo tangente de la curva bilineal del 0,5% del Módulo de Young nominal del acero. Diagonales con una tensión de fluencia superior a la nominal y/o un mayor endurecimiento en tracción pueden ver solicitaciones sobre sus conexiones superiores a las registradas en este estudio.

Por otra parte, para otorgar a la placa gusset la capacidad suficiente de rotación para acomodar la rotación requerida proveniente del pandeo global de la diagonal fuera del plano del pórtico, se proporcionó las disposiciones de la línea de plegado de “2t” (AISC, 2016b) y “6t” (Roeder et al, 2011) para las placas gusset de las esquinas y centrada el medio de la viga de pórticos arriostrados tipo Chevron, respectivamente. En particular para las placas gusset de las esquinas, Roeder et al. (2011) ilustra un método para establecer una línea de plegado elíptica de “8t” en gusset rectangulares que pretende otorgar una mayor capacidad de deformación del gusset, llevar a gusset más compactos y de menor espesor en relación con la línea de plegado recta de “2t”. Además, al igual como se menciona previamente para la línea de plegado vertical de “6t” para placas gusset centradas al medio de la viga de pórticos arriostrados tipo Chevron, la línea de plegado elíptica de “8t” procura retrasar el desgarro de la soldadura en las interfaces gusset-columna y gusset-viga, reducir daños adicionales sobre las columnas y vigas y facilitar la construcción de la conexión.

En cuanto a la soldadura que une la placa gusset de las esquinas al pórtico arriostrado, el código AISC 341-16 (AISC, 2016a) señala que fracturas prematuras de estas soldaduras han sido registradas en experimentos cuando las soldaduras fueron diseñadas utilizando el Método de la Fuerza Uniforme (UFM) y la capacidad esperada en tracción de la diagonal (Lehman et. al, 2008). Los esfuerzos sobre estas soldaduras son resultado de la fuerza axial de la diagonal en combinación con la flexión del gusset (debido al pandeo de la riostra) y los momentos del pórtico (excepto cuando liberaciones de momento son proporcionados). Para el pandeo de la riostra fuera del plano, diseñar la soldadura que une el gusset al ala de una viga o columna para resistir la capacidad esperada de corte del gusset en estas uniones genera una condición que favorece prevenir la falla de la soldadura de acuerdo con el código AISC 341-16. Si bien para el diseño de las conexiones se utilizó esta disposición, los modelos no incluyen la modelación de las soldaduras, con lo que

ensayos experimentales de conexiones de diagonales con perfiles XL podrían permitir evidenciar este efecto.

6.2.4. Curva de histéresis pórticos arriostrados

Al comparar el corte basal de los pórticos y la suma de la componente horizontal de las fuerzas de las diagonales en función de la deriva de entrepiso, se observa que a mayores drifts incrementa el corte basal del sistema, comportamiento esperado pues se requiere de una mayor fuerza horizontal externa para deformar el pórtico y, en cambio, la suma de la componente horizontal de las riostras tiende a disminuir. Esta disminución es debido al pandeo y degradación de la resistencia a compresión de las diagonales, junto con el menor valor del módulo tangente en comparación al módulo de Young en el rango elástico de la curva tensión-deformación del material, lo cual disminuye la rigidez de las diagonales. Luego, el mayor aporte a la fuerza horizontal de las riostras viene dado por la diagonal que se encuentra trabajando en tracción en cierto instante.

Es importante considerar que en las uniones viga-columna presente en los modelos se generan esfuerzos de momento, corte y axiales, asimilándose más a una conexión de momento y, además, producto de la gran altura e inercia de las vigas superior a la de las columnas, se tiende a restringir las rotaciones en las uniones viga-columna, generándose grandes esfuerzos flexurales y de corte sobre estos elementos.

Por otro lado, en el comentario de la sección F2.2 del código AISC 341-16 (AISC, 2016a) se indica que grandes derivas de entrepiso que resultan de fracturas prematuras de las diagonales pueden imponer demandas de ductilidad excesiva sobre las vigas y columnas, o sus conexiones.

6.3. Recomendaciones

El sistema de marco arriostrado concéntricamente será eficaz en la medida que garantice el resguardo de sus habitantes y la paralización de la producción industrial se reduzca a un tiempo mínimo frente a un sismo severo. En el caso de Chile y su recurrente periodicidad sísmica, se requiere minimizar el daño. A partir de los resultados obtenidos, se recomienda disminuir el límite de esbeltez local de la Tabla 8.1 de la norma NCh2369.Of2003 tanto para ángulos laminados y plegados que conforman perfiles XL y considerar un factor de sobrerresistencia del material en el límite de esbeltez local con el objetivo de retrasar el efecto de pandeo local, junto con reducir el límite de deformación sísmica máxima para la clasificación “Otras estructuras” de la sección 6.3 de NCh2369.Of2003, donde estructuras de acero recaen en esta clasificación, para marcos arriostrados concéntricamente con diagonales XL de modo de prevenir las fallas por pandeo global y local de estas riostras. Cabe destacar que el perfil XL se distingue por su ventaja de instalación en obra y posterior accesibilidad para la mantención de sus componentes. Además, el costo

asociado a aumentar el espesor de las diagonales es menor en relación con el costo total de la estructura.

Referente a las conexiones de las diagonales, al realizar un diseño por capacidad de las riostras, se requiere que se considere una resistencia requerida por la conexión superior a la resistencia nominal axial de las diagonales. La sección 8.5.2 de la norma NCh2369.Of2003 indica que las conexiones de las diagonales sísmicas se deben diseñar para resistir el 100% de la capacidad en tracción de la sección bruta de éstas (INN, 2003), pero no considera una tensión de fluencia probable en comparación a la mínima especificada para el material ni endurecimiento de la diagonal en tracción. Para ello, es conveniente la incorporación de un factor que amplifique la fuerza de diseño de la conexión. El Proyecto de norma de Diseño sísmico e instalaciones industriales (INN, 2018) contempla factores de resistencia esperada del material.

