



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 ANTE SOLICITACIÓN CÍCLICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FABBIO ADRIÁN CLAVERIE ROJAS

PROFESOR GUÍA:

RICARDO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

RAMÓN MONTECINOS CONCHA

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil
POR: Fabbio Adrián Claverie Rojas
FECHA: 12/05/2016
PROFESOR GÚIA: Ricardo Herrera Mardones

ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS MODOS DE FALLA PREDOMINANTES EN PERFILES XL DE ACERO ESTRUCTURAL ANTE SOLICITACIÓN CÍCLICA

El presente trabajo de título tiene por objetivo identificar los principales modos de falla en perfiles armados XL sometidos a carga cíclica y su vinculación con propiedades geométricas y de comportamiento estructural. Parámetros estudiados son las fuerzas máximas de tracción y compresión, la degradación de la capacidad compresiva, la ductilidad y las fuerzas en las conexiones con la placa gusset y en la intersección de las diagonales. Adicionalmente, se comparan los efectos de utilizar dos espaciamientos de placas separadoras: cada un cuarto y un octavo del largo total del arriostramiento.

Para proceder, se realiza un análisis no lineal de tipo pushover en el software de elementos finitos ANSYS Workbench 15. Se estudian en total 74 elementos, con secciones variando en altura de 80 a 400 mm, espesores de 4 a 16 mm y largos de 3 a 6 m.

Como resultado, se establece una relación entre el modo de falla y el cociente entre la esbeltez y la compacidad de la sección transversal: perfiles con una relación de esbelteces mayor a 10 tienden a fallar por flexión; cuando la razón está comprendida entre 6 y 10 fallan por flexotorsión, mientras que para valores menores a 6 lo hacen por torsión. Se identifica que los perfiles con una relación de esbelteces menor a 4 no experimentan deformaciones laterales ni aparición de una rótula plástica, por lo cual presentan una alta ductilidad y prácticamente nula degradación en la capacidad compresiva.

En cuanto a las fuerzas en las conexiones, los casos más desfavorables se vinculan con perfiles con falla flexotorsional y flexural, ya que las demandas tienden a ser crecientes con la relación de esbelteces para los ejes de las conexiones que concentran las fuerzas más críticas.

Finalmente, se recomienda distanciar los interconectores a un cuarto del largo total, por cuanto se aumenta la capacidad de deformación inelástica y se disminuyen las fuerzas en las conexiones. Además, se sugiere evitar la implementación de perfiles con falla flexotorsional, ya que mostraron fallar prematuramente y además, producto de la forma de pandeo, suponen costos de reparación mayores.

*A mis padres, Hugo y Pamela, por todo su amor y apoyo.
A mis hermanos, Franco y Luciano, que lo son todo para mí.
Este trabajo es por y para ustedes.*

Agradecimientos

Quisiera comenzar este trabajo agradeciendo a todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron en que hoy me encuentre en esta etapa que culmina, y a los que fueron parte fundamental en la concepción de este trabajo.

En primer lugar agradezco al profesor Ricardo Herrera, por darme la posibilidad de realizar mi memoria de título con él, acompañándome durante todo el proceso con una gran disposición y paciencia, ayudándome y recomendándome cada vez que lo requerí. Agradezco también a los profesores Juan Felipe Beltrán y Ramón Montecinos, por aceptar ser parte de la comisión. A todos mis formadores, tanto del colegio como de la universidad, muchas gracias.

A mis amigos de la universidad, especialmente a los CiBilis, por todo el apañío durante los momentos de estudio y los de no tanto estudio, agradezco profundamente la amistad de cada uno de ustedes y me llevo los mejores recuerdos y anécdotas, que no son pocas. Espero que el grupo siga alimentándose de historias y buenos momentos, y que cada uno de nosotros se dé el tiempo de juntarse a futuro.

A los Talas del C, por todos estos años en que hemos permanecido unidos y los innumerables buenos momentos que hemos pasado, que fueron de mucha ayuda para distraerme de la exigencia académica, especialmente los primeros semestres. Son todos muy grandes amigos y sin duda lo seremos para toda la vida. Sólo espero que el grupo siga siendo igual de especial, ellos saben a lo que me refiero con especial. ¡Los quiero cabros!

Agradezco también a Isabel Sarmiento, por ser la mejor compañera de vida durante casi toda mi etapa universitaria, sin ti habría sido todo más difícil. Supiste estar conmigo en los mejores y peores momentos y jamás fallarme. Lo mejor que me pudo pasar fue que te cruzaras en mi camino.

Finalmente quiero agradecer de todo corazón a mis padres, Hugo y Pamela, por todo su amor y apoyo, además de todo el sacrificio que han hecho por mí y mis hermanos durante toda la vida. Sin ustedes nada de esto sería posible, les estaré eternamente agradecido. Son los mejores padres del planeta y me sentiré satisfecho si cuando yo lo sea logro ser la décima parte de lo que ustedes han sido. También agradezco a mis hermanos, Franco y Luciano, por la alegría que entregan día a día a la familia, y no me cabe duda que sortearán con mucho éxito la etapa universitaria que se les apronta.

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Capítulo I: 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 del informe.....	4
Capítulo II: Antecedentes	6
2.1.- Normas	6
2.1.1- NCh2369. Of 2003	6
2.1.2- AISC360 (2010).....	7
2.1.3- AISC341 (2010).....	8
2.2.- Estudios analíticos y experimentales	9
2.2.1- Molina (2014).....	9
2.2.2.- Tremblay (2002).....	10
2.2.3.- Schepers (1983).....	12
Capítulo III: Modelación en elementos finitos.....	13
3.1.- Selección y diseño de perfiles a analizar.....	14
3.2.- Diseño de conexiones y conectores intermedios.....	15
3.3.- Análisis Elástico.....	17
3.3.1.- Geometría	17
3.3.2.- Material	18
3.3.3.- Contactos.....	19
3.3.4.- Mallado	20
3.3.5.- Condiciones de borde	22
3.3.6.- Carga	22
3.3.7.- Modos de falla y carga crítica	23
3.4.- Análisis No Lineal.....	24

3.4.1.- Imperfección inicial.....	25
3.4.2.- Material: Ley constitutiva bilineal	26
3.4.3.- Contactos, mallado y condiciones de borde	26
3.4.4.- Nivel de deformación	26
3.4.5.- Pushover: Análisis cíclico	29
3.4.6.- Pushover: Análisis monotónico.....	30
Capítulo IV: Resultados.....	31
4.1.- Modos de falla.....	31
4.1.1.- Perfiles con conectores cada un cuarto del largo total	31
4.1.2.- Perfiles con conectores cada un octavo del largo total.....	33
4.2.- Respuesta histerética	36
4.2.1.- Falla por flexión	36
4.2.2.- Falla por flexotorsión	37
4.2.3.- Falla por torsión	38
4.3.- Tracción y compresión máxima	39
4.4.- Capacidad a la compresión post pandeo	42
4.5.- Fuerzas máximas en las placas gusset.....	44
4.6.- Fuerzas máximas en la intersección	47
Capítulo V: Análisis de Resultados.....	51
5.1.- Modos de falla.....	51
5.2.- Planos de pandeo.....	53
5.3.- Pandeos locales	54
5.4.- Nivel de ductilidad	56
5.5.- Tracción y compresión máxima	58
5.5.- Capacidad a la compresión post pandeo	61
5.6.- Fuerzas máximas en las placas gusset.....	64
5.7.- Fuerzas máximas en la intersección	66
Capítulo VI: Conclusiones	69
6.1.- Conclusiones generales	69
6.2.- Modelación en elementos finitos.....	70
6.3.- Modos de falla.....	71
6.4.- Ductilidad.....	72

6.5.- Capacidades y degradación	73
6.5.- Fuerzas en las conexiones	74
6.6.- Efecto del número de conectores intermedios.....	75
6.7.- Contribuciones y recomendaciones.....	75
6.8.- Limitaciones	76
6.9.- Futuras líneas de investigación	77
Bibliografía.....	78
ANEXO A: CATÁLOGO DE PERFILES	79
ANEXO B: GEOMETRÍA DE CONEXIONES.....	81
ANEXO C: RESULTADOS GENERALES.....	83
ANEXO D: FUERZAS MÁXIMAS DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN	86
ANEXO E: FUERZAS EN LAS PLACAS GUSSET	89
ANEXO F: FUERZAS EN LA INTERSECCIÓN	92

Índice de Tablas

Tabla 2.1 – Parámetros de la regresión no lineal de la resistencia a la compresión post pandeo..	12
Tabla 3.1- Perfiles analizados según largo del arriostramiento.....	15
Tabla 3.2 – Separación máxima entre conectores intermedios en función el largo del perfil, según AISC360-10.....	16
Tabla 3.3 – Separación máxima entre conectores intermedios en función el largo del perfil, según AISC341-10 (SCBF).	16
Tabla 3.4 - Propiedades del acero utilizado.....	19
Tabla 3.5 – Análisis de sensibilidad para la determinación del nivel de mallado. Modelos de $L=3[m]$ y $a=0.25L$	21
Tabla 3.6 - Restricciones en los modelos. R=restringido, F=libre.	22
Tabla 3.7 – Análisis de sensibilidad para determinar el nivel de imperfección inicial.	25
Tabla 3.8 – Valores de δy [mm] para cada perfil, con conectores a distancia $a=L/4$	27
Tabla 3.9 - Valores de δy [mm] para cada perfil, con conectores a distancia $a=L/8$	28
Tabla 3.10 – Historial de desplazamientos del análisis.	29
Tabla 4.1 – Cantidad de elementos por modo de falla. (Total por cada separación de conectores: 37).....	35
Tabla 5.1 – Modo de falla predominante en función de la relación de esbelteces.	53
Tabla 5.2 – Relación entre esbeltez local y relación ancho-espesor límite dado por la norma NCh2369.Of2003.	56
Tabla 5.3 – Valores de $Cu/FyAg$ promedio según el modo de falla.....	59
Tabla 5.4 – Valores de Cu/Pn promedio según el modo de falla.....	60
Tabla 5.5 – Esbeltez y capacidades de elementos con $\lambda G/L \leq 4$. Número de perfiles: 23.	61
Tabla 5.6 –Relaciones de $C'u/Cu$ promedios para el nivel de ductilidad máximo de cada análisis, según el rango de $\lambda G/L$	62
Tabla 5.7 – Relaciones de $C'u/FyAg$ promedios para el nivel de ductilidad máximo de cada análisis, según el rango de $\lambda G/L$	63
Tabla 6.1 – Porcentaje de utilización de arriostramientos por rango de esbeltez: comparación entre datos estadísticos otorgados por el Prof. Ramón Montecinos (2016) y este estudio.....	69
Tabla A.1 – Catálogo y propiedades geométricas de perfiles utilizados.....	80
Tabla B.1 – Geometría de las conexiones.	82
Tabla C.1 – Características generales de los elementos analizados. Conectores a $L/4$	84
Tabla C.2 – Características generales de los elementos analizados. Conectores a $L/8$	85
Tabla D.1 – Fuerzas máximas de compresión y tracción. Elementos con conectores a $L/4$	87
Tabla D.2 – Fuerzas máximas de compresión y tracción. Elementos con conectores a $L/8$	88
Tabla E.1 –Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset. Elementos con conectores a $L/4$	90
Tabla E.2 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset. Elementos con conectores a $L/8$	91
Tabla F.1 – Fuerzas máximas en la intersección. Elementos con conectores a $L/4$	93
Tabla F.2 – Fuerzas máximas en la intersección. Elementos con conectores a $L/8$	94

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Arriostramientos XL con inestabilidades: (A) Pandeo local. (B) Pandeo torsional (Montecinos et al. 2012).....	2
Figura 1.2 - Sección transversal y ejes del perfil XL.	3
Figura 1.3 - Vista isométrica del perfil XL con planchuelas dispuestas cada un cuarto del largo total del elemento.	3
Figura 2.1- Requerimiento de conexión del arriostramiento para el pandeo fuera del plano.....	9
Figura 2.2 – (a) Respuesta histerética típica de un arriostramiento bajo carga cíclica simétrica. (b) Situación en caso de alto requerimiento de ductilidad. (Tremblay, R., 2002)	11
Figura 3.1 - Procedimiento de modelación.....	13
Figura 3.2 – Marcos arriostrados tipo considerados para la definición de largos. Medidas en mm.	14
Figura 3.3 - Modelo con diferentes separaciones de conectores intermedios.	17
Figura 3.4 - Ancho de Whitmore para conexión soldada. Thornton W., Lini C., 2011.....	18
Figura 3.5 – Geometría general de la placa gusset y conector intermedio.	18
Figura 3.6 – Esquema de contacto tipo Bonded con formulación MPC.	19
Figura 3.7 – Representación gráfica de las ecuaciones de restricción en un contacto de tipo bonded entre los ángulos y un conector intermedio.	20
Figura 3.8 – Elemento finito utilizado en el mallado.	20
Figura 3.9 – Mallado fino con redimensionamiento de cuerpo.	21
Figura 3.10 - Restricciones aplicadas en el modelo.	22
Figura 3.11 - Carga de 1 [N] aplicada en el extremo de la diagonal.	23
Figura 3.12 –Falla por flexión (XL80x4, L=3[m], a=L/4). A) Vista isométrica; B) Vista transversal. Factor de amplificación: 150.....	23
Figura 3.13 –Falla por flexotorsión (XL130x6, L=4[m], a=L/4). A) Vista isométrica; B) Vista transversal. Factor de amplificación: 300.....	24
Figura 3.14 – Falla por torsión (XL400x16, L=5 [m], a=L/4). A) Vista isométrica; B) Vista transversal. Factor de amplificación: 77.....	24
Figura 3.15 – Imperfección inicial asociada a un modo flexural, con un máximo de 5 [mm].	25
Figura 3.16 – Ley constitutiva bilineal del acero utilizado.	26
Figura 3.17 – Relación entre desplazamiento de fluencia y desplazamiento de fluencia teórico en función de la esbeltez del perfil.	28
Figura 3.18 - Historial de desplazamientos cíclico genérico.....	29
Figura 4.1 – Modos de falla para perfiles de 3 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.....	31
Figura 4.2 - Modos de falla para perfiles de 4 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.....	32
Figura 4.3 - Modos de falla para perfiles de 5 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.....	32

Figura 4.4 - Modos de falla para perfiles de 6 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.....	33
Figura 4.5 - Modos de falla para perfiles de 3 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.....	33
Figura 4.6 - Modos de falla para perfiles de 4 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.....	34
Figura 4.7 - Modos de falla para perfiles de 5 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.....	34
Figura 4.8 - Modos de falla para perfiles de 6 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.....	35
Figura 4.9 - Respuesta histerética de perfiles con falla flexural.....	36
Figura 4.10 –Respuesta histerética de perfiles con falla flexotorsional.	37
Figura 4.11 – Respuesta histerética de perfiles con falla torsional.	38
Figura 4.12 – Tracción máxima y compresiones máximas a distintos niveles de ductilidad.	40
Figura 4.13 – Tracción máxima en función de la esbeltez global.	41
Figura 4.14 – Fuerza de compresión máxima desarrollada en el perfil en función de la esbeltez global.	41
Figura 4.15 – Relación entre tracción máxima y compresión máxima en función de la esbeltez.	42
Figura 4.16 - Fuerzas de compresión monotónica a distintos niveles de ductilidad.	43
Figura 4.17 - Fuerzas de compresión cíclica a distintos niveles de ductilidad.....	43
Figura 4.18 – Ejes de la conexión ángulo-gusset.	44
Figura 4.19 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección X.....	45
Figura 4.20 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Y.....	45
Figura 4.21 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Z.	46
Figura 4.22 – Comparación de fuerzas producto de sollicitación cíclica y monotónica en la conexión ángulo-gusset.	47
Figura 4.23 – Ejes de la conexión en la intersección de las diagonales.	48
Figura 4.24 – Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección X.	48
Figura 4.25 – Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Y.	49
Figura 4.26 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Z.	49
Figura 5.1 – Modos de falla en función de $\lambda G/L$ para perfiles con conectores cada un cuarto del largo total.....	52
Figura 5.2 – Modos de falla en función de $\lambda G/L$ para perfiles con conectores cada un octavo del largo total.....	52
Figura 5.3 – Pandeo global en torno al eje U-U para un perfil con conectores a una distancia $a=L/4$. Factor de amplificación 2.5.....	53
Figura 5.4 – Pandeo global en torno a ejes combinados para un perfil con conectores a una distancia $a=L/8$. Factor de amplificación 2.5.	54
Figura 5.5 – Pandeo local previo a la falla para un perfil con conectores cada $L/8$. Factor de amplificación 1.0; Color: Tensión normal, eje X.	55
Figura 5.6 - Zona de formación de rótula plástica para los distintos espaciamentos de conectores. a) cada $L/4$; b) cada $L/8$. Factor de amplificación 2.5; Color: Deformación total.	55

Figura 5.7 – Deformación acumulada normalizada por δy en función de $\lambda G/L$	57
Figura 5.8 – Tracción máxima dividida por $F_y Ag$ en función de $\lambda G/L$	58
Figura 5.9 - Compresión máxima dividida por $F_y Ag$ en función de $\lambda G/L$	59
Figura 5.10 - Compresión máxima dividida por la capacidad nominal a la compresión (AISC360-10) en función de $\lambda G/L$	60
Figura 5.11 – Capacidad compresiva ante sollicitación cíclica a distintos niveles de ductilidad, normalizados por C_u	62
Figura 5.12 – Pandeo torsional sin deformaciones laterales. Factor de amplificación: 1.0.	62
Figura 5.13 - Capacidad compresiva ante sollicitación cíclica a distintos niveles de ductilidad, normalizados por $F_y Ag$	63
Figura 5.14 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección X, normalizadas por $F_y Ag$	64
Figura 5.15 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Y, normalizadas por $F_y Ag$	65
Figura 5.16 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Z, normalizadas por $F_y Ag$	66
Figura 5.17 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección X, normalizadas por $F_y Ag$	67
Figura 5.18 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Y, normalizadas por $F_y Ag$	68
Figura 5.19 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Z, normalizadas por $F_y Ag$	68
Figura 6.1 – Trayectorias de tensión ante tracción del arriostramiento.....	70
Figura A.1 – Ejes del perfil.	80
Figura B.1 – Geometría general de la placa gusset y conector intermedio.	82
Figura E.1 – Ejes de la conexión ángulo-gusset.	90
Figura F.1 – Ejes de la conexión en la intersección de las diagonales.	93

Capítulo I: Introducción

1.1.- Motivación

Durante toda la historia de la humanidad, los terremotos han supuesto un gran peligro para la estabilidad de las estructuras y la seguridad de sus ocupantes, provocando en innumerables ocasiones daños irreversibles de índole tanto material como humano. En este contexto, y considerando que en Chile se cuenta con una de las periodicidades sísmicas más altas y severas del planeta, es que el diseño sismorresistente de estructuras adquiere una gran relevancia.

El diseño sísmico de estructuras puede estar orientado, entre otras, a construcciones de hormigón armado y de acero, siendo estas últimas casi en su totalidad obras industriales en el contexto chileno. Para el diseño de obras e instalaciones industriales se utiliza la norma NCh 2369 (INN, 2003), la cual fue confeccionada en gran medida en base a recomendaciones prácticas de empresas líderes del país, recogidas en la segunda mitad del siglo XX. Esta metodología ha brindado resultados positivos en el comportamiento estructural tanto para los terremotos de 1985 como de 2010; sin embargo, en este último se registraron fallas de diversa gravedad en el parque industrial, correspondiendo los casos más graves a instalaciones de más de 20 años de antigüedad diseñadas sin grandes requerimientos de ductilidad; principalmente plantas de celulosa, siderurgias, bodegas de vino, estructuras portuarias (daño esencialmente ocasionado por el posterior tsunami), equipos y elementos no estructurales (Montecinos et al. 2012).

Dentro de las fallas más recurrentes se encontraron las inestabilidades en las diagonales de marcos arriostrados, que son las encargadas de restringir el desplazamiento de los marcos en el plano, trabajando en eventos sísmicos a esfuerzos alternados de tracción y compresión. Uno de los perfiles más comprometidos con la situación anterior fueron los de tipo XL, que presentaron, por mencionar algunos, problemas de inestabilidad por pandeo torsional, pandeo local y falla en las conexiones (ver Figura 1.1).

Los perfiles XL están compuestos por dos ángulos unidos vértice-vértice mediante placas de conexión en los extremos de la diagonal. Además, cuentan con planchuelas separadoras a lo largo del elemento, que tienen como función evitar su distorsión ante la aplicación de la carga y mantener los ángulos unidos (Figura 1.2 y Figura 1.3).

Anteriormente ya se realizó una memoria de título relativa al comportamiento de este tipo de perfil (Molina, 2014). En ella, se estudiaron los modos de falla y cargas críticas de una vasta gama de elementos sometidos a desplazamiento incremental monotónico, comparando los resultados del análisis mediante elementos finitos, con los obtenidos bajo los criterios de la norma AISC360 (2010) y los estudios de Marsh (1997).

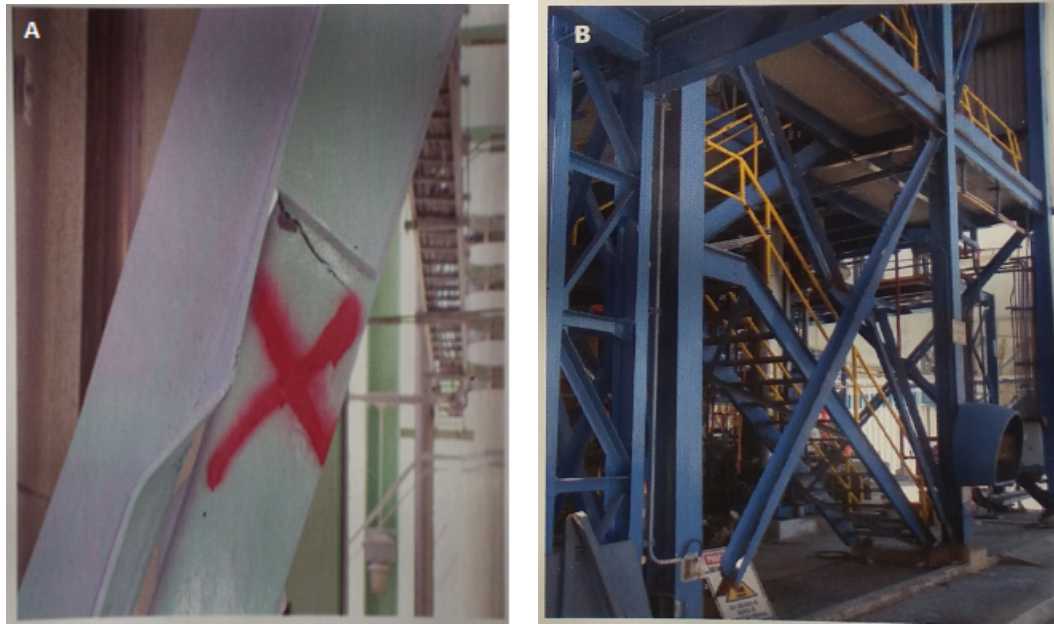


Figura 1.1 - Arriostramientos XL con inestabilidades: (A) Pandeo local. (B) Pandeo torsional (Montecinos et al. 2012).

Parámetros claves que influyen el comportamiento de los arriostramientos son la esbeltez efectiva y la compacidad de la sección transversal. En base a esto, este trabajo pretende proponer criterios de selección geométrica para perfiles XL con la finalidad de que su comportamiento en sismos de alta intensidad pueda mejorarse y orientarse a fallas de tipo dúctil, para de esta manera disminuir el costo de eventuales reparaciones y también mantener la estabilidad global del marco arriostrado.

Para esto, se analizan 74 perfiles construidos en el software de elementos finitos ANSYS Workbench 15. Para la elección de los perfiles a analizar se realiza una selección a partir de criterios de esbeltez según los requerimientos de la norma NCh2369, de modo de no incluir secciones esbeltas que se encuentren fuera de normativa. El ancho de las secciones transversales varía entre 80 y 400 mm, espesores entre 4 y 16 mm y largos entre 3 y 6 m.

Adicionalmente, se evalúa el desempeño de los perfiles y conexiones con dos espaciamientos diferentes de planchuelas intermedias, con el objetivo de identificar separaciones recomendables en el comportamiento cíclico de los perfiles. Para la modelación, se considera el elemento aislado con condiciones de borde que simulan una disposición de diagonales en cruz concéntricamente arriostradas (CBF), utilizando ángulos laminados de acero ASTM A36 y conexiones soldadas.

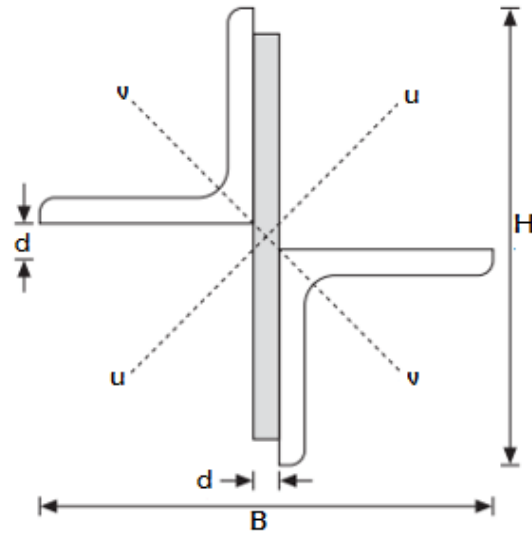


Figura 1.2 - Sección transversal y ejes del perfil XL.

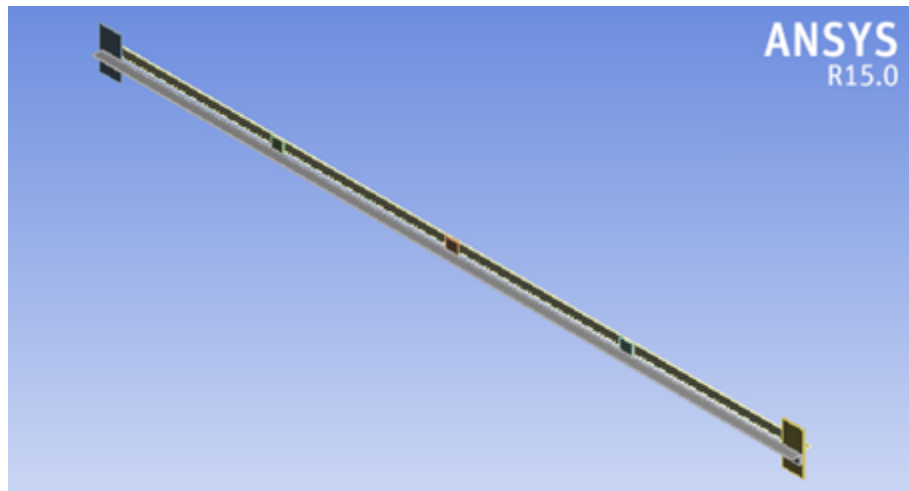


Figura 1.3 - Vista isométrica del perfil XL con planchuelas dispuestas cada un cuarto del largo total del elemento.

1.2.- Objetivos

1.2.1- Objetivos Generales

- Identificar los principales modos de falla de perfiles XL de acero de dimensiones comúnmente utilizadas en la práctica sometidos a carga cíclica, a través de un análisis no lineal de tipo *pushover* en el programa de elementos finitos ANSYS.

1.2.2.- Objetivos Específicos

- Establecer una tendencia que relacione parámetros de esbeltez con el modo de falla asociado.
- Determinar la compresión y tracción máxima que puede transmitir el arriostramiento, así como la capacidad a la compresión a distintos niveles de ductilidad ($\mu = \delta/\delta_y$).
- Estimar las solicitaciones sobre las conexiones en los extremos y en la intersección del arriostramiento cruzado.
- Identificar el efecto de la separación de los conectores intermedios en el modo de falla y desarrollo de esfuerzos en los perfiles.

1.3.- Organización del informe

Los contenidos de cada capítulo del trabajo de título pueden resumirse en los siguientes:

En el *Capítulo I: Introducción*, se muestra la motivación de la realización del estudio, sus objetivos generales, específicos y la organización de la memoria.

En el *Capítulo II: Antecedentes*, se muestran las normas e investigaciones relevantes en el desarrollo del trabajo; desde la etapa de selección del espectro de elementos a analizar, diseño de conexiones, memorias anteriores relacionadas con el tema, modelación y estudios experimentales del comportamiento inelástico de arriostramientos.

En el *Capítulo III: Modelación en elementos finitos*, se dan a conocer los supuestos y criterios utilizados en la selección y diseño de los perfiles y en la creación de los modelos en ANSYS. Este capítulo no pretende ser una guía de modelación, sino más bien presentar de manera cronológica las consideraciones relevantes en la confección de los modelos; en su geometría, condiciones de apoyo, condiciones de contacto, mallado, imperfección inicial, historial de carga, etc.

En el *Capítulo IV: Resultados*, se muestran los resultados obtenidos para cada elemento: modos de falla, respuesta histerética, esfuerzos de compresión y tracción máximos desarrollados en el elemento, fuerzas compresivas a distintos niveles de deformación y esfuerzos en las placas de conexión e intersección de las diagonales.

En el *Capítulo V: Análisis de Resultados*, se discuten los resultados obtenidos, realizando un análisis orientado en la derivación de parámetros de selección y diseño que permitan mejorar el desempeño cíclico de los perfiles XL. A lo largo del capítulo se contrastan los resultados diferenciando las dos configuraciones de distanciamiento de conectores, vinculándolos además con la relación entre la esbeltez y la compacidad de la sección transversal, lo cual permite encasillar oportunamente los elementos por su modo de falla. Además, las fuerzas absolutas presentadas en el capítulo de resultados son normalizadas por la carga de fluencia de los perfiles.

Por último, en el *Capítulo VI: Conclusiones*, se muestran las principales observaciones y conclusiones del trabajo junto con sus limitaciones. Asimismo, se presentan recomendaciones de diseño y futuras líneas de investigación.

Capítulo II: Antecedentes

El objetivo del presente capítulo es ofrecer una revisión bibliográfica de los estudios previos relativos al comportamiento de perfiles XL y la normativa que permite abarcar el criterio de selección de los mismos, el cálculo de su capacidad y diseño de conexiones.

2.1.- Normas

2.1.1- NCh2369. Of 2003

La NCh2369. Of 2003: “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”, corresponde a la principal referencia de diseño de estructuras de acero del país. Dado esto, se toman en cuenta las disposiciones de esta norma para la calificación de los perfiles en cuanto a su largo y su sección transversal. Relativo a la esbeltez global de los perfiles, en el artículo 8.3.3 se establece un límite superior, dado por:

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \leq 1.5\pi \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.1)$$

donde:

K: factor de longitud efectiva.

L: longitud no arriostrada.

r: radio de giro de la sección.

E: módulo de elasticidad $E = 200000$ MPa.

F_y : tensión de fluencia. Para acero A36 $F_y = 250$ MPa.

Adicionalmente, en la Tabla 8.1 de la norma se establecen los límites de ancho/espesor para diversos perfiles, siendo para el caso particular de los perfiles XL (laminados):

$$\frac{b}{t} \leq 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.2)$$

donde:

b: ancho del ala de un ángulo individual

t: espesor del ángulo

2.1.2- AISC360 (2010)

Los perfiles XL están compuestos por dos ángulos unidos vértice-vértice mediante placas conectoras soldadas o apernadas, por lo cual se trata de un miembro armado cuya esbeltez debe ser modificada en virtud de las deformaciones relativas que pueden producirse a partir del pandeo de la pieza, lo que genera esfuerzos de corte en los conectores entre los componentes individuales. Considerando el plano de pandeo que describe la situación anterior, la esbeltez en torno al eje U-U es modificada (ver Figura 1.2).

Para ángulos unidos mediante conectores soldados, se tiene lo siguiente:

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

$$\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)_{Um} = \left(\frac{K \cdot L}{r}\right)_{Uo} \quad (2.3)$$

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

$$\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)_{Um} = \sqrt{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)_{Uo}^2 + \left(\frac{K_i \cdot a}{r_i}\right)^2} \quad (2.4)$$

donde:

K_i : 0.86 para el caso de perfiles XL.

a : separación entre los conectores.

r_i : radio de giro menor del componente individual.

Por otro lado, se establece como requerimiento dimensional que la esbeltez efectiva de cada componente individual entre conectores, $K_i a / r_i$, no debe exceder 3/4 de la esbeltez global del miembro armado en la dirección de pandeo considerada. Lo anterior limita la separación entre conectores 'a'.

Para efectos del cálculo de la resistencia del arriostramiento al pandeo global ante cargas estáticas, se utilizan las disposiciones del capítulo E3 (perfiles sin miembros esbeltos). La tensión crítica de pandeo, considerando que se trabaja exclusivamente con elementos donde $\lambda \leq 1.5\pi\sqrt{E/F_y}$ (ec. 2.1), es:

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e}\right] F_y \quad (2.5)$$

Donde la tensión de pandeo elástico, F_e es:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} \quad (2.6)$$

En cuanto al modo de falla por pandeo flexotorsional (capítulo E4), la tensión de pandeo elástico se calcula como:

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y} \quad (2.7)$$

Finalmente, la tensión de pandeo flexotorsional crítica se obtiene utilizando nuevamente la fórmula 2.5.

Una vez determinada la menor tensión crítica de pandeo, la resistencia a la compresión P_n , es determinada como:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2.8)$$

2.1.3- AISC341 (2010)

Muchas de las fallas de las estructuras industriales en eventos sísmicos se producen en las conexiones. Este tipo de falla se produce generalmente por no considerar el comportamiento post pandeo del arriostramiento, el cual puede inducir rotaciones inelásticas en las placas de conexión.

En las disposiciones sísmicas de la AISC existen bases de diseño dependiendo del nivel de requerimiento de ductilidad del marco. Particularmente, para las conexiones de las diagonales pertenecientes a marcos especiales concéntricamente arriostrado, se establece que:

- En tracción, se debe proveer al menos la resistencia por fluencia en el área gruesa del perfil, multiplicada por 1.0 (LRFD) o dividida por 1.5 (ASD), donde la resistencia por fluencia en el área gruesa se determina por $R_y F_y A_g$.
- En compresión, debe proveerse al menos una resistencia equivalente a $1.14 F_{cr} A_g$, amplificada por 1.0 (LRFD) o dividida por 1.5 (ASD). Donde F_{cr} es la menor de las tensiones críticas considerando los diversos modos de falla.
- Las conexiones del arriostramiento deben diseñarse para resistir los esfuerzos flectores o rotaciones producidas por el pandeo de la diagonal. Para esto, se requiere que la placa de conexión tenga al menos una capacidad a la flexión de $1.1 R_y M_p$ en la dirección crítica de pandeo, multiplicada por 1.0 (LRFD) o dividida por 1.5 (ASD). Además, la placa debe tener suficiente capacidad de rotación para desarrollar la rótula plástica. Lo anterior se debe a que ante sismos de gran intensidad, existe una alta probabilidad de que los arriostramientos

desarrollen rotulas plásticas tanto en el centro como en sus extremos. Luego, para prevenir la fractura, las placas deben tener la capacidad suficiente para confinar las rotaciones inelásticas de las diagonales o bien la suficiente ductilidad para acomodarse ante dichas rotaciones. Esta capacidad se logra proveyendo suficiente espacio entre el final del arriostramiento y la línea de restricción asumida de la placa. Estudios experimentales han demostrado que una distancia igual a dos veces el espesor del gusset es lo suficientemente grande para permitir rotaciones plásticas y lo suficientemente pequeña para descartar la ocurrencia del pandeo de la placa de conexión previo al pandeo del arriostramiento (Astaneh-Asl et al., 1986, ver Figura 2.1).

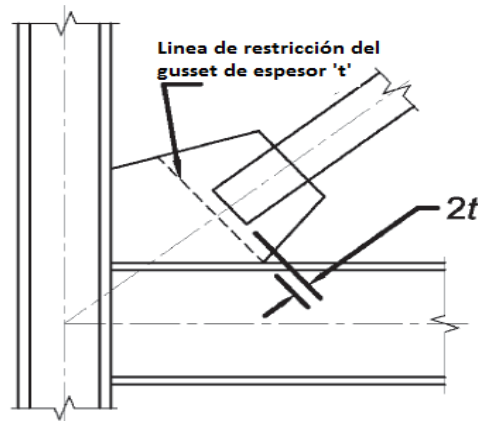


Figura 2.1- Requerimiento de conexión del arriostramiento para el pandeo fuera del plano.

En cuanto a los requerimientos de esbeltez producto de la incorporación de conectores a una distancia ' a ', la AISC341 (2010) establece para marcos especiales concéntricamente arriostrados (SCBF) que la esbeltez del miembro individual entre dos planchuelas separadores no debe exceder $2/5$ de la esbeltez global del miembro armado, a diferencia del factor $3/4$ para marcos ordinarios (OCBF).

