



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

**MODOS DE FALLA PREDOMINANTES EN PERFILES XL DE ACERO
ESTRUCTURAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JAIME ANDRÉS MOLINA CONTRERAS

PROFESOR GUÍA:

RICARDO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

RAMÓN MONTECINOS CONCHA

SANTIAGO DE CHILE

AGOSTO 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: JAIME MOLINA C.
FECHA: 27/08/2014
PROF. GUÍA: RICARDO HERRERA M.

“MODOS DE FALLA PREDOMINANTES EN PERFILES XL DE ACERO ESTRUCTURAL”

Este trabajo tiene como objetivo el estudio de los modos predominantes de falla en los perfiles XL de acero estructural, conformados por un doble ángulo plegado.

Para determinar el modo de falla y la carga crítica asociada, se realizaron tres tipos de análisis. Bajo el criterio descrito por la norma de diseño AISC, según las fórmulas desarrolladas por Marsh (1997) en su trabajo “Design of Single and Multiple Angle Columns and Beams” y mediante un análisis no lineal a través del programa de elementos finitos ANSYS, en el cual se realiza un estudio estático tipo Push-Over.

La metodología utilizada consistió en calcular la carga crítica y modo de falla dada por cada método de análisis. Además, con los modelos de elementos finitos se determinaron las sollicitaciones sobre las placas de conexión de los arriostramientos, tanto su magnitud como la distribución sobre las caras de las placas.

Para el desarrollo de la investigación se utilizó una gama de perfiles XL de dimensiones comúnmente utilizadas en la práctica y largos totales de 1.5, 2.5, 5 y 10 metros.

Con los resultados obtenidos se generó una clasificación de la falla predominante en los perfiles XL y se definió que la tendencia de los perfiles a fallar por torsión se encuentra relacionada con la razón entre la esbeltez global y local menor a 5.5. Por el otro lado, los elementos que superan este valor muestran fallar por pandeo flexural.

Finalmente, para los elementos que fallen por flexión, se recomienda diseñar la conexión de cada cara de la placa para la carga total obtenida. Mientras que para los elementos con falla torsional es posible utilizar la mitad de la carga para cada conexión.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo I. Introducción.....	1
I.1. Motivación.....	1
I.2. Objetivos.....	2
I.2.1. Objetivo General.....	2
I.2.2. Objetivos Específicos.....	2
I.3. Alcances.....	2
Capítulo II. Antecedentes.....	3
II.1. American Institute of Steel Construction (2010).....	3
II.2. Cedric Marsh (1997).....	9
II.3. NCh 2369 de 2003.....	12
II.4. American Iron and Steel Institute (2007).....	13
Capítulo III. Metodología.....	15
III.1. Modelo ANSYS.....	20
III.1.1. Geometría.....	20
III.1.2. Análisis Elástico.....	22
III.1.2.1. Material.....	22
III.1.2.2. Mallado.....	22
III.1.2.3. Carga Inicial.....	24
III.1.2.4. Restricciones.....	24
III.1.3. Análisis No Lineal.....	25
III.1.3.1. Material.....	25
III.1.3.2. Mallado.....	25
III.1.3.3. Imperfección Inicial.....	26
III.1.3.4. Desplazamiento inicial.....	26
III.1.3.5. Restricciones.....	27

Capítulo IV. Presentación de Resultados.....	28
IV.1. Esbeltez y compacidad de los perfiles.....	28
IV.2. Modos de falla.....	31
IV.3. Cargas Críticas.....	34
IV.4. Fuerzas en los ejes Y-Z sobre las placas de conexión.....	39
IV.4.1. Fuerzas en la placa del extremo.....	39
IV.4.2. Fuerzas en la placa central.....	42
Capítulo V. Análisis de Resultados.....	45
V.1. Modos de falla.....	45
V.2. Fuerzas sobre las placas.....	48
V.3. Fuerzas sobre las caras de la placa del extremo.....	50
V.4. Momentos en la interfaz de placa de conexión y el perfil.....	55
V.5. Resistencia de las soldaduras de conexión.....	61
V.5.1. Comparación con cargas críticas de ANSYS.....	63
V.5.2. Comparación con cargas críticas de AISC.....	67
Capítulo VI. Conclusiones.....	73
Bibliografía.....	76
Anexo A. Cargas críticas y modos de falla.....	77
A.1. AISC.....	77
A.2. C. Marsh.....	79
A.3. ANSYS: Análisis no lineal.....	81
Anexo B. Fuerzas en ejes Y-Z sobre las placas.....	83
B.1. Fuerzas en los ejes Y-Z de la placa de conexión del extremo.....	83
B.2. Fuerzas en los ejes Y-Z de la placa central.....	87
Anexo C. Fuerzas Sobre las caras de la placa del extremo.....	91
Anexo D. Momento en el eje z en las caras de la placa del extremo.....	93
Anexo E. Resistencia de soldaduras.....	94
E.1. Comparación con ANSYS.....	94
E.2. Comparación con AISC.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de sensibilidad de mallado para modelos elásticos.	22
Tabla 2: Análisis de sensibilidad de mallado para los modelos no lineales.	25
Tabla 3: Análisis de sensibilidad de la imperfección inicial para los modelos no lineales.	26
Tabla 4: Clasificación por esbeltez de las secciones, E = Esbeltos; NE = No esbeltos.	29
Tabla 5: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.	52
Tabla 6: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.	52
Tabla 7: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.	52
Tabla 8: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.	52
Tabla 9: Recomendación de largos y gargantas de soldadura para los diferentes perfiles.	71
Tabla 10: Cargas críticas y modos de falla por método AISC.	77
Tabla 11: Cargas críticas y modos de falla según C. Marsh.	79
Tabla 12: Cargas críticas y modos de falla según ANSYS.	81
Tabla 13: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del extremo.	83
Tabla 14: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del extremo.	85
Tabla 15: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del centro.	87
Tabla 16: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del centro.	89
Tabla 17: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 1.5 m.	91
Tabla 18: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 2.5 m.	91
Tabla 19: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 5 m.	92
Tabla 20: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 10 m.	92
Tabla 21: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 1.5 metros.	93
Tabla 22: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 2.5 metros.	93
Tabla 23: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 5 metros.	93
Tabla 24: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 10 metros.	93
Tabla 25: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 1.5 metros, ANSYS.	94
Tabla 26: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 2.5 metros ANSYS.	96
Tabla 27: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 5 metros ANSYS.	98
Tabla 28: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 10 metros, ANSYS.	100
Tabla 29: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 1.5 metros, AISC.	101
Tabla 30: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 2.5 metros, AISC.	103
Tabla 31: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 5 metros, AISC.	105

Tabla 32: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 10 metros, AISC.107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imágenes extraídas del libre Mw=8.8 Terremoto en Chile. Pandeo global de diagonales. (A) Producto del pandeo local de alas. (B) Pandeo torsional.....	1
Figura 2: Ejemplo de dimensiones a considerar.....	3
Figura 3: Disposición de ejes para el análisis por el AISC.	4
Figura 4: Disposición de ejes utilizados por el análisis de Marsh.....	9
Figura 5: Falla por flexión, vista lateral e isométrica.	16
Figura 6: Falla por flexo torsión, vista lateral e isométrica.	17
Figura 7: Falla por torsión, vista lateral e isométrica.	18
Figura 8: Fuerza resultante sobre la placa de extremo y central, respectivamente.	19
Figura 9: Largos de los arriostramientos, dimensiones en metros.	20
Figura 10: Geometría del modelo, dimensiones de la placa y vista frontal.....	21
Figura 11: Geometría del modelo, vista isométrica.....	21
Figura 12: Mallado fino.....	23
Figura 13: Mallado con refinamiento de caras.	23
Figura 14: Mallado con asignación de caras.	23
Figura 15: Restricciones del modelo y carga aplicada.	24
Figura 16: Ley constitutiva bilineal del acero.	25
Figura 17: Imperfección de 5 mm en el modelo.....	26
Figura 18: Restricciones del modelo.	27
Figura 19: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 1.5m.....	31
Figura 20: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 1.5m.....	31
Figura 21: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 2.5m.....	32
Figura 22: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 2.5m.....	32
Figura 23: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 5m.....	32
Figura 24: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 5m.....	33
Figura 25: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 10m.....	33
Figura 26: Cargas críticas de los perfiles de 1.5 m.....	34
Figura 27: Cargas críticas de los perfiles de 1.5 m.....	34
Figura 28: Cargas críticas de los perfiles de 1.5 m.....	35
Figura 29: Cargas críticas de los perfiles de 2.5 m.....	35
Figura 30: Cargas críticas de los perfiles de 2.5 m.....	35
Figura 31: Cargas críticas de los perfiles de 2.5 m.....	36
Figura 32: Cargas críticas de los perfiles de 5 m.....	36
Figura 33: Cargas críticas de los perfiles de 5 m.....	36
Figura 34: Cargas críticas de los perfiles de 10 m.....	37
Figura 35: Carga crítica según esbeltez global, para los resultados de la AISC.	37
Figura 36: Carga crítica según esbeltez global, para los resultados según Marsh.....	38
Figura 37: Carga crítica según esbeltez global, para los resultados de ANSYS.	38
Figura 38: Disposición de ejes de la placa del extremo.	39
Figura 39: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	40

Figura 40: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	40
Figura 41: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	40
Figura 42: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	41
Figura 43: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	41
Figura 44: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	41
Figura 45: Disposición de ejes placa central.	42
Figura 46: Fuerzas de torsión en la placa del centro.	43
Figura 47: Fuerzas de torsión en la placa del centro.	43
Figura 48: Fuerzas de torsión en la placa del centro.	43
Figura 49: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	44
Figura 50: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	44
Figura 51: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.	44
Figura 52: Tendencia de modos de falla según AICS, 1= Flexión; 3= Torsión.	46
Figura 53: Tendencia de modos de falla según ANSYS, 1= Flexión; 3= Torsión.	46
Figura 54: Tendencia de modos de falla según ANSYS, 1= Flexión; 2= Flexo torsión; 3= Torsión.	47
Figura 55: Fuerzas en la placa del extremo asociadas a la razón de esbeltez.	48
Figura 56: Fuerzas en la placa del centro asociadas a la razón de esbeltez.	49
Figura 57: Restricciones sobre los modelos, vista isométrica.	50
Figura 58: Restricciones sobre los modelos, vista lateral.	50
Figura 59: Detalle de conexión. Soporte A es la cara anterior, soporte D la posterior.	51
Figura 60: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 1.5 metros.	53
Figura 61: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 2.5 metros.	53
Figura 62: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 5 metros.	53
Figura 63: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 10 metros.	54
Figura 64: Centros de gravedad de las secciones y distancia relativa entre ellos.	55
Figura 65: Fuerzas sobre los elementos en los ejes principales.	56
Figura 66: Momentos sobre los elementos en los ejes principales.	56
Figura 67: Momento en el eje Z en perfiles de 1.5 metros de largo.	58
Figura 68: Momento en el eje Z en perfiles de 1.5 metros de largo.	58
Figura 69: Momento en el eje Z en perfiles de 2.5 metros de largo.	59
Figura 70: Momento en el eje Z en perfiles de 2.5 metros de largo.	59
Figura 71: Momento en el eje Z en perfiles de 5 metros de largo.	60
Figura 72: Momento en el eje X en perfiles de 10 metros de largo.	60
Figura 73: Patrón de soldadura utilizado en el caso 1.	61
Figura 74: Patrón de soldadura utilizado en el caso 2.	62
Figura 75: Patrón de soldadura utilizado en el caso 3.	62
Figura 76: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, ANSYS.	63

Figura 77: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, ANSYS.	63
Figura 78: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, ANSYS.	63
Figura 79: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 metros, ANSYS.....	64
Figura 80: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 metros, ANSYS.....	64
Figura 81: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 metros, ANSYS.....	64
Figura 82: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 metros, ANSYS.....	65
Figura 83: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 metros, ANSYS.....	65
Figura 84: Razón entre resistencias para los perfiles de 10 metros, ANSYS.....	65
Figura 85: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, AISC.	67
Figura 86: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, AISC.	67
Figura 87: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, AISC.	67
Figura 88: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 m, AISC.	68
Figura 89: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 m, AISC.	68
Figura 90: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 m., AISC	68
Figura 91: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 m, AISC.	69
Figura 92: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 m., AISC.	69
Figura 93: Razón entre resistencias para los perfiles de 10 m, AISC.	70

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

I.1. Motivación

Los arriostramientos laterales son un recurso muy común en las estructuras industriales, utilizados para el control de desplazamientos globales de la nave. Regularmente, estos elementos están conformados por perfiles canal o de doble ángulo.

Del capítulo 10 del libro “Mw=8.8 Terremoto en Chile”(Montecinos et al, 2012), se extrae que durante el terremoto del 27 de Febrero del 2010 se observaron numerosos casos de fallas en diagonales. Esta inestabilidad, por lo general, fue causada principalmente por dos razones, fallas locales y pandeos torsionales de los perfiles, como se puede apreciar en la figura 1. Dependiendo del grado de daño producido, estos problemas pueden llegar a comprometer la estabilidad global de la estructura.