Por otro lado, con el objetivo de otorgar una mayor ductilidad a los elementos de conexión, para las placas gusset esquinas es recomendable aplicar las disposiciones de las líneas de plegado con una distancia libre de $2t$ (t = espesor del gusset) de acuerdo con el código AISC 341-16 o estudiar el modelo de línea de plegado elíptica con distancia libre $8t$ descrito por Roeder et al. (2011) que conduciría a gusset más compactos; en el caso de placas gusset que conectan las riostras al centro de la viga de pórticos arriostrados tipo V invertida, estudiar una distancia libre desde el ala inferior de la viga, por ejemplo, de $6t$ según describe Roeder et al. (2011).

Por otra parte, se sugiere estudiar la aplicación de planchas de refuerzo en las alas de los ángulos del perfil XL conectadas al gusset en la zona de la conexión, de manera de que el área neta efectiva del perfil XL (área bruta disminuida por las perforaciones y/o el efecto de corte diferido), sea al menos el área bruta del perfil XL, con la finalidad de que la falla se produzca fuera de esta zona.

Finalmente, respecto a las soldaduras que conectan el gusset a las columnas y vigas del pórtico arriostrado, se sugiere estudiar la fuerza de diseño de estas en base a la resistencia esperada de corte del gusset en las interfaces gusset-columna y gusset-viga que establece el código AISC 341-16 para sistemas SCBF y comparar con la fuerza de diseño resultante de aplicar el método UFM y la resistencia esperada en tracción de la diagonal.

6.4. Futuras líneas de investigación

A continuación, se mencionan algunas futuras líneas de investigación con el fin de continuar y profundizar el estudio del desempeño de perfiles XL como diagonales de marcos arriostrados, así como también validar los resultados obtenidos en este trabajo:

- Estudiar experimentalmente el pandeo local de perfiles XL como diagonales aisladas, en el que se manufacturen diferentes perfiles que cubran un amplio rango de esbeltez local de modo de calibrar un límite de esbeltez local tanto para perfiles XL conformados a partir de ángulos laminados como plegados que permita una mayor capacidad de deformación y retrasar el inicio de pandeo local.
- Realizar ensayos experimentales de pórticos arriostrados con diagonales XL, o bien diagonales XL aisladas y relacionar teóricamente la deformación axial medida de la riostra con una cierta deriva de entrepiso, de manera de validar y comparar los resultados obtenidos. Adicionalmente, permitiría continuar la calibración de la modelación numérica de perfiles XL.
- Realizar modelaciones numéricas de pórticos arriostrados con diagonales XL en que se modifiquen las conexiones en los extremos de las vigas a una conexión de corte y comparar los resultados obtenidos.
- En la modelación numérica estudiar la inclusión de las soldaduras y pernos de las conexiones, de modo de estudiar las fuerzas solicitantes sobre las soldaduras que conectan la placa gusset hacia las interfaces gusset-viga y gusset-columna, las fuerzas solicitantes sobre los pernos que conectan la riostra al gusset, y diferencias de incluir estos elementos en la modelación.
- Estudiar experimentalmente la incorporación de planchas de refuerzo en las diagonales XL en la zona de la conexión de modo de que el área neta efectiva sea al menos el área gruesa del perfil y de acuerdo con los requerimientos del código AISC 341-16 para estos refuerzos.

Bibliografía

- [1] AISC (2016a), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI / AISC 341-16. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.
- [2] AISC (2016b), Specification for Structural Steel Buildings, ANSI / AISC 360-16. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.
- [3] AISI (2016), North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI S100-16. American Iron and Steel Institute. Washington, D.C.
- [4] ANSYS, Inc. (2022a). ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide, Canonsburg, PA, 2022.
- [5] ANSYS, Inc. (2022b). Element Reference, Canonsburg, PA, 2022.
- [6] ANSYS, Inc. (2022c). Mechanical User's Guide, Canonsburg, PA, 2022.
- [7] ASTM (2017), ASTM A6/A6M -17a, Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [8] ASTM (2019), ASTM A36 / A36M-19, Standard Specification for Carbon Structural Steel, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [9] ATC. (2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA 461 Report, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [10] AZA. (2019). Catálogo Técnico de Productos, Edición 2019. Santiago, Chile.
- [11] Claverie, F. (2016). Estudio Numérico de los Modos de Falla Predominantes en Perfiles XL de Acero Estructural ante Solicitación Cíclica [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- [12] Crisafulli, F.J. (2018). Pórticos Arriostrados Concéntricamente. En: Diseño Sismorresistente de Construcciones de Acero. 5ta ed. Mendoza, Asociación Latinoamericana del Acero. pp. 117-139.
- [13] Guerrero, R. (2017). Estudio Experimental de los Modos de Falla Predominantes en Perfiles XL de Acero Estructural [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- [14] Ibáñez, J. (2019). Procedimiento de Diseño de Conexiones Estructurales Aplicado a Edificios Industriales y Mineros de Acero [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- [15] INN (2006), NCh203:2006 Acero para uso estructural – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- [16] INN (2003), NCh2369.Of2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- [17] INN (2017), NCh428:2017 Estructuras de acero – Ejecución de construcciones de acero – Perfiles laminados, soldados y tubos. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- [18] INN (2018). Proyecto de Norma Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, NCh2369. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- [19] Marsh, C. (1997). Design of Single and Multiple Angle Columns and Beams. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123 No. 7, pp. 847-856.
- [20] Molina, J. (2014). Modos de Falla Predominantes en Perfiles XL de Acero Estructural [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- [21] Montecinos, R., Herrera, R., Verdugo, A., y Beltrán, J.F. (2012). Estructuras Industriales en Mw=8.8: Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- [22] Muir, L.S., Thornton, W.A., Kane, T. (2017). Design of Connections for Axial, Moment, and Shear Forces. *En*: Tamboli, A. *Handbook of Structural Steel Connection Design and Details*. 3rd ed. McGraw-Hill.
- [23] Roeder, C.W., Lumpkin, E.J., and Lehman, D.E. (2011). A Balanced Design Procedure for Special Concentrically Braced Frame Connections. Elsevier, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67 No. 11, pp. 1760-1772.
- [24] Vergara del Pozo, R. (2004). Manual de Diseño para Ángulos Estructurales L-AZA. Gerdau Aza, Santiago, Chile.