2.2.- Estudios analíticos y experimentales

2.2.1- Molina (2014)

Molina (2014) analizó 180 modelos de perfiles XL. En dicho estudio se identificaron los principales modos de falla de los elementos ante compresión incremental, en primer lugar considerando resistencias nominales acordes a la norma AISC360 (2010), luego los estudios realizados por Marsh (1977) y finalmente obteniendo las cargas críticas mediante un análisis no lineal utilizando ANSYS Workbench.

Como resultado, clasificó los diversos modos de falla, determinando una relación entre el cociente entre la esbeltez efectiva (global) y la esbeltez de la sección transversal (local) con dicho modo. Los perfiles con una relación esbeltez global/local mayor a 5.5 tendieron a fallar por flexión, mientras que los con una relación menor lo hicieron por torsión. Además, determinó las solicitaciones en las conexiones y en la intersección de las diagonales. La principal recomendación de diseño relativa a las conexiones fue que en los casos de falla por flexión, era conveniente diseñar la conexión de cada cara de la placa para la carga crítica total, mientras que para los elementos con falla torsional era posible utilizar la mitad de la carga para cada cara.

La principal diferencia entre dicho estudio y el actual es la solicitación, ya que además de la monótonica se incluye la cíclica incremental. Existen además, diferencias geométricas en los modelos, principalmente en las placas de conexión y conectores intermedios. En este trabajo, la geometría de las placas gusset es determinada en función de las exigencias de la norma AISC341 (2010), utilizando el manual de diseño de Tambolli (1999) y verificando que las capacidades a tracción, compresión y flexión cumplan los requerimientos. Adicionalmente, se otorga espacio suficiente para permitir la rotación de la placa y para que se desarrolle el ancho de Whitmore (Whitmore, 1952). Por otro lado, la geometría de los conectores es establecida en base a recomendaciones del Manual de diseño para ángulos estructurales L-AZA (2004), donde se indica el uso de un largo longitudinal de conectores mayor o igual a $2/3$ de la altura del perfil.

Otra diferencia de modelación es la consideración del elemento como diferentes cuerpos conectados y no como un todo. Esto permite individualizar cada miembro conformante: ángulos, placas y conectores. El establecimiento de conexiones permite posteriormente obtener resultados de la solicitación en la zona de contacto (por ejemplo, ángulo-placa gusset) y tomar cuenta de posibles fallas en dicha unión.

En virtud de las consideraciones señaladas anteriormente, y tomando en cuenta que el análisis cíclico es de mayor demanda computacional, se analizan en este trabajo una menor gama de perfiles, principalmente reducida por la no inclusión de secciones con elementos esbeltos y con esbeltez global superior a $1.5\pi\sqrt{E/F_y}$. Por lo demás, Molina (2014) analizó elementos de 1.5, 2.5, 5 y 10 m y en este estudio, en cambio, los largos son 3, 4, 5 y 6 m.

2.2.2.- Tremblay (2002)

Un requerimiento importante de diagonales en marcos arriostrados es la ductilidad, por lo cual deben ser capaces de resistir grandes deformaciones en el rango inelástico antes de fallar y comprometer a la estructura global. Tremblay (2002) recopiló 76 ensayos de 9 programas experimentales con el propósito de estudiar el comportamiento post pandeo de diversos tipos de perfil, principalmente RHS (usados comúnmente como arriostramientos), examinando parámetros como la fuerza de compresión máxima a varios niveles de ductilidad y también la máxima fuerza de tracción considerando el efecto del endurecimiento.

En la Figura 2.2a se observa una curva histerética típica para arriostramientos debido a carga cíclica simétrica, donde el eje Y contiene la carga axial en el perfil normalizada por la capacidad a la fluencia en el área gruesa ($P_y = F_y A_g$), mientras que en el eje X se muestra la deformación longitudinal del elemento normalizada por la deformación de fluencia, δ_y . Se evidencia una disminución progresiva de la fuerza máxima de compresión a medida que transcurren los ciclos de carga, marcándose valores en distintos niveles de ductilidad, siendo C_u la máxima fuerza de compresión y C'_{ui} la fuerza de compresión a distintos niveles de deformación. La disminución en la carga se debe a la formación de una rótula plástica en el arriostramiento, sumado al efecto Baushinger y a deformaciones residuales provenientes de los ciclos previos. Por otro lado, se observa que en tracción la carga máxima permanece prácticamente constante tras la fluencia, hasta el ciclo previo a la fractura. Es importante destacar que las conexiones de la diagonal deben diseñarse para soportar cargas críticas de C_u en compresión y T_{max} en tracción, que por lo general exceden a las resistencias nominales establecidas en normas de diseño. Además, puede darse el caso en que en un marco sometido a grandes deformaciones, uno de los arriostramientos esté experimentando un nivel de compresión mínimo, mientras el otro está sometido a una tracción $T > T_y$, lo cual puede llevar a la columna central a un nivel de sollicitación máximo, producto de su correspondiente carga tributaria sumado a la diferencia de esfuerzos de los arriostramientos (ver Figura 2.2b). Una situación similar puede ocurrir en arriostramientos con disposición en cruz.

Como resultados del estudio, se obtuvo que la máxima fuerza de compresión desarrollada en los perfiles se alcanzó al primer indicio de pandeo del arriostramiento, con la subsecuente aparición de una rótula plástica en el centro de la diagonal y el incremento progresivo de las deformaciones laterales. Además, en algunos casos se presencian pandeos locales en la sección transversal en la ubicación de la rótula, lo cual induce altas tensiones localizadas y reduce aún más los ciclos de vida útil de la riostra. En promedio, el cociente entre la capacidad a la compresión experimental y la predicha (AISC 1999) fue de 1.09, lo que indica cierto grado de conservadurismo. Además, los resultados muestran variaciones dependiendo de si el perfil es en primer lugar comprimido o traccionado, ya que en el segundo caso el pandeo generalmente ocurre a deformaciones mayores.

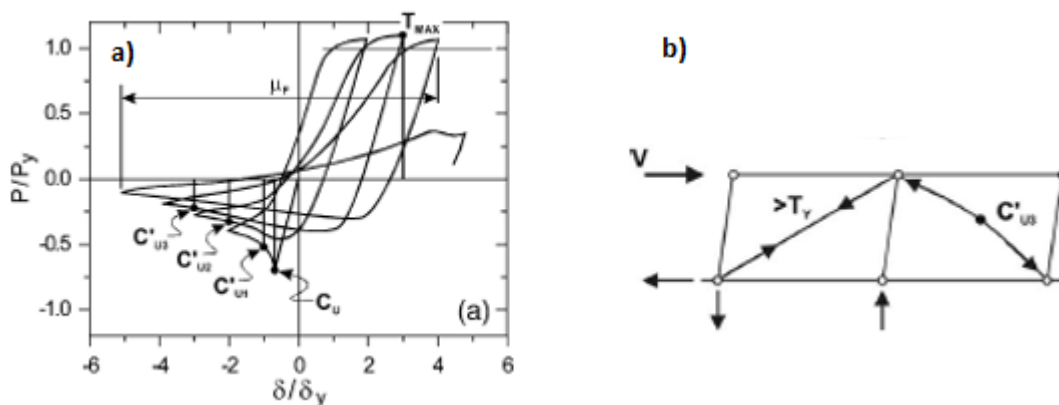


Figura 2.2 – (a) Respuesta histerética típica de un arriostramiento bajo carga cíclica simétrica. (b) Situación en caso de alto requerimiento de ductilidad. (Tremblay, R., 2002)

En cuanto a la tracción máxima, ésta depende del tipo de historial de carga aplicado, obteniéndose los mayores valores en los casos en que la excursión inelástica se presenta tempranamente en el historial. Para las secciones laminadas, el valor de T_{max} varía entre 1.01 y 1.13 $F_y A_g$, con un promedio de 1.05.

Finalmente, se propone una regresión para predecir las fuerzas de compresión que la diagonal es capaz de transmitir después de pandearse a niveles de ductilidad $\mu = \delta/\delta_y = 2, 3$ y 5:

$$C'_u = A_g F_y (a + b\lambda^{-c}) \leq C_u \quad (2.9)$$

Los valores para a, b y c se entregan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 – Parámetros de la regresión no lineal de la resistencia a la compresión post pandeo.

Ductilidad	a	b	c	Desviación estándar
2	0.058	0.23	1.4	0.07
3	0.084	0.12	1.61	0.06
5	0.095	0.046	2.22	0.036

2.2.3.- Schepers (1983)

En este estudio, se analiza el efecto de los interconectores en el comportamiento estructural de perfiles XL de sección 130x130x6, específicamente en su carga de rotura y plano de pandeo. Para esto, se realizaron 29 ensayos de compresión sobre columnas simplemente apoyadas de 1, 2 y 3 [m] con 5 tipos de interconectores, tanto soldados como apernados y variando en número desde 0 a 5.

Como resultado, se obtuvo que el tamaño y tipo de conector no tuvo efecto aparente en las fuerzas y formas de pandeo, no así el tipo de fijación. Para conectores apernados el plano de falla cambió, desarrollándose en ejes combinados. Por otro lado, para conectores soldados no hubo variaciones apreciables en la forma de pandeo o en la carga para un número dado de interconectores.

En cuanto al número de placas, se obtuvo que en las riostras con cero y un conector el pandeo ocurrió en torno al eje U-U, mientras que al tener dos o más la falla ocurrió en torno al eje V-V.

Finalmente, se recomienda la utilización de dos interconectores ubicados en los tercios del arriostamiento. Utilizar un número menor resulta insatisfactorio ya que aumenta la distorsión en los ángulos individuales, mientras que un número mayor es innecesario pues no hay un aumento significativo en la carga de rotura.

Capítulo III: Modelación en elementos finitos

Una de las etapas más importantes en el desarrollo de este trabajo es la modelación en elementos finitos de los perfiles. La elaboración de cada modelo supone la consideración de diversas condiciones geométricas, de borde, de contacto, mallado, análisis tensional, aplicación de desplazamiento controlado, análisis de esfuerzos, entre otras.

El proceso de análisis está compuesto principalmente por dos etapas: análisis elástico y análisis no lineal. En el primero se obtiene el modo de falla y la carga crítica del perfil sometiéndolo a un esfuerzo de compresión constante, manteniendo las deformaciones en el rango elástico. Por su parte, en el análisis no lineal la geometría del perfil es alterada en un factor de la deformada del primer modo de falla del modelo elástico; de esta forma se orienta la falla del perfil y se somete a deformaciones inelásticas. En la Figura 3.1 se muestra un esquema con las principales etapas de análisis.

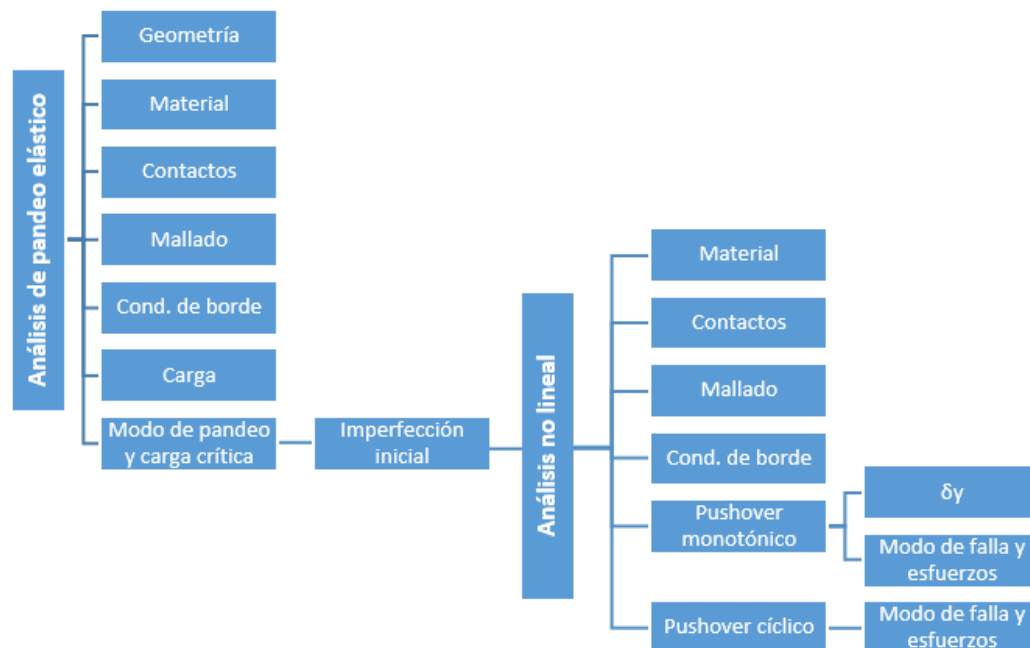


Figura 3.1 - Procedimiento de modelación.

En el presente capítulo, se dan conocer los supuestos y criterios que se utilizaron en la selección y diseño de los perfiles, así como en el procedimiento de modelación de los mismos.

3.1.- Selección y diseño de perfiles a analizar

En primer lugar se definen los largos de los arriostramientos. Para esto, se consideran marcos con alturas de techo comprendidas entre 2.5 m y 3.5 m y ángulos de inclinación entre 35° y 60° (ver Figura 3.2), lo que origina largos de elementos comprendidos entre 2.9 y 6.1 m. En consecuencia, los perfiles a analizar son de 3, 4, 5 y 6 m.

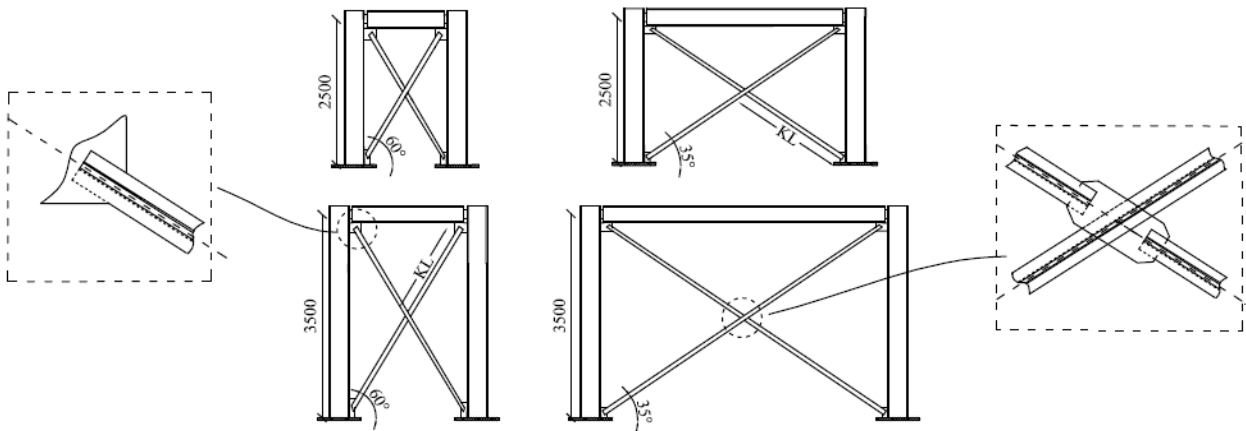


Figura 3.2 – Marcos arriostrados tipo considerados para la definición de largos. Medidas en mm.

Asimismo, para la selección de perfiles se consideran geometrías que cumplen con los criterios de esbeltez establecidos en la NCh2369.Of2003 (ver fórmulas 2.1 y 2.2), donde además la esbeltez local del eje U-U es modificada según las disposiciones de miembros armados de la AISC360 (2010) y según la sección de marcos especiales arriostrados concéntricamente (SCBF) de la AISC341 (2010). Esto permite determinar el efecto de aumentar la cantidad de conectores en el comportamiento del elemento y los esfuerzos que experimenta. De este modo, para cada perfil existen 2 modelos con diferentes separaciones entre conectores, cumpliendo que la esbeltez del miembro individual entre dos planchuelas no debe exceder las 3/4 partes de la esbeltez global del miembro armado para la primera, y 2/5 partes para la segunda. En la Tabla 3.1 se muestra el espectro final de perfiles analizados según su largo, donde 'd' representa la separación en mm entre cada ángulo, la cual está controlada por el espesor de la placa gusset. En total son 37 modelos por cada tipo de disposición de conectores.

Tabla 3.1- Perfiles analizados según largo del arriostramiento.

Elementos a modelar según largo del perfil			
3 [m]	4 [m]	5 [m]	6 [m]
XL 80x4 / d= 6			
XL 80x5 / d= 6	XL 80x5 / d= 6		
XL 80x6 / d= 6	XL 80x6 / d= 6		
XL 100x4 / d= 6	XL 100x4 / d= 6		
XL 100x5 / d= 6	XL 100x5 / d= 6		
XL 100x6 / d= 6	XL 100x6 / d= 6		
XL 120x5 / d= 6	XL 120x5 / d= 6	XL 120x5 / d= 6	
XL 120x6 / d= 6	XL 120x6 / d= 6	XL 120x6 / d= 6	
XL 130x6 / d= 8	XL 130x6 / d= 8	XL 130x6 / d= 8	XL 130x6 / d= 8
XL 200x8 / d= 8	XL 200x8 / d= 8	XL 200x8 / d= 8	XL 200x8 / d= 8
XL 250x10 / d= 10	XL 250x10 / d= 10	XL 250x10 / d= 10	XL 250x10 / d= 10
XL 300x12 / d= 12	XL 300x12 / d= 12	XL 300x12 / d= 12	XL 300x12 / d= 12
XL 400x16 / d= 14	XL 400x16 / d= 14	XL 400x16 / d= 14	XL 400x16 / d= 14

3.2.- Diseño de conexiones y conectores intermedios

El espesor de las placas gusset se determina de modo de proveer resistencia suficiente en tracción, compresión y flexión (diseño por capacidad). Para ello, se considera la sección de Whitmore de la placa con condiciones de doble empotramiento teórico ($K=0.5$) y se determina el espesor que permite tener mayor capacidad que el arriostramiento para los tres tipos de carga:

- $R_y F_y A_g$ en tracción, con $R_y = 1.5$
- $1.1 F_{cr} A_g$ en compresión, con F_{cr} la menor tensión crítica entre pandeo global y pandeo torsional o flexotorsional.
- $1.1 R_y M_p$ en flexión, con $R_y = 1.5$ y $M_p = F_y Z_x$.

Por simplicidad, se realiza el mismo diseño para cada perfil, independiente del largo, utilizando la situación más desfavorable. La geometría y espesor de las placas gusset puede verse en el Anexo B.

Por otro lado, la separación de los conectores para cada perfil, de tal modo de cumplir con el requerimiento de perfiles armados de la norma AISC360 (2010), se muestra en Tabla 3.2. En ésta, se observa que tras obtener un promedio de las separaciones entre planchuelas para los elementos de un mismo largo y dividirlos por éste, se obtiene que la disposición de los conectores debiese ser aproximadamente cada un cuarto de la luz del arriostramiento.

Tabla 3.2 – Separación máxima entre conectores intermedios en función el largo del perfil, según AISC360-10.

Perfil	Separación entre conectores [mm] según el largo			
	3 [m]	4 [m]	5 [m]	6 [m]
XL 80x4	654			
XL 80x5	618	823		
XL 80x6	584	779		
XL 100x4	708	945		
XL 100x5	677	903		
XL 100x6	649	865		
XL 120x5	723	964	1206	
XL 120x6	699	932	1165	
XL 130x6	688	917	1146	1375
XL 200x8	744	992	1240	1487
XL 250x10	748	997	1247	1496
XL 300x12	747	996	1246	1495
XL 400x16	756	1008	1260	1513
Promedio	692	927	1216	1473
a/L	0.23	0.23	0.24	0.25

Asimismo, considerando ahora las exigencias para los SCBF de la AISC341 (2010), se tienen las separaciones de la Tabla 3.3, en la cual se observa que la segunda disposición de conectores puede lograrse (aproximadamente) agregando una planchuela más entre cada conector de la configuración anterior. De este modo se obtiene un valor $a = L/8$. En la Figura 3.3 se muestran dos perfiles tipo con ambas configuraciones de conectores.

Tabla 3.3 – Separación máxima entre conectores intermedios en función el largo del perfil, según AISC341-10 (SCBF).

Perfil	Separación entre conectores [mm] según el largo			
	3 [m]	4 [m]	5 [m]	6 [m]
XL80x4	325			
XL80x5	320	426		
XL80x6	311	415		
XL100x4	330	440		
XL100x5	326	435		
XL100x6	320	427		
XL120x5	331	442	552	
XL120x6	327	436	545	
XL130x6	328	438	547	657
XL200x8	330	441	551	661
XL250x10	331	442	552	663
XL300x12	331	442	552	663
XL400x16	331	441	551	662
Promedio	326	435	550	661
a/L	0.11	0.11	0.11	0.11

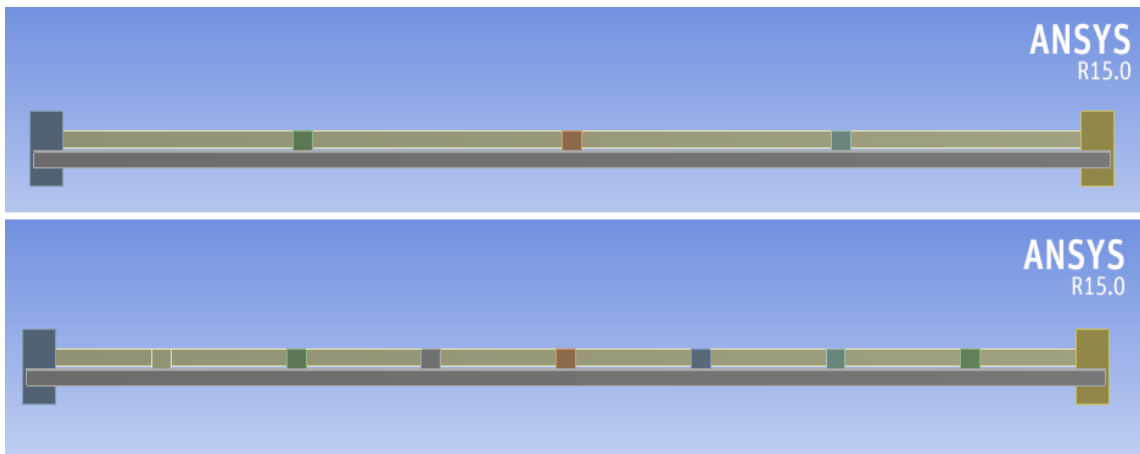


Figura 3.3 - Modelo con diferentes separaciones de conectores intermedios.

3.3.- Análisis Elástico

El análisis de pandeo elástico tiene como objetivo determinar la carga crítica del elemento y el modo de falla asociado: flexión, flexotorsión o torsión. A partir de este análisis se extrae finalmente el factor de imperfección inicial a ser usado en el modelo no lineal.

3.3.1.- Geometría

Uno de los puntos a considerar en la concepción de los modelos es la geometría de las placas gusset. El largo longitudinal de cada placa es definido como la altura del perfil XL sumado a 2 veces el espesor del gusset. Si bien esta geometría no considera la totalidad de la placa en la realidad, otorga el espacio suficiente para que se desarrolle plastificación en ella si se diera el caso. Por otro lado, la altura de cada gusset es determinada en función de que pueda tenerse completamente el ancho de Whitmore (Figura 3.4); vale decir, ángulos de 30° desde el inicio de la conexión. Esto permite que las tensiones en la placa se desarrollen totalmente.

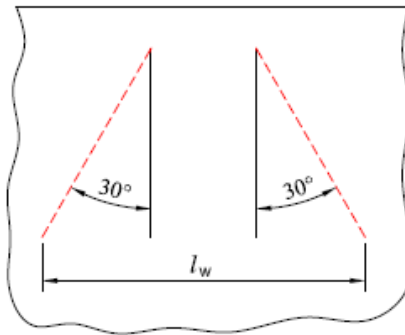


Figura 3.4 - Ancho de Whitmore para conexión soldada.
Thornton W., Lini C., 2011.

Además, el largo longitudinal de los conectores intermedios es tomado como $2/3$ de la altura del perfil (Manual AZA, 2004). En la Figura 3.5 se ilustra el esquema geométrico general de una placa de conexión y un conector intermedio.

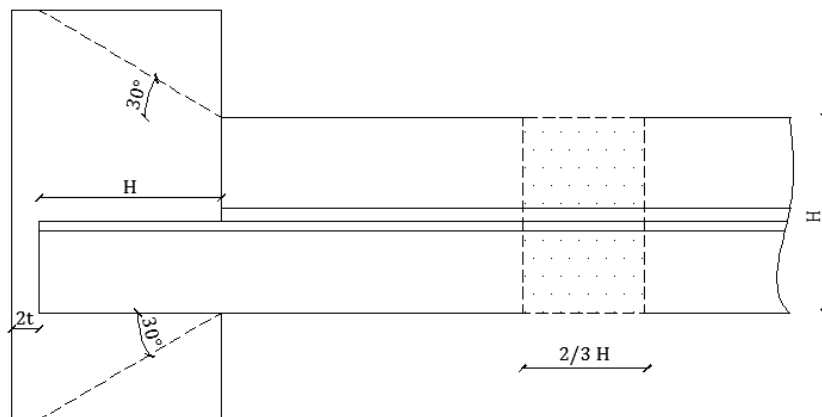


Figura 3.5 – Geometría general de la placa gusset y conector intermedio.

3.3.2.- Material

El material utilizado en todos los ángulos y placas corresponde a acero ASTM A36, con las propiedades de la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 - Propiedades del acero utilizado.

Tipo de acero	ASTM A36
ρ [kgf/m ³]	7850
E [MPa]	200000
F_y [MPa]	250
F_u [MPa]	460

3.3.3.- Contactos

Cada modelo está integrado por tres componentes: ángulos, placas gusset y conectores, que interactúan mediante condiciones de contacto. El contacto establecido para las caras de las distintas piezas es del tipo pegado o *bonded* (Contact Technology Guide, ANSYS, Inc. 2009), vale decir, sin desplazamiento relativo ni separación entre las partes. Esta condición simula de manera fructífera una conexión soldada, donde las piezas permanecen fijas. Las piezas en contacto se modelan a través de pares como elemento *contact* y elemento *target*, teniéndose que los elementos *contact* penetran a los *target* en virtud de su rigidez relativa mayor. Debido a que tanto para las placas gusset, ángulos y planchuelas se utiliza el mismo material, la especificación para que cada pieza tome el rol de componente de contacto u objetivo se establece como controlada por el programa.

Por lo demás, el análisis de pandeo elástico exige una formulación del tipo MPC (ver Figura 3.6), que añade restricciones adicionales a las ecuaciones pegando ambas superficies en múltiples puntos de manera directa, que además tiene como ventaja el soportar grandes deformaciones.

El objetivo de modelar el elemento en distintas componentes y establecer condiciones de contacto es obtener los esfuerzos en dichas superficies en el análisis. La Figura 3.7 muestra la representación gráfica de las restricciones de contacto aplicadas en un conector intermedio.

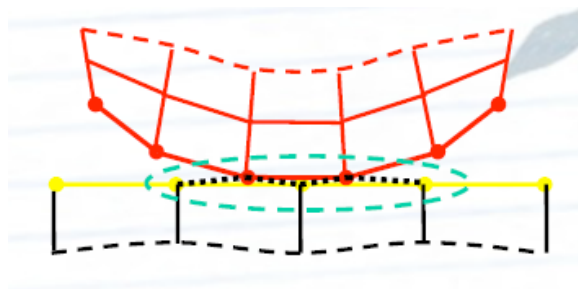


Figura 3.6 – Esquema de contacto tipo *Bonded* con formulación MPC.

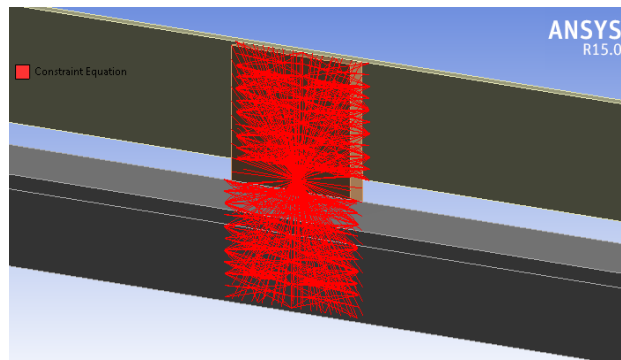


Figura 3.7 – Representación gráfica de las ecuaciones de restricción en un contacto de tipo *bonded* entre los ángulos y un conector intermedio.

3.3.4.- Mallado

El mallado utilizado es del tipo fino con elementos *brick*, compuestos por rectángulos de 8 nodos proyectados tridimensionalmente, conformando sólidos de 20 nodos con 3 grados de libertad cada uno (ver Figura 3.8).

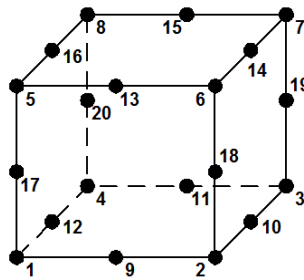


Figura 3.8 – Elemento finito utilizado en el mallado.

Para determinar el tamaño máximo de las aristas, se realiza un análisis de sensibilidad con 3 niveles de mallado en 4 perfiles, considerando la relación entre el área bidimensional del elemento de mallado (b^2 , aproximando al caso cuadrado) y el área longitudinal proyectada del arriostramiento, $H \cdot L$. Las relaciones usadas son: 1/250, 1/500 y 1/1000. Además, en las placas gusset y conectores se efectúa un redimensionamiento, disminuyendo el tamaño del elemento en un 50% con el propósito de refinar el mallado en las superficies de contacto y mejorar la precisión en la estimación de los esfuerzos en éstas. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 – Análisis de sensibilidad para la determinación del nivel de mallado. Modelos de L=3[m] y a=0.25L.

Perfil	Nivel	Nodos	Tamaño máx. [mm]	Modo de falla	Carga crítica [kN]	δ_y [mm]
XL80x4	1:250	15341	31	Flexión	133.4	1.4
	1:500	22456	22	Flexión	136.4	1.8
	1:1000	42348	15	Flexión	138.5	1.7
XL120x5	1:250	13512	38	Flexotorsión	576.8	1.5
	1:500	26934	27	Flexotorsión	578.2	2.1
	1:1000	38688	19	Flexotorsión	589.3	2.1
XL200x8	1:250	14322	49	Torsión	1859.8	1.3
	1:500	24284	35	Torsión	1847.5	2.1
	1:1000	46051	24	Torsión	1853.9	1.9
XL400x16	1:250	16037	69	Torsión	12176	1.9
	1:500	30427	49	Torsión	12418	1.6
	1:1000	52598	35	Torsión	12513	1.6

Del análisis, se desprende que el nivel de mallado no influye en el modo de falla ni tampoco significativamente en la carga crítica de pandeo elástico; sin embargo, sí existen diferencias en la deformación de fluencia δ_y , que determina en parte la deformación a la cual será sometido cada elemento. No obstante, dicha diferencia se evidencia principalmente entre los niveles 1/250 y 1/500, siendo los resultados de este último muy similares al nivel 1/1000. Dado esto, se selecciona el nivel 1/500, considerando que el número de nodos se reduce en promedio un 59% y mantiene resultados similares con un menor requerimiento computacional. La Figura 3.9 muestra el nivel de mallado utilizado: de tipo fino con refinamiento en las placas gusset y conectores.

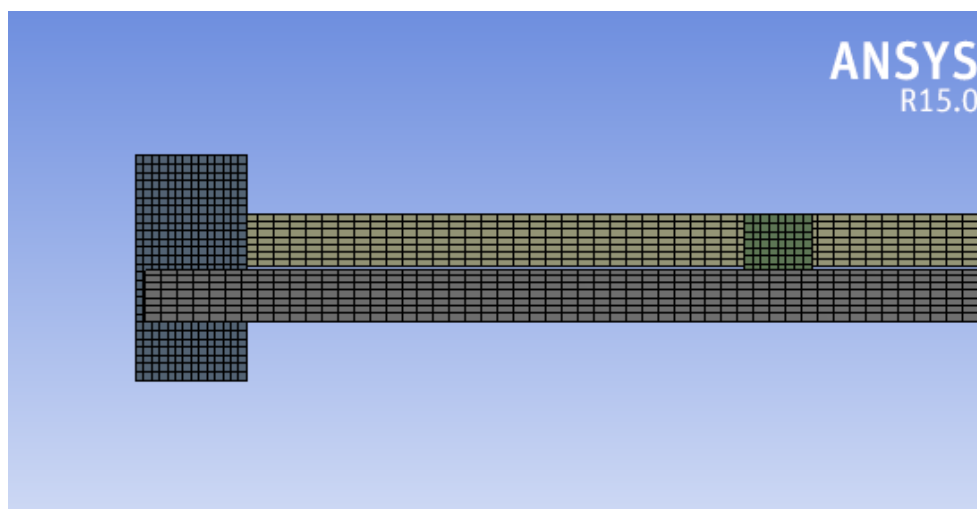


Figura 3.9 – Mallado fino con redimensionamiento de cuerpo.

3.3.5.- Condiciones de borde

Las condiciones de borde o restricciones aplicadas en cada modelo buscan representar de la mejor manera posible el comportamiento de los perfiles en una disposición en cruz. Para ello, se emplean 3 restricciones en los puntos A, B y C (Figura 3.10). En primer lugar, la cara externa de una de las placas gusset se encuentra empotrada, mientras que la cara externa de la placa del otro extremo puede desplazarse sólo longitudinalmente. Por otro lado, el punto de intersección de las diagonales está impedido de moverse fuera del plano (disposición 8.3.4 de la NCh2369). Lo anterior es implementado en cada modelo permitiendo sólo el desplazamiento longitudinal del conector central, que representa dicha intersección. La Tabla 3.6 muestra la restricción de cada punto, donde R=restringido y F=libre.

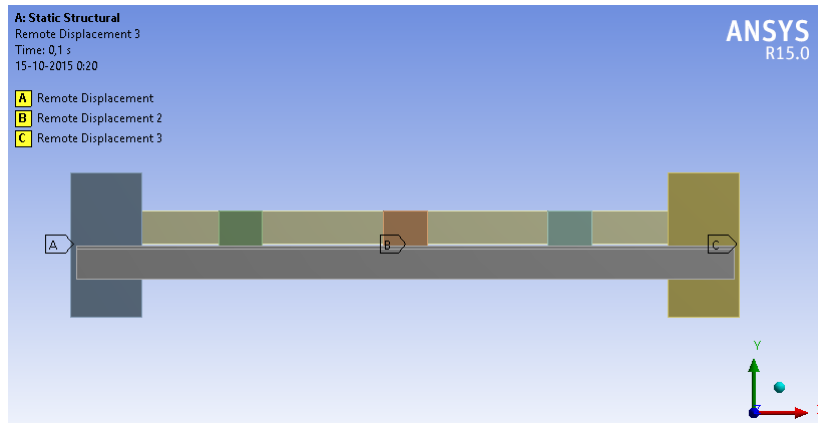


Figura 3.10 - Restricciones aplicadas en el modelo.

Tabla 3.6 - Restricciones en los modelos. R=restringido, F=libre.

Remote Displacement	Desp. X	Desp. Y	Restricción			
			Desp. Z	Rot. X	Rot. Y	Rot. Z
A	R	R	R	R	R	R
B	F	R	R	R	R	R
C	F	R	R	R	R	R

3.3.6.- Carga

El análisis de pandeo elástico del software ANSYS Workbench muestra los resultados de carga crítica como un múltiplo de la fuerza de compresión aplicada, por lo cual, por simplicidad, se aplica una fuerza de $F = 1$ [N] en el extremo C (ver Figura 3.11).

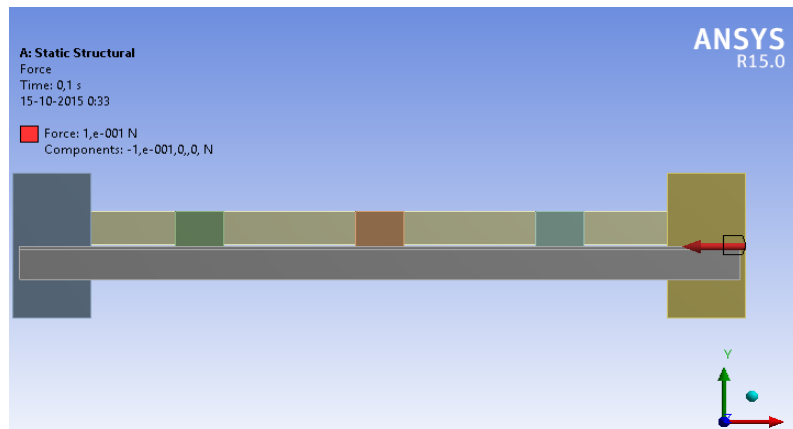


Figura 3.11 - Carga de 1 [N] aplicada en el extremo de la diagonal.