Figura 1: Imágenes extraídas del libro Mw=8.8 Terremoto en Chile. Pandeo global de diagonales. (A) Producto del pandeo local de alas. (B) Pandeo torsional

El presente estudio pretende determinar una tendencia en las inestabilidades por pandeo torsional que esté relacionada con las propiedades de cada perfil analizado. El trabajo entrega recomendaciones que pueden ser consideradas como guía a la hora de determinar las secciones a utilizar en un proyecto y así evitar fallas importantes en la estructura.

I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo General

Identificar los modos de falla predominantes en perfiles XL de dimensiones y largos comúnmente utilizados en la práctica.

I.2.2. Objetivos Específicos

- Comparar los resultados del análisis bajo el criterio AISC, según el trabajo formulado para perfiles de doble ángulo descrito por Marsh (1997) y con análisis no lineal tipo Push-Over del programa de elementos finitos ANSYS
- Estimar que tan conservador pueden ser los resultados entregados por el análisis de la AISC con respecto a los resultados del trabajo de Marsh y el análisis no lineal de ANSYS.
- Estimar las demandas sobre la conexión en los extremos de los elementos y en la intersección con el arriostramiento cruzado.

I.3. Alcances

Debido a la alta periodicidad sísmica de Chile, es importante tener en cuenta recomendaciones de diseño que permitan mejorar el comportamiento de los elementos, y de esta forma, evitar fallas que pongan en riesgo otros elementos, o aún peor, la estabilidad de la estructura.

En el Capítulo II se indican los antecedentes de los métodos analíticos de diseño, el criterio de la AISC, las ecuaciones entregadas en el trabajo de Cedric Marsh “Design of Single and Multiple Angle Columns and Beams”, la normativa chilena NCh 2369Of2003 y una revisión de lo indicado por la norma AISI. El Capítulo III contiene el procedimiento seguido para el desarrollo del presente trabajo, indicando los detalles del análisis y las consideraciones utilizadas en la realización de los modelos del programa de elementos finitos ANSYS. En el Capítulo IV se encuentran los resultados obtenidos con el análisis de la AISC, el trabajo de Marsh y los modelos de ANSYS. El Capítulo V muestra el análisis de los resultados de los modos de falla, cargas críticas y sollicitaciones sobre las conexiones, para finalizar discutiendo y concluyendo los puntos más importantes en el capítulo VI.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

II.1. American Institute of Steel Construction (2010)

Para clasificar los perfiles se utilizaron las expresiones descritas en la Tabla B4.1a Razones Ancho-Espesor: Elementos en Compresión. Miembros sujetos a Compresión Axial – Caso 3. Alas de perfiles ángulo laminados; alas de pares de ángulos con separadores y todo tipo de elemento no atiesado. La razón Ancho-Espesor o esbeltez local de la sección es determinada de la siguiente forma.

$$\lambda = b/t \quad (1.1)$$

En donde:

b : Largo del ala del ángulo simple

t : Espesor de la sección

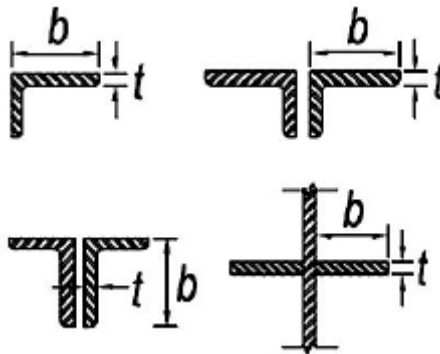


Figura 2: Ejemplo de dimensiones a considerar.

Para clasificar los perfiles como esbeltos (E) o no esbeltos (NE) se indica que el límite de esbeltez de la sección será.

$$\lambda_r = 0.45\sqrt{E/F_y} \quad (1.2)$$

En donde:

E : Módulo de elasticidad del acero

F_y : Límite de fluencia del acero

La esbeltez global del perfil con la cual se comparará el límite de esbeltez se encuentra definida por las expresiones.

$$\lambda_u = \frac{K \cdot L}{r_u} \quad (1.3)$$

$$\lambda_v = \frac{K \cdot L}{r_v} \quad (1.4)$$

$$\lambda = \max(\lambda_u, \lambda_v) \quad (1.5)$$

En donde:

u, v : Ejes principales, figura 3.

K : Factor de longitud efectiva

L : Longitud no arriostrada lateralmente

r_u, r_v : Radio de giro en el eje u y v , respectivamente

La disposición de ejes utilizados se muestra en la siguiente figura.

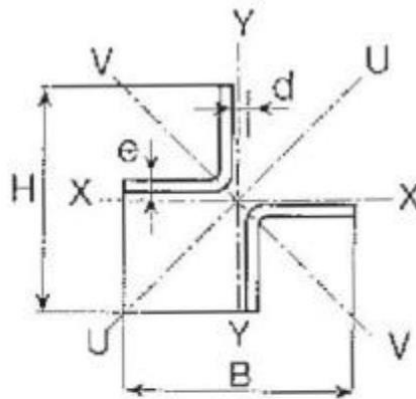


Figura 3: Disposición de ejes para el análisis por el AISC.

Por tratarse de una combinación de perfiles, es necesario modificar la esbeltez del elemento para el eje U según la sección E6.1.

Cuando $\frac{a}{r_i} < 40$.

$$\lambda_m = \lambda_u \quad (1.6)$$

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

$$\lambda_m = \sqrt{\lambda_u^2 + \left(\frac{K_i a}{r_i}\right)^2} \quad (1.7)$$

En donde:

a : Distancia entre conectores

r_i : Radio de giro mínimo del componente individual

K_i = 0.50, ángulos espalda-espalda;

0.75, canales espalda-espalda;

0.86, para otros casos.

Los perfiles sin elementos esbeltos clasificados según el límite descrito por la ecuación 1.2, se encuentran sujetos a los estados límites de las secciones E3.Pandeo por flexión y E4.Resistencia a compresión, pandeo torsional y flexo-torsional. Mientras que en las secciones catalogadas con elementos esbeltos se utiliza el punto E7.Miembros con elementos esbeltos.

Para los perfiles sin elementos esbeltos se estipula que la resistencia a la compresión nominal en el estado límite de pandeo se calcula con la siguiente expresión.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (1.8)$$

En donde:

F_{cr} : Tensión crítica de pandeo elástico.

A_g : Área bruta del perfil.

El cálculo de la tensión crítica varía dependiendo del estado último estudiado. En la sección E3. Pandeo por flexión de miembros sin elementos esbeltos se estipula.

Cuando $\lambda \leq 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (1.9)$$

Si $\lambda > 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (1.10)$$

En donde:

F_e : Tensión de pandeo elástico.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (1.11)$$

La sección E4. Resistencia a compresión, pandeo torsional y flexo-torsional, punto a, indica que para miembros con simetría doble la tensión crítica se calcula de la misma forma anterior con las ecuaciones 1.9 y 1.10. Para la tensión de pandeo elástico se estipula el uso de la siguiente expresión.

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + G J \right] \frac{1}{I_x + I_y} \quad (1.12)$$

En donde:

C_w : Constante de alabeo

K_z : Factor de longitud efectiva para la torsión

G : Módulo elástico de corte del acero

J : Constante torsional

I_x, I_y : Momento de inercia en torno de los ejes principales

Para secciones esbeltas se aplica la sección E7. Miembros con elementos esbeltos, en donde se indica que la resistencia de compresión nominal debe ser determinada basada en el estado límite de pandeo por flexión, torsional o flexo-torsional, utilizando las siguientes modificaciones.

Cuando $\lambda \leq 4.71\sqrt{E/QF_y}$

$$F_{cr} = Q \left[0.658 \frac{QF_y}{F_e} \right] F_y \quad (1.13)$$

Si $\lambda > 4.71\sqrt{E/QF_y}$

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (1.14)$$

En donde:

Q : Factor de reducción neto

$$Q = Q_s Q_a \quad (1.15)$$

Para elementos esbeltos no atiesados, $Q_a = 1$, y el factor de reducción Q_s es determinado según las siguientes expresiones.

Cuando $b/t \leq 0.56\sqrt{E/F_y}$

$$Q_s = 1.0 \quad (1.16)$$

Si $0.56\sqrt{E/F_y} < b/t < 1.03\sqrt{E/F_y}$

$$Q_s = 1.415 - 0.74 \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (1.17)$$

En el caso $b/t \geq 1.03\sqrt{E/F_y}$

$$Q_s = \frac{0.69 E}{F_y \left(\frac{b}{t} \right)^2} \quad (1.18)$$

Para determinar la resistencia de la soldadura se siguió lo estipulado en el punto J2. Soldaduras de la AISC. Con esto se obtiene que la resistencia será.

$$R_n = L \cdot t \cdot F_w \quad (1.19)$$

Donde:

L : Largo de la soldadura

t : Espesor efectivo de garganta,

$$t = 0.707 \cdot w \quad (1.20)$$

w : Tamaño de soldadura de filete

F_w : Tensión nominal del metal de soldadura,

$$F_w = 0.6 \cdot F_{e70} \quad (1.21)$$

F_{e70} : Resistencia del metal de soldadura,

$$F_{e70} = 492 \text{ MPa}$$

II.2. Cedric Marsh (1997)

El trabajo “Design of Single and Multiple Angle Columns and Beams” de C. Marsh, presenta las fórmulas para el cálculo de la carga límite de perfiles compuestos por ángulos dobles.

La disposición de ejes utilizados para la caracterizar las cargas es la siguiente.

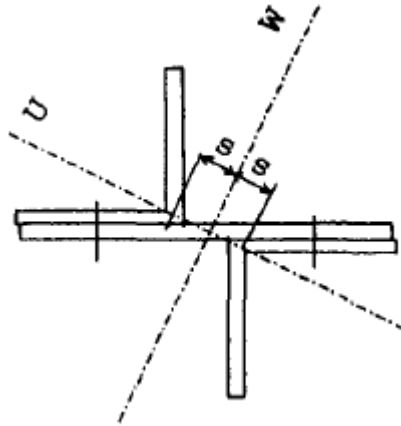


Figura 4: Disposición de ejes utilizados por el análisis de Marsh.

En donde:

U, W : Ejes principales de la sección.

Para la flexión en el eje U

$$P_U = \frac{2\pi^2 EA}{\lambda_U^2} \quad (2.1)$$

En donde:

E : Módulo de elasticidad del acero.

A : Área de la sección.

λ_U : Esbeltez del perfil en el eje U.

La esbeltez del perfil en el eje U es calculada como.

$$\lambda_U = \frac{2.4 K L}{b} \quad (2.2)$$

En donde:

K : Factor de longitud efectiva.

L : Longitud no arriostrada lateralmente.

b : Largo del ala del elemento individual.

En el caso de la flexión en el eje W, es necesario utilizar una esbeltez modificada.

$$\lambda_{WV} = \sqrt{\lambda_W^2 + \lambda_V^2} \quad (2.3)$$

En donde:

λ_{WV} : Esbeltez modificada del perfil compuesto.

λ_W : Esbeltez modificada del eje W, calculada como.

$$\lambda_w = \frac{K L}{r_w} \quad (2.4)$$

r_W : Radio de giro del eje w.

$$r_W = \sqrt{r_{vi}^2 + (u_0 + s)^2} \quad (2.5)$$

r_{vi} : Radio de giro menor del elemento individual.

u_0 : Centro de gravedad del perfil individual.

s : Distancia entre centros de gravedad del elemento individual y la pieza compuesta.

λ_V : Esbeltez modificada del eje V.

$$\lambda_V = \frac{K L}{r_{vi}} \quad (2.6)$$

Con esto, la carga límite en el eje W se determina como

$$P_{WV} = \frac{2\pi^2 EA}{\lambda_{WV}^2} \quad (2.7)$$

La carga debido a la torsión del perfil se calcula con la siguiente expresión.

$$P_t = \frac{2\pi^2 EA}{\lambda_t^2} \quad (2.8)$$

En donde:

λ_t : Esbeltez torsional.

$$\lambda_t = 5.1 \frac{b}{t} \quad (2.9)$$

b : Espesor de las alas del elemento.

II.3. NCh 2369 de 2003

En el punto 8.3.1 Marcos arriostrados de la Norma Chilena de Diseño Sísmico Industrial, se estipula en el punto 8.3.3., los elementos de sistemas sismorresistentes verticales que trabajan en compresión deben tener relaciones ancho/espesor menores que λ_r . Además, la esbeltez global del elemento debe ser menor que la siguiente expresión.

$$\lambda_{max} = 1.5 \pi \sqrt{E/F_y}. \quad (3.1)$$

En la tabla 8.1 – Límites de la relación ancho/espesor de la norma chilena, se indica que para clasificar a los elementos como esbeltos o no esbeltos se utilizará, al igual que en la AISC, el límite de esbeltez de los perfiles XL a compresión, indicado a continuación.

$$\lambda_r = 0.45\sqrt{E/F_y} \quad (3.2)$$

En donde:

E : Módulo de elasticidad del acero

F_y : Límite de fluencia del acero

II.4. American Iron and Steel Institute (2007)

Según el capítulo C4. Miembros en compresión concéntricamente cargados, se determina la resistencia nominal para el pandeo flexural, flexo-torsional y torsional.

$$P_n = F_n A_e \quad (4.1)$$

En donde:

F_n : Tensión nominal.