Anexos

ANEXO A Propiedades geométricas de los perfiles

ANEXO B Resumen de resultados

ANEXO C Análisis de sensibilidad formulación del tipo de contacto en análisis no lineal

ANEXO D Dimensiones de placas gusset

Anexo A. Propiedades geométricas de los perfiles

Tabla A.1: Propiedades geométricas de los perfiles XL laminados.

Designación	Dimensiones		Área	Eje v-v		Eje u-u				Torsión		Ángulo individual		
	B	e		A	l	r	l	r			J	Cw	xG = yG	ri
							d = 0 mm	d = 6 mm	d = 8 mm	d = 10 mm				
cm x kgf/m	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm	cm ⁴	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁶	cm	cm	
XL 20 x 35,7	200	12	45,4	655	3,80	937	4,93	5,06	5,19	23,1	256	2,90	1,94	
x 30,1	200	10	38,3	561	3,83	756	4,83	4,96	5,09	13,7	213	2,82	1,95	
XL 16 x 28,1	160	12	35,7	321	3,00	502	4,14	4,27	4,40	17,9	131	2,41	1,55	
x 23,7	160	10	30,2	277	3,03	403	4,04	4,17	4,30	10,7	109	2,34	1,56	
x 19,3	160	8	24,5	229	3,06	309	3,94	4,07	4,20	5,66	87,4	2,26	1,56	
XL 13 x 19,0	130	10	24,2	142	2,43	225	3,44	3,57	3,71	8,52	58,6	1,97	1,25	
x 15,5	130	8	19,7	119	2,46	172	3,34	3,47	3,60	4,54	46,9	1,89	1,26	
x 11,8	130	6	15,1	92,5	2,48	122	3,23	3,36	3,50	2,01	35,2	1,80	1,27	

Tabla A.2: Propiedades geométricas de los perfiles XL plegados.

Designación	Dimensiones		Área	Eje v-v		Eje u-u				Torsión		Ángulo individual		
	B	e		A	l	r	l	r			J	Cw	xG = yG	ri
							d = 0 mm	d = 6 mm	d = 8 mm	d = 10 mm				
cm x kgf/m	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm	cm ⁴	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁶	cm	cm	
XL 25 x 36,7	250	10	46,7	1150	4,97	1460	5,98	6,11	6,24	16,00	414,0	3,59	2,36	
XL 20 x 23,5	200	8	29,9	472	3,97	599	4,87	5,00	5,13	6,55	169,9	2,87	1,89	

Tabla A.3: Propiedades geométricas de los perfiles IN utilizados para vigas y columnas.

Designación	Dimensiones			Área	Eje x-x			Eje y-y			Torsión	
	B	e	t		A	l	W	r	l	W	r	J
cm x kgf/m	mm	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁶
IN 60 x 139	300	22	8	176	122000	4060	26,3	9900	660	7,49	223	8270000
IN 50 x 132	300	22	8	168	81800	3270	22	9900	660	7,67	221	5650000

Tabla A.4: Propiedades geométricas de los perfiles doble t utilizados para vigas y columnas en modelo XL 25x36,7 Diagonal única.

Designación	Dimensiones			Área	Eje x-x			Eje y-y			Torsión		
	H x Peso	B	e		t	A	I	W	r	I	W	r	J
cm x kgf/m	mm	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁶
60 x 165	300	22	14	210	130354	4345	24,9	9913	661	6,87	266	8279198	
50 x 147	300	22	12	187	84935	3397	21,3	9907	660	7,28	240	5658730	

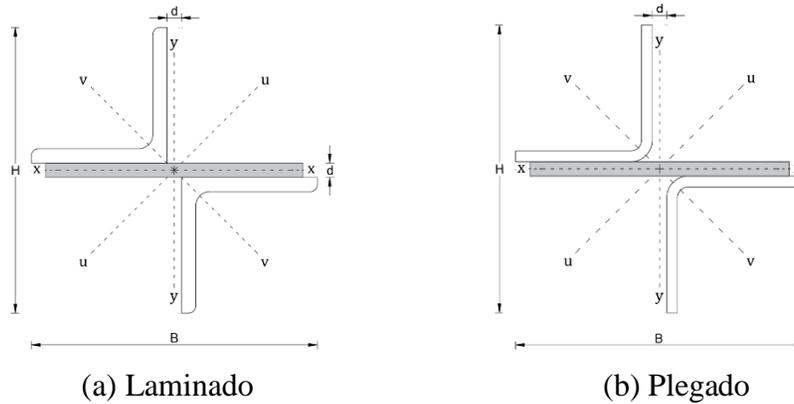


Figura A.1: Ejes principales y geométricos perfil XL.

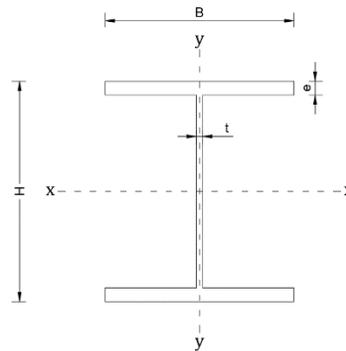


Figura A.2: Ejes principales perfil doble t.