3.3.7.- Modos de falla y carga crítica

Al finalizar el análisis de pandeo elástico se identifica la carga crítica asociada al primer modo de falla del perfil, el cual se establece mediante un análisis visual de la deformada y la distribución de tensiones. Los posibles modos de falla son: flexión, flexotorsión y torsión. Las Figura 3.12, Figura 3.13 y Figura 3.14 representan la deformada tipo de un perfil con falla flexural, flexotorsional y torsional, respectivamente.

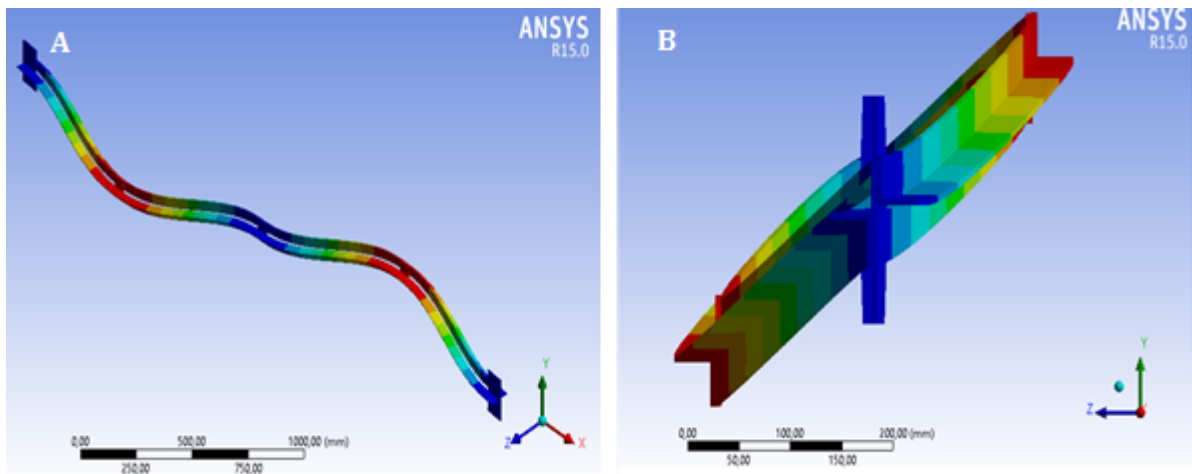


Figura 3.12 –Falla por flexión (XL80x4, L=3[m], a=L/4). A) Vista isométrica; B) Vista transversal. Factor de amplificación: 150.

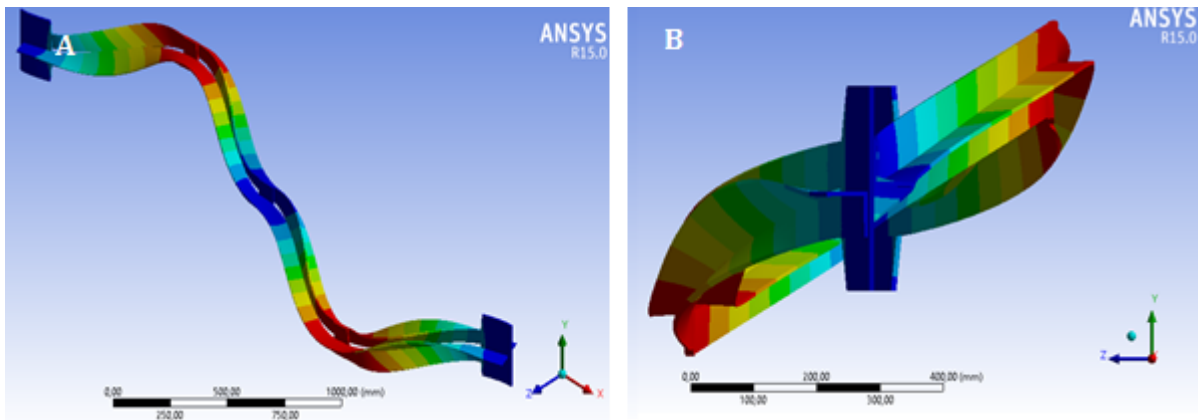


Figura 3.13 –Falla por flexotorsión (XL130x6, $L=4$ [m], $a=L/4$). A) Vista isométrica; B) Vista transversal. Factor de amplificación: 300.

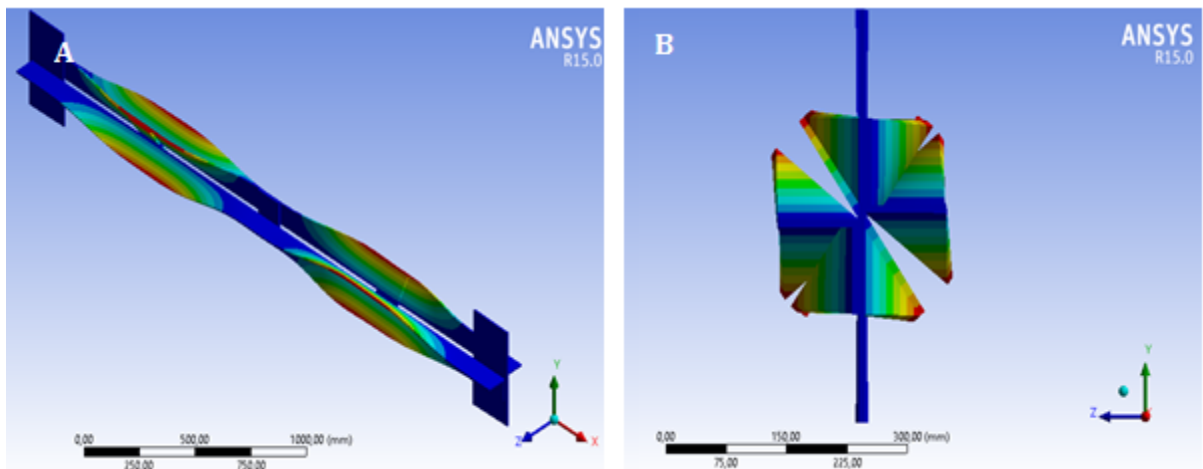


Figura 3.14 – Falla por torsión (XL400x16, $L=5$ [m], $a=L/4$). A) Vista isométrica; B) Vista transversal. Factor de amplificación: 77.

3.4.- Análisis No Lineal

Una vez terminado el análisis de pandeo elástico, se procede al análisis no lineal. En primer lugar, se genera un nuevo perfil con una imperfección inicial correspondiente a la deformada del primer modo de falla por un factor variable dependiendo del perfil.

3.4.1.- Imperfección inicial

Al igual que para el refinamiento del mallado, se realiza un análisis de sensibilidad para la determinación del nivel de imperfección inicial. Se estudian 3 niveles de imperfección: 3, 5 y 7 mm en 4 modelos: XL130x6 de 3, 4, 5 y 6 m, con conectores cada cuarto del largo del arriostramiento. En cada caso se establece el valor de la deformación requerida para iniciar la fluencia en el elemento, δ_y . Los resultados se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 – Análisis de sensibilidad para determinar el nivel de imperfección inicial.

XL130x6, a=0.25L L [m]	δ_y [mm] según nivel de imperfección		
	3 [mm]	5 [mm]	7 [mm]
3	2.2	2.1	2.0
4	2.9	2.8	2.9
5	3.0	2.9	3.0
6	3.2	3.3	3.1

De la Tabla 3.7, se determina que no hay una variación significativa en el valor de δ_y conforme aumenta el nivel de imperfección, por lo cual se toma el valor de 5 [mm]. Dado esto, cada modelo tiene una deformada proporcional a su primer modo de falla, de tal modo que la deformación máxima en éste es de 5 [mm]. Un ejemplo de imperfección inicial aplicada en un modelo puede verse en la Figura 3.15.

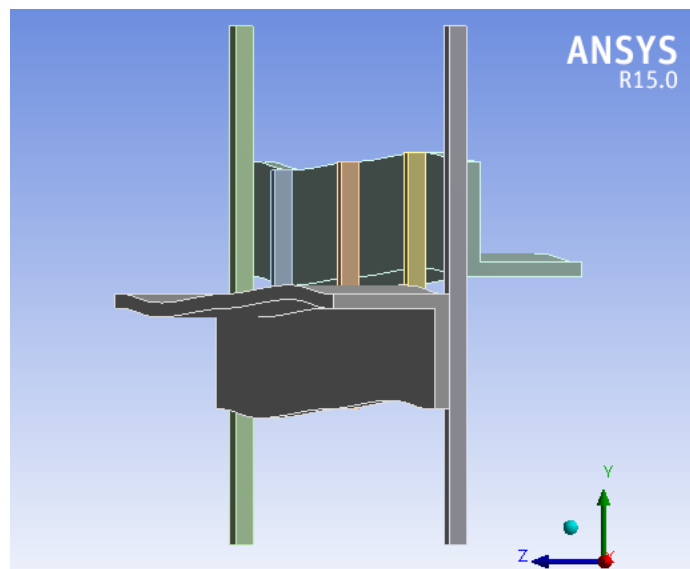


Figura 3.15 – Imperfección inicial asociada a un modo flexural, con un máximo de 5 [mm].

3.4.2.- Material: Ley constitutiva bilineal

Para el análisis no lineal se utiliza un acero con endurecimiento, caracterizado por una ley constitutiva bilineal con módulo tangente de 10000 MPa y propiedades nominales del acero ASTM A36 (ver Tabla 3.4 y Figura 3.16).

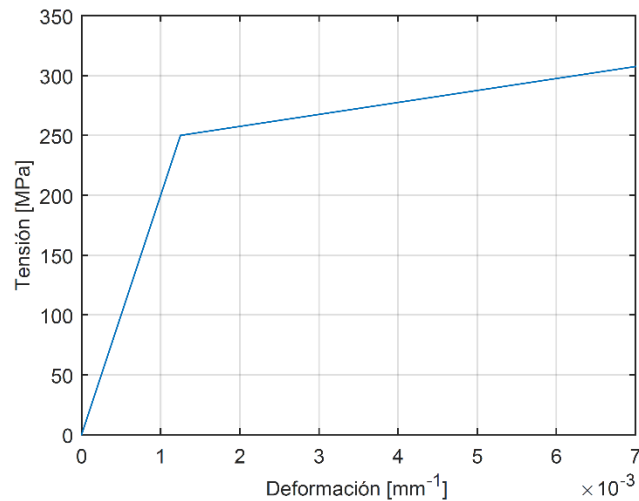


Figura 3.16 – Ley constitutiva bilineal del acero utilizado.

3.4.3.- Contactos, mallado y condiciones de borde

Las condiciones de contacto, mallado y restricciones estructurales se mantienen respecto al análisis lineal. Realizar cambios en estas materias conllevaría a alejarse de los estados que originaron un modo de falla dado, y por lo tanto incompatibilizaría ambos modelos.

3.4.4.- Nivel de deformación

Previo a realizar el análisis cíclico, en primer lugar se determina δ_y , correspondiente al desplazamiento axial que genera el primer indicio de fluencia en el perfil. El procedimiento para su cálculo es deformar inicialmente cada elemento desde 0 a 5 mm (que garantiza la fluencia) y derivar las tensiones de Von Mises en cada instante. Dicha tensión está dada por:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{3}} \quad (3.1)$$

Luego, δ_y corresponde al desplazamiento axial que provoca la primera variación significativa en la pendiente de la curva tensión-deformación. Posteriormente, el desplazamiento máximo se consideró como el desplazamiento de techo de diseño del marco (Δ_{bm}), pudiendo tomarse $\Delta_{bm} = 4\delta_y$ (NEHRP *Recommended Seismic Provisions*, 2009). Las Tabla 3.8 y Tabla 3.9 muestran los valores de δ_y para cada modelo analizado.

En el 85% de los casos el valor de δ_y es mayor si los conectores se encuentran a 1/8 del largo del perfil, por lo tanto en general los perfiles con esta configuración son sometidos a una amplitud máxima mayor. Además, los valores se aproximan a $\delta_{y,teórico} = (KL)F_y/E$, con $K=0.5$. La Figura 3.17 muestra la relación entre los valores obtenidos mediante ANSYS y los valores teóricos de δ_y , el promedio de las relaciones es 0.99 con una desviación estándar de 0.13.

Tabla 3.8 – Valores de δ_y [mm] para cada perfil, con conectores a distancia $a=L/4$.

Perfil	Valores de δ_y [mm], según largo del perfil ($a=L/4$)			
	3 [m]	4 [m]	5 [m]	6 [m]
XL80x4	1.8			
XL80x5	1.8	2.4		
XL80x6	1.8	1.9		
XL100x4	1.6	2.4		
XL100x5	1.8	2.3		
XL100x6	2	2.3		
XL120x5	2.1	2.5	2.5	
XL120x6	2.1	2.7	2.3	
XL130x6	2.1	2.8	2.9	3.3
XL200x8	2.1	2.6	2.8	3.2
XL250x10	1.8	2.6	3	3.7
XL300x12	1.5	2.7	3	3.3
XL400x16	1.6	2.6	2.4	3.4

Tabla 3.9 - Valores de δ_y [mm] para cada perfil, con conectores a distancia $a=L/8$.

Perfil	Valores de δ_y [mm], según largo del perfil ($a=L/8$)			
	3 [m]	4 [m]	5 [m]	6 [m]
XL80x4	2.1			
XL80x5	2.1	2.4		
XL80x6	1.8	2.8		
XL100x4	1.8	3.1		
XL100x5	2.3	2.8		
XL100x6	2.3	3.1		
XL120x5	2.2	2.5	2.5	
XL120x6	2.1	2.4	2.3	
XL130x6	2.2	2.9	3	3.8
XL200x8	2.1	2.6	2.9	3.4
XL250x10	1.4	2.7	3.2	3.8
XL300x12	1.6	2.3	3	3.5
XL400x16	1.5	2.5	3.2	3.5

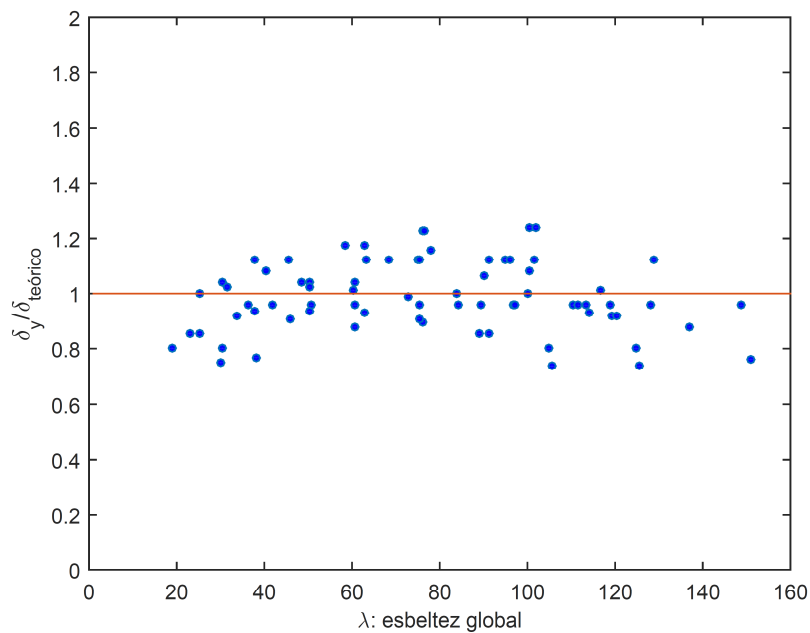


Figura 3.17 – Relación entre desplazamiento de fluencia y desplazamiento de fluencia teórico en función de la esbeltez del perfil.

3.4.5.- Pushover: Análisis cíclico

El historial de desplazamientos cíclicos utilizado es simétrico para tracción y compresión, con amplitudes aumentando cada dos ciclos. Los valores se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 – Historial de desplazamientos del análisis.

Numero de ciclos	Desplazamiento
2	$0.5\delta_y$
2	δ_y
2	$2\delta_y$
2	$3\delta_y$
2	$4\delta_y$

Como se mencionó anteriormente, δ_y representa la deformación axial del elemento al primer momento de alcanzar la fluencia. El total acumulado del historial es $84\delta_y$, de los cuales $72\delta_y$ son de deformación inelástica. La Figura 3.18 muestra el historial cíclico para el caso genérico.

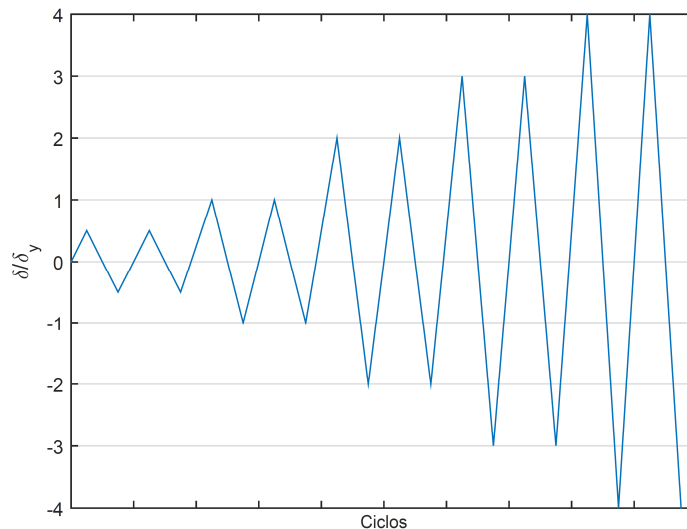


Figura 3.18 - Historial de desplazamientos cíclico genérico.

Si bien el nivel de ductilidad alcanzado es $\mu = 4$, existen elementos que sobrepasan la tensión última $F_u = 460$ MPa para deformaciones menores. En base a esto, se utiliza un criterio de interrupción del análisis dado por un factor de seguridad de 0.92, es decir, permitiendo una tensión máxima de 500 MPa en el arriostamiento. De este modo, puede asegurarse una mayor correlación con una eventual fractura en la práctica, ya que en el modelo las tensiones últimas se alcanzan primeramente en zonas puntuales, por lo que usar un factor de seguridad igual a 1 conllevaría a

suspender el análisis de manera prematura. Una vez finalizado el análisis cíclico, cada análisis monotónico fue restringido al mismo nivel de deformación, variando entre $3\delta_y$ y $4\delta_y$.

Al finalizar el análisis se extrae para cada modelo el modo de falla asociado, la carga axial en el arriostramiento y las fuerzas en las conexiones placa gusset-ángulos y conectores-ángulos.

3.4.6.- Pushover: Análisis monotónico

El realizar un análisis de sollicitación monotónica en este trabajo tiene como objetivo único efectuar comparaciones en los resultados de modo de falla y esfuerzos con los originados a partir de carga cíclica. En base a esto, el desplazamiento para cada modelo es lineal incremental, partiendo de cero hasta alcanzar el mismo nivel de ductilidad del análisis cíclico correspondiente.

Capítulo IV: Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos tanto del análisis monotónico como cíclico de los 74 modelos estudiados. El detalle de los mismos puede verse en las tablas contenidas en los Anexos.

4.1.- Modos de falla

Dentro de los modos de falla se encuentran flexión, flexotorsión y torsión. Las siguientes figuras muestran dichos modos agrupando los perfiles según su largo y distancia entre conectores intermedios.

4.1.1.- Perfiles con conectores cada un cuarto del largo total

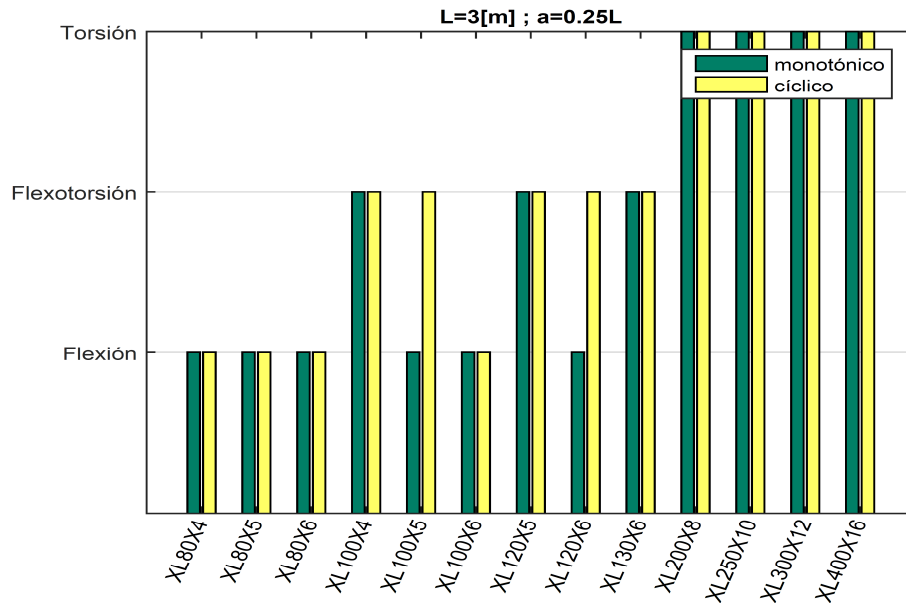


Figura 4.1 – Modos de falla para perfiles de 3 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.

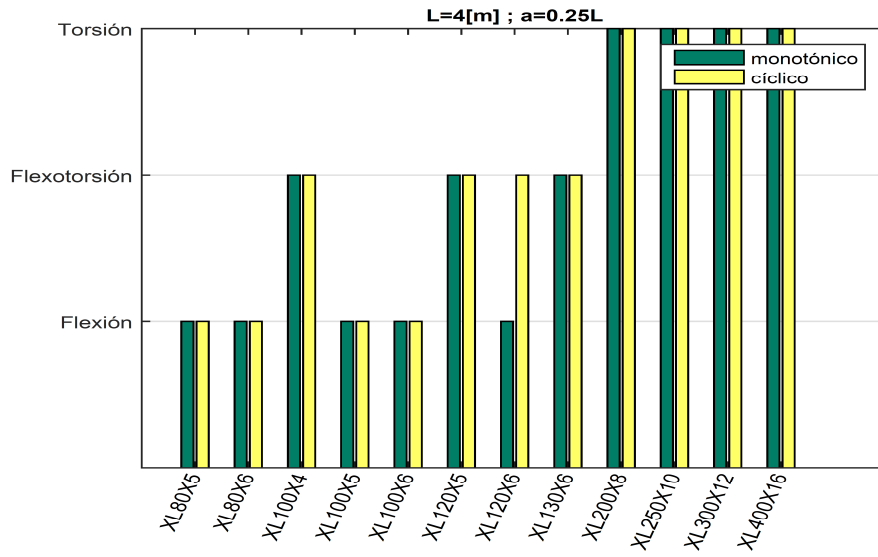


Figura 4.2 - Modos de falla para perfiles de 4 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.

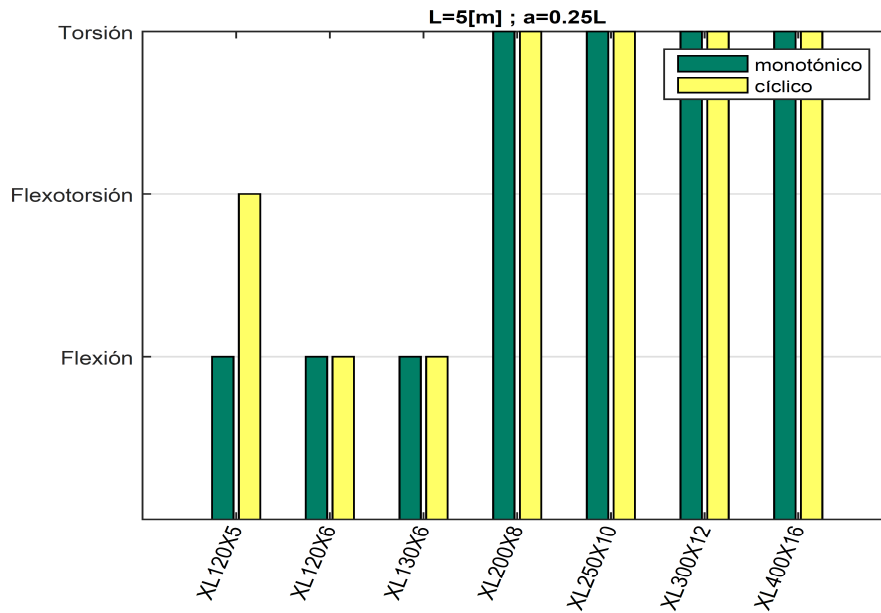


Figura 4.3 - Modos de falla para perfiles de 5 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.

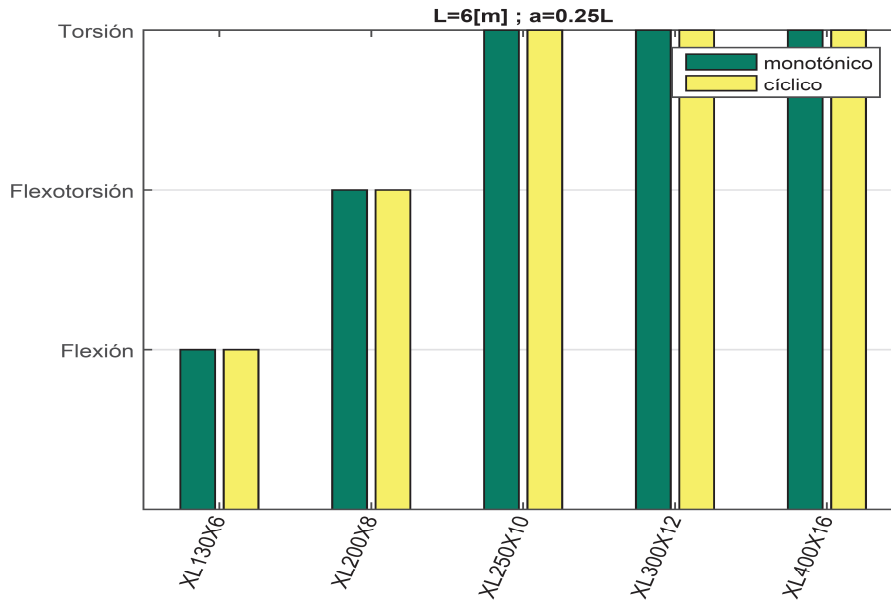


Figura 4.4 - Modos de falla para perfiles de 6 [m], con conectores intermedios cada un cuarto del largo del arriostramiento.

4.1.2.- Perfiles con conectores cada un octavo del largo total

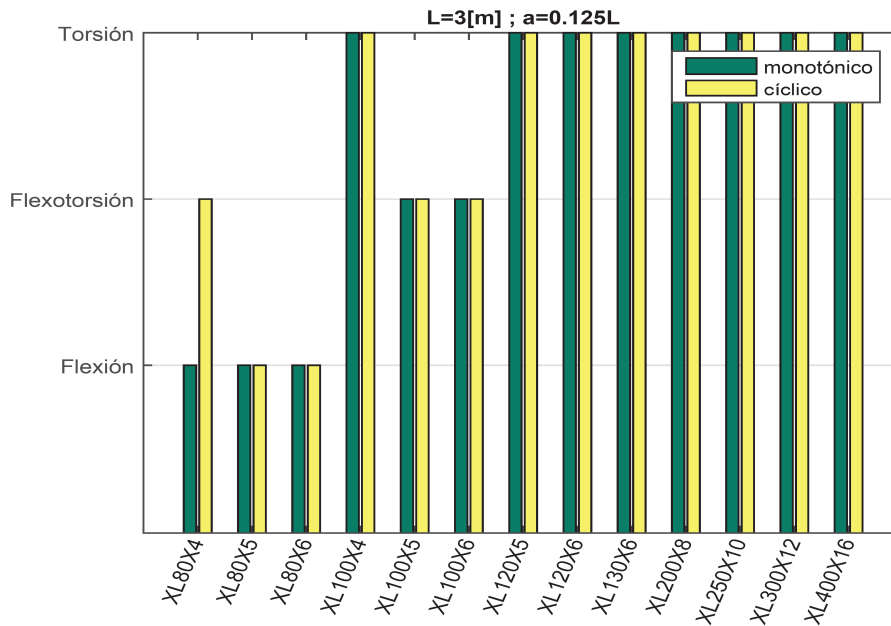


Figura 4.5 - Modos de falla para perfiles de 3 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.

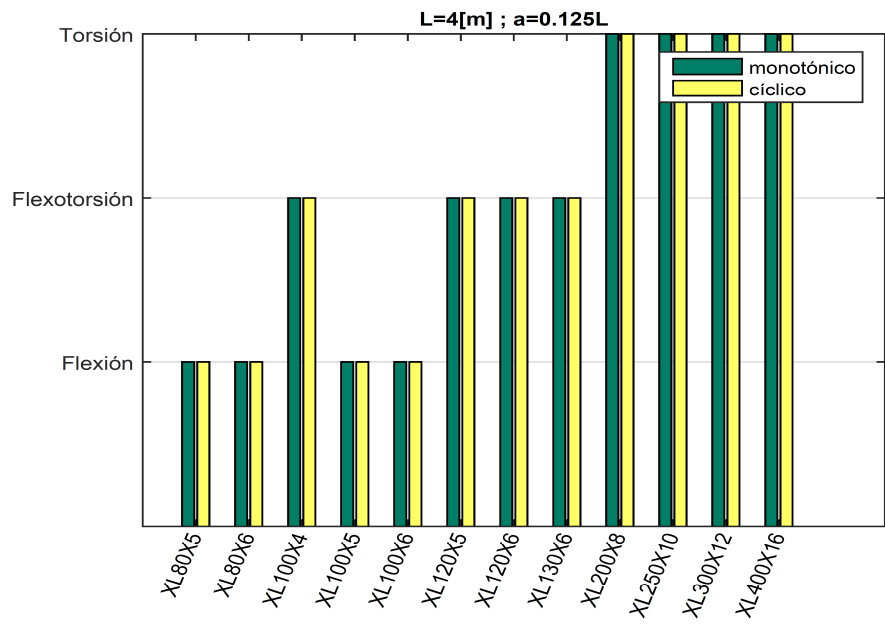


Figura 4.6 - Modos de falla para perfiles de 4 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.

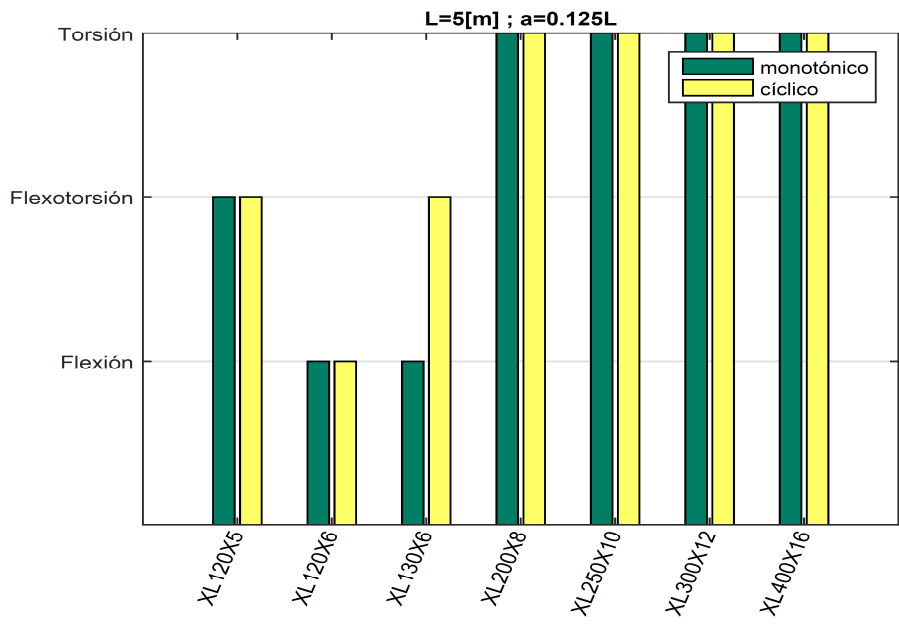


Figura 4.7 - Modos de falla para perfiles de 5 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.

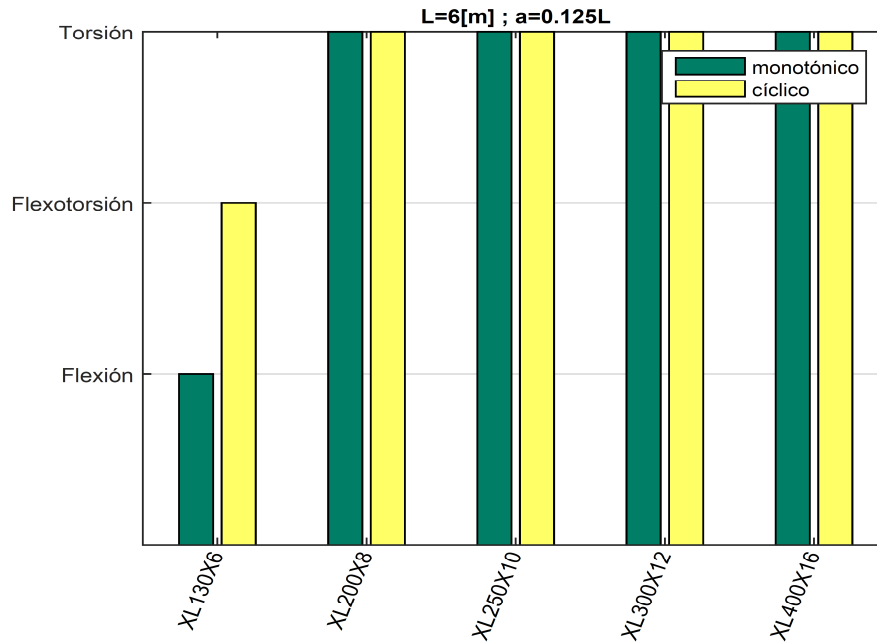


Figura 4.8 - Modos de falla para perfiles de 6 [m], con conectores intermedios cada un octavo del largo del arriostramiento.

En las figuras anteriores, se observa que en el modo de falla puede variar dependiendo del tipo de carga aplicada, teniéndose en algunos casos falla por flexión para el caso monotónico y flexotorsión para el cíclico (9% del total analizado). Por otro lado, para los perfiles de mayor área transversal se tuvo falla torsional independiente de la carga. A modo resumen, en la Tabla 4.1 se entrega la cantidad de elementos por modo de falla y distanciamiento de conectores. En los casos de pandeo global, los perfiles con una menor cantidad de conectores se pandearon en torno al eje U-U (ver Figura 1.2), mientras que los perfiles con una mayor cantidad de conectores lo hicieron en torno a ejes combinados (eje geométrico vertical Y-Y). Asimismo, en algunos perfiles con conectores cada $L/8$ se observó la aparición de pandeos locales ante carga cíclica, próximos a la falla. Lo anterior no ocurre en ningún perfil con la configuración de menos conectores.

Tabla 4.1 – Cantidad de elementos por modo de falla. (Total por cada separación de conectores: 37)

Modo de falla	Conectores a L/4		Conectores a L/8	
	Monotónico	Cíclico	Monotónico	Cíclico
Flexión	15	11	10	7
Flexotorsión	7	11	7	10
Torsión	15	15	20	20

4.2.- Respuesta histerética

La respuesta histerética del arriostramiento permite deducir cómo será su comportamiento mientras es solicitado, por ejemplo observando cuánto decae la fuerza compresiva que es capaz de transmitir al aumentar el requerimiento de ductilidad, o también el efecto del endurecimiento al ser traccionado. Una observación importante de este estudio es que esta respuesta muestra formas similares según el modo de falla, siendo además distintas entre cada modo. En esta sección se exhibe la respuesta cíclica y monotónica de una muestra representativa de elementos según su modo de falla (ante carga cíclica). En el eje de las abscisas se muestra el nivel de ductilidad, mientras que en el de las ordenadas se muestra la carga axial normalizada por la carga de fluencia $P_y = F_y A_g$.