A_e : Área bruta del perfil.

La tensión nominal es calculada de la siguiente forma, para $\lambda_c \leq 1.5$.

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (4.2)$$

Para $\lambda_c > 1.5$.

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad (4.3)$$

En donde:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (4.4)$$

F_e : La mínima tensión de pandeo elástico flexural, flexo-torsional o torsional.

La tensión debido al pandeo flexural se calculó según el punto C4.1.1. Secciones no sujetas a pandeo torsional o flexo-torsional, en donde se estipula que.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (4.5)$$

En donde:

E : Módulo de elasticidad del acero

K : Factor de longitud efectiva

L : Longitud no arriostrada lateralmente

r : Radio de giro de la sección

Para los casos de flexo-torsión y torsión se aplicó la sección C4.1.2 Elementos con doble y simple simetría sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional, en donde se indica que.

$$F_e = \sigma_t$$

Con.

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} + G J \right] \quad (4.6)$$

En donde:

C_w : Constante de alabeo

K_t : Factor de longitud efectiva para la torsión

G : Módulo elástico de corte del acero

J : Constante torsional

r_o : Radio polar; $r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2}$

r_x, r_y : Radio de giro con respecto a los ejes principales de la sección.

x_o : Distancia del centro de corte y el centroide.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El trabajo se divide esencialmente en cuatro secciones, el análisis mediante la norma de diseño AISC, según las ecuaciones descritas por Cedric Marsh en su trabajo “Design of Single and Multiple Angle Columns and Beams”, por un análisis no lineal de desplazamiento controlado mediante el programa de elementos finitos ANSYS y finalmente el análisis de los resultados anteriores.

En la primera y segunda sección del trabajo se determinaron las cargas críticas y modos de falla de cada elemento según el procedimiento de diseño descrito en la AISC y mediante las expresiones descritas en el trabajo de C. Marsh (1997) para el cálculo de fuerzas de pandeo y flexión de perfiles compuestos por un doble ángulo.

Según lo estudiado se decidió no utilizar los resultados entregados por la norma de diseño AISI, debido a la similitud con la AISC en las expresiones de cálculo de tensión nominal de las secciones. Además, la primera norma considera una resistencia post pandeo que aumenta las cargas críticas de los elementos, por lo que la AISC entrega resultados menores.

Para la tercera parte, se realizaron modelos con el programa de elementos finitos ANSYS. Con un análisis elástico se clasificó la primera forma de falla de cada perfil según tres estados límites, flexión, flexo torsión y torsión, como se observa en las figuras 5,6 y 7, respectivamente.

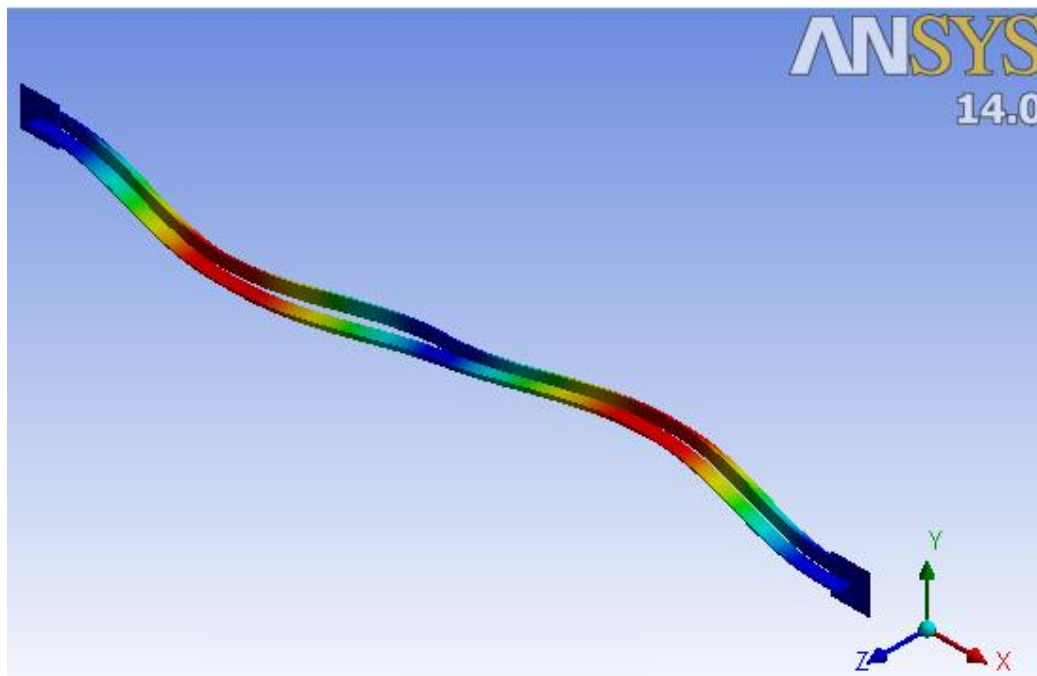
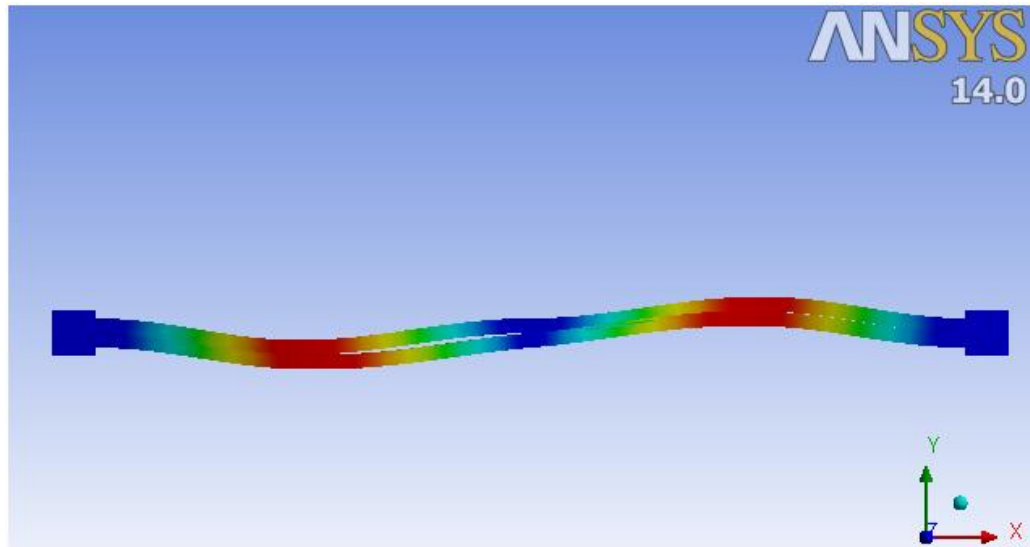


Figura 5: Falla por flexión, vista lateral e isométrica.

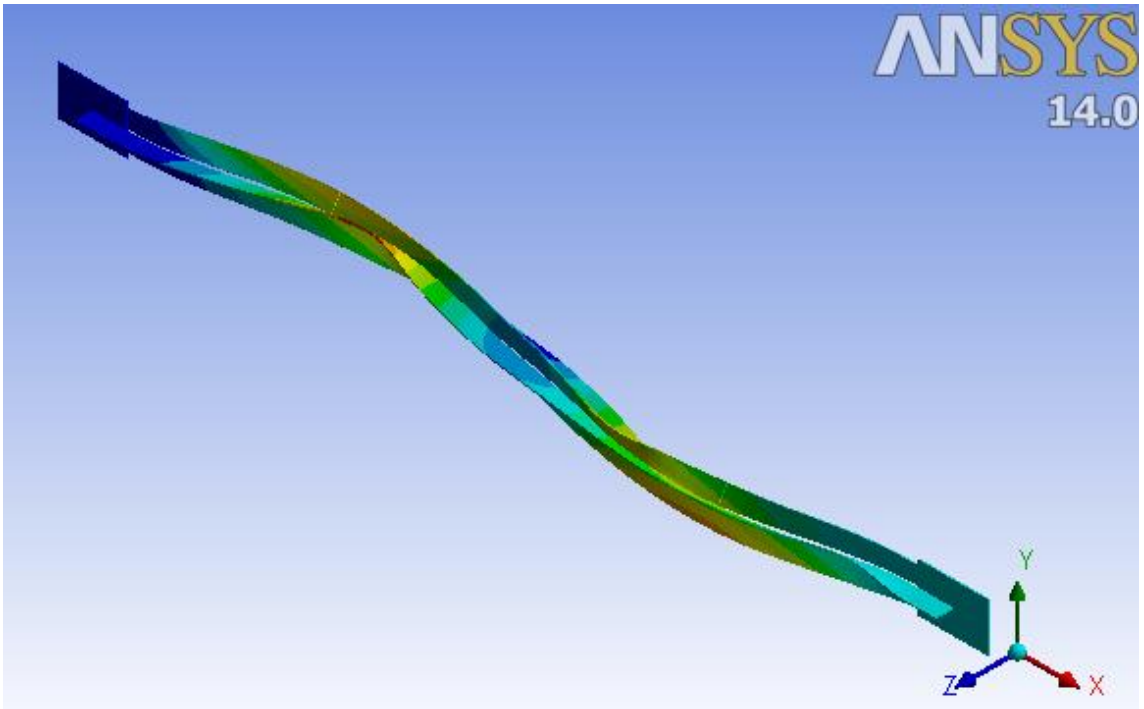
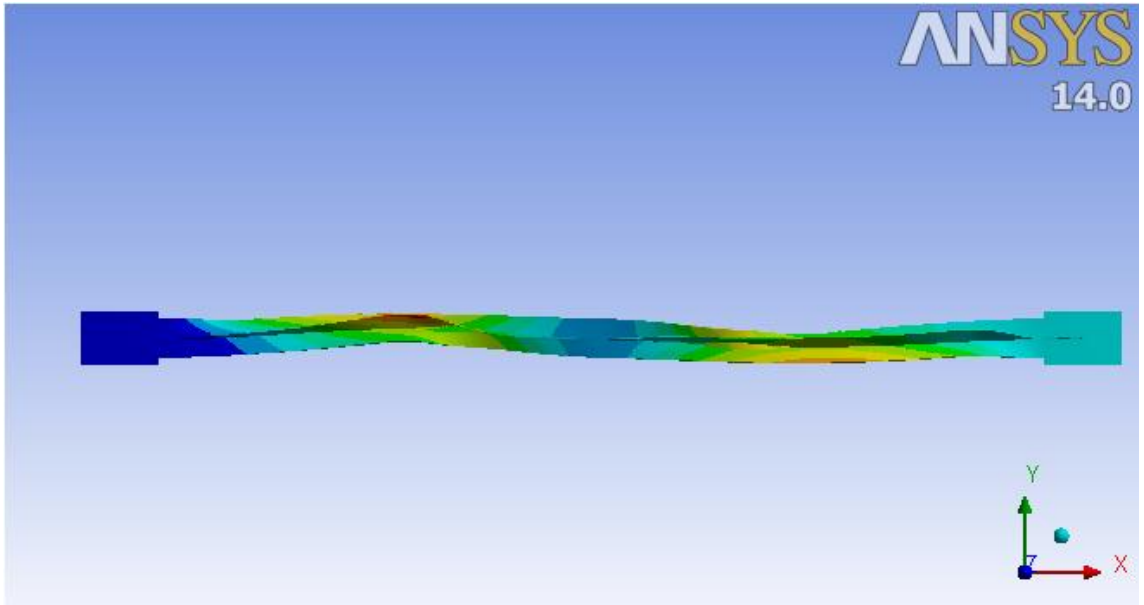


Figura 6: Falla por flexo torsión, vista lateral e isométrica.