Anexo B. Resumen de resultados

Tabla B.1: Esbelteces de las diagonales XL, modo de pandeo global, plano de pandeo y pandeo local.

	Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Riostra	(a/ri) / λ_G	Modo de Falla	Plano de pandeo	Pandeo Global Drift [%]	Pandeo Local Drift [%]	dz / Lb [%]
Pórticos arriostrados en X (hpliso = 3,5 m)	XL 13x11,8	3710	88,2	10,8	8,2	Continua	62%	Flexotorsional	Y-Y	0,20	0,28	3,4
						Discontinua	52%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	2,7
	XL 13x15,5	3710	87,9	8,1	10,9	Continua	60%	Flexural	U-U	0,20	0,39	5,1
						Discontinua	48%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	3,5
	XL 13x19,0	3700	87,9	6,5	13,5	Continua	58%	Flexural	U-U	0,28	0,55	6,5
						Discontinua	43%	Flexural	Y-Y	0,28	0,39	5,5
	XL 16x19,3	3490	57,1	10,0	5,7	Continua	63%	Flexural	Y-Y	0,20	0,39	3,5
						Discontinua	51%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	2,1
	XL 16x23,7	3330	55,0	8,0	6,9	Continua	55%	Flexotorsional	U-U	0,28	0,39	4,0
						Discontinua	44%	Flexural	Y-Y	0,28	0,28	3,1
XL 16x28,1	3250	54,2	6,7	8,1	Continua	50%	Flexural	U-U	0,28	0,55	6,0	
					Discontinua	39%	Flexural	Y-Y	0,28	0,39	3,3	
Pórticos arriostrados en X (hpliso = 4,25 m)	XL 16x19,3	4760	92,7	10,0	9,3	Continua	63%	Flexotorsional	U-U	0,20	0,28	2,6
						Discontinua	53%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	3,1
	XL 16x23,7	4700	91,3	8,0	11,4	Continua	61%	Flexural	U-U	0,20	0,55	7,3
						Discontinua	51%	Flexural	Y-Y	0,20	0,39	5,3
	XL 16x28,1	4560	87,7	6,7	13,1	Continua	58%	Flexural	U-U	0,20	0,55	6,2
						Discontinua	48%	Flexural	Y-Y	0,20	0,39	4,4
	XL 20x30,1	4260	55,5	10,0	5,6	Continua	62%	Flexotorsional	U-U	0,20	0,28	1,4
						Discontinua	46%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	3,3
	XL 20x35,7	4260	56,0	8,3	6,7	Continua	54%	Flexotorsional	Y-Y	0,20	0,39	3,8
						Discontinua	40%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	3,1
	XL 20x23,5 (P)	4400	61,1	10,5	5,8	Continua	42%	Flexural	Y-Y	0,14	0,28	2,7
						Discontinua	36%	Flexural	Y-Y	0,14	0,20	1,3
XL 25x36,7 (P)	4300	47,0	10,5	4,5	Continua	39%	Flexotorsional	Y-Y	0,20	0,28	1,3	
					Discontinua	45%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	1,1	

Tabla B.1: Esbelteces de las diagonales XL, modo de pandeo global, plano de pandeo y pandeo local (continuación).

	Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Riostra	(a/ri) / λ_G	Modo de Falla	Plano de pandeo	Pandeo Global Drift [%]	Pandeo Local Drift [%]	dz / Lb [%]
Pórticos arriostrados en V invertida (hplano = 2,85 m)	XL 13x11,8	2270	98,7	10,8	9,1	Izquierda	44%	Flexural	U-U	0,20	0,28	2,0
						Derecha	44%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	2,4
	XL 13x15,5	2160	87,9	8,1	10,9	Izquierda	43%	Flexural	U-U	0,20	0,39	3,4
						Derecha	43%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	2,5
	XL 16x19,3	2070	67,6	10,0	6,8	Izquierda	42%	Flexural	U-U	0,20	0,28	1,6
						Derecha	42%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	1,7
	XL 20x23,5 (P)	2030	51,2	10,5	4,9	Izquierda	41%	Flexural	U-U	0,14	0,28	1,1
						Derecha	41%	Flexural	U-U	0,14	0,20	0,6
Pórticos arriostrados en Diagonal única (hplano = 2,85 m)	XL 13x11,8	2790	122,7	10,8	11,4	Izquierda	47%	Flexural	U-U	0,14	0,39	3,8
						Derecha	47%	Flexural	Y-Y	0,14	0,28	2,9
	XL 16x19,3	2580	84,4	10,0	8,4	Izquierda	47%	Flexural	U-U	0,14	0,39	1,8
						Derecha	47%	Flexural	Y-Y	0,14	0,28	2,2
	XL 20x23,5 (P)	2430	61,3	10,5	5,8	Izquierda	46%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	1,5
						Derecha	46%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	1,7
	XL 25x36,7 (P)	2320	46,8	10,5	4,5	Izquierda	40%	Flexural	Y-Y	0,20	0,28	1,2
						Derecha	40%	Flexural	U-U	0,20	0,28	0,7

Tabla B.2: Resistencia a tracción y compresión y degradación de la capacidad a compresión a distintas derivas de entrepiso.