4.2.1.- Falla por flexión

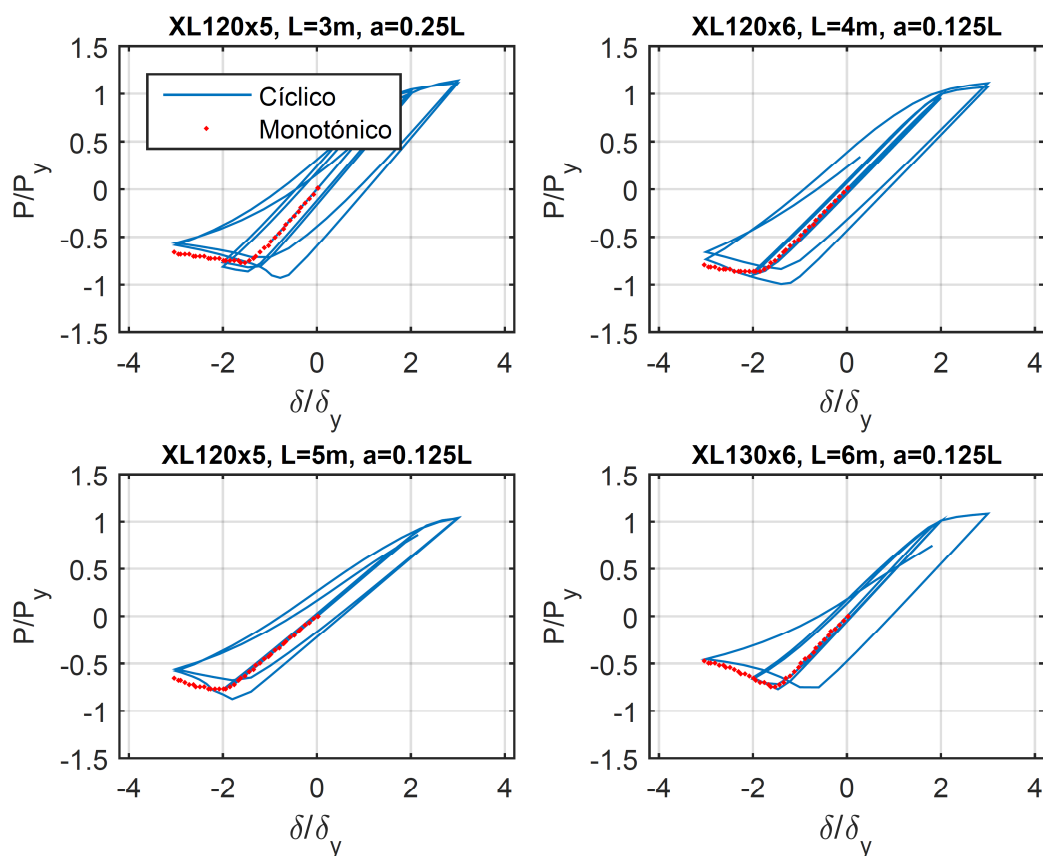


Figura 4.9 - Respuesta histerética de perfiles con falla flexural.

4.2.2.- Falla por flexotorsión

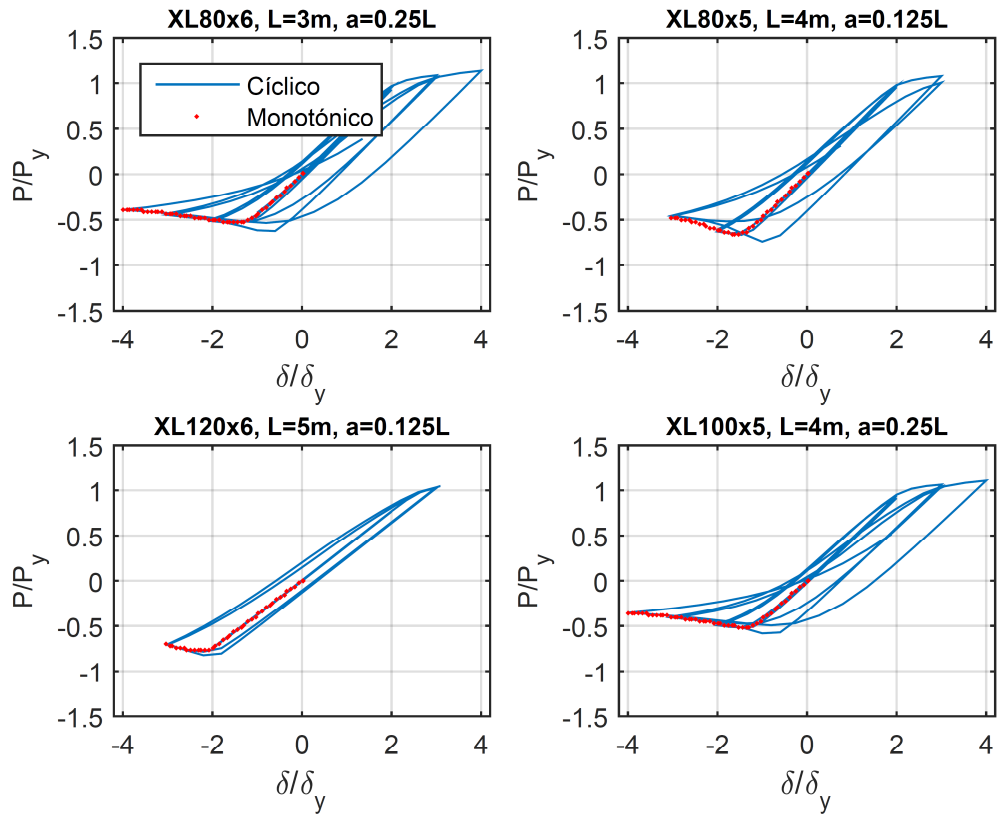


Figura 4.10 –Respuesta histerética de perfiles con falla flexotorsional.

4.2.3.- Falla por torsión

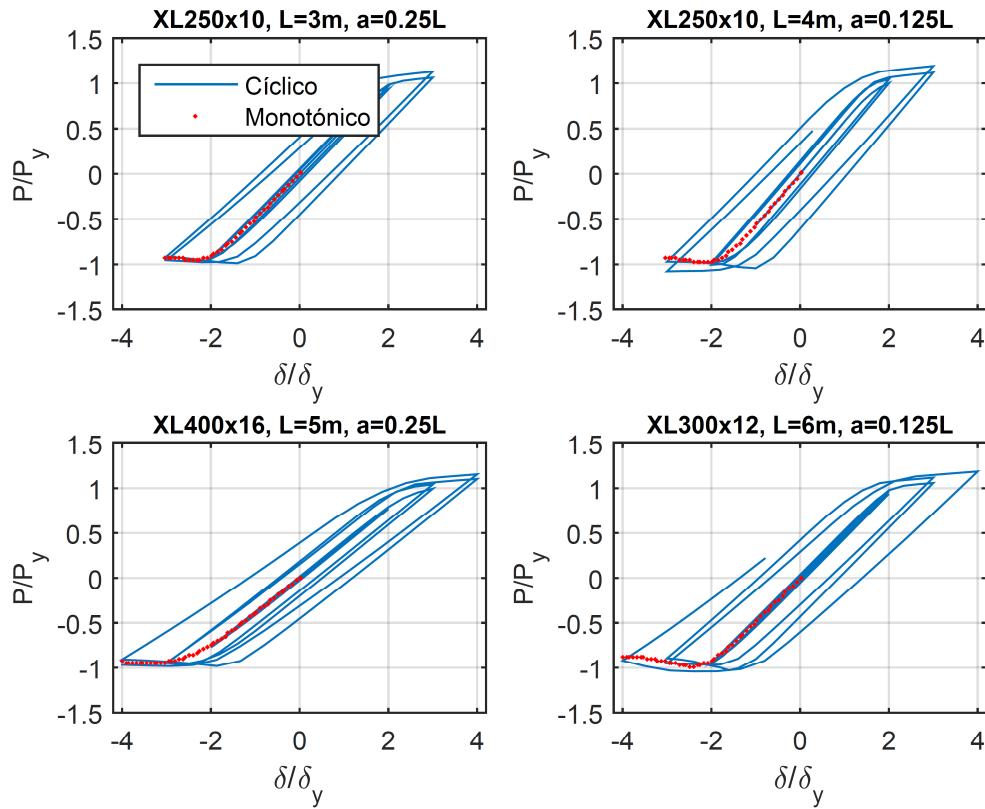


Figura 4.11 – Respuesta histerética de perfiles con falla torsional.

En general, la diferencia entre las respuestas histeréticas para elementos con falla flexural y flexotorsional radicó en la aproximación de la curva monotónica con la cíclica. Para el primer caso, la respuesta monotónica después del pandeo se ajusta perfectamente a la cíclica, asemejando una envolvente.

Por otro lado, en los perfiles con falla flexotorsional, por lo general la capacidad a la compresión post pandeo es menor cuando el elemento es solicitado cíclicamente en relación a cuando lo es monotónicamente.

Sin embargo, para ambos modos de falla se observa una rápida degradación de la capacidad a la compresión, la cual alcanza el máximo para niveles de deformación entre $-\delta_y$ y $-2\delta_y$ para el caso monotónico y aproximadamente $-\delta_y$ para el cíclico. El hecho de que en el caso monotónico el pandeo se produzca para deformaciones mayores a δ_y se basa en que tal deformación fue escogida como la primera en causar una alteración en la pendiente de curva tensión-deformación, y no la que provocara el valor peak o el inicio del plateau. Asimismo, dada la forma del historial cíclico utilizado, el pandeo ante carga cíclica se da después de que el perfil fluya en tracción, al

pasar por una deformación $-\delta_y$, al alternarse el sentido de carga. Por la misma razón explicada anteriormente, la fluencia se da típicamente para elongaciones mayores a δ_y .

La degradación antes mencionada es considerablemente menor (o inexistente en algunos casos) en perfiles con falla torsional (Figura 4.11), en los cuales la respuesta es prácticamente simétrica entre tracción y compresión, siendo además menor la carga compresiva del caso monotónico respecto al cíclico para todo nivel de deformación.

La pérdida de capacidad posterior al pandeo en los casos de falla por flexión o flexotorsión se debe a la formación de una rótula plástica en la mitad del largo no arriostrado, lo cual genera una deformación excesiva en dicha zona. Cuando la carga se revierte, la diagonal es enderezada a través de la rotación inelástica de la rótula. Durante los siguientes ciclos, la carga compresiva disminuye progresivamente debido al efecto Baushinger y a deformaciones residuales fuera del plano provenientes de ciclos anteriores (Tremblay, 2002).

En cambio, en perfiles con falla torsional la deflexión fuera del plano del marco es considerablemente menor o incluso nula para los casos más robustos, por lo cual las tensiones y deformaciones no tienden a acumularse en un punto específico.

4.3.- Tracción y compresión máxima

A continuación, se muestran las fuerzas axiales de tracción y compresión máximas desarrolladas en los arriostramientos durante el análisis. Además, se entregan los valores máximos de compresión post pandeo para distintos niveles de ductilidad: $\mu = 1, 2, 3$ y 4 . En la Figura 4.12 se observa la representación gráfica de dichos valores para un caso genérico.

En primer lugar, la Figura 4.13 muestra los valores máximos de tracción (representados por el punto T_{max} en la Figura 4.12) en función de la esbeltez global, agrupando la totalidad de los modelos, vale decir, ambas configuraciones de conectores. Los valores pueden representarse adecuadamente con una aproximación potencial de la forma $f(x) = ax^n$, con un valor de R^2 de 0.83.

Los valores de T_{max} fluctúan entre 165 y 3900 kN, teniéndose una tendencia a aumentar rápidamente para elementos con esbeltez global menor a 80. Además, se observa un aumento significativo en las fuerzas para algunos elementos con $20 < \lambda < 40$, correspondientes a los perfiles de mayor área transversal con falla torsional y sin posterior deformación fuera del plano.

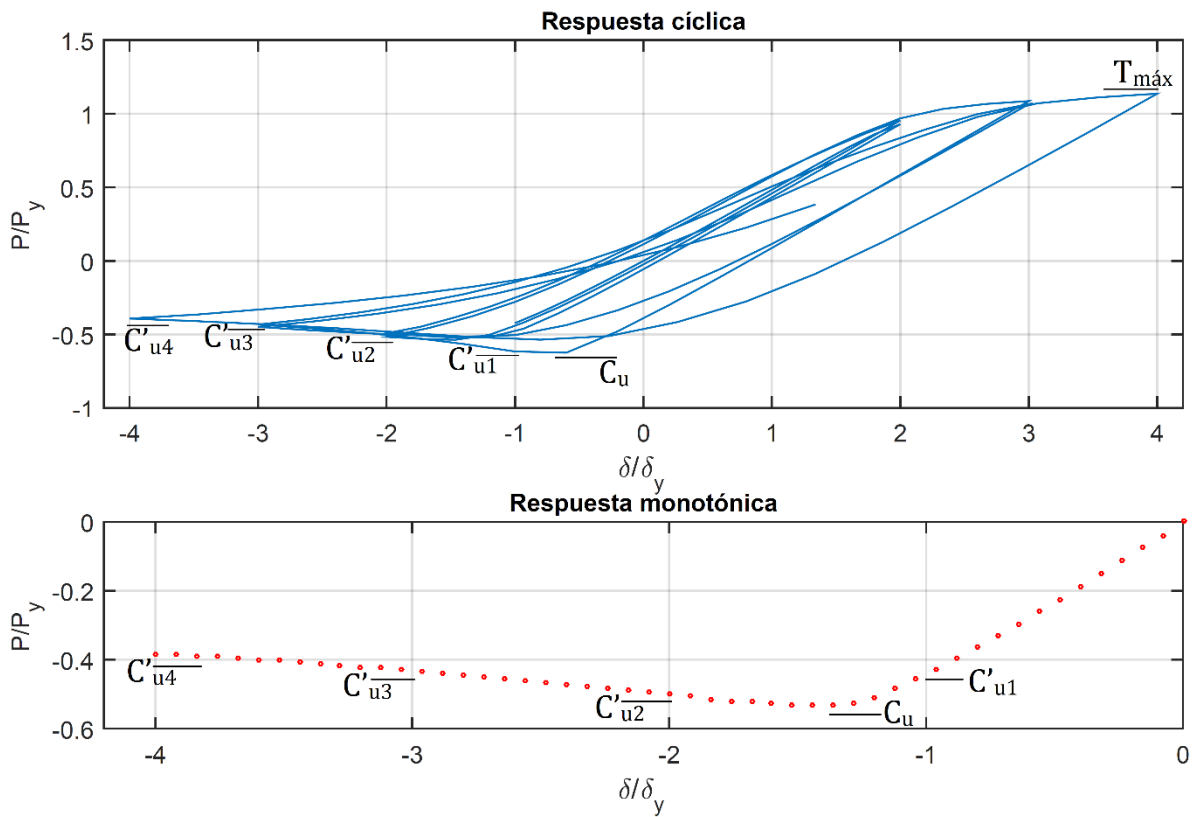


Figura 4.12 – Tracción máxima y compresiones máximas a distintos niveles de ductilidad.

En la Figura 4.14 se muestra la máxima fuerza compresiva alcanzada para la carga monotónica y cíclica, representada por C_u en la Figura 4.12. En ambos casos se determinaron tendencias de aproximación potencial, con valores de R^2 de 0.82 para el caso monotónico y 0.84 para el cíclico.

Al igual que para la tracción máxima, el valor de C_u aumenta significativamente para perfiles con esbeltez menor a 80, variando entre 68 y 3080 kN para el caso monotónico y entre 78 y 3780 kN para el cíclico. Asimismo, se registra igualmente un salto en los valores para los mismos elementos entre $20 < \lambda < 40$. En promedio, las fuerzas de compresión máximas desarrolladas en el arriostramiento producto de la carga cíclica son un 11% mayores a las producidas por la carga monotónica.

Al comparar los valores de $T_{máx}$ con los de C_u , se observa que éstos tienden a igualarse para esbelteces bajas, lo cual se condice con el comportamiento reflejado observado en elementos con falla torsional (que corresponden a los de menor esbeltez). Al aumentar la esbeltez efectiva, la tracción máxima se hace considerablemente mayor a la compresión máxima, alcanzando un factor $T_{máx}/C_u$ de 2.6 (ver Figura 4.15).

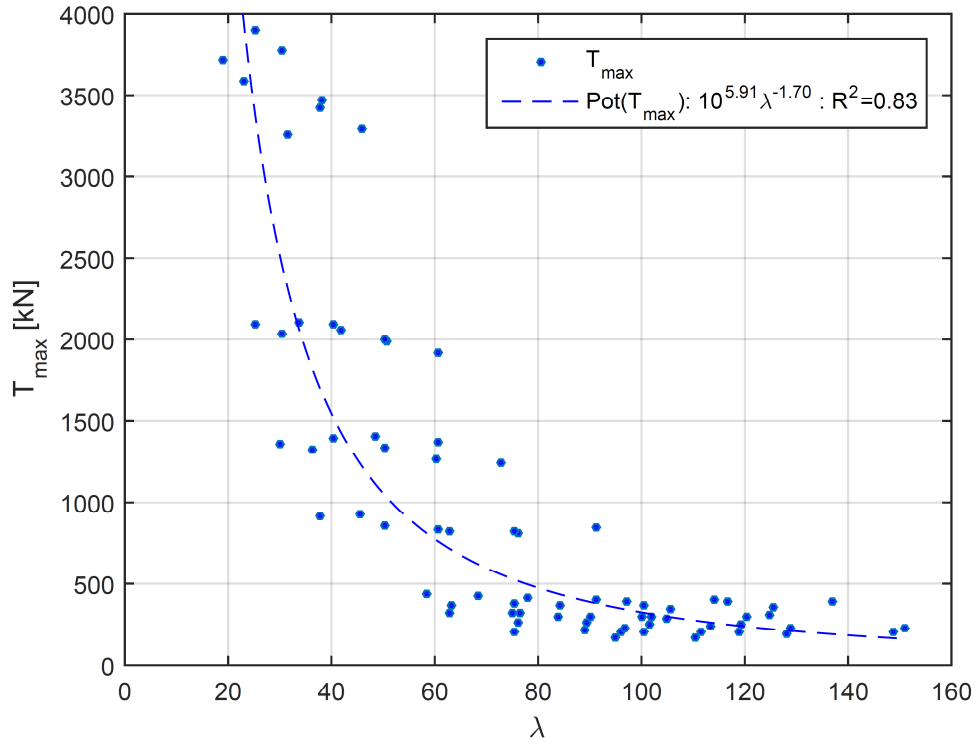


Figura 4.13 – Tracción máxima en función de la esbeltez global.

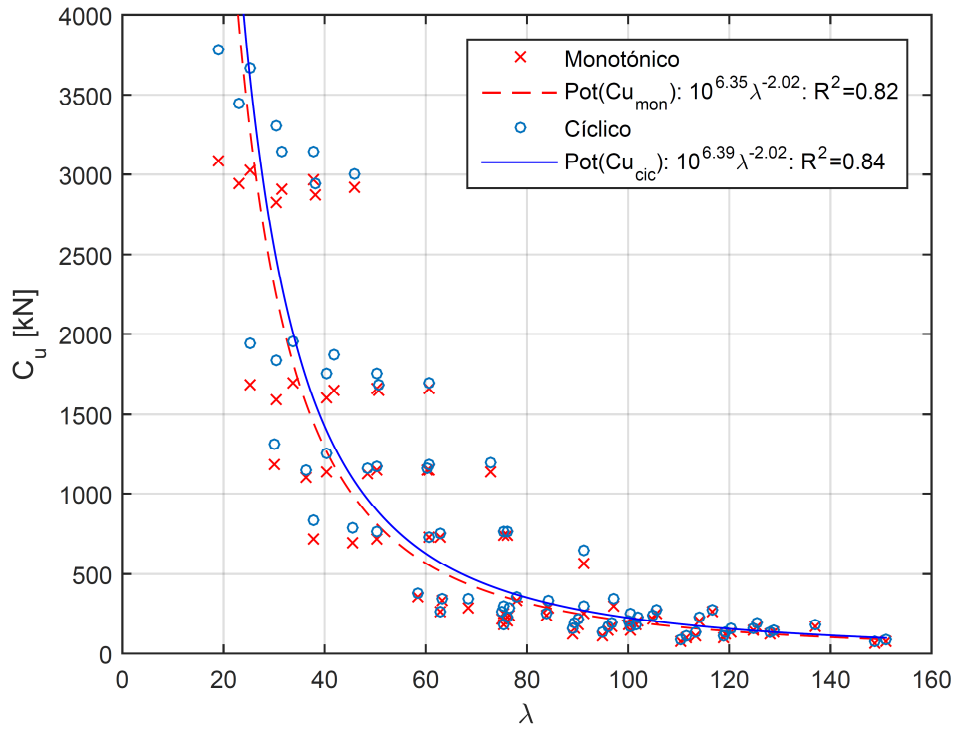


Figura 4.14 – Fuerza de compresión máxima desarrollada en el perfil en función de la esbeltez global.

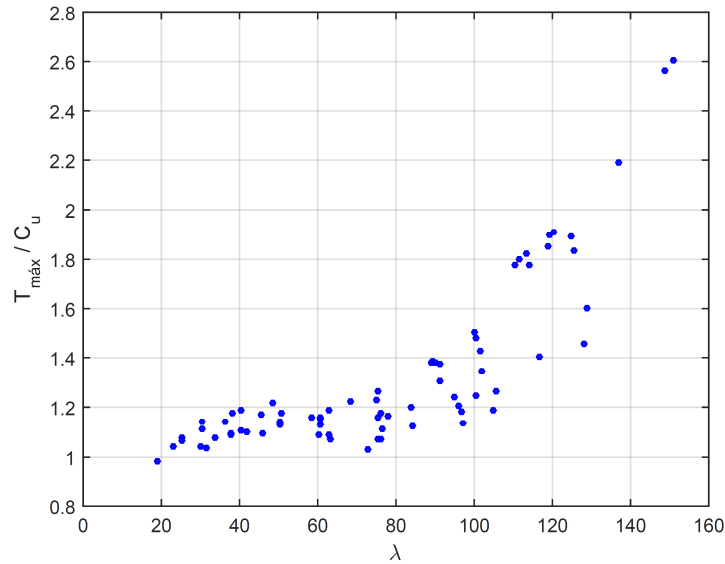


Figura 4.15 – Relación entre tracción máxima y compresión máxima en función de la esbeltez.

4.4.- Capacidad a la compresión post pandeo

En general, la carga de compresión que transmite el arriostramiento va gradualmente disminuyendo a medida que se aumenta el nivel de deformación. En la Figura 4.16 y Figura 4.17 se muestran los valores máximos de estos esfuerzos para 4 niveles de ductilidad, para carga monotónica y cíclica, respectivamente. La representación gráfica de estas fuerzas en una curva histerética se muestra en la Figura 4.12 como C'_{ui} .

En ambas figuras pueden verse tendencias similares a las observadas para T_{max} y C_u , con un aumento importante en las fuerzas para $\lambda < 80$ y un salto de aproximadamente 1000 kN para ocho elementos con esbeltez entre 20 y 40.

Cabe recordar que el análisis cíclico fue interrumpido al alcanzar una tensión de 500 MPa, limitando también el análisis monotónico al mismo nivel de ductilidad. Por consiguiente, existen menos marcadores para $\mu = 4$, pues algunos arriostramientos registraron su tensión última para $\mu = 3$. Esta menor ductilidad se concentra principalmente en el rango $60 < \lambda < 90$, donde ningún perfil alcanzó deformaciones de $-4\delta_y$.

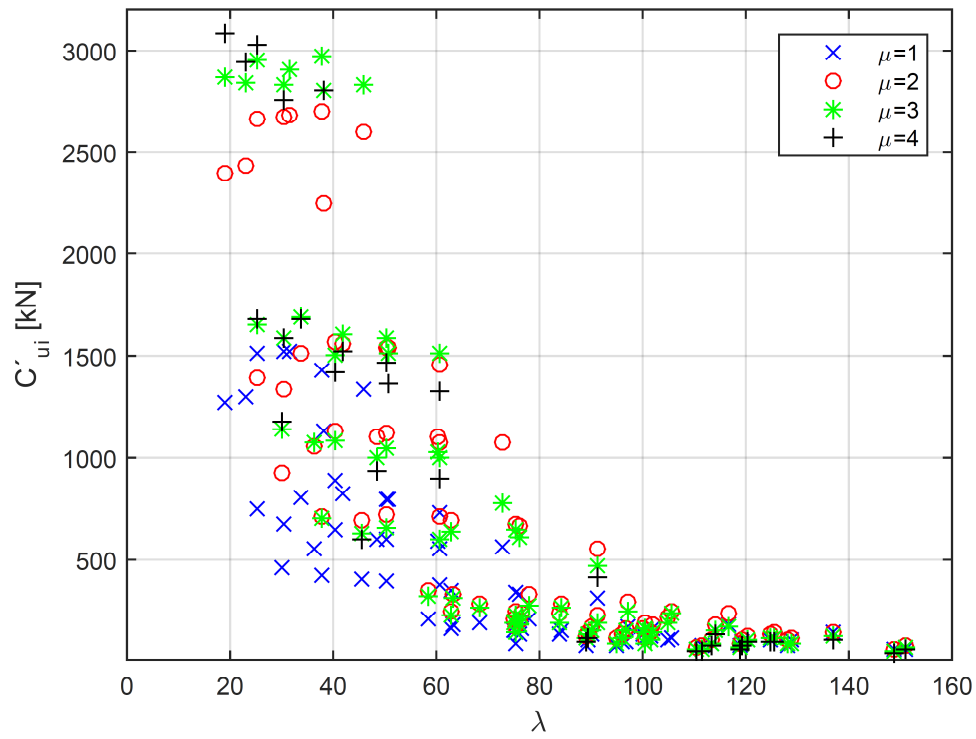


Figura 4.16 - Fuerzas de compresión monotónica a distintos niveles de ductilidad.

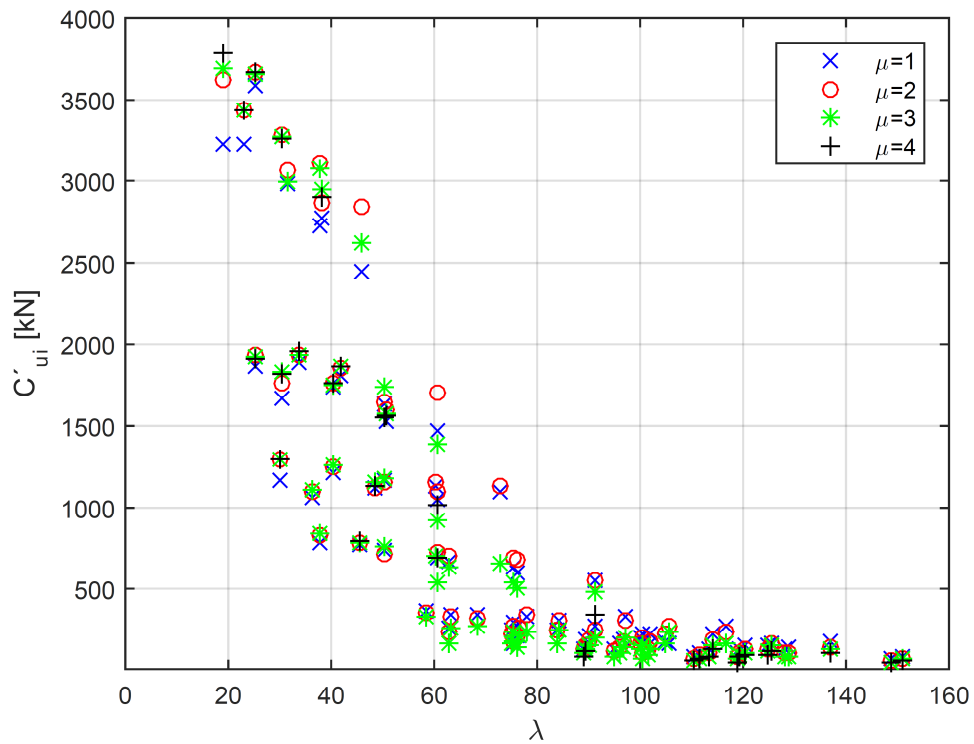


Figura 4.17 - Fuerzas de compresión cíclica a distintos niveles de ductilidad.

4.5.- Fuerzas máximas en las placas gusset

A continuación, se muestran las fuerzas máximas en la placa gusset considerando los ejes de la Figura 4.18 (ejes globales). Para las fuerzas en el plano de la placa (ejes X e Y) se considera el caso más desfavorable teniendo en cuenta tanto valores positivos como negativos para cada eje, vale decir, el máximo absoluto entre las fuerzas en la dirección $-X$ y X e igualmente el máximo absoluto de las fuerzas en $-Y$ e Y . En cambio, para la componente fuera del plano (eje Z), sólo se consideraron las fuerzas que suponían una separación entre ambas piezas, en base a la buena capacidad al aplastamiento del acero. Dado esto, en la Figura 4.18, por ejemplo, se determina el máximo de las fuerzas de reacción en el eje $-Z$ para la cara visible de la placa, mientras que para la cara no visible se tomaron en cuenta las reacciones en $+Z$. Los valores entregados corresponden a los máximos entre las dos caras de ambas placas gusset.

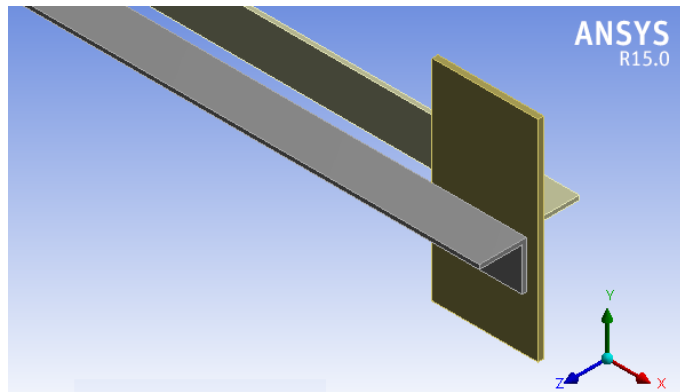


Figura 4.18 – Ejes de la conexión ángulo-gusset.

En la Figura 4.19 se observan los valores de las fuerzas en la conexión en el eje X. Asimismo, la Figura 4.20 y Figura 4.21 muestran datos análogos para los ejes Y y Z, respectivamente.

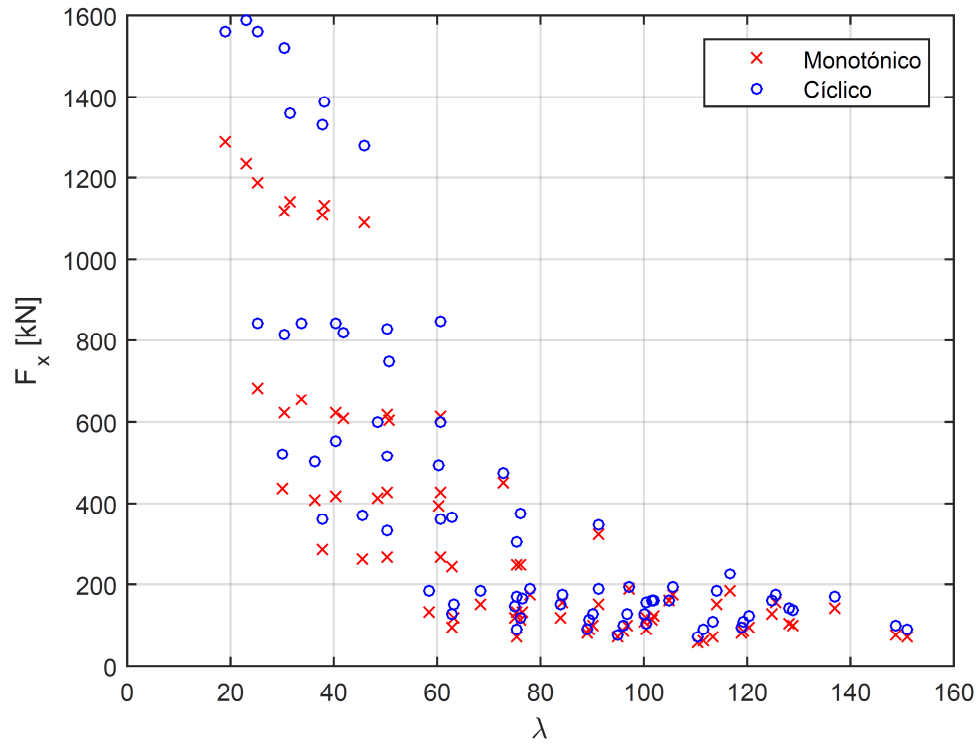


Figura 4.19 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección X.

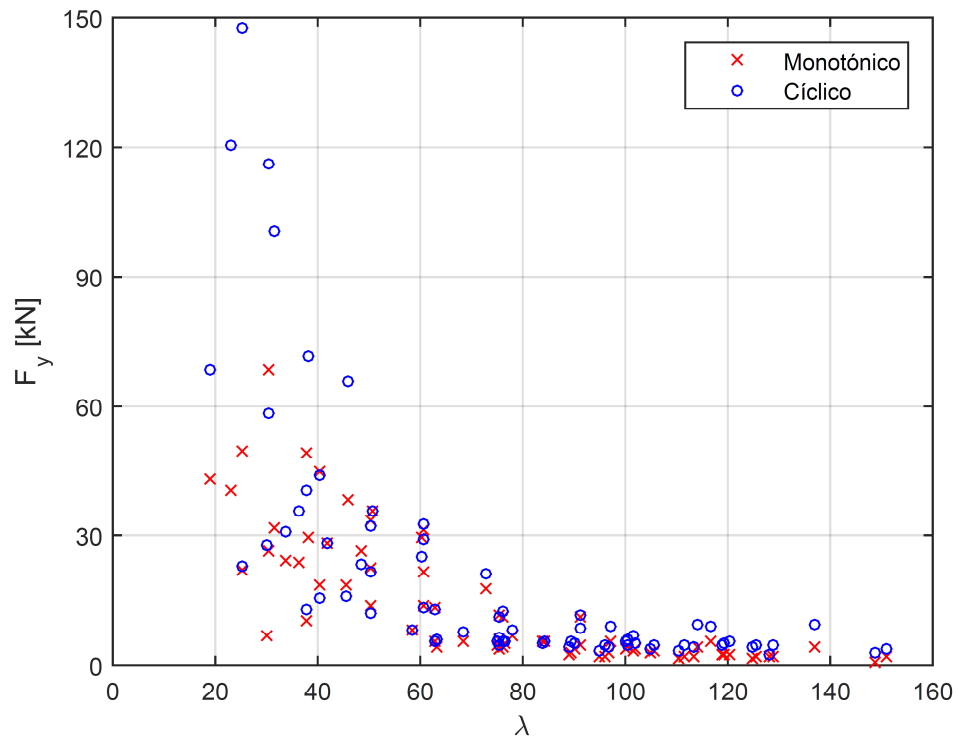


Figura 4.20 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Y.

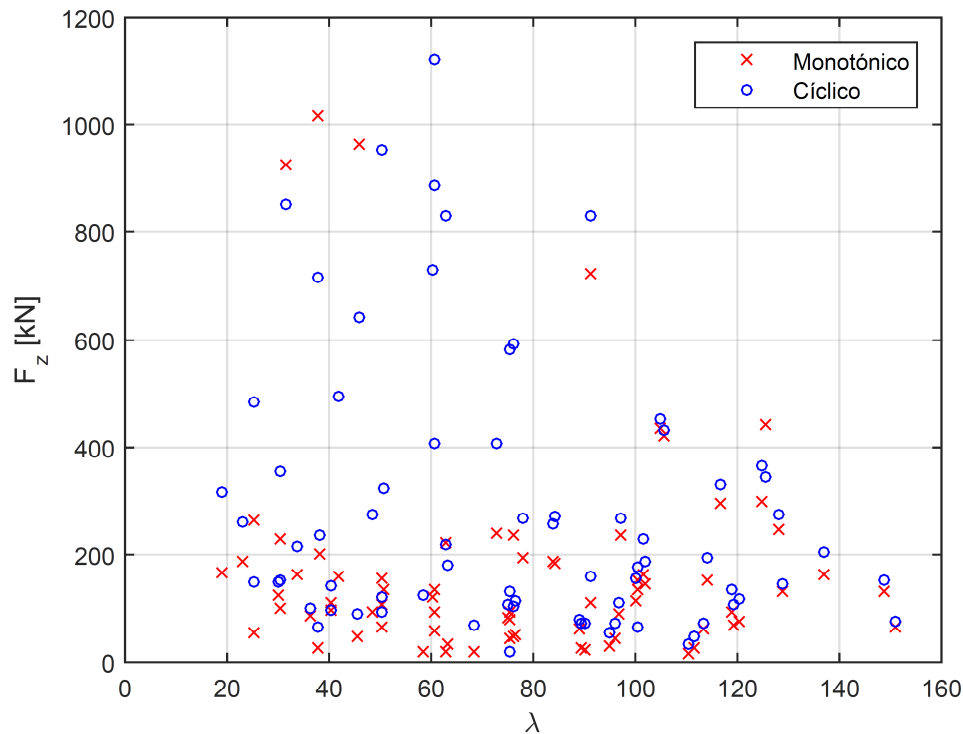


Figura 4.21 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Z.

Para las fuerzas en los ejes X e Y de la conexión (Figura 4.19 y Figura 4.20, respectivamente), se aprecia un aumento considerable de la magnitud para esbelteces menores 80, similar a lo ocurrido para los esfuerzos de tracción y compresión máximos transmitidos por la diagonal. En cambio, las fuerzas en el eje Z tuvieron una gran dispersión, no apreciándose una tendencia clara relacionada con la esbeltez global de los elementos, aunque los valores máximos se concentran en el rango $30 < \lambda < 90$.