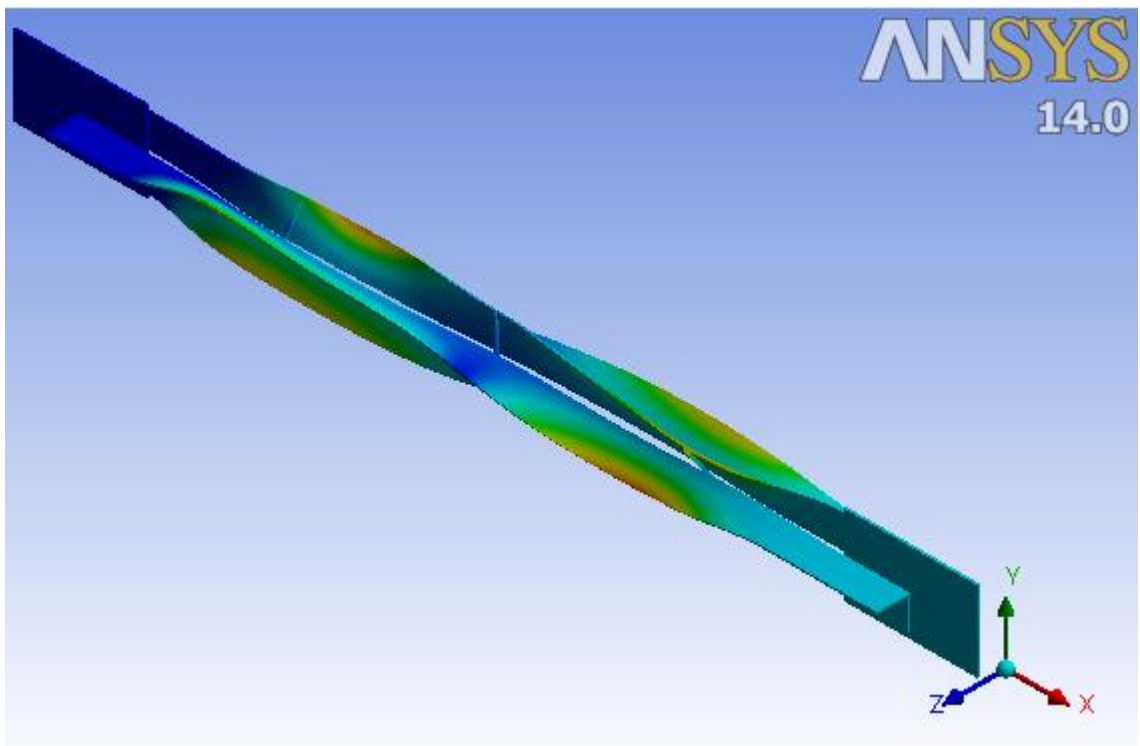
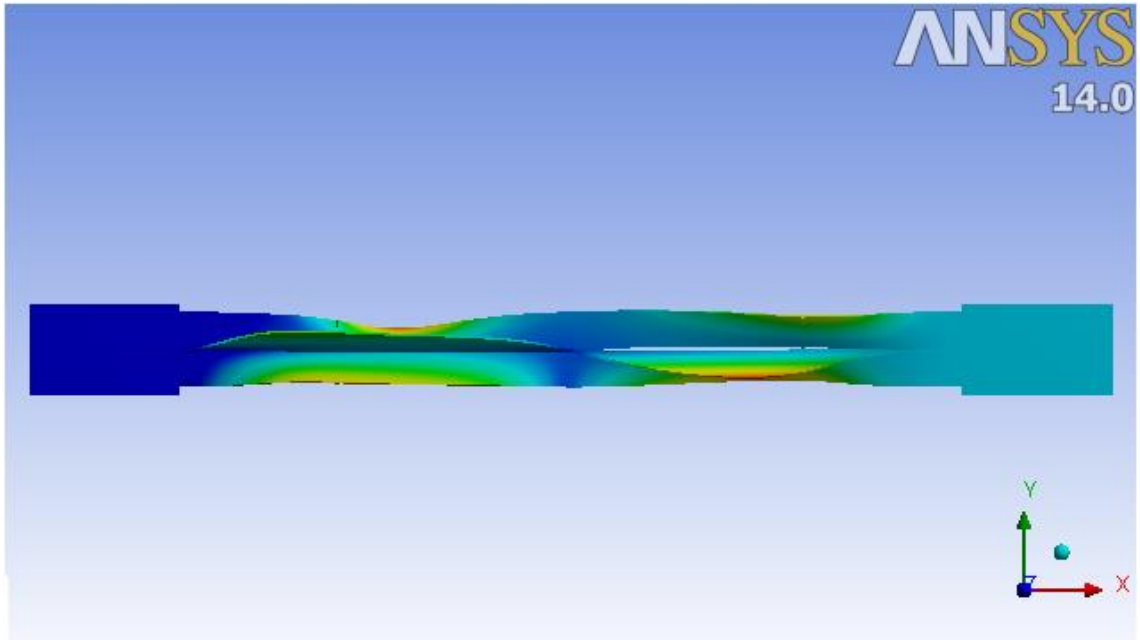


Figura 7: Falla por torsión, vista lateral e isométrica.

Luego con el análisis no lineal se identificaron las fuerzas a las que se encuentra sometida la placa de conexión del extremo y central del arriostramiento, como se muestra en la figura 8.

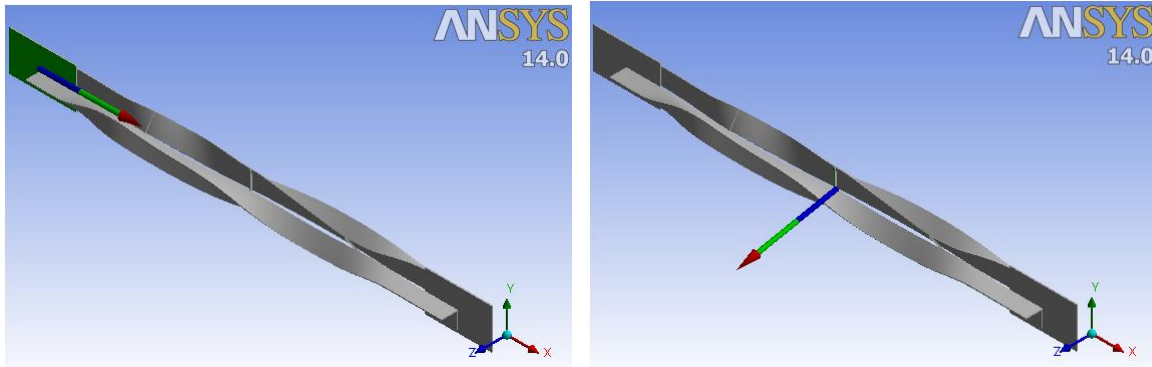


Figura 8: Fuerza resultante sobre la placa de extremo y central, respectivamente.

Con estos resultados se determinó la carga crítica del elemento, como la componente en el eje X de la fuerza resultante de la placa del extremo. Mientras que las otras dos componentes se utilizaron para estimar las solicitaciones a las que se encuentra sometida la soldadura de conexión.

Se compararon los resultados de cada método en busca de una tendencia que relacione el tipo de falla con las propiedades de los perfiles. También se investigó un nexo entre las fuerzas sobre las placas y las dimensiones de los elementos.

Finalmente con los resultados obtenidos, se entregan recomendaciones de diseño de las conexiones y soldaduras. Éstas, no permiten subestimar las solicitaciones sobre las uniones del arriostramiento con la placa. También se propone un factor que permite seleccionar un perfil con mejor desempeño, es decir, que idealmente falle por flexión ya que este estado facilita la reparación de los miembros afectados, no así la torsión que además genera una distorsión en las placas conectoras y los elementos que interactúan con el arriostramiento. Por último, permite distinguir los elementos que no presenten solicitaciones excesivas en las placas de conexión al momento de ser cargadas.

III.1. Modelo ANSYS

III.1.1. Geometría

Para el desarrollo completo de la investigación se utilizó una gama de perfiles XL, de dimensiones comúnmente utilizadas en la práctica y largos totales de 1.5, 2.5, 5 y 10 metros, como se muestra en la figura 9.

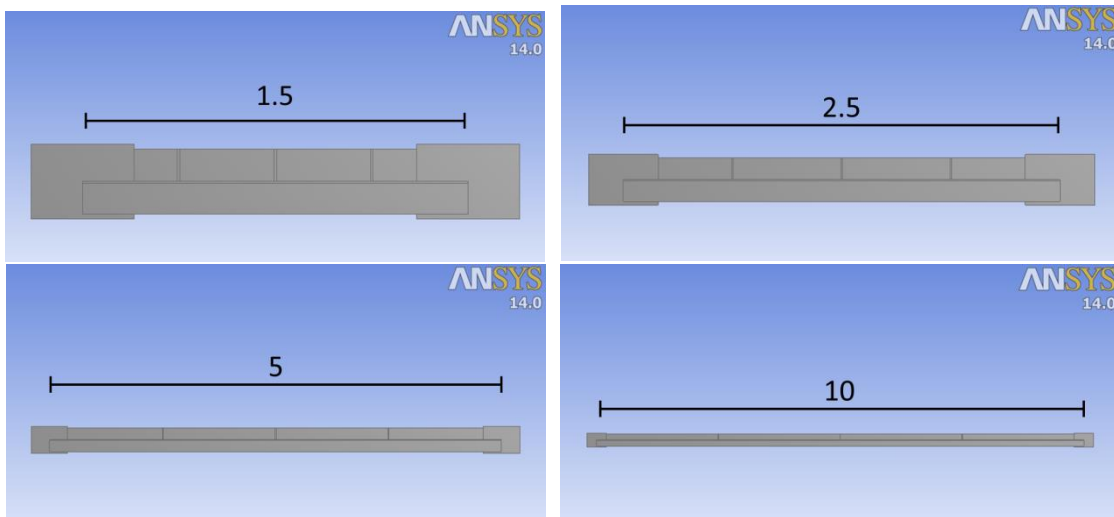


Figura 9: Largos de los arriostramientos, dimensiones en metros.

Con esta selección de propiedades se analizó un total de 180 modelos por cada método de estudio.

La geometría de los modelos está basada en un perfil XL, conformado por dos ángulos unidos en su parte central por medio de una placa de conexión adherida a las caras opuestas de las secciones, como se aprecia en la figura 10. Estas placas tienen un largo igual a dos veces la altura total del perfil XL. Mientras que el alto de la placa excede en 20 mm tanto la parte superior como la inferior del doble ángulo.

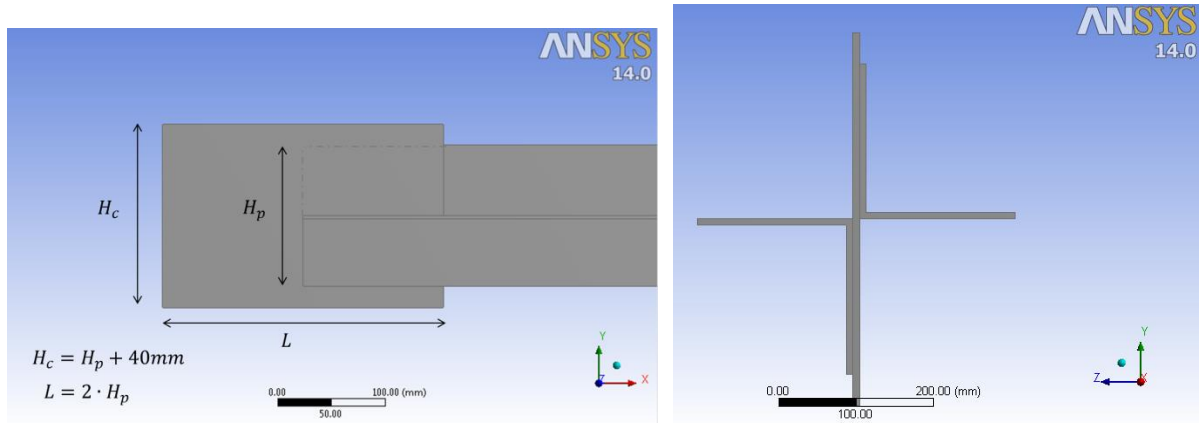


Figura 10: Geometría del modelo, dimensiones de la placa y vista frontal.

Además se agregan 3 planchas a lo largo del elemento que evitan la distorsión de la forma del perfil al aplicarse carga. Estos conectores se encuentran distanciados entre sí a un cuarto de la distancia total del elemento, como se observa en la figura 11. Su espesor es el mismo de las placas de conexiones extremas y su ancho es de 10 mm.

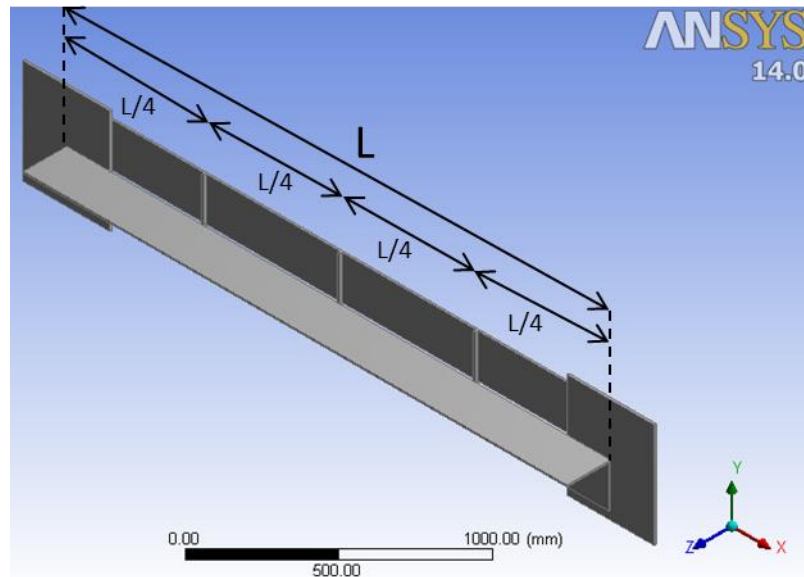


Figura 11: Geometría del modelo, vista isométrica.