	Modelo	Largo [mm]	λG	λL	$\lambda G / \lambda L$	Riostra	Pt [tonf]	Pc [tonf]	Pci / Pc - Drift					Pt / FyAg	Pc / Pc nom.
									0,20 %	0,28 %	0,39 %	0,55 %	0,77 %		
Pórticos arriostrados en X (hpliso = 3,5 m)	XL 13x11,8	3710	88,2	10,8	8,2	Continua	41,2	34,7	-	0,62	0,33	0,26	0,23	1,01	1,33
						Discontinua	40,5	28,9	-	0,76	0,38	0,29	0,24	0,99	1,11
	XL 13x15,5	3710	87,9	8,1	10,9	Continua	52,5	48,7	-	0,82	0,38	0,24	0,19	0,99	1,42
						Discontinua	52,0	38,1	-	0,83	0,40	0,30	0,25	0,98	1,12
	XL 13x19,0	3700	87,9	6,5	13,5	Continua	65,9	60,3	-	0,87	0,41	0,32	0,28	1,01	1,44
						Discontinua	65,4	51,4	-	-	0,48	0,32	0,25	1,00	1,22
	XL 16x19,3	3490	57,1	10,0	5,7	Continua	66,0	62,6	-	0,93	0,50	0,37	0,27	1,00	1,14
						Discontinua	68,8	60,7	-	0,73	0,51	0,40	0,33	1,04	1,11
	XL 16x23,7	3330	55,0	8,0	6,9	Continua	84,8	78,9	-	0,97	0,63	0,47	0,39	1,04	1,15
						Discontinua	82,2	76,2	-	-	0,57	0,44	0,36	1,01	1,11
	XL 16x28,1	3250	54,2	6,7	8,1	Continua	98,9	95,6	-	-	0,75	0,54	0,41	1,03	1,17
						Discontinua	101,9	93,9	-	-	0,70	0,48	0,38	1,06	1,15
Pórticos arriostrados en X (hpliso = 4,25 m)	XL 16x19,3	4760	92,7	10,0	9,3	Continua	66,6	61,6	-	0,57	0,31	0,24	0,21	1,01	1,52
						Discontinua	63,8	49,0	-	0,81	0,37	0,28	0,24	0,96	1,21
	XL 16x23,7	4700	91,3	8,0	11,4	Continua	81,7	77,4	-	0,89	0,52	0,28	0,18	1,00	1,53
						Discontinua	79,6	65,3	-	0,82	0,56	0,30	0,22	0,98	1,29
	XL 16x28,1	4560	87,7	6,7	13,1	Continua	95,7	89,9	-	0,98	0,40	0,32	0,27	0,99	1,45
						Discontinua	96,2	81,3	-	0,78	0,45	0,31	0,25	1,00	1,31
	XL 20x30,1	4260	55,5	10,0	5,6	Continua	104,1	100,8	-	0,96	0,53	0,38	0,30	1,01	1,18
						Discontinua	107,1	94,0	-	0,81	0,49	0,37	0,30	1,04	1,10
	XL 20x35,7	4260	56,0	8,3	6,7	Continua	126,1	118,9	-	-	0,68	0,52	0,34	1,03	1,16
						Discontinua	127,9	112,0	-	0,83	0,52	0,38	0,31	1,04	1,09
	XL 20x23,5 (P)	4400	61,1	10,5	5,8	Continua	77,6	72,7	-	0,68	0,50	0,36	0,30	1,04	1,23
						Discontinua	80,2	68,5	0,87	0,69	0,57	0,48	0,41	1,07	1,16
	XL 25x36,7 (P)	4300	47,0	10,5	4,5	Continua	127,6	117,7	-	0,95	0,81	0,61	0,45	1,09	1,28
						Discontinua	127,2	111,1	-	0,80	0,68	0,52	0,42	1,09	1,21

Tabla B.2: Resistencia a tracción y compresión y degradación de la capacidad a compresión a distintas derivas de entrepiso (continuación).

	Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Riostra	Pt [tonf]	Pc [tonf]	Pci / Pc - Drift					Pt / FyAg	Pc / Pc nom.
									0,20 %	0,28 %	0,39 %	0,55 %	0,77 %		
Pórticos arriostrados en V invertida (hpliso = 2,85 m)	XL 13x11,8	2270	98,7	10,8	9,1	Izquierda	41,1	38,2	-	0,54	0,40	0,33	0,25	1,01	1,64
						Derecha	39,0	28,1	-	0,66	0,55	0,44	0,36	0,96	1,21
	XL 13x15,5	2160	87,9	8,1	10,9	Izquierda	54,3	50,5	-	0,74	0,48	0,38	0,31	1,02	1,48
						Derecha	52,5	41,0	-	0,81	0,61	0,49	0,40	0,99	1,19
	XL 16x19,3	2070	67,6	10,0	6,8	Izquierda	68,0	63,5	-	0,76	0,62	0,54	0,43	1,03	1,25
						Derecha	67,8	60,9	-	0,79	0,67	0,60	0,48	1,02	1,20
	XL 20x23,5 (P)	2030	51,2	10,5	4,9	Izquierda	85,9	74,7	-	0,81	0,74	0,76	0,59	1,15	1,28
						Derecha	86,1	68,0	0,96	0,90	0,87	0,86	0,70	1,15	1,17
Pórticos arriostrados en Diagonal única (hpliso = 2,85 m)	XL 13x11,8	2790	122,7	10,8	11,4	Izquierda	40,9	38,7	-	0,62	0,23	0,16	0,13	1,00	2,25
						Derecha	39,6	19,0	0,93	0,73	0,42	0,31	0,25	0,97	1,11
	XL 16x19,3	2580	84,4	10,0	8,4	Izquierda	67,5	64,4	-	0,93	0,47	0,24	0,18	1,02	1,46
						Derecha	65,0	48,5	0,98	0,67	0,39	0,29	0,24	0,98	1,10
	XL 20x23,5 (P)	2430	61,3	10,5	5,8	Izquierda	81,1	74,6	-	0,69	0,53	0,38	0,30	1,09	1,27
						Derecha	79,5	71,8	-	0,67	0,52	0,41	0,33	1,06	1,22
	XL 25x36,7 (P)	2320	46,8	10,5	4,5	Izquierda	129,4	116,9	-	0,77	0,63	0,54	0,43	1,11	1,27
						Derecha	130,3	110,8	-	0,85	0,73	0,65	0,51	1,12	1,20

Tabla B.3: Fuerzas solicitantes en cada eje sobre placas gusset.