En promedio, se obtuvo que las fuerzas cíclicas en el eje X fueron un 25% superior a las monotónicas, manteniéndose constante tal aumento para todo rango de esbeltez. Por su parte, para las fuerzas en el eje Y, las originadas por carga cíclica fueron, en promedio, un 60% mayores a las de origen monotónico, acrecentándose las diferencias para perfiles con $\lambda < 40$ y $\lambda > 100$. Finalmente, la diferencia más grande entre ambos tipos de carga se da en el eje Z, donde las fuerzas en la conexión producto de la sollicitación cíclica son en promedio un 130% mayores, concentrando la mayor diferencia para elementos con esbeltez comprendida entre 50 y 70, llegando a ser incluso 10 veces superior (ver Figura 4.22).

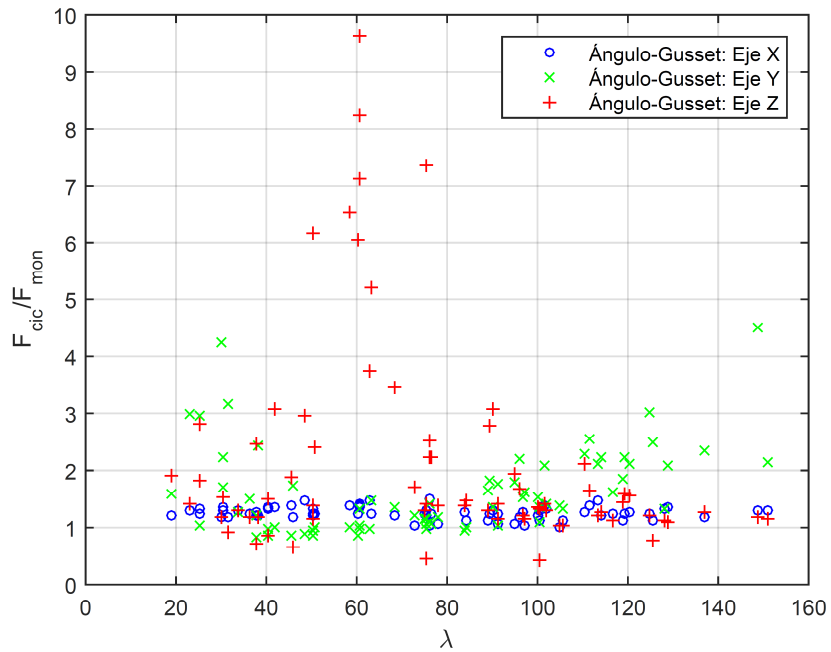


Figura 4.22 – Comparación de fuerzas producto de sollicitación cíclica y monotónica en la conexión ángulo-gusset.

4.6.- Fuerzas máximas en la intersección

En este trabajo se estudian exclusivamente arriostramientos con una disposición en cruz, representando la intersección con una placa central con condiciones de borde que simulan el efecto de la diagonal contraria, restringiendo el movimiento fuera del plano de la pieza en dicho punto (ver Tabla 3.6). Al igual que en la sección anterior, a continuación se exhiben las fuerzas máximas en el punto de encuentro de las riostras, según los ejes globales de la Figura 4.23. Igualmente, se considera el caso más desfavorable entre ambas caras de la placa, tomando en cuenta el sentido positivo y negativo de las fuerzas para los ejes en el plano (X e Y) y sólo las que supongan una separación entre los ángulos y la placa para el caso del eje Z.

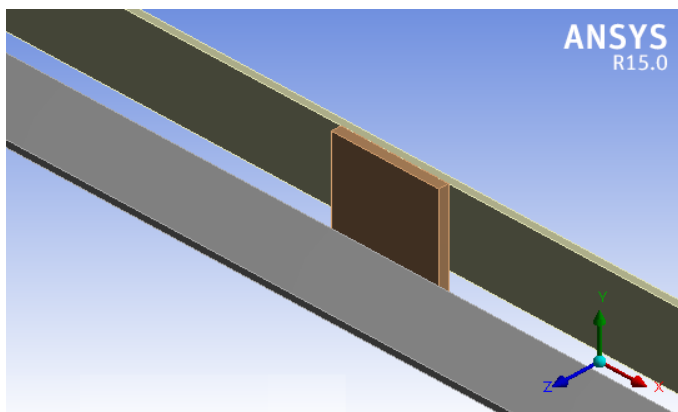


Figura 4.23 – Ejes de la conexión en la intersección de las diagonales.

En la Figura 4.24 se observan los valores absolutos de las fuerzas en la intersección en el eje X. Asimismo, la Figura 4.25 y Figura 4.26 muestran dichos valores para los ejes Y y Z, respectivamente.

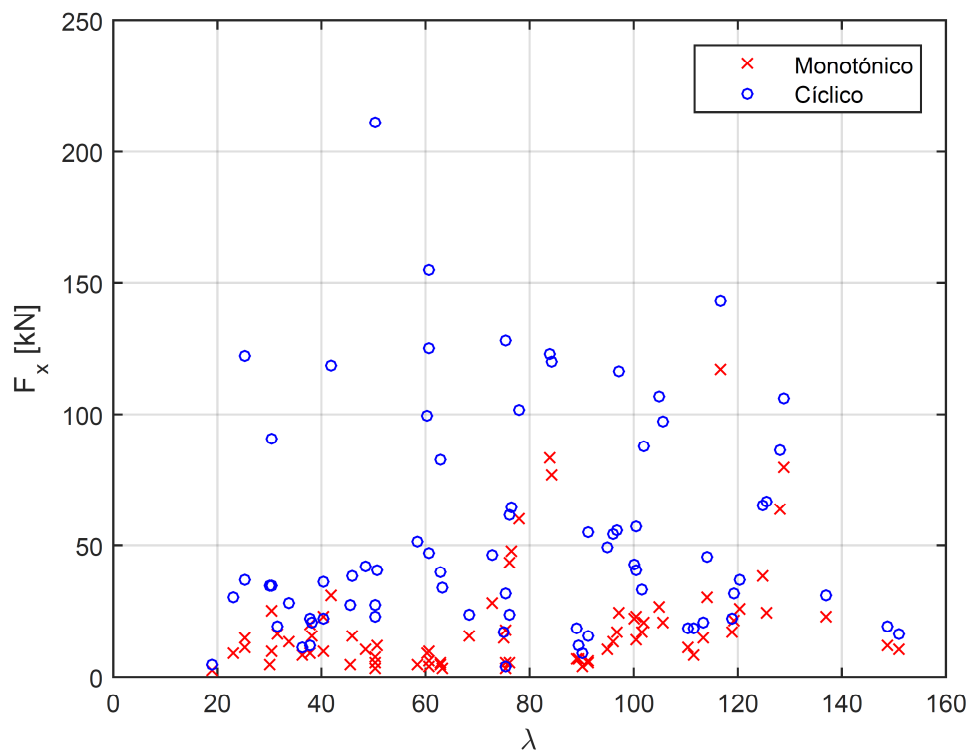


Figura 4.24 – Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección X.

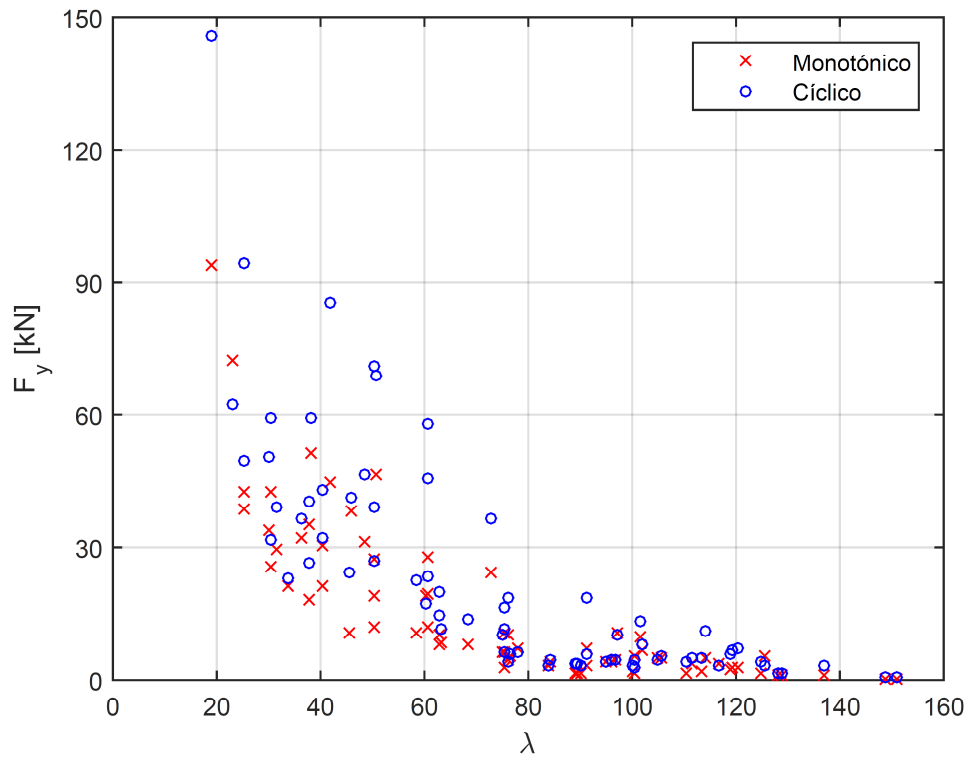


Figura 4.25 – Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Y.

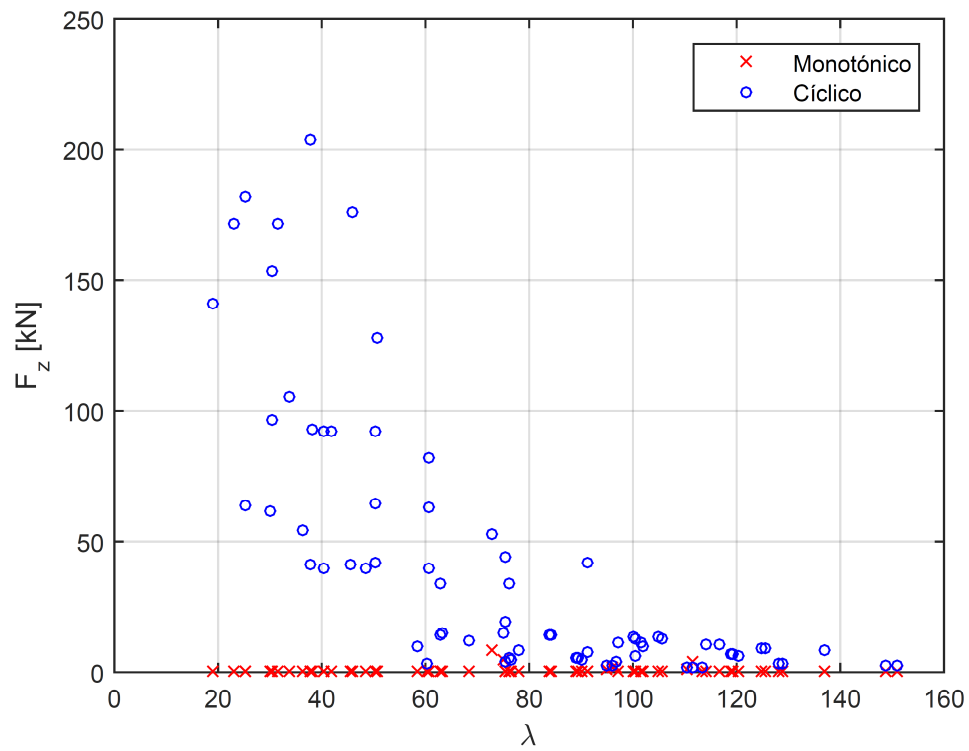


Figura 4.26 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Z.

En la Figura 4.24, puede verse que las fuerzas en el eje X producidas por la carga monotónica son crecientes con la esbeltez, mientras que las originadas por la carga cíclica no muestran una relación clara de dependencia con λ . Por otro lado, en la Figura 4.25 y Figura 4.26 se aprecia que las fuerzas en los ejes Y y Z siguen la tendencia de crecimiento exponencial aumentando significativamente su valor para esbelteces menores a 80, similar a lo observado en las fuerzas en la conexión del gusset en los ejes X e Y. Un punto importante a destacar es que al solicitar monotónicamente los elementos, no se registraron fuerzas de separación entre las partes (eje Z), vale decir la conexión de la intersección se aplasta con la compresión del perfil independiente de la forma de pandeo.

Al comparar las fuerzas originadas por cada tipo de carga, las mayores diferencias se dan en el eje X, donde las fuerzas cíclicas son en promedio 4.5 veces mayores a las monotónicas. Para el eje Y el factor promedio es de 1.7, mientras que en el eje Z no es posible hacer tal comparación.

Capítulo V: Análisis de Resultados

En el presente capítulo se analizan los resultados expuestos anteriormente con el objetivo de determinar relaciones entre los mismos y el modo de falla de cada perfil. Además, se diferencian los resultados en función de la separación de los conectores intermedios, de modo de identificar influencias en el comportamiento cíclico de los arriostramientos, o bien en las fuerzas registradas en las conexiones.

Con el propósito de vincular los resultados con una propiedad geométrica que englobe directamente tanto el largo como la sección transversal de los perfiles, se define la relación entre esbelteces, dada por:

$$\lambda_{G/L} = \frac{\text{máx}(\lambda_{u,mod}; \lambda_v)}{(b/t)} \quad (5.1)$$

5.1.- Modos de falla

A partir de los resultados se llega a la deducción de que el modo de falla que presenta cada perfil puede vincularse con sus propiedades geométricas. De las figuras de la sección 4.1 se desprende que, dado cierto largo, los perfiles con mayor área transversal tendieron a fallar por torsión. En el caso contrario, los perfiles más esbeltos lo hicieron por flexión. Dado esto, a continuación se muestra la correspondencia entre el modo de falla y la relación de esbelteces (ec. 5.1), para conectores distanciados a $L/4$ (Figura 5.1) y $L/8$ (Figura 5.2).

Se observa que ambas disposiciones de conectores muestran resultados similares al relacionar el modo de falla con la razón de esbelteces, y si bien existen diferencias en el modo de falla con el tipo de carga en algunos perfiles, al establecer rangos predominantes no se constatan grandes diferencias. En todos los casos, los perfiles con una razón de esbelteces menor a 6 fallan por torsión. Por otro lado, perfiles con una relación $\lambda_{G/L}$ comprendida entre 6 y 10 fallaron por flexotorsión, mientras los con un valor $\lambda_{G/L} > 10$ lo hicieron por flexión. Esta última transición es más difusa que la que hay entre flexotorsión y torsión, especialmente para los perfiles con conectores a una distancia $a = L/4$.

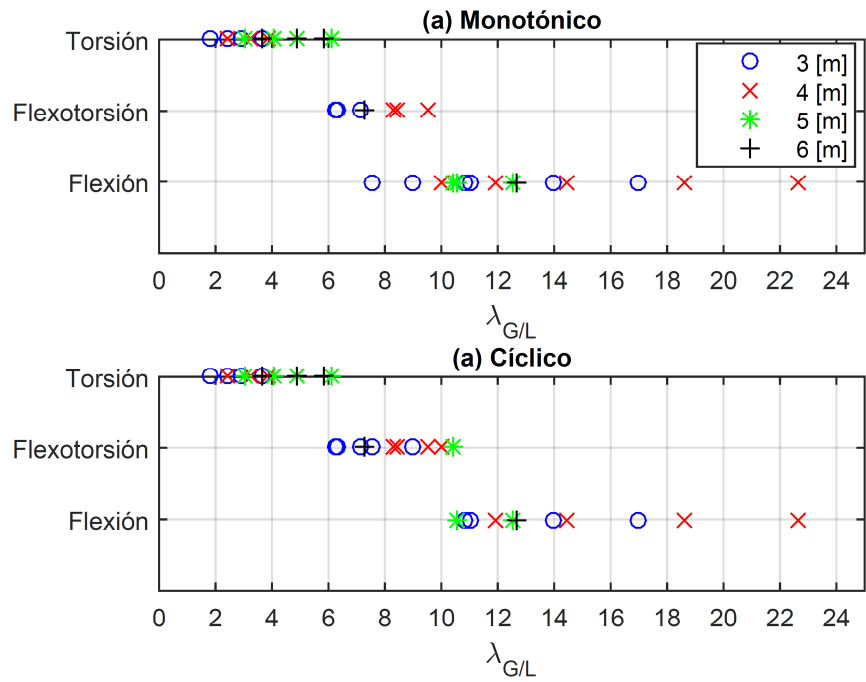


Figura 5.1 – Modos de falla en función de $\lambda_{G/L}$ para perfiles con conectores cada un cuarto del largo total.

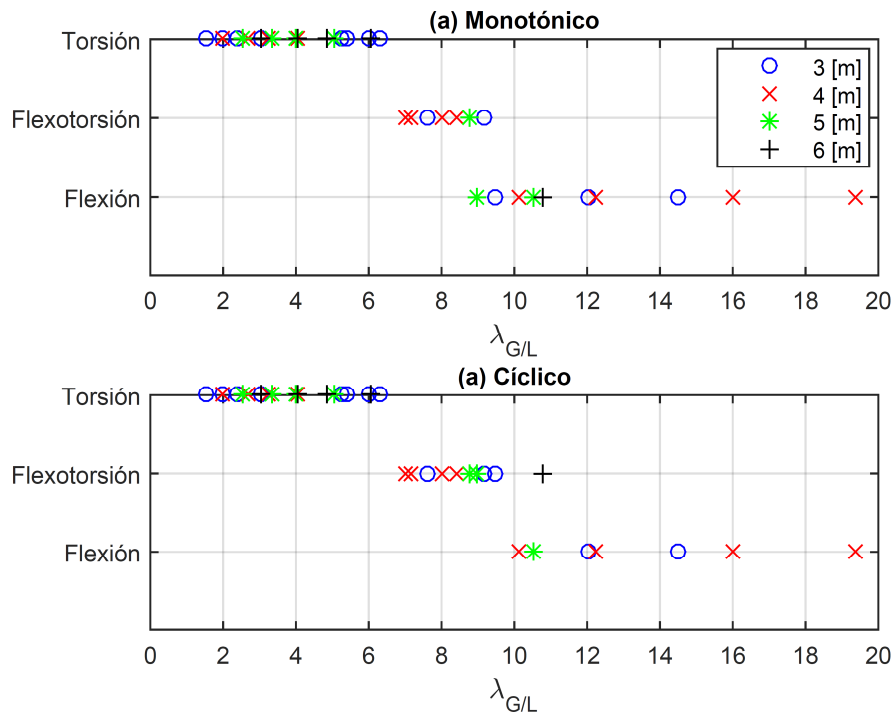


Figura 5.2 – Modos de falla en función de $\lambda_{G/L}$ para perfiles con conectores cada un octavo del largo total.

En la Tabla 5.1 se muestra el resumen de la clasificación de los modos de falla en función del rango de la relación de esbelteces. Esta clasificación será utilizada durante todo el análisis.

Tabla 5.1 – Modo de falla predominante en función de la relación de esbelteces.

Modo de falla	Relación de esbelteces
Flexión	$\lambda_{G/L} > 10$
Flexotorsión	$6 < \lambda_{G/L} \leq 10$
Torsión	$\lambda_{G/L} \leq 6$

5.2.- Planos de pandeo

Respecto a los planos de pandeo, existen diferencias para ambas disposiciones de conectores. En el caso con conectores separados a una distancia de $L/4$, la esbeltez mayor es la del eje U-U modificada, por lo que el pandeo global ocurre en torno a este eje (ver Figura 5.3). En cambio, al aumentar el número de placas situándolas a $L/8$, la esbeltez gobernante es la del eje V-V (detalle de esbelteces en Anexo C). No obstante, el pandeo global registrado en dichos perfiles es en torno al eje vertical Y-Y secundario (ver Figura 5.4). Lo anterior se debe a que la inclusión de un mayor número de conectores rigidiza al perfil de tal modo que sus ejes principales varían, tornándose paralelos a las placas de conexión, similar al caso teórico en que hubiera un único conector del largo total del arriostramiento. Esta situación se condice con lo estudiado por Schepers (1983), que concluyó que usar dos o más conectores en los largos no arriostrados suponía que el pandeo ya no fuera en torno al eje U-U.

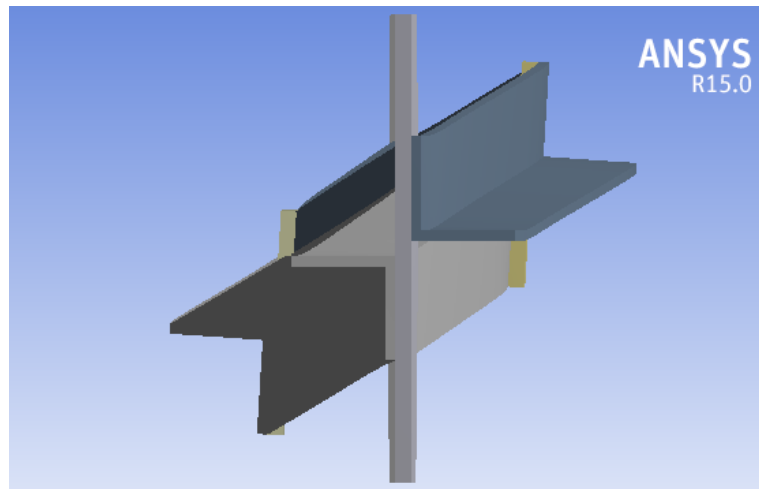


Figura 5.3 – Pandeo global en torno al eje U-U para un perfil con conectores a una distancia $a=L/4$. Factor de amplificación 2.5.

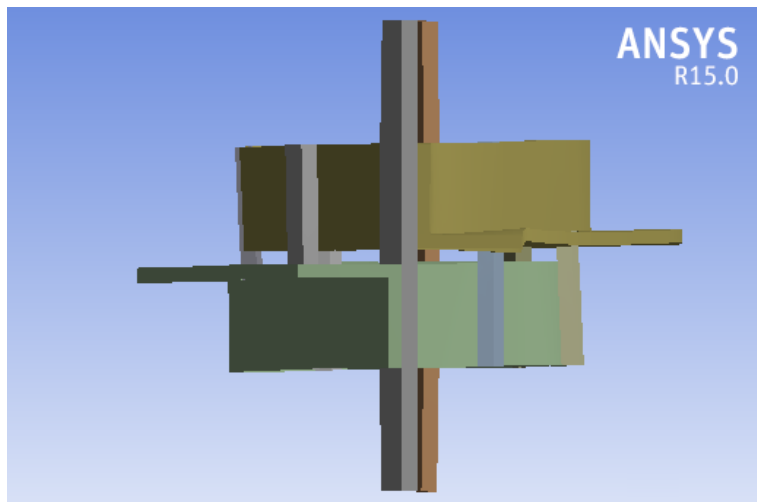


Figura 5.4 – Pandeo global en torno a ejes combinados para un perfil con conectores a una distancia $a=L/8$. Factor de amplificación 2.5.

5.3.- Pandeos locales

Otra diferencia antes mencionada, es la aparición de pandeos locales en algunos perfiles con conectores a una distancia $L/8$ ante sollicitación cíclica, próximos a la falla (ver Figura 5.5). Dichas inestabilidades locales se produjeron principalmente en perfiles con falla flexotorsional. En los casos observados, el pandeo local se formó en la misma zona de aparición de la rótula plástica y posterior a ésta, provocando además la falla (al alcanzar la tensión última definida en la sección 3.4.5) al alternar entre compresión a tracción luego de formada la inestabilidad. El hecho de no observar este fenómeno en perfiles con menos conectores radica en que en éstos la rótula plástica se forma sobre la zona de conexión entre las planchuelas y los ángulos (Figura 5.6a), mientras que en los perfiles con una mayor cantidad de conectores la rótula se formó en los ángulos, en una zona entre dichos conectores (Figura 5.6b). Esto hace que en el segundo caso la deformación se concentre en una zona más débil, confinada por la presencia de los interconectores por ambos lados.

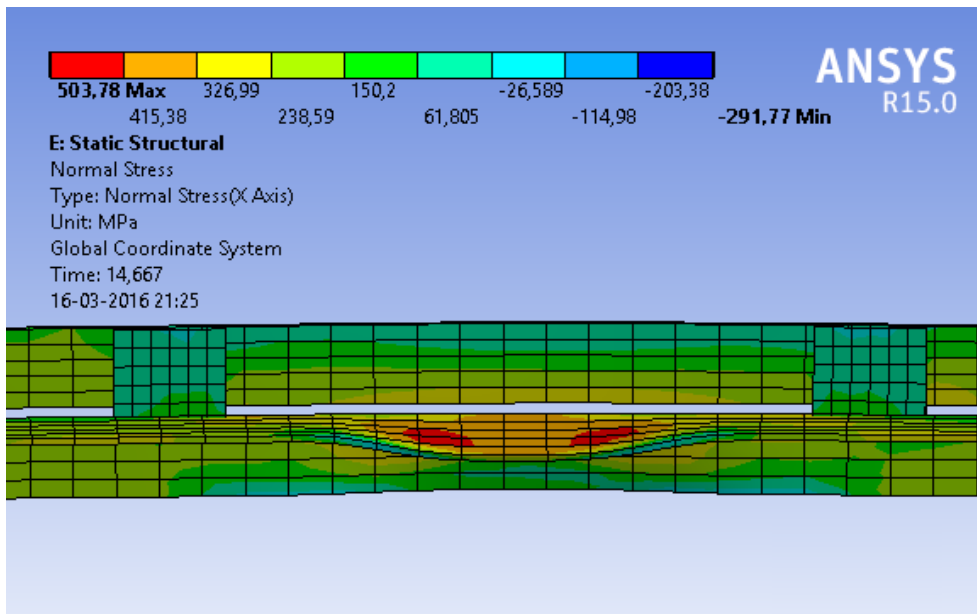


Figura 5.5 – Pandeo local previo a la falla para un perfil con conectores cada L/8. Factor de amplificación 1.0; Color: Tensión normal, eje X.

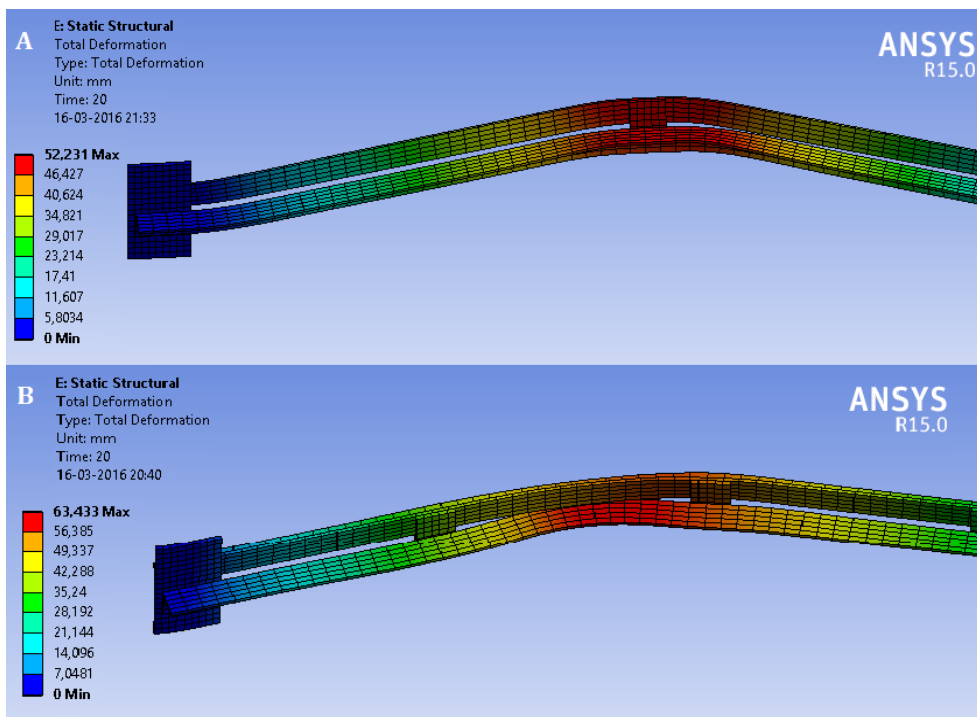


Figura 5.6 - Zona de formación de rótula plástica para los distintos espaciamentos de conectores. a) cada L/4; b) cada L/8. Factor de amplificación 2.5; Color: Deformación total.

No obstante, cabe recordar que los perfiles estudiados satisfacen la norma NCh2369, luego cumplen con que su relación ancho-espesor es menor a la esbeltez límite dada por la ecuación 2.2. La Tabla 5.2 muestra las relaciones entre la esbeltez local y el valor de $(b/t)_{lim}$ para los perfiles que presentaron pandeos locales. Se emplea la siguiente notación:

$$(b/t)_{nor} = \frac{(b/t)}{0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}} \quad (5.2)$$

Tabla 5.2 – Relación entre esbeltez local y relación ancho-espesor límite dado por la norma NCh2369.Of2003.

Perfil	Largo [m]	Modo de falla	b/t	$(b/t)_{nor}$
XL80x4	3	Flexotorsión	10.0	0.79
XL100x5	3	Flexotorsión	10.0	0.79
XL100x4	4	Flexotorsión	12.5	0.98
XL100x5	4	Flexión	10.0	0.79
XL120x5	4	Flexotorsión	12.0	0.94
XL130x6	4	Flexotorsión	10.8	0.85
XL120x5	5	Flexotorsión	12.0	0.94
XL130x6	5	Flexotorsión	10.8	0.85
XL130x6	6	Flexotorsión	10.8	0.85

De la Tabla 5.2 se observa en primer lugar que 9 perfiles padecieron pandeos localizados, lo cual representa un 24% del total (con conectores cada $L/8$) y un 53% de los perfiles con falla flexural o flexotorsional. De estos últimos, un 80% registró pandeo local. Por otro lado, puede verse que el valor $(b/t)_{nor}$ se encuentra entre 0.79 y 0.94, mientras que en perfiles con falla flexotorsional y un valor $(b/t)_{nor}$ menor que 0.79 no se presentó dicho problema. Al multiplicar la compacidad límite exigida por la norma NCh2369 por 0.79 se obtiene $0.36\sqrt{E/F_y}$, valor muy similar al límite exigido por las previsiones sísmicas de la AISC para este tipo de perfil en miembros de moderada ductilidad ($0.38\sqrt{E/F_y}$).

5.4.- Nivel de ductilidad

La concentración de deformaciones entre los conectores intermedios al estar distanciados cada $L/8$ no sólo generó problemas de inestabilidad local, sino también una menor ductilidad a nivel general. La Figura 5.7 muestra la deformación acumulada normalizada por δ_y en función de la relación de esbelteces para ambas configuraciones de conectores.

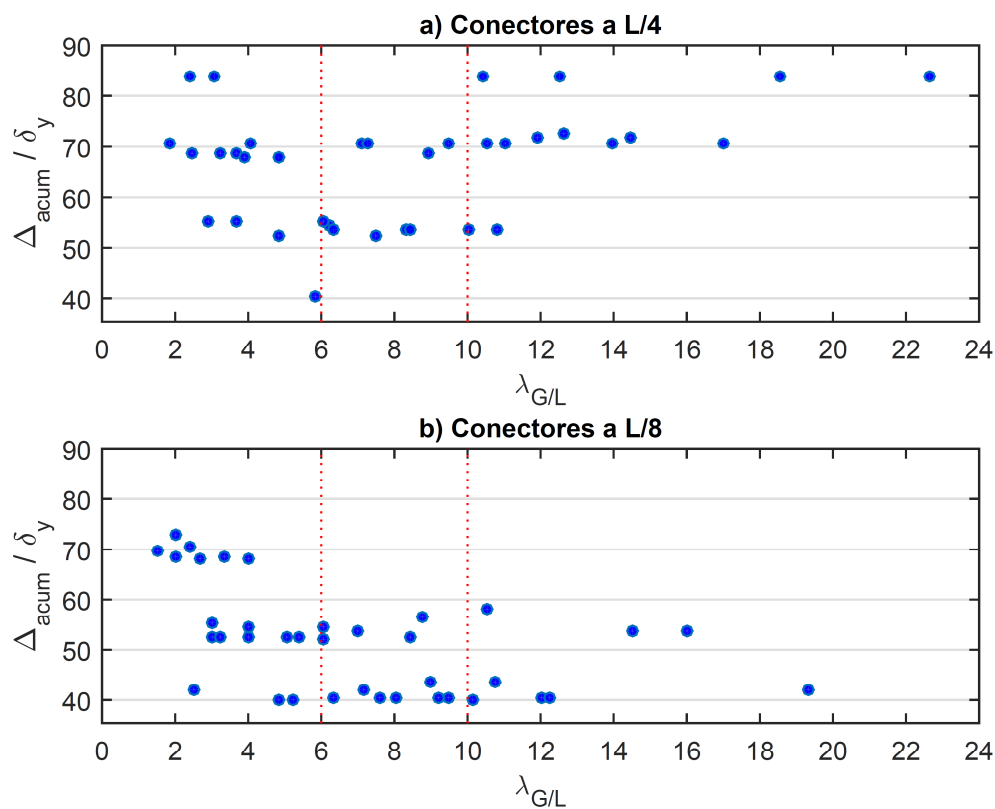


Figura 5.7 – Deformación acumulada normalizada por δ_y en función de $\lambda_{G/L}$.

Para el caso con conectores distanciados a $L/4$, los elementos de mayor ductilidad fueron los más alejados de la franja de flexotorsión (dada por $6 < \lambda_{G/L} < 10$), tanto en la zona izquierda (gobernada por la torsión), como la derecha (gobernada por la flexión). Por otro lado, para los perfiles con conectores cada $L/8$ los niveles mayores de ductilidad sólo se dieron para perfiles alejados de la zona de flexotorsión por la izquierda, vale decir con falla torsional. El hecho de que los perfiles con falla flexural para esta disposición de conectores tengan una baja ductilidad se fundamenta de igual manera que la presencia de inestabilidades locales; luego del pandeo fuera del plano y tras sucesivos ciclos, la formación de la rótula plástica (donde se acumulan las mayores tensiones y deformaciones) se da en una zona del perfil comprendida entre dos conectores intermedios, los cuales confinan y rigidizan dicha zona haciéndola más frágil. Precisamente en este punto es donde se alcanzan las tensiones últimas, que desencadenarían la falla en la práctica.

Al comparar par a par cada perfil, en todos los casos se tiene una mayor ductilidad para la configuración de menos conectores. El promedio de deformación acumulada para los perfiles con conectores a $L/4$ es $66.7\delta_y$, con 6 elementos que finalizaron el análisis sin alcanzar el criterio de interrupción (500 MPa). En cambio, el promedio para los perfiles con distanciamiento de planchuelas a $L/8$ es $51.6\delta_y$, y ningún elemento logró ser solicitado con el historial completo.

5.5.- Tracción y compresión máxima

Una de las observaciones más importantes de la sección 4.3 es el aumento pronunciado en los valores de $T_{m\acute{a}x}$ para elementos de baja esbeltez (que tienden a fallar por torsión). Al dividir estos valores por $F_y A_g$ y graficarlos en función de la relación de esbelteces, pueden observarse comportamientos similares para ambas distribuciones de conectores (ver Figura 5.8). En todos los casos la tracción máxima desarrollada en el arriostramiento es mayor a $F_y A_g$, siendo aproximadamente un 10% mayor para elementos con falla flexural y flexotorsional, mientras que para los perfiles con falla torsional los valores aumentan conforme disminuye la relación de esbelteces, llegando a ser un 30% mayores a $F_y A_g$. Al calcular el cociente entre las tracciones máximas para cada disposición de conectores y determinar el promedio se obtiene un valor de 1.00 con una desviación estándar de 0.03, de manera que puede asegurarse que el aumentar el número de conectores intermedios no influye en la capacidad a la tracción de la diagonal.

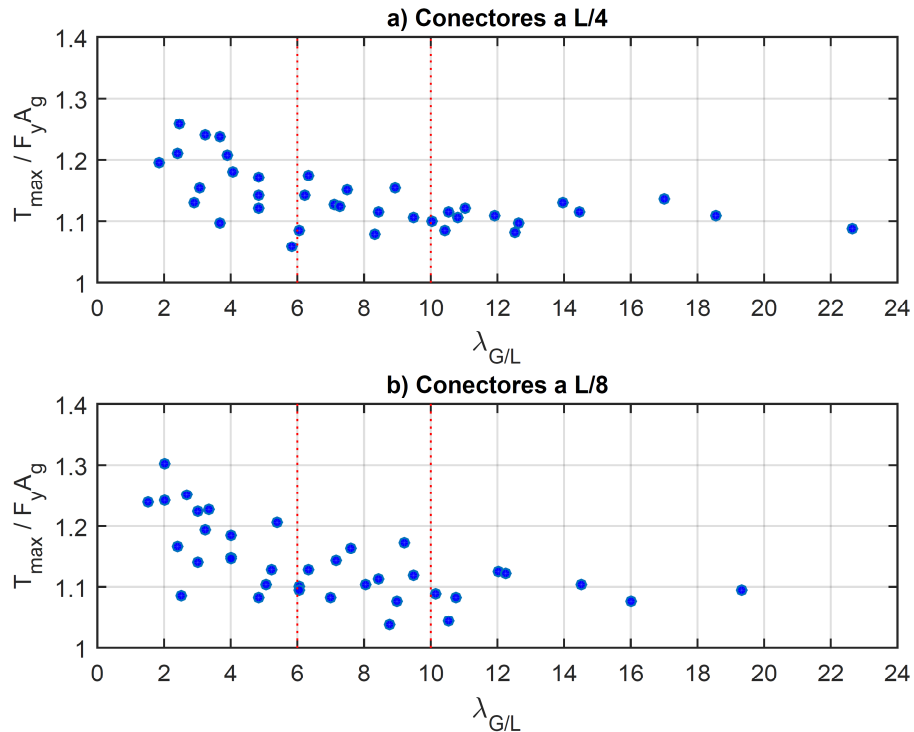


Figura 5.8 – Tracción máxima dividida por $F_y A_g$ en función de $\lambda_{G/L}$.