III.1.2. Análisis Elástico

A continuación se presentan las consideraciones tomadas para el análisis elástico de los modelos.

III.1.2.1. Material

Se utilizaron las propiedades del acero A36.

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$F_y = 250 \text{ MPa}$$

Donde:

ρ : Densidad.

E : Módulo de elasticidad.

F_y : Tensión de fluencia.

III.1.2.2. Mallado

Se estudiaron tres niveles de mallado diferentes, figuras 12, 13 y 14, variando el tamaño y la distribución de los elementos utilizados. Con el análisis de sensibilidad se obtiene.

Tabla 1. Análisis de sensibilidad de mallado para modelos elásticos.

Mallado	Análisis Estático		
	Deformación	Carga	Tipo de Falla
	mm	kN	
Fino	1.0013	76.5	Torsión
Fino con Refinamiento	1.001	91.5	Torsión
Fino con Asignación	1.0014	76.7	Torsión

Por lo tanto, aunque se obtienen valores similares con la primera y tercera opción, se decidió utilizar el mallado fino con asignación de caras que mejora la transferencia de fuerzas entre los elementos de los extremos.

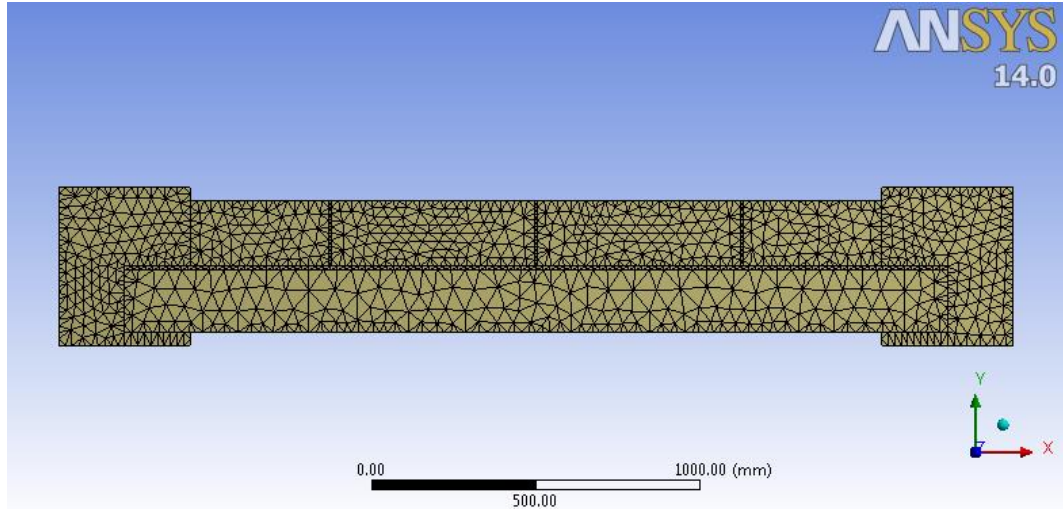


Figura 12: Mallado fino.

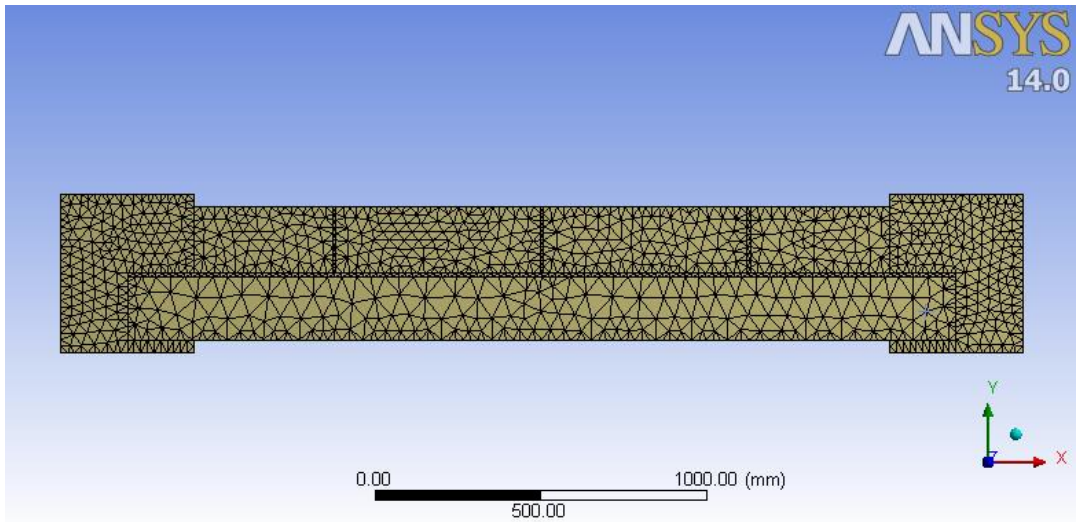


Figura 13: Mallado con refinamiento de caras.

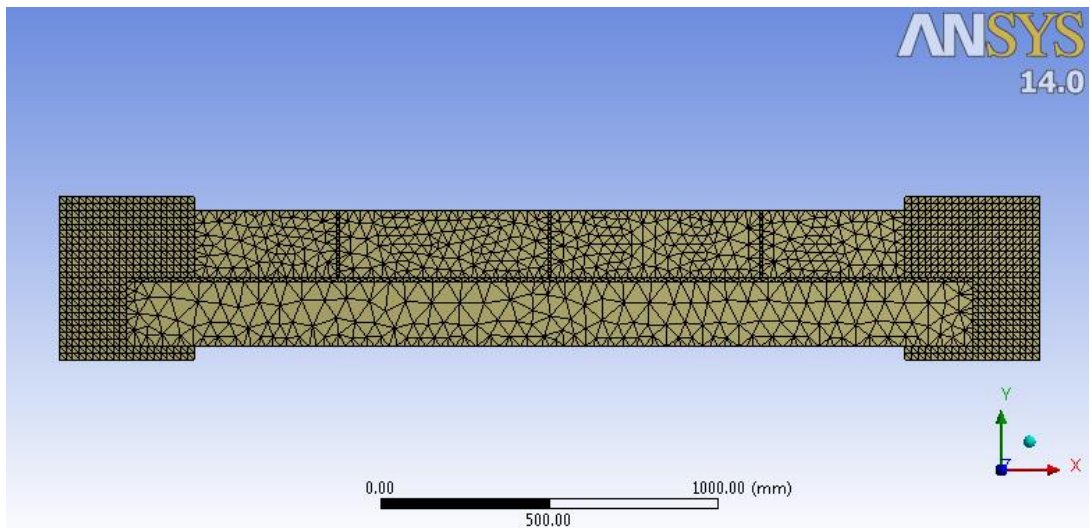


Figura 14: Mallado con asignación de caras.

III.1.2.3. Carga Inicial

La carga utilizada para determinar el modo de falla de los modelos fue.

$$P = 1 N$$

Esta carga es aplicada en el extremo libre del elemento y en dirección axial. Se utiliza la unidad debido a que la carga final de pandeo es presentada por el programa ANSYS como un multiplicador de la carga aplicada, por lo tanto, al utilizar este valor se facilita la lectura de los datos.

III.1.2.4. Restricciones

En los modelos se aplicaron 3 restricciones importantes, como se aprecia en la figura 15. Uno de los extremos estará empotrado, es decir, restringido en todos los sentidos de desplazamiento y rotación. Mientras que el otro apoyo sólo se podrá deslizar en el plano axial. De la misma forma anterior, el centro del arriostramiento sólo tiene libertad en la dirección longitudinal. Esto último es debido a la forma en que trabajan estas diagonales, en donde se intersecta en el centro con otro arriostramiento cruzado que restringe su desplazamiento lateral. La disposición 8.3.4 de la norma NCh 2369, indica que el punto de unión de las diagonales se puede considerar fijo en la dirección perpendicular al plano de las diagonales cuando una de las diagonales sea continua.

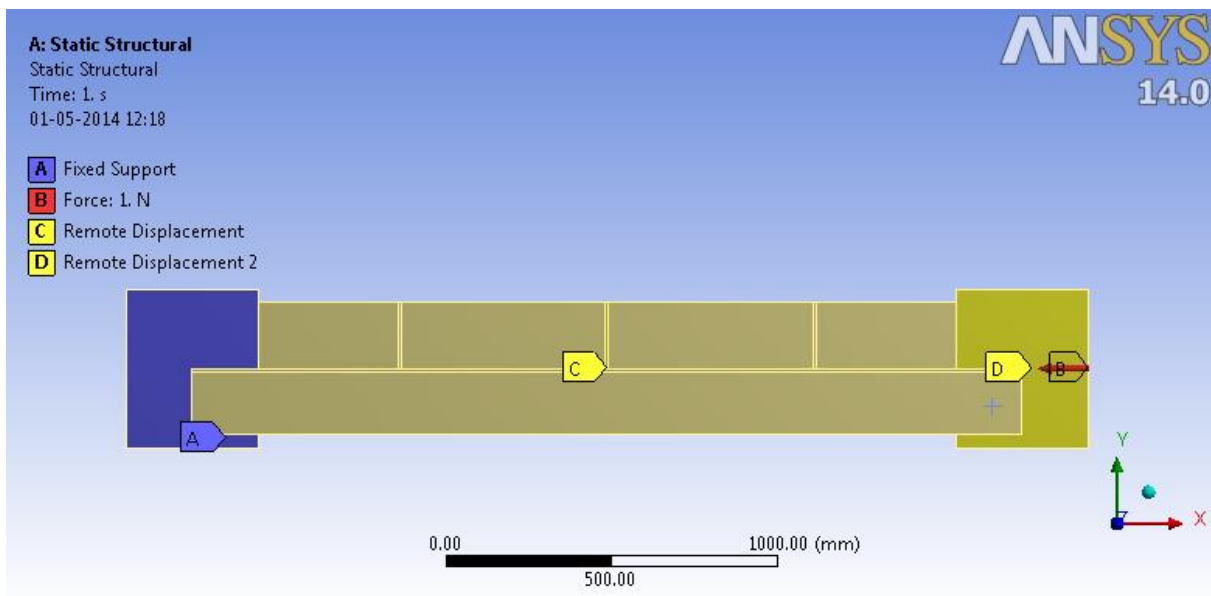


Figura 15: Restricciones del modelo y carga aplicada.

III.1.3. Análisis No Lineal

A continuación se presentan las consideraciones tomadas para el análisis no lineal tipo Push-Over de los modelos.

III.1.3.1. Material

Se utilizó un acero con ley constitutiva bilineal basado en las propiedades nominales del acero A36, con una tensión de fluencia de 2.5×10^8 Pa y un módulo tangente igual a 1×10^{10} Pa, como es posible observar en la curva obtenida de los datos de ingeniería del programa ANSYS, representada en la figura 16.

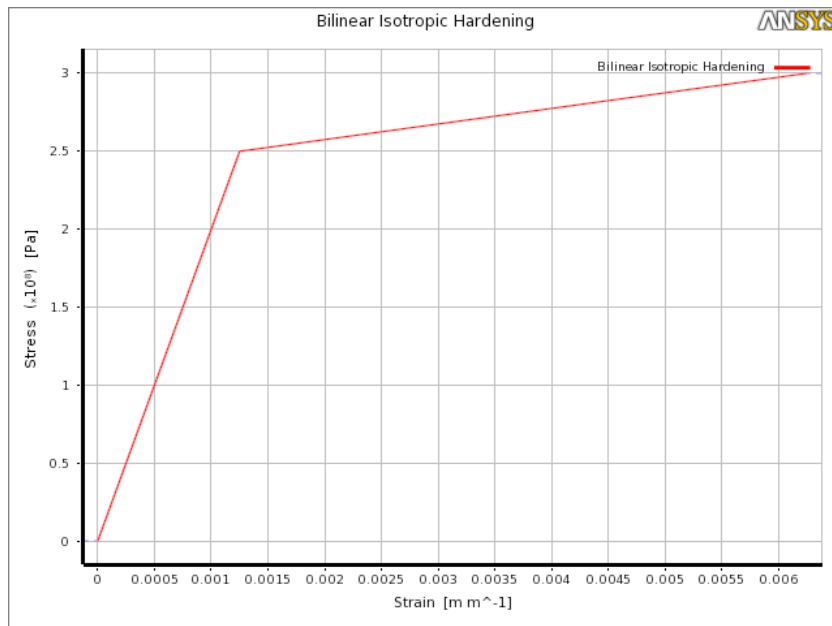


Figura 16: Ley constitutiva bilineal del acero.

III.1.3.2. Mallado

Analizando nuevamente los tres niveles anteriores se decide utilizar el mismo mallado anterior, pero más la asignación de caras.