	Modelo	Largo [mm]	λG	λL	$\lambda G / \lambda L$	Fuerzas sobre gusset normalizadas									FyAg [tonf]	Pc nominal [tonf]
						Pt / FyAg	Pc / Pc nom. Con imp. Inicial	Pc / Pc nom. Sin imp. Inicial	Px / FyAg Cara Frontal (X)	Px / FyAg Cara Frontal (-X)	Px / FyAg Cara Posterior (X)	Px / FyAg Cara Posterior (-X)	Pz / FyAg Cara Frontal (Z)	Pz / FyAg Cara Posterior (-Z)		
Pórticos arriostrados en X (hpliso = 3,5 m)	XL 13x11,8	3710	88,2	10,8	8,2	101%	111%	133%	2,0%	1,5%	2,2%	1,2%	2,5%	2,5%	40,77	26,12
	XL 13x15,5	3710	87,9	8,1	10,9	101%	111%	142%	1,7%	1,9%	1,3%	1,3%	3,4%	2,4%	53,19	34,18
	XL 13x19,0	3700	87,9	6,5	13,5	101%	122%	144%	2,8%	2,3%	2,8%	2,1%	5,1%	4,9%	65,34	41,98
	XL 16x19,3	3490	57,1	10,0	5,7	104%	111%	114%	2,1%	3,3%	2,9%	4,1%	2,4%	3,3%	66,15	54,90
	XL 16x23,7	3330	55,0	8,0	6,9	104%	111%	115%	2,6%	2,6%	2,3%	1,7%	3,7%	2,9%	81,54	68,60
	XL 16x28,1	3250	54,2	6,7	8,1	106%	115%	117%	3,7%	3,5%	3,9%	3,9%	3,7%	3,4%	96,39	81,48
Pórticos arriostrados en X (hpliso = 4,25 m)	XL 16x19,3	4760	92,7	10,0	9,3	101%	125%	147%	2,0%	2,9%	2,0%	1,7%	4,7%	4,4%	66,15	40,46
	XL 16x23,7	4700	91,3	8,0	11,4	102%	128%	152%	1,2%	1,6%	1,5%	2,0%	1,7%	2,6%	81,54	50,61
	XL 16x28,1	4560	87,7	6,7	13,1	101%	129%	147%	2,1%	2,0%	1,6%	1,9%	5,6%	4,5%	96,39	62,09
	XL 20x30,1	4260	55,5	10,0	5,6	105%	110%	118%	3,5%	3,4%	3,4%	2,9%	4,6%	4,5%	103,41	85,62
	XL 20x35,7	4260	56,0	8,3	6,7	104%	109%	116%	2,0%	2,7%	3,9%	4,2%	2,0%	2,8%	122,58	102,44
	XL 20x23,5 (P)	4400	61,1	10,5	5,8	107%	116%	124%	2,4%	3,1%	2,7%	3,5%	3,5%	4,0%	74,75	58,98
	XL 25x36,7 (P)	4300	47,0	10,5	4,5	109%	121%	128%	5,7%	4,8%	3,7%	4,2%	4,9%	5,4%	116,75	92,15

Tabla B.3: Fuerzas solicitantes en cada eje sobre placas gusset (continuación).

	Modelo	Largo [mm]	λ_G	λ_L	λ_G / λ_L	Fuerzas sobre gusset normalizadas										FyAg [tonf]	Pc nominal [tonf]
						Pt / FyAg	Pc / Pc nom. Con imp. Inicial	Pc / Pc nom. Sin imp. Inicial	Px / FyAg Cara Frontal (X)	Px / FyAg Cara Frontal (X)	Px / FyAg Cara Posterior (X)	Px / FyAg Cara Posterior (-X)	Pz / FyAg Cara Frontal (Z)	Pz / FyAg Cara Posterior (-Z)			
Pórticos arriostrados en V invertida (hpliso = 2,85 m)	XL 13x11,8	2270	98,7	10,8	9,1	101%	120%	164%	1,7%	1,5%	1,2%	1,5%	2,9%	3,2%	40,77	23,34	
	XL 13x15,5	2270	87,9	8,1	10,9	102%	117%	148%	2,1%	1,1%	1,7%	1,7%	5,1%	4,5%	53,19	34,18	
	XL 16x19,3	2070	67,6	10,0	6,8	103%	120%	125%	2,7%	2,1%	2,1%	2,3%	3,5%	3,6%	66,15	50,92	
	XL 20x23,5 (P)	2030	51,2	10,5	4,9	115%	117%	128%	3,3%	3,3%	2,4%	2,4%	5,0%	7,1%	74,75	58,30	
Pórticos arriostrados en Diagonal única (hpliso = 2,85 m)	XL 13x11,8	2790	122,7	10,8	11,4	100%	110%	225%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	4,2%	4,2%	40,77	17,22	
	XL 16x19,3	2580	84,4	10,0	8,4	102%	110%	146%	1,7%	1,5%	1,8%	1,8%	3,8%	3,6%	66,15	44,01	
	XL 20x23,5 (P)	2430	61,3	10,5	5,8	108%	122%	126%	2,0%	2,0%	3,3%	3,1%	3,7%	3,5%	74,75	58,98	
	XL 25x36,7 (P)	2320	46,8	10,5	4,5	112%	120%	127%	4,6%	4,1%	5,0%	5,0%	4,7%	5,0%	116,75	92,15	

Anexo C. Análisis de sensibilidad formulación del tipo de contacto en análisis no lineal

Tabla C.1: Análisis de sensibilidad módulo tangente – Formulación program controlled.