Análogamente, en la Figura 5.9 se muestran los valores de C_u divididos por $F_y A_g$ para ambos distanciamientos de conectores. Para perfiles con falla torsional, se aprecia que ante carga monótonica la compresión máxima es aproximadamente igual a P_y , mientras que para carga cíclica varía entre P_y y $1.2P_y$ (para los elementos de menor relación de esbelteces). Adicionalmente, para ambos espaciamientos de planchuelas se experimenta un descenso en las capacidades normalizadas

al variar a falla flexotorsional y luego flexural, siendo dicha disminución más pronunciada en los perfiles con conectores a $L/4$. En la Tabla 5.3, se entregan los valores promedios clasificados por modo de falla.

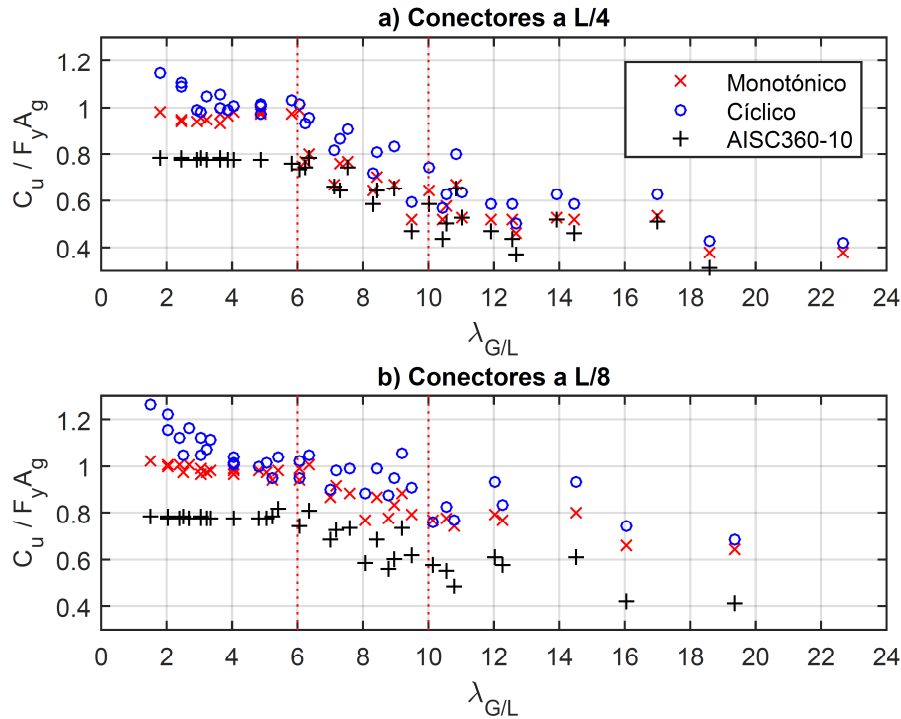


Figura 5.9 - Compresión máxima dividida por $F_y A_g$ en función de $\lambda_{G/L}$.

Tabla 5.3 – Valores de $C_u / F_y A_g$ promedio según el modo de falla.

Modo de falla	Conectores a $L/4$		Conectores a $L/8$	
	Monotónico	Cíclico	Monotónico	Cíclico
Flexión	0.55	0.58	0.76	0.82
Flexotorsión	0.69	0.80	0.85	0.93
Torsión	0.97	1.03	0.99	1.07

Debido a que los perfiles con conectores a $L/8$ son menos esbeltos, es esperable que los valores de $C_u / F_y A_g$ sean mayores para este distanciamiento. Luego, con objeto de poder efectuar una comparación entre ambas configuraciones, en la Figura 5.10 se normalizan los valores de C_u por la capacidad nominal a la compresión del perfil, considerando el estado límite más desfavorable entre pandeo global y pandeo torsional del capítulo E de la norma AISC360 (2010). Como resultado principal, se observa que para ambos tipos de carga y espaciamientos el valor de C_u es mayor a la capacidad nominal. Para el caso de conectores a $L/4$ y carga cíclica, la razón es prácticamente

constante e independiente del modo de falla, mientras que para carga monotónica la capacidad registrada en relación a la nominal es mayor en perfiles con falla torsional. Al aumentar el número de conectores, los valores de C_u/P_n aumentan para relaciones de esbeltez bajas del lado de elementos con falla torsional y relaciones de esbeltez altas por el lado de elementos con falla flexural, siendo mayores en estos últimos. La Tabla 5.4 muestra los valores promedio clasificados por modo de falla.

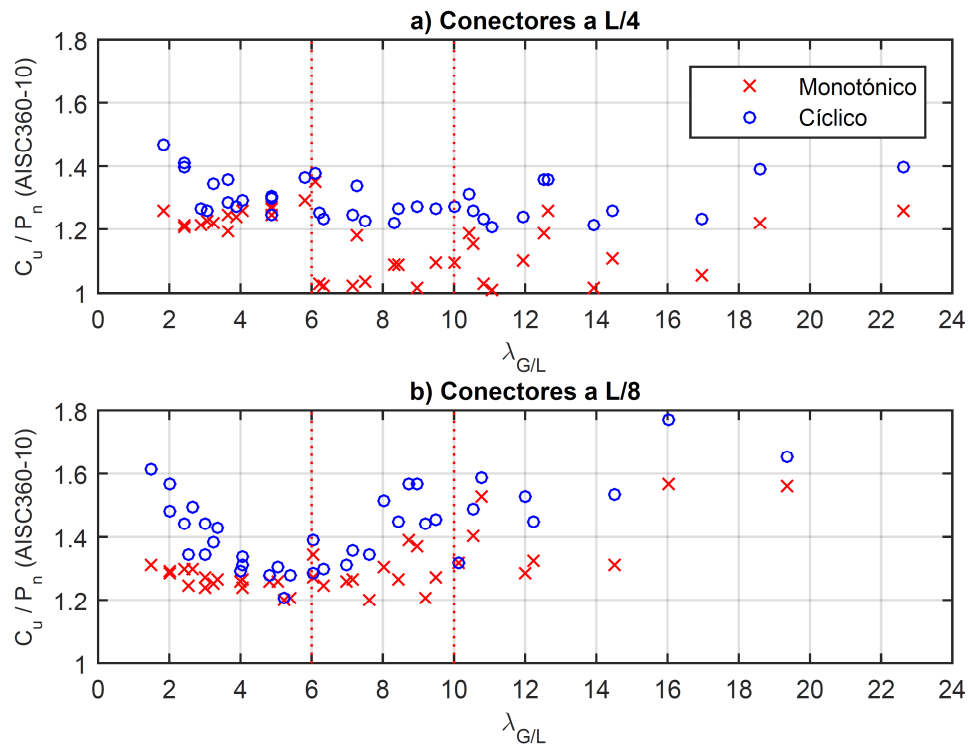


Figura 5.10 - Compresión máxima dividida por la capacidad nominal a la compresión (AISC360-10) en función de $\lambda_{G/L}$.

Tabla 5.4 – Valores de C_u/P_n promedio según el modo de falla.

Modo de falla	Conectores a L/4		Conectores a L/8	
	Monotónico	Cíclico	Monotónico	Cíclico
Flexión	1.11	1.29	1.39	1.53
Flexotorsión	1.08	1.26	1.27	1.46
Torsión	1.25	1.33	1.27	1.38

5.5.- Capacidad a la compresión post pandeo

En la sección 4.4 se entregaron los valores absolutos de las capacidades a la compresión a distintos niveles de deformación en función de la esbeltez global. A continuación, se estudia en primer lugar la forma del decaimiento de dicha capacidad ante carga cíclica y luego su relación con la fuerza de fluencia conforme aumenta el requerimiento de ductilidad, vinculándolo con la relación $\lambda_{G/L}$. De esta manera, en primer lugar la Figura 5.11 exhibe las capacidades a la compresión para $\mu = 1, 2, 3$ y 4 , divididas por la fuerza de compresión axial máxima de todo el análisis, C_u (cíclico). Se observa que no existen variaciones significativas de comportamiento al cambiar el espaciamiento de conectores, salvo por las diferencias de ductilidad mencionadas en la sección 5.4, ilustradas por la menor cantidad de marcadores para $\mu = 4$. Se evidencia además que existen dos patrones de comportamiento generales, separados para una relación de esbelteces de 4. Para $\lambda_{G/L} > 4$, se constató que la fuerza compresiva máxima se produce después de alcanzada la fluencia en tracción, al pasar por $\delta \approx -\delta_y$ en la compresión ulterior. Tras el peak, la pérdida de capacidad se comprueba al observar que para dicho rango se tiene que $C'_{u2} > C'_{u3} > C'_{u4}$, decayendo hasta un 60% del valor máximo. Por otro lado, para $\lambda_{G/L} \leq 4$ los valores de C'_u son aproximadamente iguales a C_u , lo cual denota que la capacidad a la compresión se mantiene prácticamente constante a lo largo del análisis tras alcanzar el máximo, no decayendo a menos del 90%. Además, en este rango la ductilidad de los elementos es mayor. La Tabla 5.6 muestra los promedios de las capacidades compresivas al nivel de ductilidad máximo divididas por C_u , para cada modo de falla.

La diferencia antes mencionada se debe a que en los elementos con una relación de esbeltez menor o igual a 4 no se genera rótula plástica, por consiguiente no existe acumulación de tensiones y deformaciones en un punto específico ni tampoco deformación fuera del plano (ver Figura 5.12), lo cual permite que el endurecimiento isotrópico del material se manifieste para ambos sentidos de carga y no sea contrarrestado por la pérdida de capacidad. Este comportamiento resulta de gran ventaja en términos estructurales, aunque implementar perfiles tan robustos supondría costos muy elevados en material. En efecto, para lograr una relación $\lambda_{G/L}$ menor a 4 se emplean perfiles de sección XL200x8, XL250x10, XL300x12 y XL400x16 con esbelteces efectivas entre 18.9 y 50.6 y capacidades a la fluencia en tracción entre 746 kN y 3000 kN (ver Tabla 5.5).

Tabla 5.5 – Esbeltez y capacidades de elementos con $\lambda_{G/L} \leq 4$. Número de perfiles: 23.

Parámetro	Mín	Máx	Prom
λ_{eff}	18.9	50.6	37.5
$F_y A_g$ [kN]	747.5	3000	1906.8
C_u [kN]	761.5	3782.7	2072.9
P_n (AISC360-10) [kN]	581.5	2344.4	1486.8

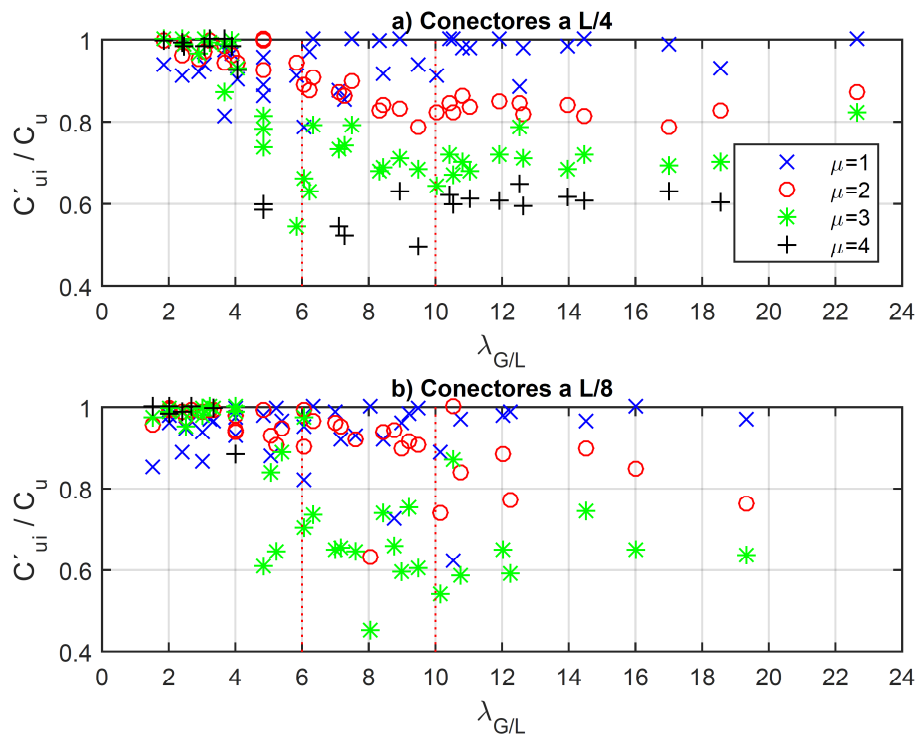


Figura 5.11 – Capacidad compresiva ante sollicitación cíclica a distintos niveles de ductilidad, normalizados por C_u .

Tabla 5.6 –Relaciones de C'_u/C_u promedios para el nivel de ductilidad máximo de cada análisis, según el rango de $\lambda_{G/L}$.

Modo de falla	Rango de $\lambda_{G/L}$	Conectores a L/4	Conectores a L/8
Flexión	$\lambda_{G/L} > 10$	0.63	0.66
Flexotorsión	$6 < \lambda_{G/L} \leq 10$	0.64	0.64
Torsión	$4 < \lambda_{G/L} \leq 6$	0.63	0.77
	$\lambda_{G/L} \leq 4$	0.97	0.98

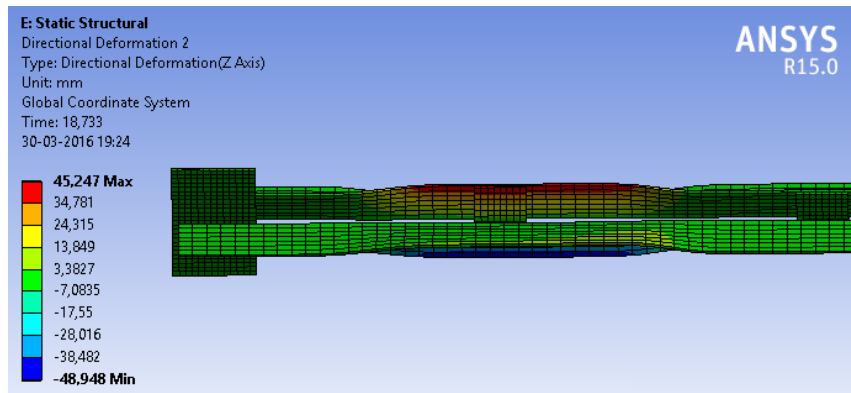


Figura 5.12 – Pandeo torsional sin deformaciones laterales. Factor de amplificación: 1.0.

En la Figura 5.13, se observa que los valores de C'_u divididos por $F_y A_g$ son decrecientes con la razón de esbelteces. Para los niveles de ductilidades finales ($\mu = 3$ o 4 , dependiendo del caso), las capacidades varían entre 0.9 y $1.3F_y A_g$ si $\lambda_{G/L} \leq 4$. En los perfiles con relaciones de esbelteces altas (con falla flexural), las fuerzas al final del análisis se encuentran en torno al 35% de $F_y A_g$ para el caso de conectores a $L/4$ y al 50% para conectores a $L/8$. En la Tabla 5.7 se muestran los valores de C'_u promedios para la deformación máxima alcanzada por cada perfil, normalizados por la fuerza de fluencia y en función del modo de falla. Además, se hace distinción para el caso de falla por torsión para la relación de esbeltez igual a 4.

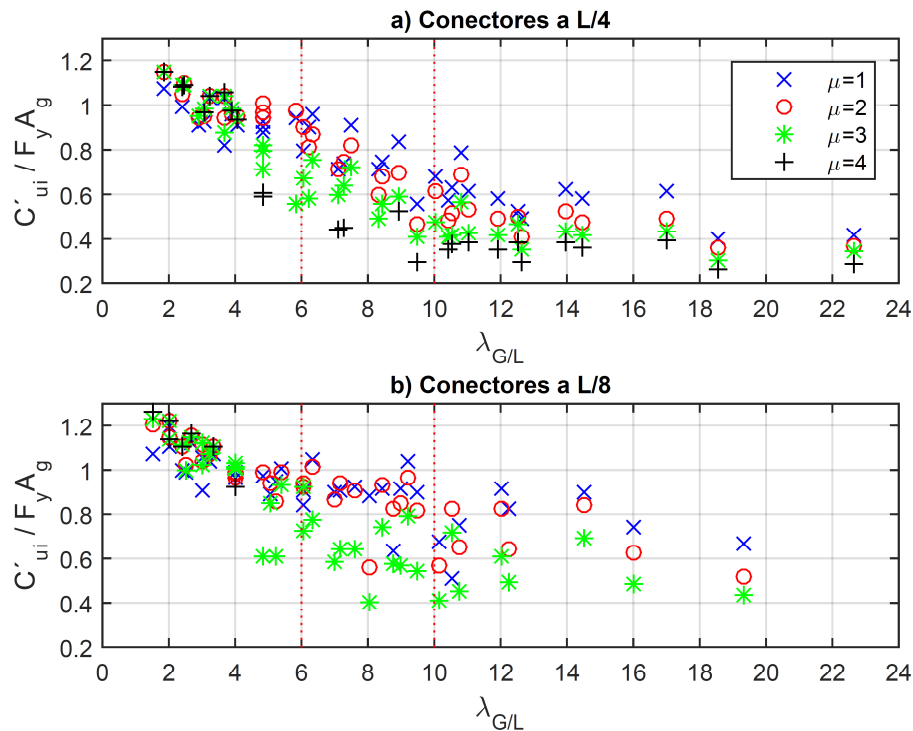


Figura 5.13 - Capacidad compresiva ante sollicitación cíclica a distintos niveles de ductilidad, normalizados por $F_y A_g$.

Tabla 5.7 – Relaciones de $C'_u / F_y A_g$ promedios para el nivel de ductilidad máximo de cada análisis, según el rango de $\lambda_{G/L}$.

Modo de falla	Rango de $\lambda_{G/L}$	Conectores a L/4	Conectores a L/8
Flexión	$\lambda_{G/L} > 10$	0.37	0.55
Flexotorsión	$6 < \lambda_{G/L} \leq 10$	0.51	0.59
Torsión	$4 < \lambda_{G/L} \leq 6$	0.63	0.77
	$\lambda_{G/L} \leq 4$	1.01	1.09

5.6.- Fuerzas máximas en las placas gusset

En la sección 4.5 se entregaron los valores absolutos de las fuerzas en la conexión ángulo-gusset. En la presente sección, dichos valores son divididos por la capacidad a la fluencia en el área gruesa y distribuidos en función de la relación de esbelteces. Los ejes de conexión pueden verse en la Figura 4.18.

Para las fuerzas en el eje X (ver Figura 5.14), se observa que en la configuración de conectores cada L/4 no existe una variabilidad significativa en los valores con el modo de falla, siendo en promedio un 40% de $F_y A_g$ para el caso monotónico y un 50% para el cíclico. Al aumentar el número de conectores, las fuerzas en el eje X de la conexión crecieron, en promedio, un 11% ante carga monotónica y un 8% ante carga cíclica. Esta diferencia se concentra principalmente en perfiles con una relación de esbelteces mayor a 6, donde para el caso con mayor número de conectores las fuerzas normalizadas muestran una tendencia creciente.

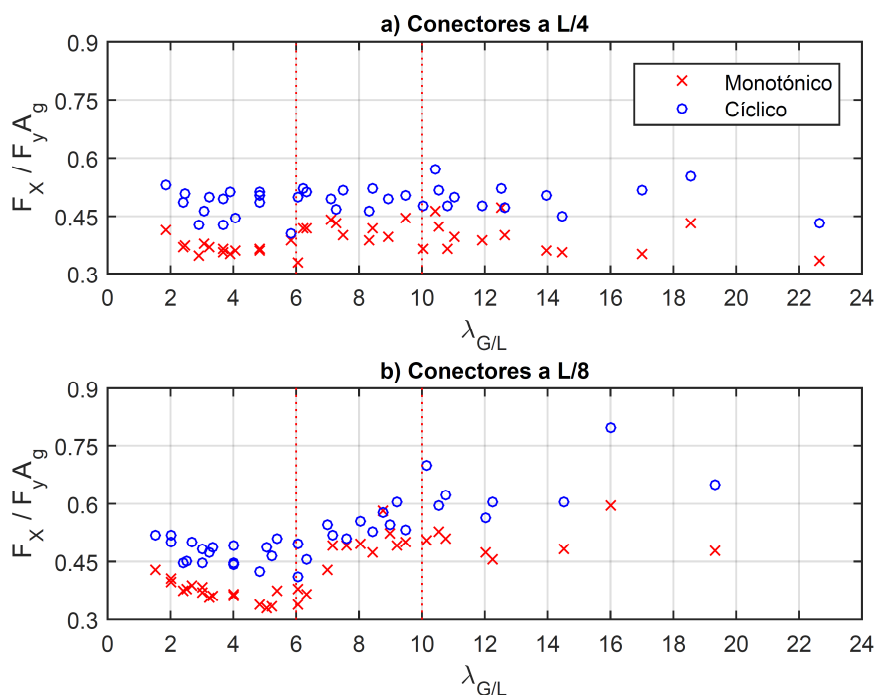


Figura 5.14 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección X, normalizadas por $F_y A_g$.

En el eje Y las fuerzas resultaron ser mucho menores, siendo en el peor de los casos un 5% de $F_y A_g$ (ver Figura 5.15). Ante carga cíclica, los valores tendieron a aumentar para perfiles con falla torsional y $\lambda_{G/L} < 4$, mientras que para relaciones de esbelteces mayores las fuerzas oscilaron en torno al 2% de P_y .

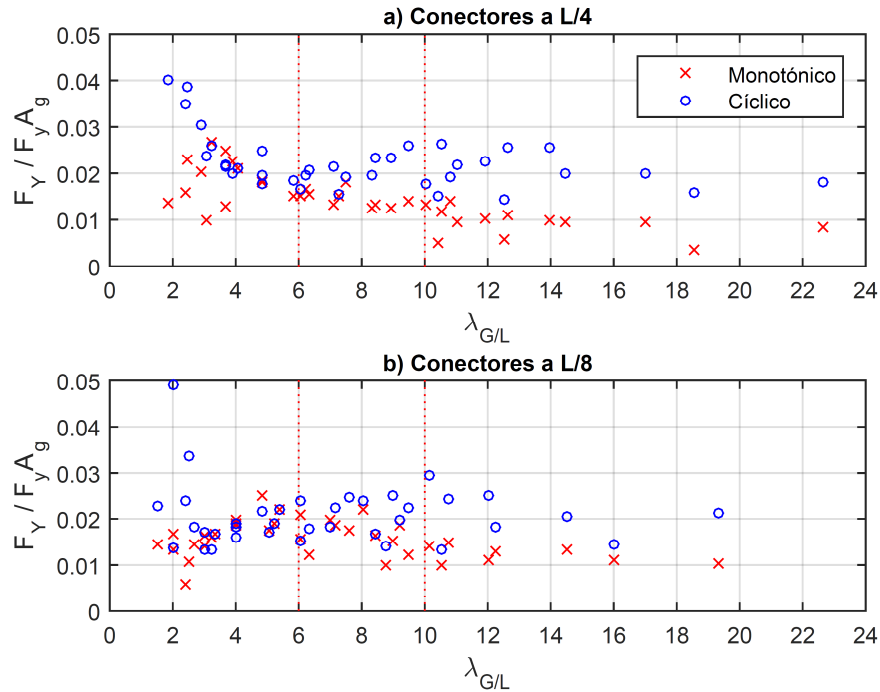


Figura 5.15 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Y, normalizadas por $F_y A_g$.

Finalmente, en la Figura 5.16 se entregan las fuerzas normalizadas por $F_y A_g$ en el eje Z. Puede verse que para perfiles con falla flexotorsional y flexural, las fuerzas de separación entre el ángulo y la placa resultan ser las más demandantes para la conexión, superando en algunos casos la carga de fluencia. Por otra parte, para los elementos con falla torsional nuevamente se observa una dicotomía en el comportamiento ante una relación de esbelteces igual a 4. Cuando $\lambda_{G/L} < 4$, las fuerzas normalizadas en el eje Z resultaron ser considerablemente menores, sin ser el área transversal de estos elementos lo suficientemente mayor (respecto a los otros con falla torsional) como para explicar tal disminución al normalizar. Luego, la aminoración en las fuerzas se debe a la forma de pandeo del perfil, ya que cuando $\lambda_{G/L} < 4$ la torsión se desarrolló completamente en el plano incluso hasta el momento de alcanzar la tensión última, sin la aparición de una rótula plástica. En base a esto, se presume que es la ausencia de deformaciones laterales lo que explica que las fuerzas en este eje sean menores en relación a la carga de fluencia, ya que la conexión se encuentra fundamentalmente aplastada.

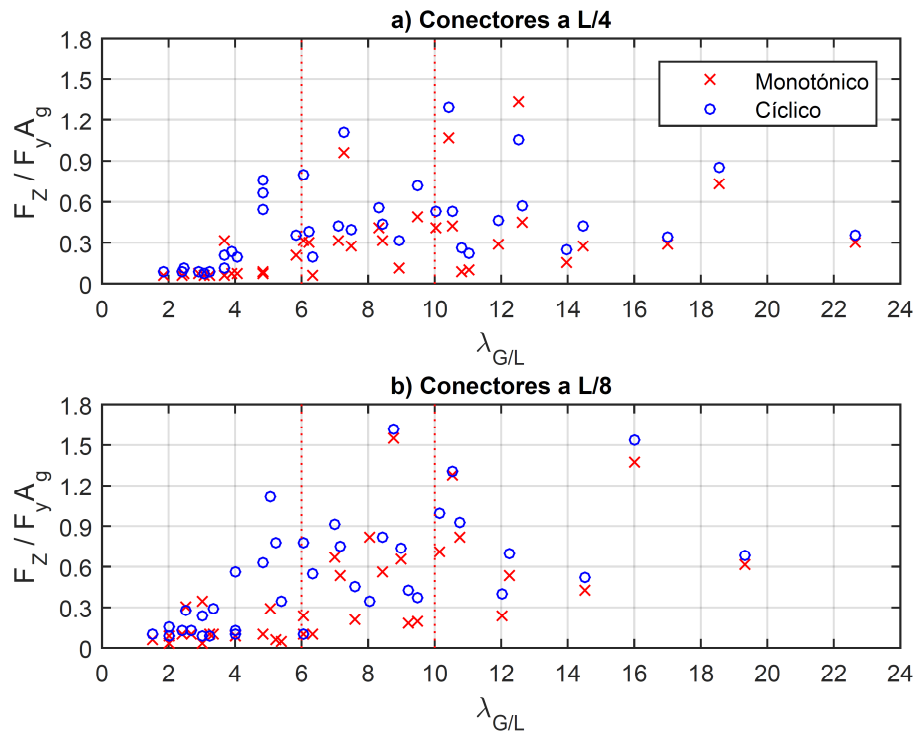


Figura 5.16 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset en la dirección Z, normalizadas por $F_y A_g$.

5.7.- Fuerzas máximas en la intersección

El punto de cruce de las diagonales puede ser en muchos casos el de mayor vulnerabilidad del marco, fundamentalmente debido a la baja importancia que suele darse a las fuerzas que puedan desarrollarse en ese sector. Con el objetivo de determinar la significancia de dichos esfuerzos, a continuación se entregan las fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos, considerando la descomposición dada por los ejes de la Figura 4.23.

En primer lugar, para el eje X (Figura 5.17) se observa que las menores fuerzas (en relación a $F_y A_g$) se dan en el rango de perfiles de menor relación de esbeltez con falla torsional (bajo el 10% de $F_y A_g$), mientras que las mayores se dan en perfiles con falla por flexión, alcanzando en el peor caso el 50% de la carga de fluencia. Cabe distinguir que los valores aumentaron considerablemente al incrementar el número de conectores, con un promedio de un 130%, acrecentándose la diferencia en los perfiles más esbeltos.

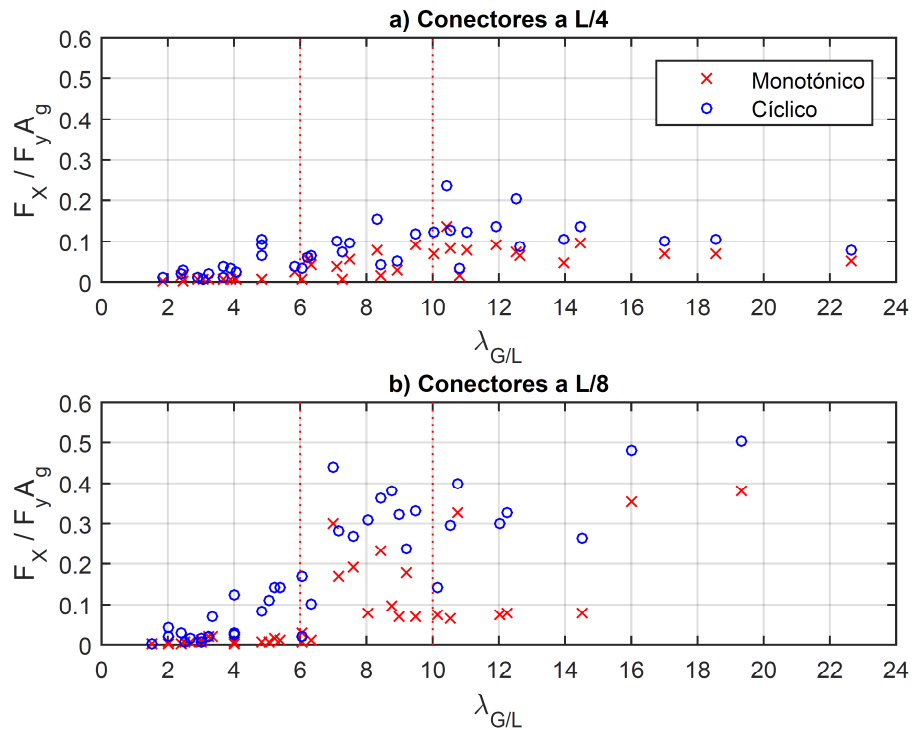


Figura 5.17 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección X, normalizadas por $F_y A_g$.

En la Figura 5.18, puede verse que las fuerzas en el eje Y normalizadas no muestran una variación significativa con la esbeltez y el modo de falla. Para el caso con conectores distanciados a L/4 las fuerzas originadas por carga cíclica llegaron a un máximo del 4% de P_y , mientras que con un mayor número de conectores el caso más desfavorable es de un 6%.

Finalmente, al normalizar las fuerzas en el eje Z (Figura 5.19), puede constatar que los valores ante carga cíclica son decrecientes con el aumento de $\lambda_{G/L}$, vale decir, las relaciones máximas (4%-8% de $F_y A_g$) se dan para elementos con falla torsional y las menores (aproximadamente un 2% de $F_y A_g$) para elementos con falla flexural.

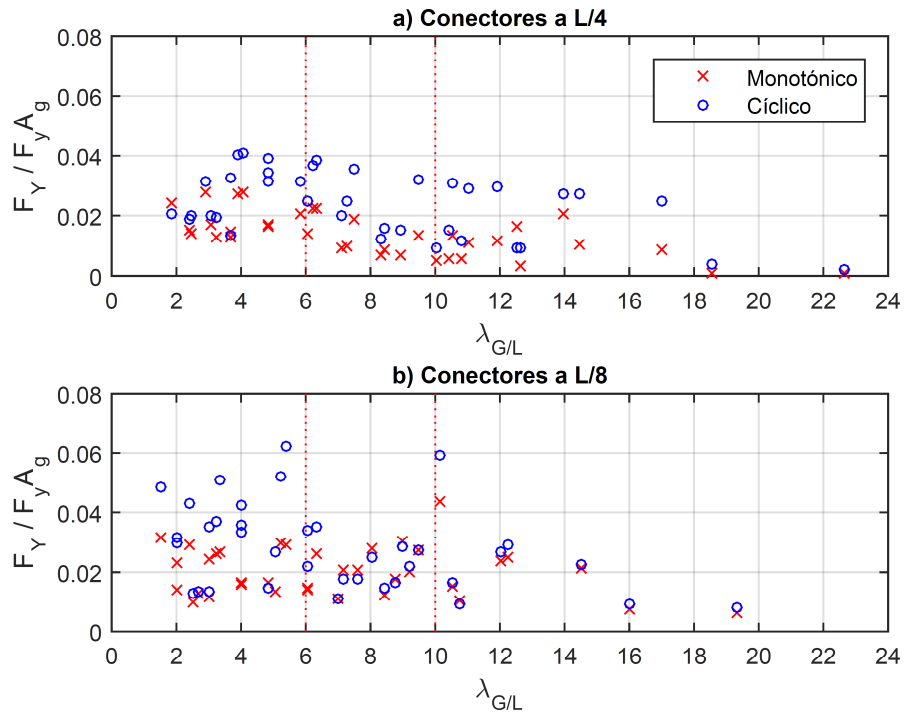


Figura 5.18 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Y, normalizadas por $F_y A_g$.

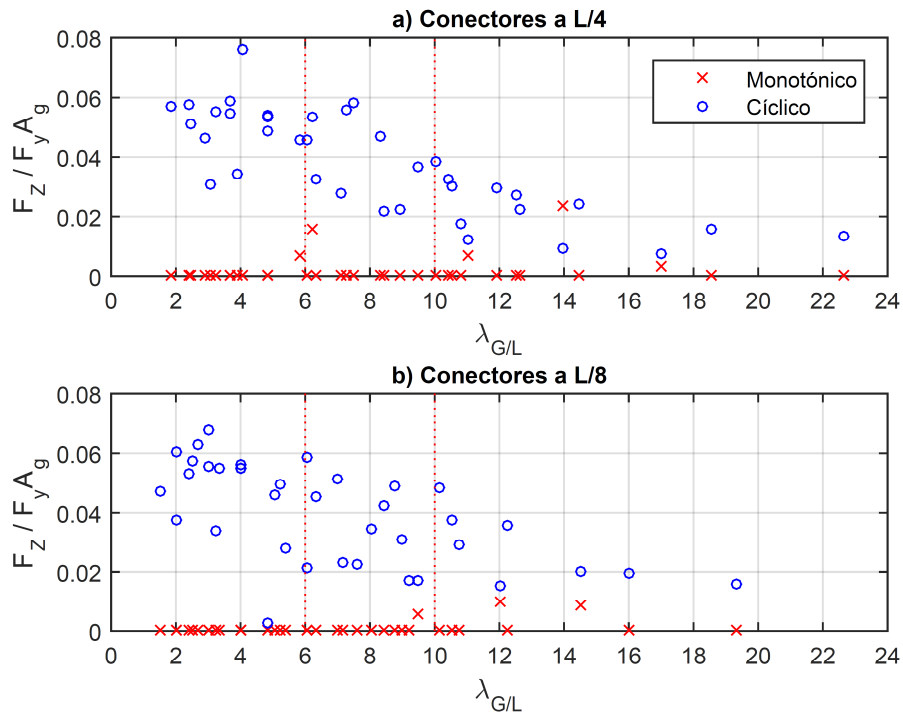


Figura 5.19 - Fuerzas máximas en la intersección de los arriostramientos en la dirección Z, normalizadas por $F_y A_g$.

Capítulo VI: Conclusiones

6.1.- Conclusiones generales

El objetivo del presente trabajo fue identificar la vinculación entre los modos de falla de perfiles XL sometidos a carga cíclica y diversos parámetros, como las propiedades geométricas, las capacidades a la tracción y compresión, la pérdida de capacidad ante altos requerimientos de ductilidad y las fuerzas en las conexiones de los extremos y en la intersección de las diagonales. Además, se compararon los efectos de utilizar dos distanciamientos de interconectores: cada un cuarto y un octavo del largo total del arriostramiento. Para proceder, los elementos fueron analizados en el software de elementos finitos Ansys Workbench 15. Los perfiles estudiados variaron en altura de 80 a 400 mm, espesores de 4 a 16 mm y largos de 3 a 6 m, abarcando un gran rango de configuraciones con alta probabilidad de ser empleados en la práctica.