Tabla 2: Análisis de sensibilidad de mallado para los modelos no lineales.

Mallado	Análisis No lineal	
	Deformación	Carga
Fino	mm	kN
Fino con Refinamiento	96.87	169.82
Fino con Asignación	101.09	190.75
	102.07	149.33

III.1.3.3. Imperfección Inicial

Al modelo se le aplica una deformación inicial proporcional al primer modo de falla determinado en el análisis elástico, esto según el criterio de tolerancia máxima del material indicada en la AISC Code of Standard Practice, dado por un milésimo del largo no arriostrado lateralmente del elemento. Para determinar el nivel de distorsión a utilizar, se analizaron distintos niveles de imperfección 2, 5, 7 y 10 mm con respecto al primer modo de falla. Obteniéndose.

Tabla 3: Análisis de sensibilidad de la imperfección inicial para los modelos no lineales.

	Deformación	Carga
Imperfección	mm	kN
2	117.09	499.24
5	111.49	469.33
7	109.27	458.88
10	105.4	442.09

La disminución de carga no es de una magnitud significativa, por lo tanto, se decide utilizar una imperfección inicial de 5 mm, como se muestra en la figura 17.

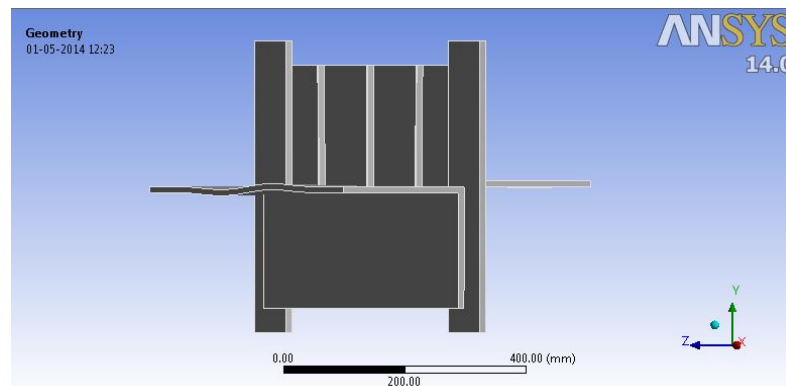


Figura 17: Imperfección de 5 mm en el modelo.

III.1.3.4. Desplazamiento inicial

Para determinar el modo de falla de los modelos en el análisis de control por desplazamiento, utilizándose como desplazamiento inicial.

$$d = 30 \text{ mm}$$

Este es aplicado en el extremo libre del elemento, denotado por la letra C en la figura 18, y en dirección axial. Lo que busca deformar el elemento hasta su límite de falla, y así, determinar la carga a la que estuvo sometido en ese instante.

III.1.3.5. Restricciones

Al igual que en el análisis elástico, se aplicaron 3 restricciones, figura 18. Uno de los extremos empotrado y otro libre en el plano axial. Debido al arriostramiento cruzado mencionado anteriormente en el punto III.2.3., se agrega una última restricción en el centro del arriostramiento que sólo permite desplazamiento longitudinal.

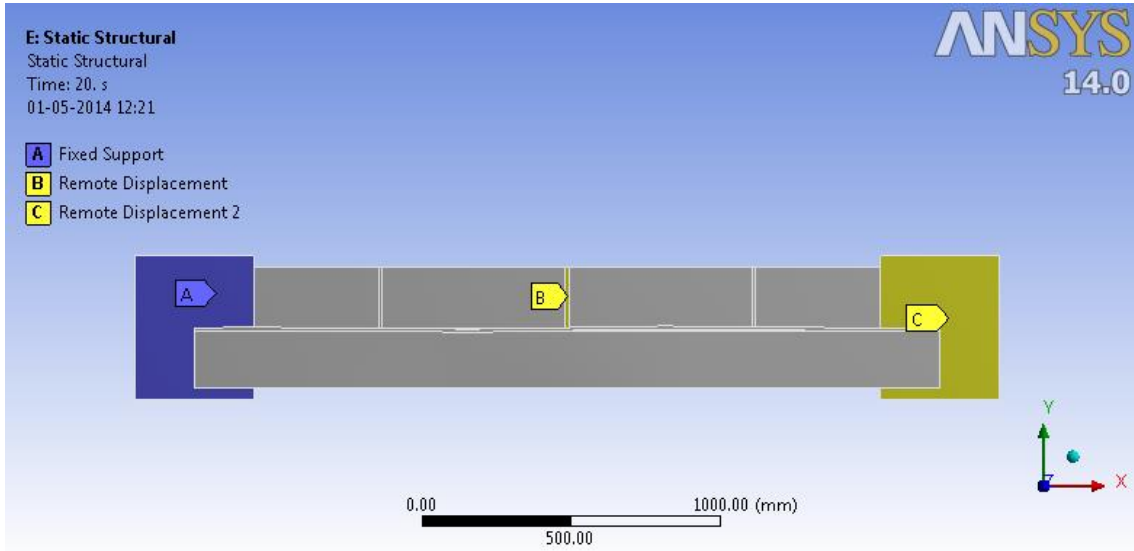


Figura 18: Restricciones del modelo.

CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

IV.1. Esbeltez y compacidad de los perfiles

Según las expresiones descritas en el punto III.1. American Institute of Steel Construction (2010) se clasificaron los perfiles como esbeltos (E) y no esbeltos (NE) según el límite indicado por la AISC del 2010 y la NCh 2369 del 2003, dado por la ecuación 1.2. Este límite se comparó la compacidad del perfil entregada por la ecuación 1.1.

La esbeltez global del elemento se encuentra calculada con la ecuación 1.5 de la siguiente forma.

$$\lambda = \max(\lambda_m, \lambda_v)$$

En donde λ_m y λ_v están descritas por las ecuaciones 1.6 o 1.7 y 1.4, respectivamente.

A continuación se presenta el valor de la esbeltez global del elemento y la clasificación por esbeltez local de los perfiles analizados. Destacando que no se agregan al contenido de las tablas 4 y 5 los resultados de las secciones que sobrepasan el límite de esbeltez máxima, igual a 133.3, descrito por la ecuación 3.1 de la sección II.3 NCh 2369 del 2003.

Tabla 4: Clasificación por esbeltez de las secciones, E = Esbeltos; NE = No esbeltos.

Designación			Compacidad	Largo [m]			
XL	H	Peso		1.5	2.5	5	10
	cm	kgf/m					
XL	4	1.15	NE	103.4	-	-	-
		1.65	NE	105.4	-	-	-
XL	5	1.47	NE	81.6	-	-	-
		2.12	NE	82.2	-	-	-
XL	6	1.78	E	67.1	118.0	-	-
		2.59	NE	67.0	118.0	-	-
		3.35	NE	67.6	119.3	-	-
XL	8	2.41	E	50.9	89.4	-	-
		3.54	E	50.8	89.4	-	-
		4.61	NE	50.9	89.6	-	-
		5.63	NE	51.0	89.9	-	-
		6.61	NE	51.4	90.7	-	-
XL	10	3.04	E	32.3	66.6	-	-
		4.48	E	32.5	66.5	-	-
		5.87	NE	32.7	66.4	-	-
		7.2	NE	36.2	66.6	-	-
		8.49	NE	36.2	66.8	-	-
XL	12	5.42	E	26.1	54.3	117.8	-
		7.12	E	26.4	54.3	117.8	-
		8.77	NE	26.5	54.2	117.7	-
		10.4	NE	26.6	54.2	118.0	-
XL	13	5.89	E	23.8	48.6	106.3	-
		7.75	E	23.8	48.6	106.4	-
		9.56	E	24.0	48.5	106.4	-
		11.3	NE	24.1	48.6	106.6	-

Designación			Compacidad	Largo [m]			
XL	H	Peso		1.5	2.5	5	10
	cm	kgf/m					
XL	16	7.3	E	18.3	33.9	85.9	-
		9.63	E	18.4	38.2	85.6	-
		11.9	E	18.4	38.2	85.5	-
		14.1	E	18.6	38.1	85.5	-
XL	20	12.1	E	13.6	26.1	66.6	-
		15.1	E	13.7	26.2	66.5	-
		17.9	E	13.8	26.3	66.5	-
		23.5	NE	13.9	26.4	66.5	-
XL	25	19.0	E	10.9	20.9	53.9	115.1
		22.6	E	11.0	20.9	53.9	115.1
		29.7	E	11.0	21.0	53.7	114.8
		36.7	NE	11.1	21.1	53.7	114.9
XL	30	27.3	E	9.1	17.4	44.8	95.7
		36	E	9.2	17.5	44.7	95.5
		44.5	E	9.2	17.5	44.6	95.5
		52.8	NE	9.2	17.6	44.7	95.6
XL	40	48.6	E	6.8	13.0	28.5	72.6
		60.2	E	6.8	13.1	28.6	72.5
		71.6	E	6.9	13.1	28.8	72.5
		82.9	E	6.9	13.2	28.9	72.5
		93.9	NE	6.9	13.2	28.9	72.5

IV.2. Modos de falla.

A continuación se presentan los modos de falla obtenidos según el diseño descrito por la AISC, por las fórmulas del trabajo de Marsh y el análisis no lineal por ANSYS. Además, se utilizó la siguiente nomenclatura para facilitar la presentación de datos.

- 1 = Flexión
- 2 = Flexo torsión
- 3 = Torsión

Con lo anterior, para los perfiles de 1.5 metros se obtuvo lo siguiente.

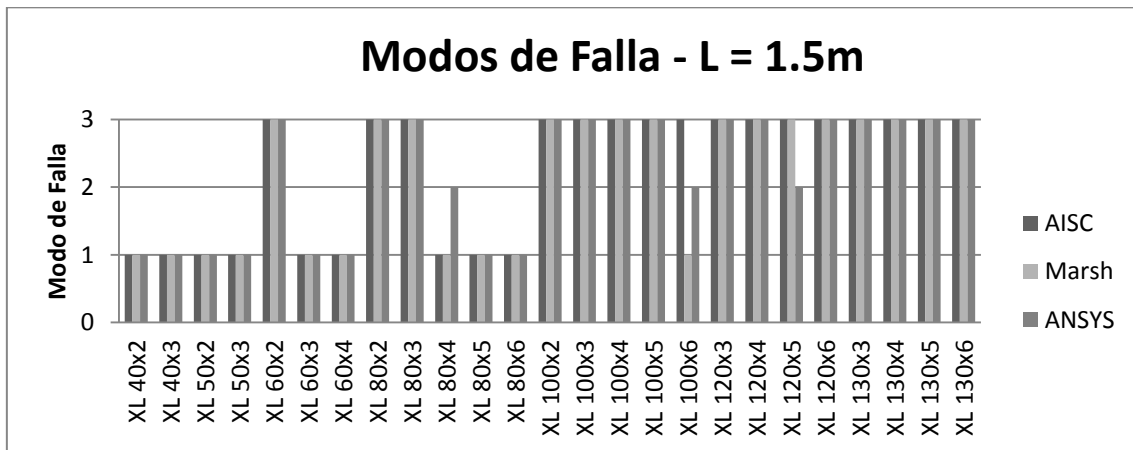


Figura 19: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 1.5m.

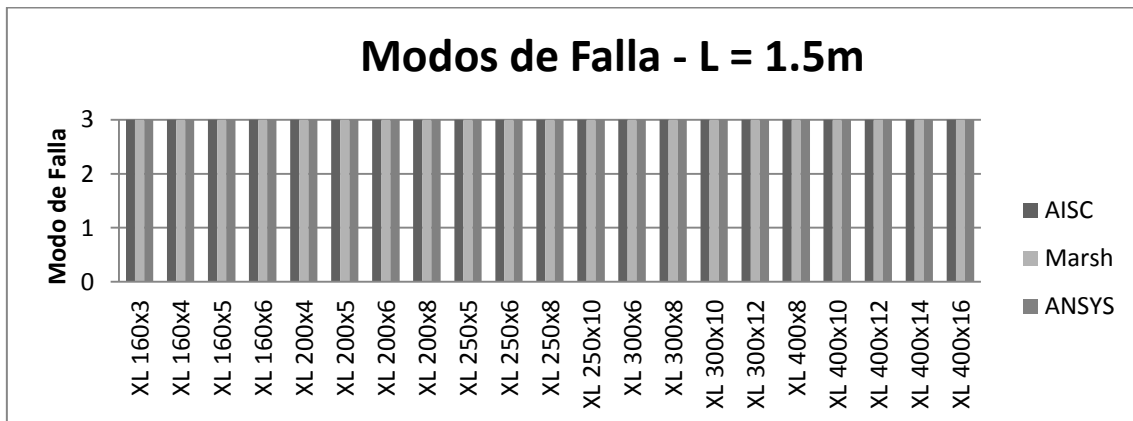


Figura 20: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 1.5m.

Para los de 2.5 metros de largo.