Perfil XL 10x6,11	Módulo tangente	Modo de falla	Capacidad	Capacidad numérica
			tracción numérica [tonf]	/ experimental [-] Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	0,1% x E	Flexión y PL*	24,06	1,05
	0,5% x E	Flexión y PL*	24,21	1,06
	1,0% x E	Flexión y PL*	24,33	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	0,1% x E	Flexión y PL	24,05	0,99
	0,5% x E	Flexión y PL	24,30	1,00
	1,0% x E	Flexión y PL	24,30	1,00
Riostra 3 (L = 964 mm)	0,1% x E	Flexión y PL**	24,24	1,00
	0,5% x E	FT y PL	25,32	1,04
	1,0% x E	FT y PL	26,58	1,10

*Dos rótulas plásticas próximas al conector intermedio central del perfil XL ubicadas simétricamente respecto al centro de la diagonal.

**Ubicación de la rótula plástica en uno de los conectores intermedios próximo al gusset.

Tabla C.2: Análisis de sensibilidad imperfección inicial – Formulación program controlled.

Perfil XL 10x6,11	Imperfección inicial		Modo de falla	Capacidad compresión numérica [tonf]	Capacidad tracción numérica [tonf]	Capacidad numérica / experimental [-]	
	Nivel	Deformación [mm]				Compresión	Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	L / 200	12,82	Flexión y PL*	11,08	24,21	1,09	1,06
	L / 500	5,13	Flexión y PL	11,61	24,27	1,14	1,06
	L / 1000	2,56	Flexión y PL	12,42	24,28	1,23	1,06
	L / 1500	1,71	Flexión y PL	13,22	24,28	1,30	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	L / 200	8,82	Flexión y PL	13,79	23,70	0,74	0,98
	L / 500	3,53	Flexión y PL*	17,17	24,26	0,93	1,00
	L / 1000	1,76	Flexión y PL	18,54	24,30	1,00	1,00
	L / 1500	1,18	Flexión y PL*	18,75	24,36	1,01	1,01
Riostra 3 (L = 964 mm)	L / 200	4,82	FT y PL	21,84	26,58	1,01	1,10
	L / 500	1,93	FT y PL	22,48	26,51	1,04	1,09
	L / 1000	0,96	FT y PL	22,75	26,52	1,05	1,09
	L / 1500	0,64	FT y PL	22,82	27,24	1,05	1,12

*Dos rótulas plásticas próximas al conector intermedio central del perfil XL ubicadas simétricamente respecto al centro de la diagonal.

Tabla C.3: Análisis de sensibilidad módulo tangente – Formulación MPC.

Perfil XL 10x6,11	Módulo tangente	Modo de falla	Capacidad	Capacidad numérica
			tracción numérica [tonf]	numérica / experimental [-] Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	0,1% x E	Flexión y PL*	24,00	1,05
	0,5% x E	Flexión y PL	24,21	1,06
	1,0% x E	Flexión y PL*	24,31	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	0,1% x E	Flexión y PL*	24,03	0,99
	0,5% x E	Flexión y PL*	24,36	1,01
	1,0% x E	Flexión y PL*	24,36	1,01
Riostra 3 (L = 964 mm)	0,1% x E	FT y PL**	24,22	1,05
	0,5% x E	FT y PL	25,38	1,05
	1,0% x E	FT y PL	27,53	1,14

*Dos rótulas plásticas próximas al conector intermedio central del perfil XL ubicadas simétricamente respecto al centro de la diagonal.

**Ubicación de la rótula plástica en uno de los conectores intermedios próximo al gusset.

Tabla C.4: Análisis de sensibilidad imperfección inicial – Formulación MPC.

Perfil XL 10x6,11	Imperfección inicial		Modo de falla	Capacidad compresión numérica [tonf]	Capacidad tracción numérica [tonf]	Capacidad numérica / experimental [-]	
	Nivel	Deformación [mm]				Compresión	Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	L / 200	12,82	Flexión y PL	11,08	24,21	1,09	1,06
	L / 500	5,13	Flexión y PL*	11,68	24,26	1,15	1,06
	L / 1000	2,56	Flexión y PL*	12,24	24,27	1,21	1,06
	L / 1500	1,71	Flexión y PL*	12,86	24,27	1,27	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	L / 200	8,82	Flexión y PL	14,18	23,80	0,76	0,98
	L / 500	3,53	Flexión y PL*	17,84	24,29	0,96	1,00
	L / 1000	1,76	Flexión y PL*	18,90	24,36	1,02	1,01
	L / 1500	1,18	Flexión y PL*	19,27	24,37	1,04	1,01
Riostra 3 (L = 964 mm)	L / 200	4,82	FT y PL	22,81	27,53	1,05	1,14
	L / 500	1,93	FT y PL	22,83	27,39	1,05	1,13
	L / 1000	0,96	FT y PL	22,96	27,97	1,06	1,15
	L / 1500	0,64	FT y PL	22,99	26,72	1,06	1,10

*Dos rótulas plásticas próximas al conector intermedio central del perfil XL ubicadas simétricamente respecto al centro de la diagonal.

Tabla C.5: Análisis de sensibilidad módulo tangente – Formulación combinación program controlled y MPC.

Perfil XL 10x6,11	Módulo tangente	Modo de falla	Capacidad	Capacidad numérica
			tracción numérica [tonf]	/ experimental [-] Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	0,1% x E	Flexión y PL	24,04	1,05
	0,5% x E	Flexión y PL	24,20	1,05
	1,0% x E	Flexión y PL	24,32	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	0,1% x E	Flexión y PL	23,98	0,99
	0,5% x E	Flexión y PL	24,34	1,00
	1,0% x E	Flexión y PL	24,34	1,00
Riostra 3 (L = 964 mm)	0,1% x E	Flexión y PL**	24,24	1,00
	0,5% x E	FT y PL	25,44	1,05
	1,0% x E	Flexión y PL	25,47	1,05

**Ubicación de la rótula plástica en uno de los conectores intermedios próximo al gusset.

Tabla C.6: Análisis de sensibilidad imperfección inicial – Formulación combinación program controlled y MPC.