En efecto, datos estadísticos otorgados por el profesor Ramón Montecinos (2016) y que recopilan información de 20 estructuras y aproximadamente 300 diagonales (25% de ellas XL), establecen que la esbeltez media utilizada es $\lambda=80$, muy cercano al valor medio de $\lambda=77$ de este estudio. Además, establece rangos de esbelteces y su porcentaje de utilización, los cuales también se asemejan con los de la gama de arriostramientos analizados en este trabajo (ver Tabla 6.1).

Tabla 6.1 – Porcentaje de utilización de arriostramientos por rango de esbeltez: comparación entre datos estadísticos otorgados por el Prof. Ramón Montecinos (2016) y este estudio.

	Rango	Estudio estadístico	Este estudio
Esbeltez baja	$\lambda \leq 50$	20%	26%
Esbeltez media	$51 \leq \lambda \leq 100$	50%	46%
Esbeltez alta	$101 \leq \lambda$	30%	28%
Esbeltez promedio		80	77

La principal motivación del estudio fue mejorar el desempeño general de los perfiles XL ante sismos de gran intensidad, en vista y consideración de la alta vulnerabilidad que mostraron durante el terremoto del Maule del 2010, donde se registraron daños de diversa gravedad en estos elementos y sus conexiones (Montecinos et al. 2012). Dado esto, la utilización de perfiles XL como arriostramientos de naves industriales ha mermado su popularidad, a pesar de las grandes ventajas no estructurales que poseen: fácil y rápida accesibilidad a las superficies para mantención (importante para la industria alimentaria, por ejemplo), conexiones ligeras, montaje sencillo, entre otras.

En general, se cuenta con un cumplimiento adecuado de los objetivos por cuanto pudieron establecerse claras relaciones entre la geometría del perfil y su modo de falla. Adicionalmente se identificaron relaciones que, dada la relación entre la esbeltez y la compacidad de la sección transversal, permiten estimar de antemano el nivel de esfuerzos en las placas gusset y en el punto de cruce, así como la deformación inelástica acumulada previo a la falla, la cantidad de decaimiento en la capacidad compresiva y las capacidades máximas para ambos sentidos de carga. Por último, en algunos de los tópicos antes mencionados se registraron diferencias importantes al variar la cantidad de interconectores o el tipo de carga.

6.2.- Modelación en elementos finitos

Para la modelación en el software ANSYS, se adoptaron una serie de simplificaciones. En primer lugar, la placa gusset no fue modelada en su extensión total, sino que sólo hasta una distancia de dos veces el espesor de la misma más allá del perfil. Si bien esta adaptación otorga espacio suficiente para permitir rotaciones inelásticas en la placa (de darse el caso), excluye la unión entre ésta y la columna del marco. Además, la altura de la placa gusset se determinó de modo de completar el ancho de Whitmore, el cual indica que utilizar abanicos de 30° hacia fuera de las líneas de conexión es suficiente para asegurar que las fuerzas provenientes del arriostamiento que controlan el diseño del espesor de la placa se encuentren dentro. En la Figura 6.1 se muestran las isóneas de tensión normal (eje X) desarrolladas en la placa gusset para una situación de tracción en la riostra. Puede verse que éstas describen ángulos de aproximadamente 30° y que las tensiones máximas se dan en la zona central, de lo que se desprende que la selección de altura fue adecuada. Una distribución semejante de tensiones es observada para el caso en que la diagonal es comprimida.

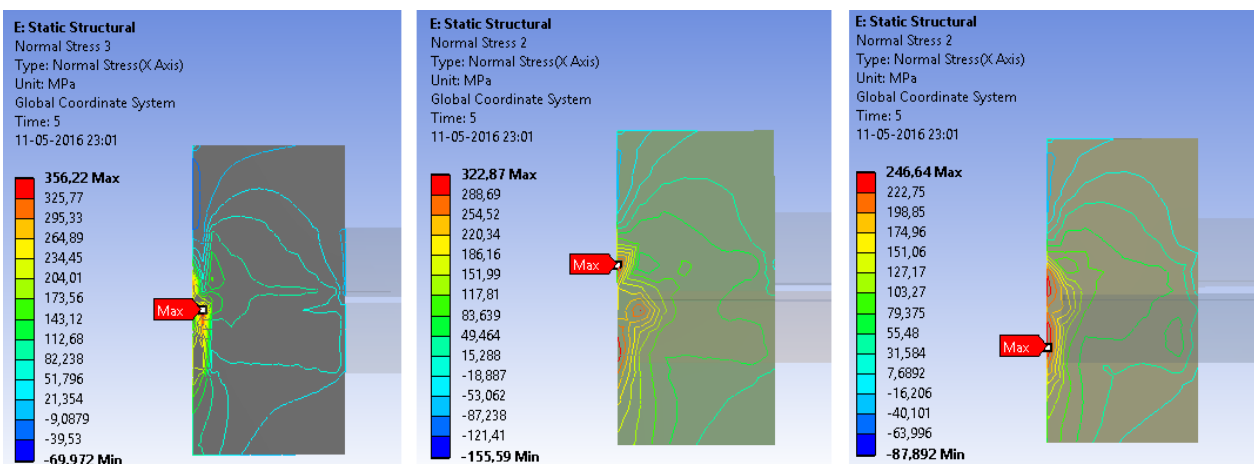


Figura 6.1 – Trayectorias de tensión ante tracción del arriostamiento.

Para implementar la disposición en cruz de las diagonales, se permitió sólo el desplazamiento longitudinal del conector central, que representa el punto de intersección. Los movimientos fuera del plano fueron restringidos en virtud de la norma NCh2369, que en su punto 8.3.4 establece que en las diagonales en X el punto de cruce se puede considerar fijo en la dirección perpendicular al plano del marco. Por otra parte, los movimientos transversales al eje longitudinal en el plano (eje Y de la conexión, ver Figura 4.23) fueron restringidos para facilitar la convergencia de los análisis, muchas veces imposibilitada de no efectuar tal restricción. Luego, la placa central describía una trayectoria recta durante la aplicación de la carga. Liberar el movimiento en el eje Y supondría que no hay aporte de rigidez por parte de la diagonal contraria, por lo que imposibilitar esa dirección de desplazamiento resulta ser la mejor aproximación posible al caso real.

Se estudiaron tres niveles de mallado teniendo como parámetro la relación entre el área bidimensional de los elementos *brick* y el área longitudinal proyectada de las riostras. El criterio de elección se basó en que se obtuvieron resultados muy similares al caso de mayor refinamiento pero con un requerimiento computacional menor, expresado en un 59% de reducción en el número de nodos, en promedio.

6.3.- Modos de falla

Respecto a los modos de falla, en primer lugar cabe señalar que en un 9% de los casos, perfiles que fallaron por flexión ante carga monotónica lo hicieron por flexotorsión ante sollicitación cíclica. Esto no ocurrió para el pandeo torsional, donde se mantuvo el tipo de falla independiente de la carga.

No obstante, los modos de falla logran clasificarse y vincularse adecuadamente con las propiedades geométricas del perfil al definir $\lambda_{G/L}$, correspondiente a la relación entre la esbeltez mayor del perfil y la compacidad de su sección transversal. Este término fue implementado por Molina (2014), que determinó que los perfiles con una relación de esbelteces mayor a 5.5 tendieron a fallar por flexión, mientras que los con una relación menor lo hicieron por torsión.

En este trabajo se obtuvo un resultado similar para la transición a fallas torsionales: se estableció que perfiles en el rango $\lambda_{G/L} \leq 6$, fallaron por torsión; los pertenecientes al rango $6 < \lambda_{G/L} \leq 10$, fallaron por flexotorsión; mientras que los con un valor $\lambda_{G/L} > 10$, lo hicieron por flexión. En general, existió una transición marcada entre la deformada y distribución de tensiones para perfiles con falla flexotorsional y torsional, haciendo inconfundible su clasificación. En cambio, la transición entre flexión y flexotorsión es menos clara, especialmente para relaciones de esbelteces entre 8 y 10.

También se determinó que perfiles con falla torsional pero con una relación de esbelteces menor a 4 presentaron un desempeño ventajoso, por cuanto su capacidad a la compresión prácticamente no decae con el aumento de la deformación, son en general más dúctiles y además

registran fuerzas de menor magnitud en sus conexiones en relación a su capacidad a la fluencia. La diferencia apreciable durante la aplicación de la carga para los elementos en este rango es que no se formó una rótula plástica en la mitad de los largos no arriostrados, a diferencia de los perfiles con $\lambda_{G/L} > 4$, donde aquello sí ocurre. La formación de la rótula plástica conlleva a que cada vez se requiera una menor carga para inducir mayores desplazamientos laterales, por medio de la rotación inelástica en dicho punto. Además, la rótula representa un punto donde se acumulan grandes tensiones y deformaciones, por lo que su aparición supone reducir la cantidad de deformación inelástica que el perfil es capaz de sobrellevar previo a su falla.

Los planos en torno a los cuales se describió la falla variaron al aumentar el número de conectores; cuando éstos se distancian cada $L/4$ es la esbeltez en el eje U-U la mayor y el pandeo se desarrolla en torno a este eje. Al disminuir el espaciamiento, el perfil se hace menos esbelto en el eje U-U, quedando por bajo a los valores para el eje V-V. Sin embargo, para estos casos el eje de pandeo se da en torno al eje geométrico vertical (Y-Y), lo cual se explica por la gran proximidad entre conectores, que al tratarse de placas presentan gran prevalencia para flectarse en torno al eje solidario a su largo mayor. Esto asemeja a lo que ocurriría en el caso de tener un único conector continuo del largo total de la diagonal.

Cabe destacar que las variables estudiadas en este trabajo pueden relacionarse con los modos de falla producto de la gran claridad con que éstos dependen de las propiedades de esbeltez del perfil; sin embargo, no todas dependen de manera directa del modo de pandeo. Por ejemplo, las fuerzas máximas de tracción y compresión dependen de cuán robusto es el elemento, mientras que el nivel de ductilidad y las fuerzas normalizadas en las conexiones mostraron tener una mayor relación con el modo de falla y la presencia o ausencia de deformaciones laterales.

6.4.- Ductilidad

Ante sismos severos resulta imperativo asegurar la continuidad en la operación industrial. Para esto, las estructuras diseñadas deben tener un exceso de capacidad o bien contar con que sus elementos resistentes, anclajes y conexiones sean lo suficientemente dúctiles para soportar las incursiones en el rango no elástico. Adicionalmente, el diseño debe favorecer que el daño se produzca en zonas accesibles y visibles. En marcos arriostrados solicitados sísmicamente, el pandeo de las diagonales será probablemente la primera patología observada, por lo cual diagonales que se fracturan prematuramente tras pandearse podrían comprometer la estabilidad de la estructura.

En base a lo anterior, se determinaron las deformaciones acumuladas de cada perfil hasta alcanzar la tensión última. Los resultados mostraron grandes diferencias según el distanciamiento de interconectores; para el caso de separación a $L/4$, la deformación acumulada promedio fue $66.7\delta_y$, mientras que para una separación a $L/8$ fue $51.6\delta_y$, es decir más de un 20% de disminución. Dicha diferencia se acentúa con el hecho cualitativo de que, comparando par a par

cada perfil, en todos los casos la deformación acumulada previa a la tensión última fue mayor para conectores en los cuartos.

En general, los perfiles con falla flexotorsional fueron los menos dúctiles para ambos distanciamientos de planchuelas, mientras que los con falla torsional mostraron altas deformaciones acumuladas, especialmente si $\lambda_{G/L} < 4$. Por otra parte, los con falla flexural fueron significativamente más dúctiles al tener conectores en los cuartos (56% de aumento en las deformaciones acumuladas en promedio), respecto a un distanciamiento de $L/8$.

La mayor fragilidad al aumentar el número de conectores se vio expresada en la presencia de pandeos locales, fundamentalmente en perfiles con falla flexotorsional. Estas inestabilidades se observaron sólo en perfiles con una compacidad de la sección transversal mayor a un 80% del valor máximo establecido por la NCh2369 (fórmula 2.2), vale decir, mayores a $0.36\sqrt{E/F_y}$. Este valor es prácticamente igual al exigido por la AISC341 (2010) para ángulos en elementos de moderada ductilidad ($0.38\sqrt{E/F_y}$), lo cual indica que este límite debe ser aplicado en una configuración de conectores cada $L/8$, recordando que tal distribución surge de los requerimientos de dicha norma.

6.5.- Capacidades y degradación

Determinar las fuerzas reales que son capaces de transmitir las diagonales resulta de gran importancia, ya que con éstas debe realizarse el diseño de las conexiones de tal manera que la falla se desencadene en el arriostamiento antes que en la conexión. En muchas ocasiones dichas fuerzas son mayores a las establecidas en códigos de diseño, por lo cual utilizar capacidades nominales podría resultar en conexiones sub-dimensionadas.

Al obtener la tracción máxima en los arriostamiento, se determinó que los valores fueron siempre mayores a la carga de fluencia, siendo aproximadamente un 110% de $F_y A_g$ para perfiles con falla flexural y flexotorsional, y hasta un 130% de $F_y A_g$ para los de falla torsional. Para la compresión, la fuerza máxima fue mayor a $F_y A_g$ principalmente en perfiles con falla por torsión, producto de la simetría en la respuesta al no haber pérdida de capacidad. Es probable que exista una sobrevaloración en los valores de C_u debido a la implementación de un historial de carga que lleva al perfil a fluir y experimentar cierto endurecimiento antes que a pandearse. En efecto, los valores de C_u originados por carga cíclica son en promedio un 11% mayores a los obtenidos con carga monotónica. Además, al comparar las compresiones máximas con la capacidad nominal, se obtienen relaciones de hasta un 150% para conectores a $L/4$ y hasta un 180% para conectores a $L/8$.

En todos los perfiles con una relación de esbelteces mayor a 4 se registró una pérdida de la capacidad a la compresión conforme aumentaba la deformación impuesta en el análisis. En promedio, puede esperarse que la capacidad a compresión en los ciclos previos a la falla se

encuentre en torno al 60% del máximo. Esta degradación fue levemente menor en perfiles con conectores a $L/8$, pero no resulta ser una ventaja considerando que la tensión última en todos los casos se alcanzó para deformaciones acumuladas menores.

6.5.- Fuerzas en las conexiones

Las fuerzas en las conexiones aumentaron significativamente al comparar la sollicitación cíclica con la monotónica, especialmente para el eje Z de la unión entre el ángulo y la placa y para eje X de la intersección. Aumentar la cantidad de conectores también suscitó que las fuerzas en estos ejes fueran las principales alteradas, para el eje Z de la conexión de los extremos el aumento promedio fue del 37%; mientras para el eje X del punto central el aumento promedio fue de un 130%. Cabe destacar que estos ejes son además los que suponen una mayor demanda para cada conexión.

El punto 8.5.2 de la norma NCh2369 establece que las conexiones de las diagonales sísmicas deben ser diseñadas para resistir el 100% de la capacidad a tracción de la sección bruta de éstas. Al calcular las fuerzas en la conexión con el gusset normalizadas por $F_y A_g$ (ver Figura 5.14 Figura 5.15 y Figura 5.16), puede verse que en el eje Z se excede la carga de fluencia en tres casos con conectores a $L/4$ y en cuatro casos con conectores a $L/8$, fundamentalmente para modos de falla de flexión y flexotorsión. Situación similar ocurre para las fuerzas en el eje X de la conexión de la intersección, ya que tienden a aumentar considerablemente para estos modos de falla, principalmente en la configuración con más conectores.

Por lo general, las fuerzas en los ejes que mostraron situaciones más desfavorables (ejes X y Z en la conexión ángulo-placa y eje X de la intersección) tendieron a ser mayores en los perfiles con fallas flexurales y flexotorsionales. Luego, puede concluirse que son dichos modos los más vulnerables a sufrir fallas en sus conexiones.

A pesar de las fuerzas elevadas en las conexiones de perfiles con falla por flexión, su utilización resulta conveniente considerando la menor distorsión que padecen los ángulos, lo que facilita su eventual reparación.

Por último, se destaca que las fuerzas en el eje Y de la placa y en los ejes Y y Z de la intersección, las fuerzas son significativamente menores, alcanzando en el peor de los casos un 8% de la carga de fluencia.

6.6.- Efecto del número de conectores intermedios

Al analizar los resultados, puede concluirse que utilizar una configuración con una elevada cantidad de interconectores resulta contraproducente en prácticamente todas las variables. A continuación se resumen los principales efectos observados producto de disminuir a $L/8$ el espaciamiento, algunos de los cuales ya fueron mencionados y explicados en este capítulo.

- El plano de pandeo cambió, tornándose al eje Y-Y.
- Existe probabilidad de pandeos locales, principalmente en perfiles en el rango $6 < \lambda_{G/L} < 10$ con relaciones b/t mayores al 80% del valor límite de la NCh 2369.
- Reducción en ductilidad. El aumento de interconectores hace al perfil un 20% más frágil en términos de la deformación acumulada que alcanza.
- No hay influencia en la capacidad a la tracción.
- Aumento en un 10% de la carga máxima de compresión en relación a la capacidad nominal. La diferencia es más pronunciada en los perfiles más esbeltos.
- Menor pérdida de la capacidad compresiva al aumentar la deformación; sin embargo, esto se ve opacado por la alta fragilidad.
- En la placa gusset, las fuerzas en el eje X aumentan en promedio un 8%; en el eje Y disminuyen un 6% y en el eje Z aumentan un 37%.
- En la intersección, las fuerzas en el eje X aumentan considerablemente, un 130% en promedio; en el eje Y aumentan un 30% y en el Z un 14%.

6.7.- Contribuciones y recomendaciones

Al no existir investigaciones anteriores sobre el comportamiento cíclico de perfiles XL, este trabajo contribuye en originar una base de datos que pueda ser utilizada con posteridad para la calibración de nuevos estudios de elementos finitos sobre el tema, o bien de ensayos experimentales.

Además, a partir de los resultados y el análisis de éstos es posible contribuir con algunas recomendaciones de diseño, principalmente:

- En disposiciones en cruz, distanciar los interconectores a $L/4$ del perfil resulta suficiente para satisfacer los requerimientos de perfiles armados de la AISC360 (2010). Además, con esta distribución se aumenta la ductilidad del perfil y se disminuye la relación entre los esfuerzos en las conexiones y la carga de fluencia.
- Evitar la implementación de perfiles con modo de falla flexotorsional; esto es, en un rango $6 < \lambda_{G/L} \leq 10$. Dichos perfiles demostraron tener una menor capacidad de deformación. Además, tienen la desventaja de experimentar altas deformaciones laterales producto de la

influencia del modo de flexión, y la distorsión en las alas de los ángulos por la influencia de la torsión, lo cual dificulta eventuales reparaciones.

- En caso de emplear los requerimientos para elementos de ductilidad moderada a alta de la AISC341 (2010) para determinar el número de interconectores, se debe seleccionar un perfil con una relación ancho-espesor que esté bajo el valor límite de dicha norma (que representa aproximadamente un 80% del establecido en la NCh2369 para ángulos laminados)
- Si se necesita restringir al máximo las deformaciones laterales, por ejemplo para proteger tabiquería, tuberías u otros elementos, se recomienda utilizar perfiles con una relación de esbeltez global-local menor o igual a 4.
- Al momento de diseñar por capacidad la conexión, se debe tener en cuenta de que es posible que el arriostamiento transmita fuerzas superiores a las predichas por códigos de diseño. En este estudio, las fuerzas máximas de tracción variaron entre un 110 y un 130% de $F_y A_g$. Por su parte, las de compresión variaron entre 40 y un 120% de $F_y A_g$.
- Tener en consideración que en la conexión entre los ángulos y la placa gusset las mayores fuerzas se esperan para los ejes X y Z. Para la conexión de la intersección, las fuerzas de mayor demanda ocurren en el eje X.

6.8.- Limitaciones

Una de limitaciones de este estudio es que las diagonales fueron modeladas como elementos aislados, por lo tanto los comportamientos registrados no pueden extrapolarse de manera directa al desempeño global del marco. Por ejemplo, en la estimación de las fuerzas en la intersección sólo se toma en cuenta el efecto de una diagonal, considerando la otra mediante condiciones de restricción al movimiento fuera del plano en el punto de cruce; esto representa una aproximación, ya que es posible que existan influencias provenientes del modo de pandeo de la diagonal contraria, tal como se demostró que ocurre en este trabajo.

El tipo de acero utilizado fue ASTM A36 tanto para perfiles como para placas de conexión, donde además las relaciones constitutivas fueron aproximadas a curvas bilineales. Por lo demás, tampoco se incluyó el efecto de las tensiones residuales provenientes, por ejemplo, del proceso de laminado en la fabricación.

Por otro lado, Tremblay (2002) evidenció diferencias en las deformaciones necesarias para la ocurrencia del pandeo en los arriostamientos dependiendo de si el historial cíclico iniciaba en tracción o en compresión. En este trabajo se utilizó un historial que impone una deformación δ_y inicialmente en tracción, por lo que los elementos se pandearon después de haber alcanzado la fluencia, lo cual no siempre ocurre en la práctica.

6.9.- Futuras líneas de investigación

Son muy pocas las investigaciones previas que se centran en el comportamiento de perfiles XL en particular, por lo que cualquier tipo de investigación al respecto representará un aporte en el mejoramiento del desempeño cíclico de este tipo de sección.

Incluyendo este trabajo, son dos memorias de título de la Facultad las que han estudiado los modos de falla en perfiles XL a la fecha, ambas de carácter analítico. Por consiguiente, urge poder validar los resultados de ambas mediante ensayos experimentales, idealmente incluyendo la totalidad del marco arriostrado, pudiendo realizarse un trabajo conjunto que se centre en las conexiones viga-columna.

Un aspecto sugestivo de este trabajo fue el comportamiento mostrado por la gama de menor esbeltez de perfiles con falla torsional, identificada por un valor $\lambda_{G/L} \leq 4$. Es posible seguir profundizando en sus cualidades cíclicas; particularmente la casi nula degradación de su capacidad a la compresión, el no experimentar desplazamientos laterales y la baja fuerza en las conexiones en relación a su carga de fluencia, pudiendo proponerse como una alternativa económica a las riostras con pandeo restringido (BRB).

Además, cabe destacar que los resultados están condicionados por la disposición en cruz de los arriostramientos, por lo cual es posible desarrollar nuevos estudios en elementos finitos que incluyan otras disposiciones de las riostras en el marco, como diagonal única, en V o Chevron; considerando también agregar más tipos de sección, para ver si las tendencias encontradas en este trabajo obedecen sólo a perfiles XL o pueden generalizarse.

Bibliografía

- [1] Ansys Inc., Contact Technology Guide, Canonsburg, PA., 2009.
- [2] American Institute of Steel Construction, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC 341-10, Chicago, Illinois. 2010.
- [3] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10, Chicago, Illinois. 2010.
- [4] Building Seismic Safety Council. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures, FEMA P-750, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [5] López-Almansa, F., Castro-Medina, J., Oller, S., A numerical model of the structural behavior of buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 2012.
- [6] Molina Contreras, J., Modos de falla predominantes en perfiles XL de acero estructural, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2014.
- [7] Montecinos, R., Herrera, R., Verdugo, A., Beltran, J.F., “Estructuras industriales”, Libro Mw=8.8 Terremoto en Chile 27 de febrero 2010, Capítulo 10, 211-239. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2012.
- [8] Naguipour, M., Abdollahzadeh, G., Shokri, M. Analysis and Design Procedure of Corner Gusset Plate Connection in BRBFs, *Iranica Journal of Energy and Environment*, 2013.
- [9] NCh 2369, Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, Santiago, Chile, Instituto Nacional de Normalización, 2003.
- [10] Schepers, J.A. The interconnection of starred angle compression members. A thesis presented to the University of Windsor in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Applied Science in Civil Engineering, University of Windsor, Ontario, Canada, 1983.
- [11] Tamboli, Akbar R. Handbook of structural steel connection design and details. McGraw-Hill, 1999.
- [12] Thornton, William A., Lini, C. The Whitmore section: how to use the Whitmore method for tension and compression strength checks. *Modern Steel Construction*, p. 52-56, July 2011.
- [13] Tremblay, R., et al. Testing and design of buckling restrained braces for Canadian application. En *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. 2004.
- [14] Tremblay, R. Inelastic seismic response of steel bracing members. *Journal of Constructional Steel Research* 58:5-8, 665-701, 2002.
- [15] Vergara del Pozo, R. Manual de diseño para ángulos estructurales L-AZA. Gerdau Aza, Santiago, Chile. 2004
- [16] Whitmore, Richard E. Experimental investigation of stresses in gusset plates. Masters Thesis, University of Tennessee Engineering Station Bulletin No. 16, Knoxville, 1952.

**ANEXO A:
CATÁLOGO DE PERFILES**

Tabla A.1 – Catálogo y propiedades geométricas de perfiles utilizados.

Designación	Dimensiones		Área	Inercia	Eje U-U						Eje V-V		Perfil Individual			
	B	E			A	I	d=6	d=8	d=10	d=12	d=14	I	i	i min	x0	Cw
mm	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ⁴	cm	cm	cm	cm ⁶	cm ⁴
XL 80	80	4	5.87	19.7	2.23	2.36	2.50	2.63	2.76	14.6	1.58	0.74	1.15	5.3	0.32	
80	80	5	7.18	25.6	2.29	2.42	2.56	2.69	2.82	17.6	1.56	0.72	1.08	6.3	0.63	
80	80	6	8.42	31.8	2.34	2.48	2.62	2.75	2.88	20.2	1.55	0.69	1.02	7.3	1.07	
XL 100	100	4	7.47	37.5	2.63	2.76	2.90	3.03	3.16	29.5	1.99	0.94	1.5	10.6	0.41	
100	100	5	9.18	48.2	2.69	2.82	2.95	3.08	3.21	35.7	1.97	0.92	1.43	12.9	0.79	
100	100	6	10.8	59.5	2.74	2.88	3.01	3.14	3.27	41.5	1.96	0.90	1.37	14.9	1.35	
XL 120	120	5	11.2	81.3	3.09	3.22	3.35	3.48	3.61	63.4	2.38	1.13	1.79	22.8	0.96	
120	120	6	13.2	99.9	3.14	3.28	3.41	3.54	3.67	74.0	2.37	1.11	1.72	26.6	1.64	
XL 130	130	6	14.4	126	3.34	3.48	3.61	3.74	3.87	95.3	2.57	1.21	1.9	34.3	1.79	
XL 200	200	8	29.9	599	4.87	5.00	5.13	5.26	5.39	472	3.97	1.88	3	169.9	6.55	
XL 250	250	10	46.7	1460	5.98	6.11	6.24	6.37	6.50	1150	4.97	2.36	3.75	414.0	16.00	
XL 300	300	12	67.3	3030	7.10	7.23	7.36	7.49	7.62	2390	5.96	2.83	4.5	860.4	33.18	
XL 400	400	16	120	9590	9.34	9.47	9.60	9.73	9.86	7550	7.95	3.77	6	2718.0	104.86	

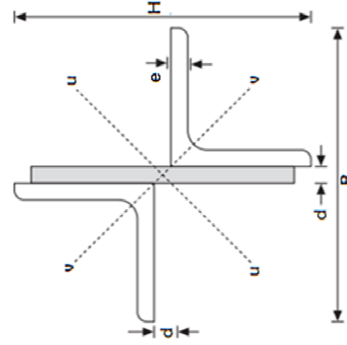


Figura A.1 – Ejes del perfil.

**ANEXO B:
GEOMETRÍA DE CONEXIONES**

Tabla B.1 – Geometría de las conexiones.

XL	Perfil				Gusset				Conectores		
	H mm	B mm	e mm	A cm ²	Lg mm	H1 mm	Hg mm	t mm	Lc mm	Hc mm	t mm
XL	80	80	4	5.87	92	47	180	6	53	80	6
XL	80	80	5	7.18	92	47	180	6	53	80	6
XL	80	80	6	8.42	92	47	180	6	53	80	6
XL	100	100	4	7.47	112	58	222	6	67	100	6
XL	100	100	5	9.18	112	58	222	6	67	100	6
XL	100	100	6	10.8	112	58	222	6	67	100	6
XL	120	120	5	11.2	132	70	266	6	80	120	6
XL	120	120	6	13.2	132	70	266	6	80	120	6
XL	130	130	6	14.4	146	76	290	8	87	130	8
XL	200	200	8	29.9	216	116	440	8	133	200	8
XL	250	250	10	46.7	270	145	550	10	167	250	10
XL	300	300	12	67.3	324	174	660	12	200	300	12
XL	400	400	16	120	428	231	876	14	267	400	14

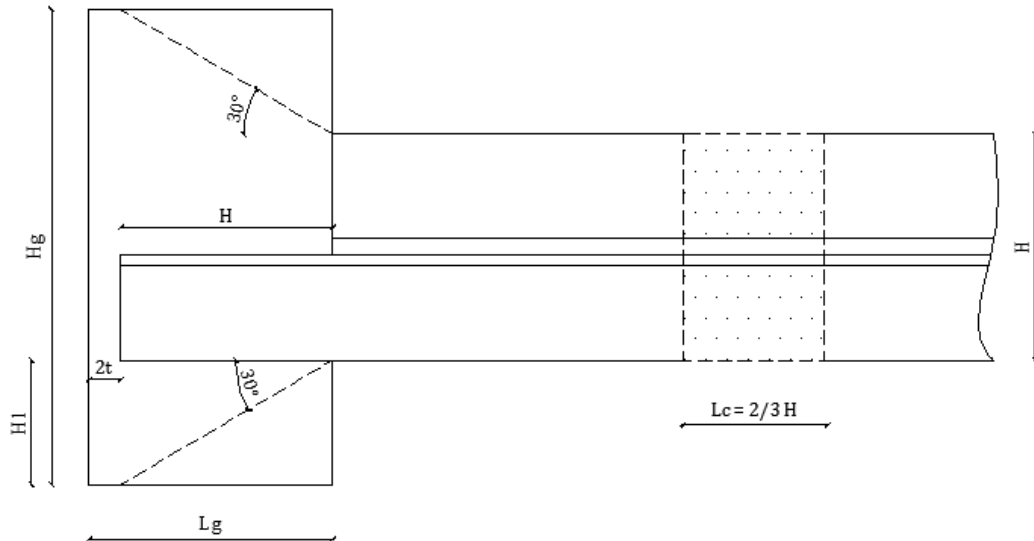


Figura B.1 – Geometría general de la placa gusset y conector intermedio.

**ANEXO C:
RESULTADOS GENERALES**

Tabla C.1 – Características generales de los elementos analizados. Conectores a L/4.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	λ_{U-L}	λ_{V-Y}	b/t	$\lambda_{G/L}$	$(b/L)_{hor}$	FVAg [kN]	Pn [kN]	δ_y [mm]	Análisis monotónico			Análisis cíclico		
											Modo de falla	Eje	Modo de falla	Eje	Modo de falla	Eje
XL80x4	5.87	300	110.38	94.94	10.00	11.04	0.79	146.75	76.9	1.8	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	70.7
XL80x5	7.18	300	111.48	96.15	8.00	13.94	0.63	179.5	92.9	1.8	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	70.7
XL80x6	8.42	300	113.23	96.77	6.67	16.99	0.52	210.5	106.7	1.8	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	70.7
XL100x4	7.47	300	89.11	75.38	12.50	7.13	0.98	186.75	122.6	1.6	Flexotorsión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	70.7
XL100x5	9.18	300	89.52	76.14	10.00	8.95	0.79	229.5	150.1	1.8	Flexión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	68.5
XL100x6	10.8	300	90.25	76.53	8.33	10.83	0.65	270	175.3	2	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	53.5
XL120x5	11.2	300	74.93	63.03	12.00	6.24	0.94	280	207.9	2.1	Flexotorsión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	54.4
XL120x6	13.2	300	75.22	63.29	10.00	7.52	0.79	330	244.5	2.1	Flexión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	52.5
XL130x6	14.4	300	68.55	58.37	10.83	6.33	0.85	360	280.6	2.1	Flexotorsión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	53.5
XL200x8	29.9	300	45.57	37.78	12.50	3.65	0.98	747.5	581.9	2.1	Torsión	-	Torsión	-	No	68.5
XL250x10	46.7	300	36.40	30.18	12.50	2.91	0.98	1167.5	909.6	1.8	Torsión	-	Torsión	-	No	55.3
XL300x12	67.3	300	30.34	25.17	12.50	2.43	0.98	1682.5	1310.3	1.5	Torsión	-	Torsión	-	No	84.0
XL400x16	120	300	22.89	18.87	12.50	1.83	0.98	3000	2344.4	1.6	Torsión	-	Torsión	-	No	70.7
XL80x5	7.18	400	148.64	128.21	8.00	18.58	0.63	179.5	55.6	2.4	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	84.0
XL80x6	8.42	400	150.98	129.03	6.67	22.65	0.52	210.5	62.9	1.9	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	84.0
XL100x4	7.47	400	118.82	100.50	12.50	9.51	0.98	186.75	88.4	2.4	Flexotorsión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	70.7
XL100x5	9.18	400	119.36	101.52	10.00	11.94	0.79	229.5	107.8	2.3	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	71.7
XL100x6	10.8	400	120.33	102.04	8.33	14.44	0.65	270	125.3	2.3	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	71.7
XL120x5	11.2	400	99.91	84.03	12.00	8.33	0.94	280	165.0	2.5	Flexotorsión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	53.5
XL120x6	13.2	400	100.30	84.39	10.00	10.03	0.79	330	193.6	2.7	Flexión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	53.5
XL130x6	14.4	400	91.40	77.82	10.83	8.44	0.85	360	231.2	2.8	Flexotorsión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	53.5
XL200x8	29.9	400	60.77	50.38	12.50	4.86	0.98	747.5	581.5	2.6	Torsión	-	Torsión	-	No	52.5
XL250x10	46.7	400	48.53	40.24	12.50	3.88	0.98	1167.5	908.9	2.6	Torsión	-	Torsión	-	No	68.0
XL300x12	67.3	400	40.45	33.56	12.50	3.24	0.98	1682.5	1309.2	2.7	Torsión	-	Torsión	-	No	68.5
XL400x16	120	400	30.53	25.16	12.50	2.44	0.98	3000	2342.6	2.6	Torsión	-	Torsión	-	No	68.5
XL120x5	11.2	500	124.88	105.04	12.00	10.41	0.94	280	122.5	2.5	Flexión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	84.0
XL120x6	13.2	500	125.37	105.49	10.00	12.54	0.79	330	143.4	2.3	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	84.0
XL130x6	14.4	500	114.25	97.28	10.83	10.55	0.85	360	180.2	2.9	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	70.7
XL200x8	29.9	500	75.96	62.97	12.50	6.08	0.98	747.5	550.5	2.8	Torsión	-	Torsión	-	No	55.3
XL250x10	46.7	500	60.66	50.30	12.50	4.85	0.98	1167.5	908.5	3	Torsión	-	Torsión	-	No	68.0
XL300x12	67.3	500	50.57	41.95	12.50	4.05	0.98	1682.5	1308.7	3	Torsión	-	Torsión	-	No	70.7
XL400x16	120	500	38.16	31.45	12.50	3.05	0.98	3000	2341.7	2.4	Torsión	-	Torsión	-	No	84.0
XL130x6	14.4	600	137.10	116.73	10.83	12.66	0.85	360	132.9	3.3	Flexión	U-U	Flexión	U-U	No	72.8
XL200x8	29.9	600	91.15	75.57	12.50	7.29	0.98	747.5	481.2	3.2	Flexotorsión	U-U	Flexotorsión	U-U	No	70.7
XL250x10	46.7	600	72.80	60.36	12.50	5.82	0.98	1167.5	881.6	3.7	Torsión	-	Torsión	-	No	40.4
XL300x12	67.3	600	60.68	50.34	12.50	4.85	0.98	1682.5	1308.5	3.3	Torsión	-	Torsión	-	No	68.0
XL400x16	120	600	45.79	37.74	12.50	3.66	0.98	3000	2341.2	3.4	Torsión	-	Torsión	-	No	55.3