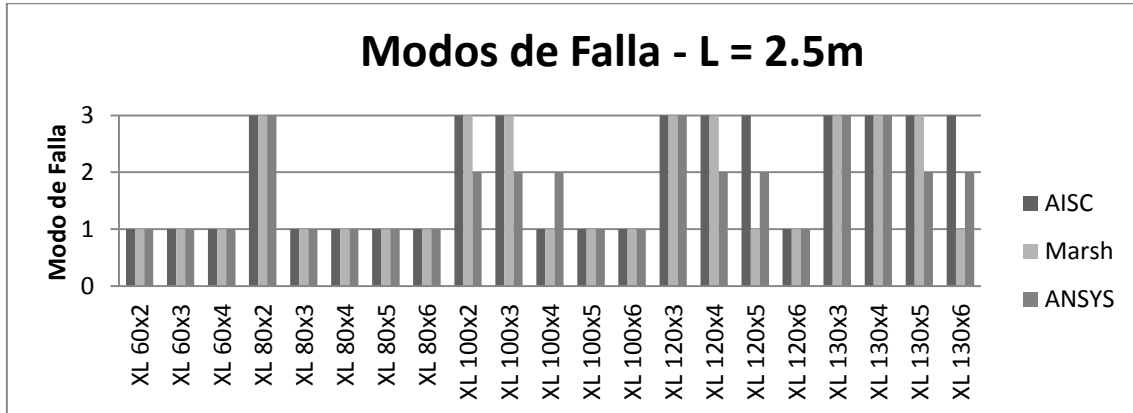


Figura 21: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 2.5m.

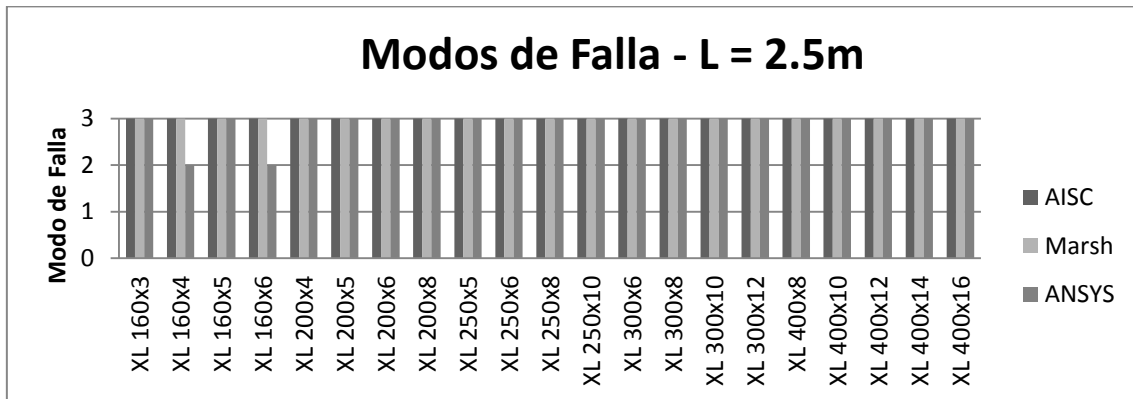


Figura 22: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 2.5m.

Los de 5 metros

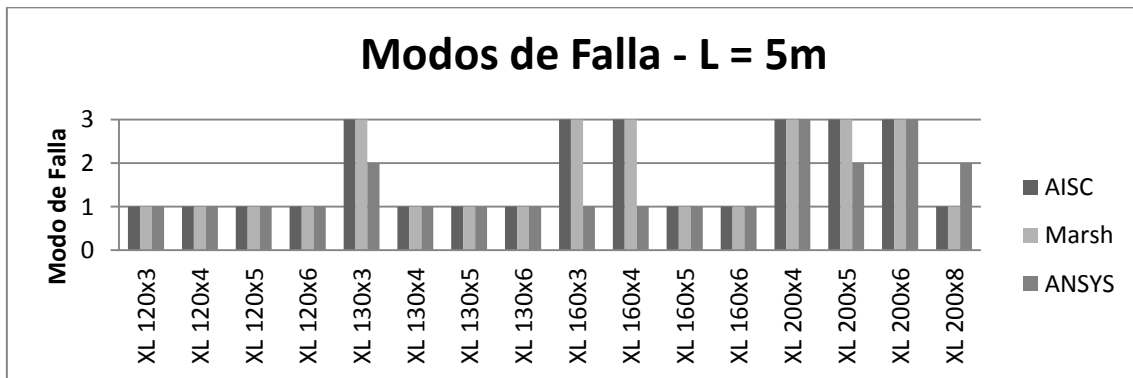


Figura 23: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 5m.

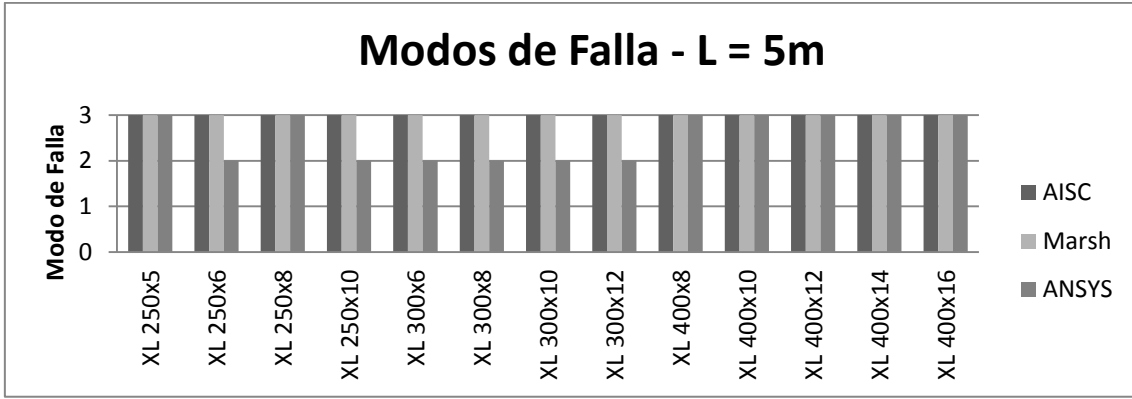


Figura 24: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 5m.

Finalmente para las diagonales de 10 metros.

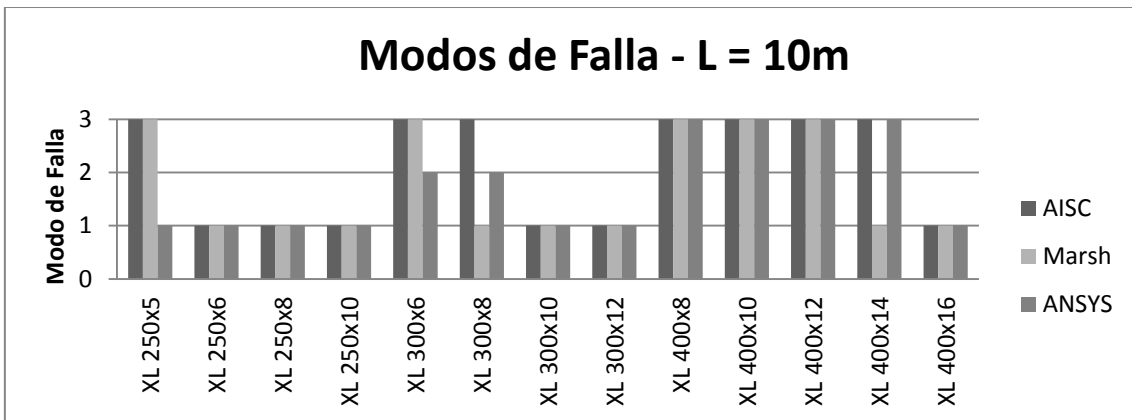


Figura 25: Modo de falla de los tres tipos de análisis para largos de 10m.

IV.3. Cargas Críticas.

A continuación se presentan las cargas críticas obtenidas según el diseño por la AISC, el trabajo de C.Marsh y el análisis no lineal de ANSYS.

El detalle con los valores numéricos de los resultados obtenidos se adjuntan en el Anexo A.

Para los arriostramientos de 1.5 metros de largo total se tiene.

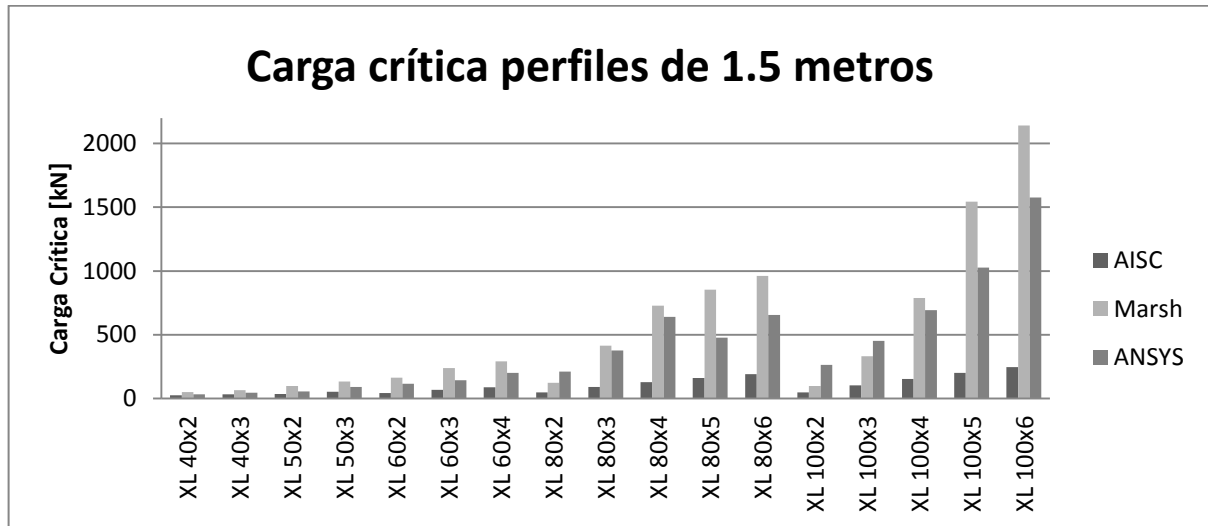


Figura 26: Cargas críticas de los perfiles de 1.5 m.

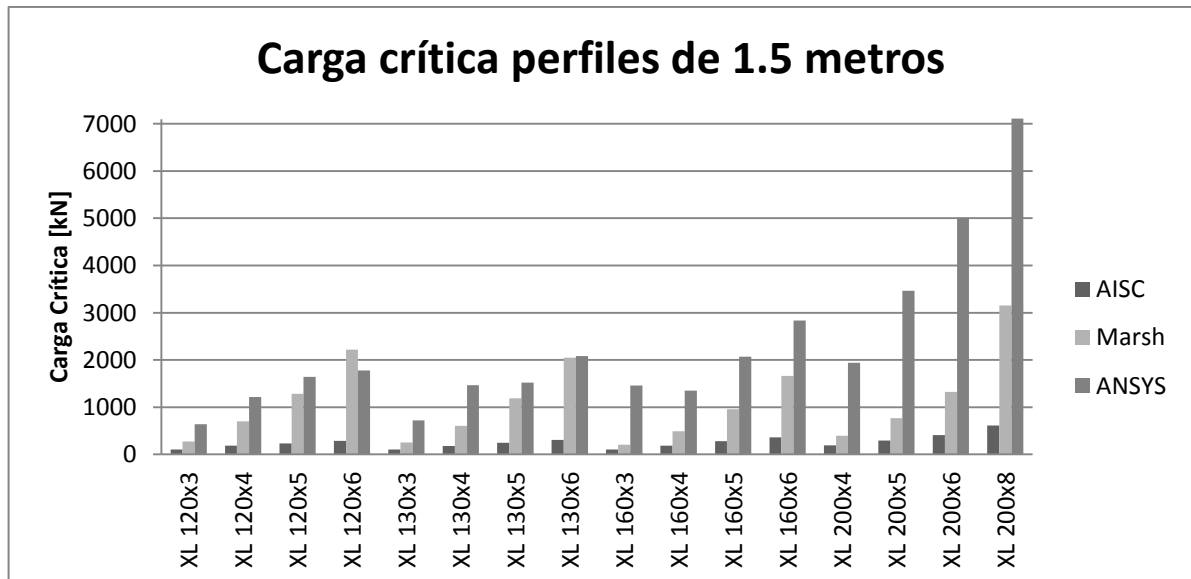


Figura 27: Cargas críticas de los perfiles de 1.5 m.