Perfil XL 10x6,11	Imperfección inicial		Modo de falla	Capacidad compresión numérica [tonf]	Capacidad tracción numérica [tonf]	Capacidad numérica / experimental [-]	
	Nivel	Deformación [mm]				Compresión	Tracción
Riostra 1 (L = 2564 mm)	L / 200	12,82	Flexión y PL	11,09	24,20	1,09	1,05
	L / 500	5,13	Flexión y PL	11,66	24,27	1,15	1,06
	L / 1000	2,56	Flexión y PL	12,24	24,28	1,21	1,06
	L / 1500	1,71	Flexión y PL	12,90	24,28	1,27	1,06
Riostra 2 (L = 1764 mm)	L / 200	8,82	Flexión y PL	14,03	23,74	0,76	0,98
	L / 500	3,53	Flexión y PL	17,66	24,26	0,95	1,00
	L / 1000	1,76	Flexión y PL	18,85	24,34	1,02	1,00
	L / 1500	1,18	Flexión y PL	19,14	24,36	1,03	1,01
Riostra 3 (L = 964 mm)	L / 200	4,82	Flexión y PL	22,02	25,47	1,01	1,05
	L / 500	1,93	FT y PL	22,52	27,08	1,04	1,12
	L / 1000	0,96	FT y PL	22,72	27,25	1,05	1,12
	L / 1500	0,64	FT y PL	22,86	26,60	1,05	1,10

Anexo D. Dimensiones de placas gusset

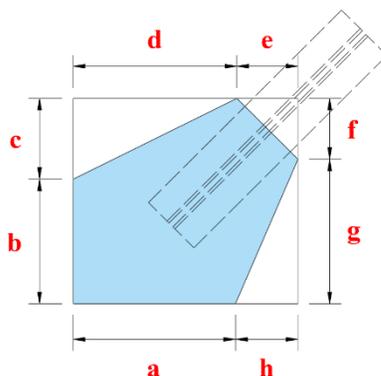


Figura D.1: Dimensiones de placa gusset esquina.

Tabla D.1: Dimensiones de placas gusset esquinas.

Tipo arriostramiento	Modelo	t [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	e [mm]	f [mm]	g [mm]	h [mm]
X (hpiso = 3,5 m)	XL 13x11,8	10	300	200	226	334	141	141	284	176
	XL 13x15,5	10	300	200	271	366	156	156	316	221
	XL 13x19,0	12	300	200	310	403	157	157	353	260
	XL 16x19,3	14	440	340	219	444	165	165	394	169
	XL 16x23,7	16	550	450	189	522	167	167	472	139
	XL 16x28,1	18	600	500	189	570	168	168	520	139
X (hpiso = 4,25 m)	XL 16x19,3	12	300	200	299	358	192	192	307	250
	XL 16x23,7	14	340	240	290	415	165	165	365	240
	XL 16x28,1	16	450	350	260	493	167	167	443	210
	XL 20x30,1	18	640	540	232	626	197	197	576	182
	XL 20x35,7	18	640	540	282	675	197	197	625	232
	XL 20x23,5 (P)	16	540	440	222	517	195	195	467	172
	XL 25x36,7 (P)	20	600	500	274	590	233	233	540	224
V inv (hpiso = 2,85 m)	XL 13x11,8	12	300	462	168	324	161	122	508	185
	XL 13x15,5	14	380	568	176	411	161	122	623	192
	XL 16x19,3	18	420	620	183	432	190	143	660	202
	XL 20x23,5 (P)	18	440	647	225	459	222	167	705	241
DU (hpiso = 2,85 m)	XL 13x11,8	10	300	200	226	334	141	141	284	176
	XL 16x19,3	12	440	340	216	442	164	164	392	166
	XL 20x23,5 (P)	16	540	440	222	517	195	195	467	172
	XL 25x36,7 (P)	20	600	500	274	590	233	233	540	224

t = espesor de placa gusset.

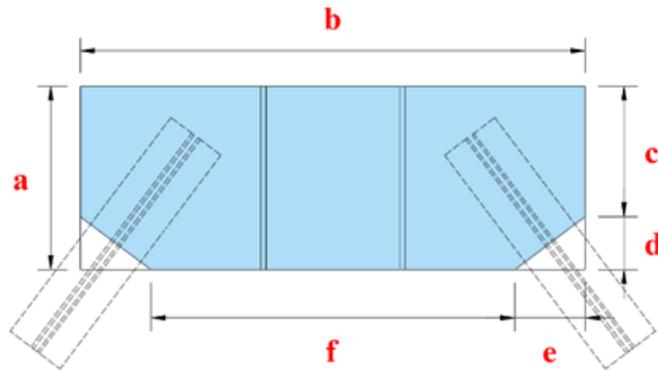


Figura D.2: Dimensiones de placa gusset centrada al medio de la viga en pórtico arriostrado tipo Chevron.

Tabla D.2: Dimensiones de placas gusset centradas al medio de la viga en pórticos arriostrados tipo Chevron.

Tipo arriostramiento	Modelo	t [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	e [mm]	f [mm]
V inv (hpiso = 2,85 m)	XL 13x11,8	12	419	1153	298	121	161	831
	XL 13x15,5	14	476	1240	353	123	163	914
	XL 16x19,3	18	529	1330	386	143	190	951
	XL 20x23,5 (P)	18	593	1440	426	167	221	997

t = espesor de placa gusset.