Tabla C.2 – Características generales de los elementos analizados. Conectores a L/8.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	λ_{y-z}	λ_{y-y}	b/t	$\lambda_{e/L}$	$(b/t)_{nor}$	FyAg [kN]	Pn [kN]	δ_y [mm]	Análisis monotónico			Análisis cíclico		
											Modo de falla	Eje	Modo de falla	Eje	Modo de falla	Eje
XL80x4	5.87	300	80.25	94.94	10.00	9.49	0.79	146.8	91.0	2.1	Flexión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	40.4
XL80x5	7.18	300	79.53	96.15	8.00	12.02	0.63	179.5	110.0	2.1	Flexión	Y-Y	Flexión	Y-Y	No	40.4
XL80x6	8.42	300	79.29	96.77	6.67	14.52	0.52	210.5	128.1	1.8	Flexión	Y-Y	Flexión	Y-Y	No	53.5
XL100x4	7.47	300	66.52	75.38	12.50	6.03	0.98	186.8	138.2	1.8	Torsión	-	Torsión	-	No	54.4
XL100x5	9.18	300	65.84	76.14	10.00	7.61	0.79	229.5	168.8	2.3	Flexotorsión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	40.4
XL100x6	10.8	300	65.45	76.53	8.33	9.18	0.65	270.0	197.9	2.3	Flexotorsión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	No	40.4
XL120x5	11.2	300	56.31	63.03	12.00	5.25	0.94	280.0	220.4	2.2	Torsión	-	Torsión	-	No	40.0
XL120x6	13.2	300	55.91	63.29	10.00	6.33	0.79	330.0	266.9	2.1	Torsión	-	Torsión	-	No	40.4
XL130x6	14.4	300	50.68	58.37	10.83	5.39	0.85	360.0	293.7	2.2	Torsión	-	Torsión	-	No	52.5
XL200x8	29.9	300	34.56	37.78	12.50	3.02	0.98	747.5	581.9	2.1	Torsión	-	Torsión	-	No	52.5
XL250x10	46.7	300	27.65	30.18	12.50	2.41	0.98	1167.5	909.6	1.4	Torsión	-	Torsión	-	No	70.7
XL300x12	67.3	300	23.04	25.17	12.50	2.01	0.98	1682.5	1310.3	1.6	Torsión	-	Torsión	-	No	72.8
XL400x16	120	300	17.45	18.87	12.50	1.51	0.98	3000.0	2344.4	1.5	Torsión	-	Torsión	-	No	69.6
XL80x5	7.18	400	106.04	128.21	8.00	16.03	0.63	179.5	75.1	2.4	Flexión	Y-Y	Flexión	Y-Y	No	53.5
XL80x6	8.42	400	105.72	129.03	6.67	19.35	0.52	210.5	87.1	2.8	Flexión	Y-Y	Flexión	Y-Y	No	42.0
XL100x4	7.47	400	88.69	100.50	12.50	8.04	0.98	186.8	109.3	3.1	Flexotorsión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	40.4
XL100x5	9.18	400	87.79	101.52	10.00	10.15	0.79	229.5	132.9	2.8	Flexión	Y-Y	Flexión	Y-Y	Sí	40.0
XL100x6	10.8	400	87.27	102.04	8.33	12.24	0.65	270.0	155.5	3.1	Flexión	Y-Y	Flexión	Y-Y	No	40.4
XL120x5	11.2	400	75.08	84.03	12.00	7.00	0.94	280.0	192.6	2.5	Flexotorsión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	53.5
XL120x6	13.2	400	74.55	84.39	10.00	8.44	0.79	330.0	226.2	2.4	Flexotorsión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	No	52.5
XL130x6	14.4	400	67.57	77.82	10.83	7.18	0.85	360.0	261.1	2.9	Flexotorsión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	42.0
XL200x8	29.9	400	46.08	50.38	12.50	4.03	0.98	747.5	581.5	2.6	Torsión	-	Torsión	-	No	52.5
XL250x10	46.7	400	36.87	40.24	12.50	3.22	0.98	1167.5	908.9	2.7	Torsión	-	Torsión	-	No	52.5
XL300x12	67.3	400	30.72	33.56	12.50	2.68	0.98	1682.5	1309.2	2.3	Torsión	-	Torsión	-	No	68.0
XL400x16	120	400	23.27	25.16	12.50	2.01	0.98	3000.0	2342.6	2.5	Torsión	-	Torsión	-	No	68.5
XL120x5	11.2	500	93.85	105.04	12.00	8.75	0.94	280.0	156.0	2.5	Flexotorsión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	56.3
XL120x6	13.2	500	93.19	105.49	10.00	10.55	0.79	330.0	183.0	2.3	Flexión	Y-Y	Flexión	Y-Y	No	58.1
XL130x6	14.4	500	84.46	97.28	10.83	8.98	0.85	360.0	218.0	3	Flexión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	43.6
XL200x8	29.9	500	57.60	62.97	12.50	5.04	0.98	747.5	581.3	2.9	Torsión	-	Torsión	-	No	52.5
XL250x10	46.7	500	46.09	50.30	12.50	4.02	0.98	1167.5	908.5	3.2	Torsión	-	Torsión	-	No	54.4
XL300x12	67.3	500	38.40	41.95	12.50	3.36	0.98	1682.5	1308.7	3	Torsión	-	Torsión	-	No	68.5
XL400x16	120	500	29.09	31.45	12.50	2.52	0.98	3000.0	2341.7	3.2	Torsión	-	Torsión	-	No	42.0
XL130x6	14.4	600	101.36	116.73	10.83	10.78	0.85	360.0	174.8	3.8	Flexión	Y-Y	Flexotorsión	Y-Y	Sí	43.6
XL200x8	29.9	600	69.12	75.57	12.50	6.05	0.98	747.5	552.3	3.4	Torsión	-	Torsión	-	No	52.0
XL250x10	46.7	600	55.30	60.36	12.50	4.83	0.98	1167.5	908.3	3.8	Torsión	-	Torsión	-	No	40.0
XL300x12	67.3	600	46.08	50.34	12.50	4.03	0.98	1682.5	1308.5	3.5	Torsión	-	Torsión	-	No	68.0
XL400x16	120	600	34.91	37.74	12.50	3.02	0.98	3000.0	2341.2	3.5	Torsión	-	Torsión	-	No	55.3

**ANEXO D:
FUERZAS MÁXIMAS DE COMPRESIÓN Y
TRACCIÓN**

Tabla D.1 – Fuerzas máximas de compresión y tracción. Elementos con conectores a L/4.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	FyAg [kN]	Pn [kN]	Cu [kN]	C'u1 [kN]	C'u2 [kN]	C'u3 [kN]	C'u4 [kN]	Cu [kN]	C'u1 [kN]	C'u2 [kN]	C'u3 [kN]	C'u4 [kN]	Tmax [kN]
XL80x4	5.87	300	146.8	76.9	77.5	62.1	72.7	63.2	55.6	92.7	90.7	77.6	63.0	56.8	164.7
XL80x5	7.18	300	179.5	92.9	94.4	75.9	77.7	61.4	52.8	112.7	111.2	94.6	77.2	69.8	202.6
XL80x6	8.42	300	210.5	106.7	112.3	90.0	105.5	91.4	80.4	131.3	129.6	103.5	91.1	82.5	239.2
XL100x4	7.47	300	186.8	122.6	125.3	76.1	124.1	112.7	101.2	152.6	133.5	133.2	111.8	83.2	210.4
XL100x5	9.18	300	229.5	150.1	152.8	104.0	148.2	132.3	117.7	191.2	191.2	159.4	135.7	120.6	265.0
XL100x6	10.8	300	270.0	175.3	180.1	135.1	170.7	150.0	0.0	216.2	211.6	186.8	151.7	0.0	298.8
XL120x5	11.2	300	280.0	207.9	213.8	150.8	207.2	188.4	0.0	260.2	253.1	227.9	164.0	0.0	319.6
XL120x6	13.2	300	330.0	244.5	252.7	177.7	245.7	224.2	0.0	300.5	300.5	270.7	237.4	0.0	380.2
XL130x6	14.4	300	360.0	280.6	287.6	195.2	283.5	265.7	0.0	345.1	345.1	313.3	272.5	0.0	422.6
XL200x8	29.9	300	747.5	581.9	695.2	405.9	695.2	629.1	600.2	790.2	770.2	778.0	780.1	790.2	926.0
XL250x10	46.7	300	1167.5	909.6	1102.0	558.0	1057.3	1078.8	0.0	1152.7	1062.3	1098.3	1114.0	0.0	1318.4
XL300x12	67.3	300	1682.5	1310.3	1592.9	673.0	1337.9	1582.8	1589.3	1831.9	1668.6	1760.0	1831.9	1821.4	2034.4
XL400x16	120	300	3000.0	2344.4	2944.8	1294.6	2431.3	2841.7	2944.8	3440.3	3231.6	3433.6	3440.3	3433.1	3589.9
XL80x5	7.18	400	179.5	55.6	67.7	63.8	61.7	53.2	46.9	77.5	72.0	64.1	54.3	46.8	198.9
XL80x6	8.42	400	210.5	62.9	79.1	65.1	76.7	68.1	60.3	87.9	87.9	76.7	72.3	60.1	229.1
XL100x4	7.47	400	186.8	88.4	96.8	79.9	87.3	74.4	64.9	111.6	104.8	87.8	76.4	55.4	206.8
XL100x5	9.18	400	229.5	107.8	118.5	94.7	108.6	92.7	81.0	133.7	133.7	113.3	96.2	81.4	254.2
XL100x6	10.8	400	270.0	125.3	139.3	111.5	127.9	109.0	95.3	157.6	157.6	127.9	113.5	96.2	300.8
XL120x5	11.2	400	280.0	165.0	179.9	132.4	164.3	140.5	0.0	201.0	200.8	166.6	136.7	0.0	301.9
XL120x6	13.2	400	330.0	193.6	212.1	167.8	189.0	160.3	0.0	246.0	224.4	202.7	158.0	0.0	363.4
XL130x6	14.4	400	360.0	231.2	251.7	194.4	227.0	195.6	0.0	292.2	268.6	245.5	201.0	0.0	401.3
XL200x8	29.9	400	747.5	581.5	725.6	381.3	711.3	600.5	0.0	725.1	695.3	724.4	535.5	0.0	838.8
XL250x10	46.7	400	1167.5	908.9	1128.7	598.8	1107.2	998.8	933.5	1157.2	1119.1	1115.4	1153.3	1137.6	1409.4
XL300x12	67.3	400	1682.5	1309.2	1598.4	890.7	1570.4	1503.8	1419.6	1757.7	1742.8	1756.1	1747.9	1757.7	2088.7
XL400x16	120	400	3000.0	2342.6	2833.8	1523.5	2670.3	2830.4	2758.1	3308.6	3276.2	3288.0	3272.1	3263.3	3775.5
XL120x5	11.2	500	280.0	122.5	145.1	104.4	135.3	115.7	100.9	160.3	160.3	135.3	115.1	99.5	303.5
XL120x6	13.2	500	330.0	143.4	170.1	114.2	147.6	112.5	95.3	194.3	172.0	164.0	153.0	126.1	356.9
XL130x6	14.4	500	360.0	180.2	207.8	158.1	185.5	156.7	136.3	226.4	226.4	186.1	151.7	135.4	401.9
XL200x8	29.9	500	747.5	550.5	741.9	330.4	668.2	612.4	0.0	758.6	596.9	674.6	503.5	0.0	810.9
XL250x10	46.7	500	1167.5	908.5	1148.6	551.8	1072.5	1002.5	901.4	1185.6	1056.5	1099.1	926.1	692.9	1368.5
XL300x12	67.3	500	1682.5	1308.7	1647.4	797.0	1538.8	1507.4	1359.3	1689.7	1530.2	1594.6	1573.9	1566.5	1986.3
XL400x16	120	500	3000.0	2341.7	2871.7	1130.3	2246.8	2803.9	2805.9	2944.7	2770.8	2861.2	2944.7	2905.0	3465.0
XL130x6	14.4	600	360.0	132.9	167.1	143.3	147.6	125.0	109.0	180.1	176.7	147.6	127.8	107.3	394.5
XL200x8	29.9	600	747.5	481.2	568.3	311.1	557.5	473.8	414.4	645.2	550.5	556.7	478.2	336.2	840.9
XL250x10	46.7	600	1167.5	881.6	1137.1	563.8	1073.9	775.1	0.0	1201.0	1096.9	1134.8	653.8	0.0	1236.7
XL300x12	67.3	600	1682.5	1308.5	1664.1	729.7	1459.5	1509.3	1329.6	1700.3	1470.4	1700.3	1382.8	1021.2	1922.8
XL400x16	120	600	3000.0	2341.2	2922.0	1336.9	2601.8	2831.1	0.0	3002.2	2450.3	2837.2	2620.9	0.0	3290.4

Tabla D.2 – Fuerzas máximas de compresión y tracción. Elementos con conectores a L/8.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	FyAg [kN]	Pn [kN]	Cu [kN]	Cu1 [kN]	Monotónico						Cíclico					
							Cu2 [kN]	Cu3 [kN]	Cu4 [kN]	Cu [kN]	Cu1 [kN]	Cu2 [kN]	Cu3 [kN]	Cu4 [kN]	Tmax [kN]			
XL80x4	5.87	300	146.8	76.9	77.5	62.1	72.7	63.2	55.6	92.7	90.7	77.6	63.0	56.8	164.7			
XL80x5	7.18	300	179.5	92.9	94.4	75.9	77.7	61.4	52.8	112.7	111.2	94.6	77.2	69.8	202.6			
XL80x6	8.42	300	210.5	106.7	112.3	90.0	105.5	91.4	80.4	131.3	129.6	103.5	91.1	82.5	239.2			
XL100x4	7.47	300	186.8	122.6	125.3	76.1	124.1	112.7	101.2	152.6	133.5	133.2	111.8	83.2	210.4			
XL100x5	9.18	300	229.5	150.1	152.8	104.0	148.2	132.3	117.7	191.2	191.2	159.4	135.7	120.6	265.0			
XL100x6	10.8	300	270.0	175.3	180.1	135.1	170.7	150.0	0.0	216.2	211.6	186.8	151.7	0.0	298.8			
XL120x5	11.2	300	280.0	207.9	213.8	150.8	207.2	188.4	0.0	260.2	253.1	227.9	164.0	0.0	319.6			
XL120x6	13.2	300	330.0	244.5	252.7	177.7	245.7	224.2	0.0	300.5	300.5	270.7	237.4	0.0	380.2			
XL130x6	14.4	300	360.0	280.6	287.6	195.2	283.5	265.7	0.0	345.1	345.1	313.3	272.5	0.0	422.6			
XL200x8	29.9	300	747.5	581.9	695.2	405.9	695.2	629.1	600.2	790.2	770.2	778.0	780.1	790.2	926.0			
XL250x10	46.7	300	1167.5	909.6	1102.0	558.0	1057.3	1078.8	0.0	1152.7	1062.3	1098.3	1114.0	0.0	1318.4			
XL300x12	67.3	300	1682.5	1310.3	1592.9	673.0	1337.9	1582.8	1589.3	1831.9	1668.6	1760.0	1831.9	1821.4	2034.4			
XL400x16	120	300	3000.0	2344.4	2944.8	1294.6	2431.3	2841.7	2944.8	3440.3	3231.6	3433.6	3440.3	3433.1	3589.9			
XL180x5	7.18	400	179.5	55.6	67.7	63.8	61.7	53.2	46.9	77.5	72.0	64.1	54.3	46.8	198.9			
XL180x6	8.42	400	210.5	62.9	79.1	65.1	76.7	68.1	60.3	87.9	87.9	76.7	72.3	60.1	229.1			
XL100x4	7.47	400	186.8	88.4	96.8	79.9	87.3	74.4	64.9	111.6	104.8	87.8	76.4	55.4	206.8			
XL100x5	9.18	400	229.5	107.8	118.5	94.7	108.6	92.7	81.0	133.7	133.7	113.3	96.2	81.4	254.2			
XL100x6	10.8	400	270.0	125.3	139.3	111.5	127.9	109.0	95.3	157.6	157.6	127.9	113.5	96.2	300.8			
XL120x5	11.2	400	280.0	165.0	179.9	132.4	164.3	140.5	0.0	201.0	200.8	166.6	136.7	0.0	301.9			
XL120x6	13.2	400	330.0	193.6	212.1	167.8	189.0	160.3	0.0	246.0	224.4	202.7	158.0	0.0	363.4			
XL130x6	14.4	400	360.0	231.2	251.7	194.4	227.0	195.6	0.0	292.2	268.6	245.5	201.0	0.0	401.3			
XL200x8	29.9	400	747.5	581.5	725.6	381.3	711.3	600.5	0.0	725.1	695.3	724.4	535.5	0.0	838.8			
XL250x10	46.7	400	1167.5	908.9	1128.7	598.8	1107.2	998.8	933.5	1157.2	1119.1	1115.4	1153.3	1137.6	1409.4			
XL300x12	67.3	400	1682.5	1309.2	1598.4	890.7	1570.4	1503.8	1419.6	1757.7	1742.8	1756.1	1747.9	1757.7	2088.7			
XL400x16	120	400	3000.0	2342.6	2833.8	1523.5	2670.3	2830.4	2758.1	3308.6	3276.2	3288.0	3272.1	3263.3	3775.5			
XL120x5	11.2	500	280.0	122.5	145.1	104.4	135.3	115.7	100.9	160.3	160.3	135.3	115.1	99.5	303.5			
XL120x6	13.2	500	330.0	143.4	170.1	114.2	147.6	112.5	95.3	194.3	172.0	164.0	153.0	126.1	356.9			
XL130x6	14.4	500	360.0	180.2	207.8	158.1	185.5	156.7	136.3	226.4	226.4	186.1	151.7	135.4	401.9			
XL200x8	29.9	500	747.5	550.5	741.9	330.4	668.2	612.4	0.0	758.6	596.9	674.6	503.5	0.0	810.9			
XL250x10	46.7	500	1167.5	908.5	1148.6	551.8	1072.5	1002.5	901.4	1185.6	1056.5	1099.1	926.1	692.9	1368.5			
XL300x12	67.3	500	1682.5	1308.7	1647.4	797.0	1538.8	1507.4	1359.3	1689.7	1530.2	1594.6	1573.9	1566.5	1986.3			
XL400x16	120	500	3000.0	2341.7	2871.7	1130.3	2246.8	2803.9	2805.9	2944.7	2770.8	2861.2	2944.7	2905.0	3465.0			
XL130x6	14.4	600	360.0	132.9	167.1	143.3	147.6	125.0	109.0	180.1	176.7	147.6	127.8	107.3	394.5			
XL200x8	29.9	600	747.5	481.2	568.3	311.1	557.5	473.8	414.4	645.2	550.5	556.7	478.2	336.2	840.9			
XL250x10	46.7	600	1167.5	881.6	1137.1	563.8	1073.9	775.1	0.0	1201.0	1096.9	1134.8	653.8	0.0	1236.7			
XL300x12	67.3	600	1682.5	1308.5	1664.1	729.7	1459.5	1509.3	1329.6	1700.3	1470.4	1700.3	1382.8	1021.2	1922.8			
XL400x16	120	600	3000.0	2341.2	2922.0	1336.9	2601.8	2831.1	0.0	3002.2	2450.3	2837.2	2620.9	0.0	3290.4			

**ANEXO E:
FUERZAS EN LAS PLACAS GUSSET**

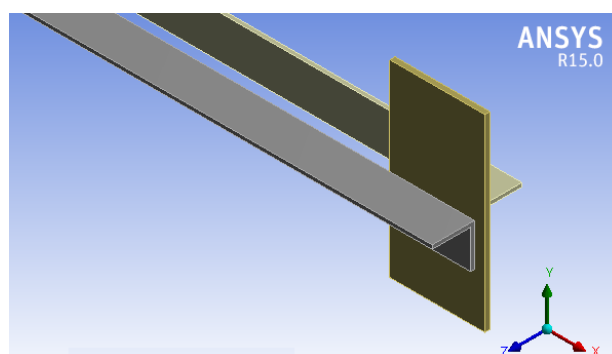


Figura E.1 – Ejes de la conexión ángulo-gusset.

Tabla E.1 –Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset. Elementos con conectores a L/4.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	FyAg [kN]	Pn [kN]	Análisis Monotónico			Análisis Cíclico		
					X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]
XL80x4	5.87	300	146.8	76.9	58.4	1.4	15.5	73.3	3.2	32.5
XL80x5	7.18	300	179.5	92.9	64.8	1.8	27.9	90.3	4.6	45.6
XL80x6	8.42	300	210.5	106.7	74.1	2.0	60.4	108.5	4.2	73.3
XL100x4	7.47	300	186.8	122.6	82.0	2.5	60.1	92.8	4.0	78.8
XL100x5	9.18	300	229.5	150.1	90.6	2.9	26.2	113.1	5.3	73.3
XL100x6	10.8	300	270.0	175.3	98.6	3.8	23.0	128.6	5.2	70.6
XL120x5	11.2	300	280.0	207.9	117.5	4.7	83.8	145.4	5.4	107.6
XL120x6	13.2	300	330.0	244.5	131.7	6.0	91.6	170.6	6.3	129.7
XL130x6	14.4	300	360.0	280.6	151.3	5.6	19.9	184.4	7.5	69.0
XL200x8	29.9	300	747.5	581.9	264.6	18.5	46.8	370.3	16.0	88.0
XL250x10	46.7	300	1167.5	909.6	407.4	23.7	84.5	500.6	35.5	99.7
XL300x12	67.3	300	1682.5	1310.3	624.4	26.4	98.5	815.7	58.6	151.6
XL400x16	120	300	3000.0	2344.4	1235.9	40.3	186.7	1587.6	120.6	261.4
XL80x5	7.18	400	179.5	55.6	77.4	0.6	130.4	99.5	2.8	153.5
XL80x6	8.42	400	210.5	62.9	70.1	1.8	64.2	90.8	3.8	74.8
XL100x4	7.47	400	186.8	88.4	82.8	2.6	92.6	93.8	4.8	133.2
XL100x5	9.18	400	229.5	107.8	88.5	2.3	67.6	109.1	5.2	107.4
XL100x6	10.8	400	270.0	125.3	95.6	2.5	73.8	121.4	5.4	115.6
XL120x5	11.2	400	280.0	165.0	108.3	3.5	113.0	130.1	5.4	154.7
XL120x6	13.2	400	330.0	193.6	120.4	4.3	133.9	157.7	5.8	176.0
XL130x6	14.4	400	360.0	231.2	150.4	4.8	111.8	187.9	8.4	157.9
XL200x8	29.9	400	747.5	581.5	268.9	13.6	57.1	363.5	13.3	407.8
XL250x10	46.7	400	1167.5	908.9	411.2	26.3	93.1	600.5	23.2	275.6
XL300x12	67.3	400	1682.5	1309.2	624.1	44.7	95.6	843.5	43.9	142.8
XL400x16	120	400	3000.0	2342.6	1116.2	68.4	230.2	1518.3	116.3	354.5
XL120x5	11.2	500	280.0	122.5	130.2	1.4	297.7	159.6	4.2	364.3
XL120x6	13.2	500	330.0	143.4	155.8	1.9	441.7	172.8	4.7	346.0
XL130x6	14.4	500	360.0	180.2	152.1	4.2	151.4	186.1	9.4	192.5
XL200x8	29.9	500	747.5	550.5	247.3	11.4	236.6	374.8	12.4	594.2
XL250x10	46.7	500	1167.5	908.5	425.1	21.6	91.8	599.2	28.9	885.7
XL300x12	67.3	500	1682.5	1308.7	603.4	35.7	135.6	748.2	35.5	325.3
XL400x16	120	500	3000.0	2341.7	1132.4	29.4	200.4	1386.1	71.4	235.9
XL130x6	14.4	600	360.0	132.9	144.1	3.9	161.9	170.3	9.3	204.0
XL200x8	29.9	600	747.5	481.2	322.9	11.3	721.7	348.4	11.6	830.6
XL250x10	46.7	600	1167.5	881.6	451.4	17.8	240.1	471.2	21.4	408.9
XL300x12	67.3	600	1682.5	1308.5	615.6	31.3	135.9	847.2	32.7	1120.3
XL400x16	120	600	3000.0	2341.2	1089.8	38.2	964.5	1281.4	65.8	641.8

Tabla E.2 - Fuerzas máximas en la conexión ángulo-gusset. Elementos con conectores a L/8.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	FyAg [kN]	Pn [kN]	Análisis Monotónico			Análisis Cíclico		
					X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]
XL80x4	5.87	300	146.8	91.0	73.4	1.8	28.4	78.4	3.3	54.8
XL80x5	7.18	300	179.5	110.0	85.1	2.0	42.4	101.5	4.5	71.3
XL80x6	8.42	300	210.5	128.1	101.3	2.8	89.8	127.6	4.3	108.5
XL100x4	7.47	300	186.8	138.2	70.8	3.9	43.0	92.3	4.5	19.3
XL100x5	9.18	300	229.5	168.8	112.5	4.0	46.8	116.9	5.6	104.1
XL100x6	10.8	300	270.0	197.9	133.0	5.0	50.8	163.5	5.3	114.0
XL120x5	11.2	300	280.0	220.4	94.0	5.3	18.0	129.5	5.3	217.4
XL120x6	13.2	300	330.0	266.9	121.0	4.0	34.5	150.3	5.9	180.1
XL130x6	14.4	300	360.0	293.7	134.2	7.9	18.7	184.1	7.9	122.5
XL200x8	29.9	300	747.5	581.9	285.3	10.4	26.1	361.4	12.7	64.4
XL250x10	46.7	300	1167.5	909.6	435.4	6.6	125.7	520.2	27.8	149.2
XL300x12	67.3	300	1682.5	1310.3	685.2	22.3	53.4	841.6	22.8	149.8
XL400x16	120	300	3000.0	2344.4	1290.8	42.9	166.6	1562.2	68.4	317.1
XL80x5	7.18	400	179.5	75.1	107.1	2.0	246.9	143.2	2.6	276.0
XL80x6	8.42	400	210.5	87.1	100.4	2.2	130.6	136.6	4.5	144.0
XL100x4	7.47	400	186.8	109.3	92.6	4.1	152.3	103.7	4.4	63.9
XL100x5	9.18	400	229.5	132.9	116.1	3.2	162.2	160.3	6.8	228.9
XL100x6	10.8	400	270.0	155.5	122.8	3.5	145.0	163.0	5.0	188.0
XL120x5	11.2	400	280.0	192.6	119.6	5.5	186.2	152.3	5.2	255.8
XL120x6	13.2	400	330.0	226.2	156.4	5.4	184.8	173.8	5.5	271.9
XL130x6	14.4	400	360.0	261.1	176.8	6.8	192.9	186.7	8.0	268.2
XL200x8	29.9	400	747.5	581.5	268.5	13.9	65.6	332.6	12.0	91.4
XL250x10	46.7	400	1167.5	908.9	415.3	18.5	111.2	553.7	15.7	96.6
XL300x12	67.3	400	1682.5	1309.2	654.2	24.5	164.4	839.9	30.7	214.4
XL400x16	120	400	3000.0	2342.6	1185.7	49.7	264.3	1558.9	147.4	485.0
XL120x5	11.2	500	280.0	156.0	162.6	2.8	435.5	162.1	3.9	453.2
XL120x6	13.2	500	330.0	183.0	174.7	3.3	420.0	195.8	4.4	431.4
XL130x6	14.4	500	360.0	218.0	188.2	5.5	234.7	195.7	8.9	268.0
XL200x8	29.9	500	747.5	581.3	246.6	13.2	221.8	365.8	12.9	832.3
XL250x10	46.7	500	1167.5	908.5	424.9	22.4	105.3	516.0	21.5	121.8
XL300x12	67.3	500	1682.5	1308.7	607.3	28.4	160.8	817.1	28.3	496.6
XL400x16	120	500	3000.0	2341.7	1142.0	31.9	926.7	1359.0	100.6	852.5
XL130x6	14.4	600	360.0	174.8	183.2	5.4	296.2	224.9	8.8	331.4
XL200x8	29.9	600	747.5	552.3	251.4	11.6	79.0	307.1	11.2	582.0
XL250x10	46.7	600	1167.5	908.3	393.9	29.3	120.2	492.9	25.3	728.5
XL300x12	67.3	600	1682.5	1308.5	616.7	33.3	154.5	827.0	32.0	955.0
XL400x16	120	600	3000.0	2341.2	1106.1	49.2	1018.0	1334.1	40.5	715.6

**ANEXO F:
FUERZAS EN LA INTERSECCIÓN**

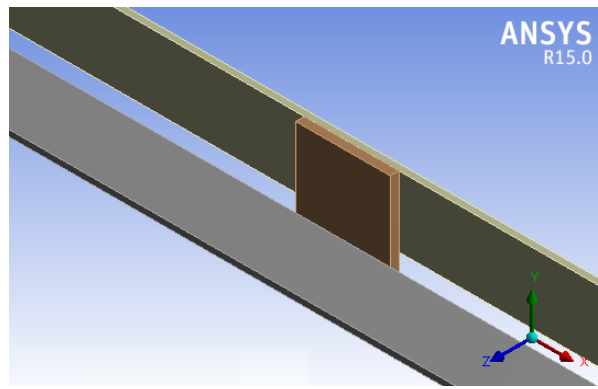


Figura F.1 – Ejes de la conexión en la intersección de las diagonales.

Tabla F.1 – Fuerzas máximas en la intersección. Elementos con conectores a L/4.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	FyAg [kN]	Pn [kN]	Análisis Monotónico			Análisis Cíclico		
					X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]
XL80x4	5.87	300	146.8	76.9	11.4	1.6	1.0	18.3	4.3	1.8
XL80x5	7.18	300	179.5	92.9	8.6	3.7	4.2	18.9	4.8	1.7
XL80x6	8.42	300	210.5	106.7	15.0	1.8	0.7	21.0	5.2	1.5
XL100x4	7.47	300	186.8	122.6	6.8	1.7	0.0	18.4	3.8	5.2
XL100x5	9.18	300	229.5	150.1	7.1	1.6	0.0	11.8	3.5	5.2
XL100x6	10.8	300	270.0	175.3	3.9	1.5	0.0	9.0	3.1	4.8
XL120x5	11.2	300	280.0	207.9	15.3	6.3	4.5	17.1	10.3	14.9
XL120x6	13.2	300	330.0	244.5	18.0	6.3	0.0	32.0	11.8	19.1
XL130x6	14.4	300	360.0	280.6	15.5	8.1	0.0	23.8	13.8	11.7
XL200x8	29.9	300	747.5	581.9	4.6	10.8	0.0	27.5	24.4	40.9
XL250x10	46.7	300	1167.5	909.6	8.7	32.3	0.0	11.6	36.6	54.1
XL300x12	67.3	300	1682.5	1310.3	25.2	25.4	0.0	34.6	31.8	96.8
XL400x16	120	300	3000.0	2344.4	8.9	72.5	0.0	30.2	62.5	171.9
XL80x5	7.18	400	179.5	55.6	12.3	0.2	0.0	19.0	0.7	2.8
XL80x6	8.42	400	210.5	62.9	10.6	0.1	0.0	16.3	0.5	2.8
XL100x4	7.47	400	186.8	88.4	17.0	2.5	0.0	22.1	6.0	6.9
XL100x5	9.18	400	229.5	107.8	21.5	2.7	0.0	31.4	6.7	6.8
XL100x6	10.8	400	270.0	125.3	25.8	2.8	0.0	36.7	7.3	6.5
XL120x5	11.2	400	280.0	165.0	22.0	1.9	0.0	42.7	3.4	13.2
XL120x6	13.2	400	330.0	193.6	23.2	1.7	0.0	40.3	3.0	12.7
XL130x6	14.4	400	360.0	231.2	6.1	3.1	0.0	16.0	5.8	7.8
XL200x8	29.9	400	747.5	581.5	4.3	12.1	0.0	47.0	23.3	40.0
XL250x10	46.7	400	1167.5	908.9	10.4	31.5	0.0	41.7	46.8	40.0
XL300x12	67.3	400	1682.5	1309.2	9.5	21.4	0.0	36.3	32.2	92.5
XL400x16	120	400	3000.0	2342.6	9.7	42.5	0.0	90.9	59.3	153.5
XL120x5	11.2	500	280.0	122.5	38.1	1.6	0.0	65.3	4.2	9.0
XL120x6	13.2	500	330.0	143.4	24.3	5.4	0.0	66.9	3.1	8.9
XL130x6	14.4	500	360.0	180.2	30.4	4.9	0.0	45.4	11.1	10.9
XL200x8	29.9	500	747.5	550.5	5.5	10.3	0.0	23.5	18.5	34.0
XL250x10	46.7	500	1167.5	908.5	6.5	19.7	0.0	125.1	45.6	62.8
XL300x12	67.3	500	1682.5	1308.7	12.2	46.6	0.0	40.5	68.9	128.1
XL400x16	120	500	3000.0	2341.7	15.7	51.6	0.0	20.6	59.4	92.8
XL130x6	14.4	600	360.0	132.9	23.0	1.3	0.0	31.2	3.3	8.1
XL200x8	29.9	600	747.5	481.2	5.8	7.3	0.0	55.0	18.4	41.8
XL250x10	46.7	600	1167.5	881.6	28.3	24.1	8.2	46.2	36.4	53.1
XL300x12	67.3	600	1682.5	1308.5	9.6	27.8	0.0	155.1	58.0	81.9
XL400x16	120	600	3000.0	2341.2	16.0	38.4	0.0	38.2	41.2	176.1

Tabla F.2 – Fuerzas máximas en la intersección. Elementos con conectores a L/8.

Perfil	A [cm ²]	L [cm]	FyAg [kN]	Pn [kN]	Análisis Monotónico			Análisis Cíclico		
					X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]
XL80x4	5.87	300	146.8	91.0	10.3	4.0	0.8	48.9	4.0	2.5
XL80x5	7.18	300	179.5	110.0	13.4	4.3	1.8	54.0	4.8	2.8
XL80x6	8.42	300	210.5	128.1	16.8	4.5	1.8	55.9	4.7	4.2
XL100x4	7.47	300	186.8	138.2	5.8	2.7	0.0	3.7	6.4	4.0
XL100x5	9.18	300	229.5	168.8	43.5	4.8	0.0	61.9	4.1	5.1
XL100x6	10.8	300	270.0	197.9	48.0	5.5	0.0	64.5	5.9	4.7
XL120x5	11.2	300	280.0	220.4	4.4	8.3	0.0	39.9	14.6	13.9
XL120x6	13.2	300	330.0	266.9	3.3	8.7	0.0	34.2	11.7	15.0
XL130x6	14.4	300	360.0	293.7	4.7	10.5	0.0	51.4	22.4	10.0
XL200x8	29.9	300	747.5	581.9	9.0	18.2	0.0	12.3	26.3	41.4
XL250x10	46.7	300	1167.5	909.6	4.6	33.9	0.0	34.4	50.4	61.8
XL300x12	67.3	300	1682.5	1310.3	14.8	38.9	0.0	36.7	49.8	63.6
XL400x16	120	300	3000.0	2344.4	2.8	94.0	0.0	4.5	146.0	141.3
XL80x5	7.18	400	179.5	75.1	63.8	1.3	0.0	86.2	1.7	3.5
XL80x6	8.42	400	210.5	87.1	79.9	1.3	0.0	106.1	1.7	3.3
XL100x4	7.47	400	186.8	109.3	14.5	5.3	0.0	57.4	4.7	6.4
XL100x5	9.18	400	229.5	132.9	17.1	10.0	0.0	32.9	13.5	11.1
XL100x6	10.8	400	270.0	155.5	20.8	6.7	0.0	87.8	7.9	9.7
XL120x5	11.2	400	280.0	192.6	83.4	3.1	0.0	122.7	3.1	14.3
XL120x6	13.2	400	330.0	226.2	77.1	4.0	0.0	119.7	4.8	14.0
XL130x6	14.4	400	360.0	261.1	60.1	7.4	0.0	101.5	6.4	8.3
XL200x8	29.9	400	747.5	581.5	3.6	12.0	0.0	23.2	27.0	42.1
XL250x10	46.7	400	1167.5	908.9	22.7	30.3	0.0	22.0	43.2	39.5
XL300x12	67.3	400	1682.5	1309.2	13.2	21.3	0.0	28.2	22.9	105.4
XL400x16	120	400	3000.0	2342.6	11.0	42.9	0.0	122.4	94.4	181.5
XL120x5	11.2	500	280.0	156.0	26.9	5.0	0.0	107.1	4.7	13.8
XL120x6	13.2	500	330.0	183.0	21.1	5.0	0.0	97.0	5.4	12.4
XL130x6	14.4	500	360.0	218.0	24.4	10.9	0.0	116.0	10.3	11.2
XL200x8	29.9	500	747.5	581.3	5.5	10.2	0.0	82.9	19.9	34.2
XL250x10	46.7	500	1167.5	908.5	5.4	19.0	0.0	27.6	39.0	64.2
XL300x12	67.3	500	1682.5	1308.7	30.9	44.7	0.0	118.5	85.5	92.2
XL400x16	120	500	3000.0	2341.7	16.7	29.4	0.0	19.4	38.9	171.4
XL130x6	14.4	600	360.0	174.8	117.2	3.7	0.0	143.2	3.4	10.4
XL200x8	29.9	600	747.5	552.3	3.4	10.7	0.0	127.7	16.6	43.8
XL250x10	46.7	600	1167.5	908.3	9.2	19.1	0.0	99.7	17.4	3.5
XL300x12	67.3	600	1682.5	1308.5	7.3	27.5	0.0	210.7	71.1	92.4
XL400x16	120	600	3000.0	2341.2	20.1	35.4	0.0	22.5	40.5	203.4