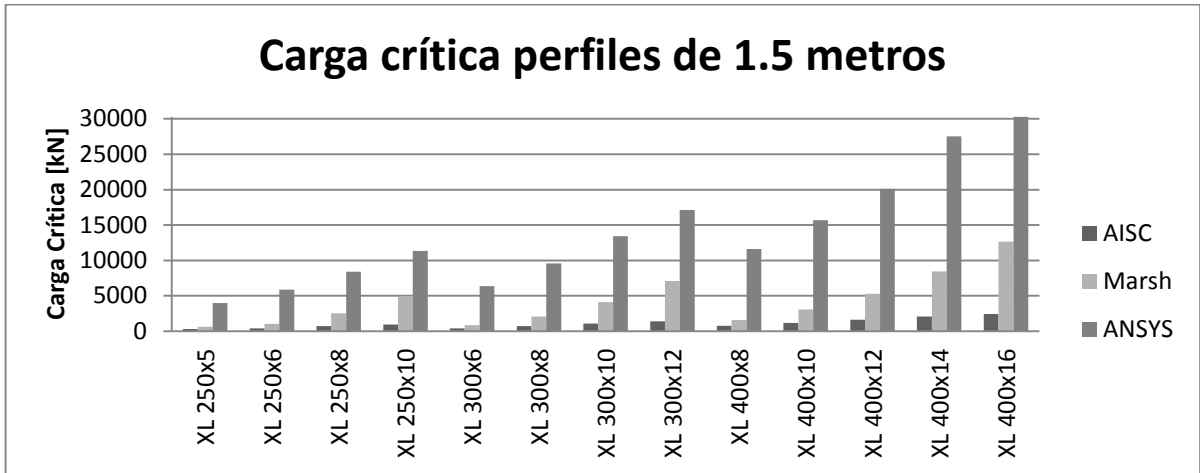


Figura 28: Cargas críticas de los perfiles de 1.5 m.

Los de 2.5 metros.

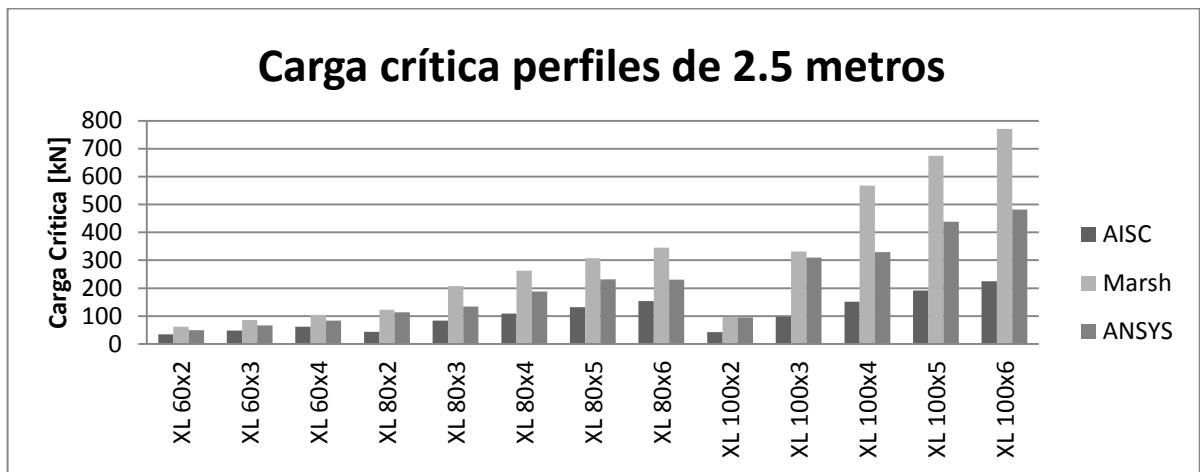


Figura 29: Cargas críticas de los perfiles de 2.5 m.

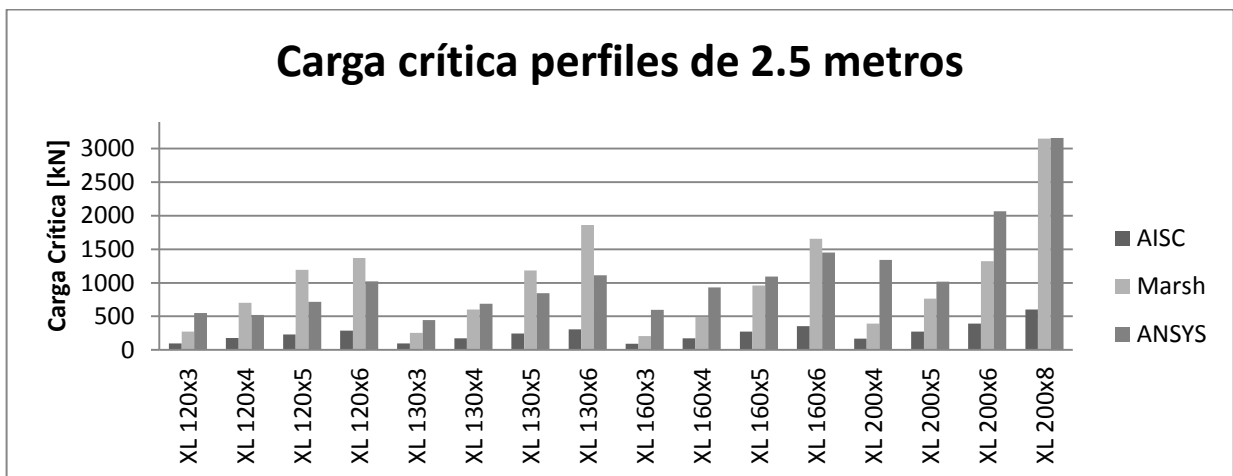


Figura 30: Cargas críticas de los perfiles de 2.5 m.

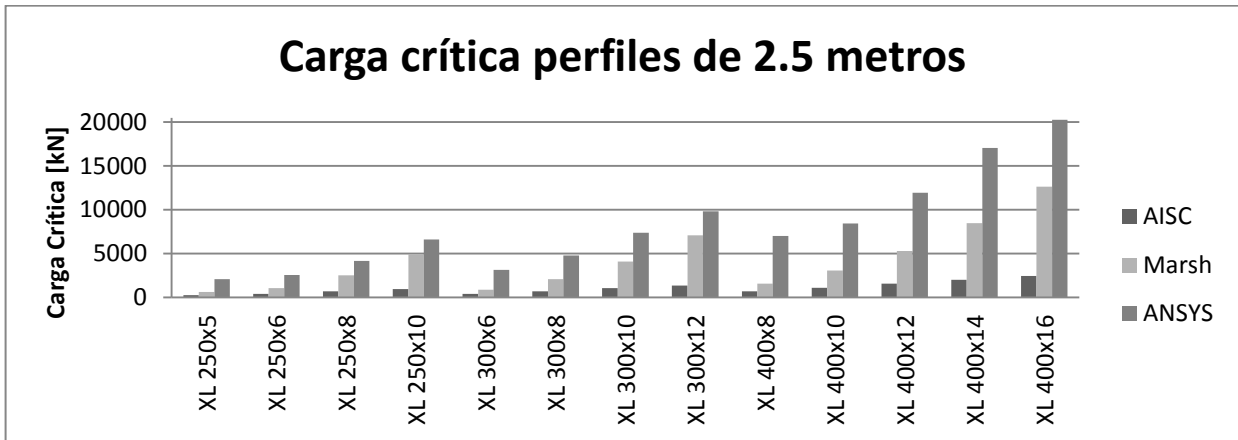


Figura 31: Cargas críticas de los perfiles de 2.5 m.

Los de 5 metros.

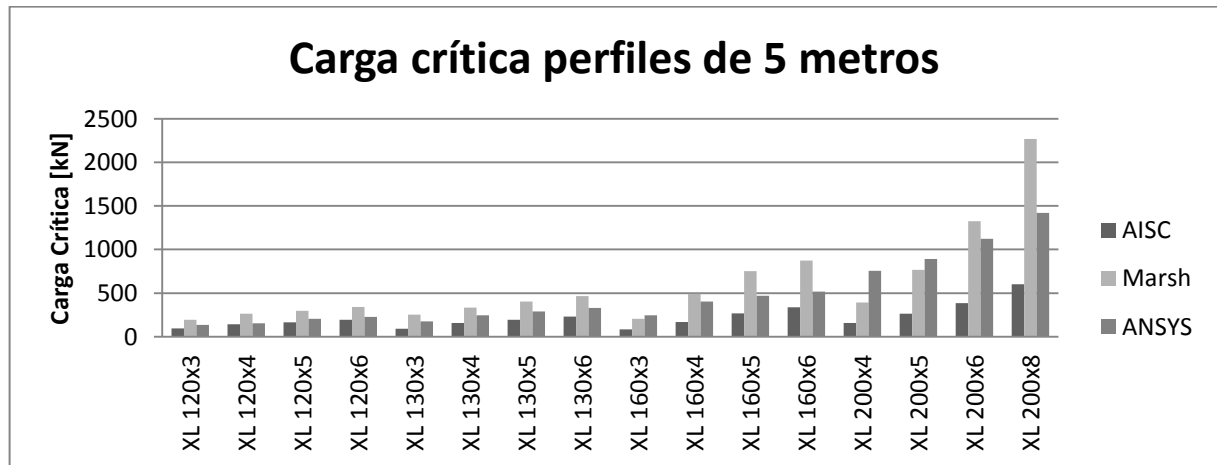


Figura 32: Cargas críticas de los perfiles de 5 m.

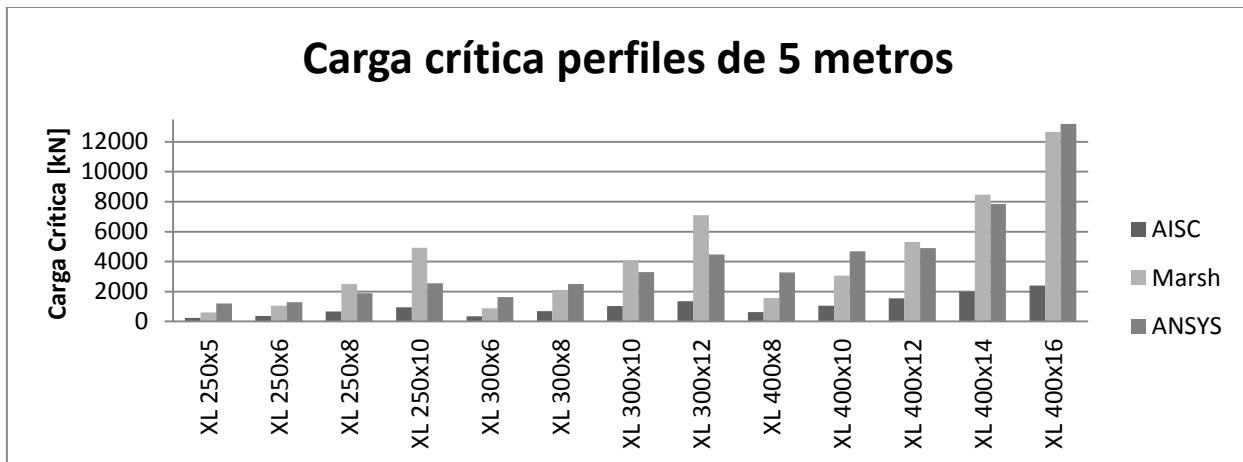


Figura 33: Cargas críticas de los perfiles de 5 m.

Finalmente los de 10 metros de largo total.

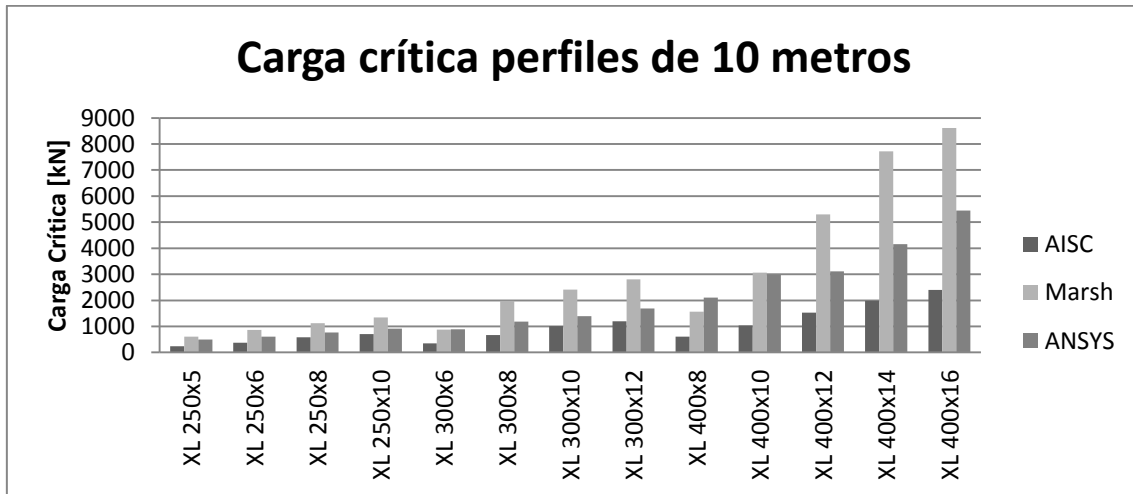


Figura 34: Cargas críticas de los perfiles de 10 m.

A continuación se presentan las cargas críticas de los modelos con respecto a su esbeltez global y una curva que ajusta su tendencia. Para los resultados entregados por la AISC.

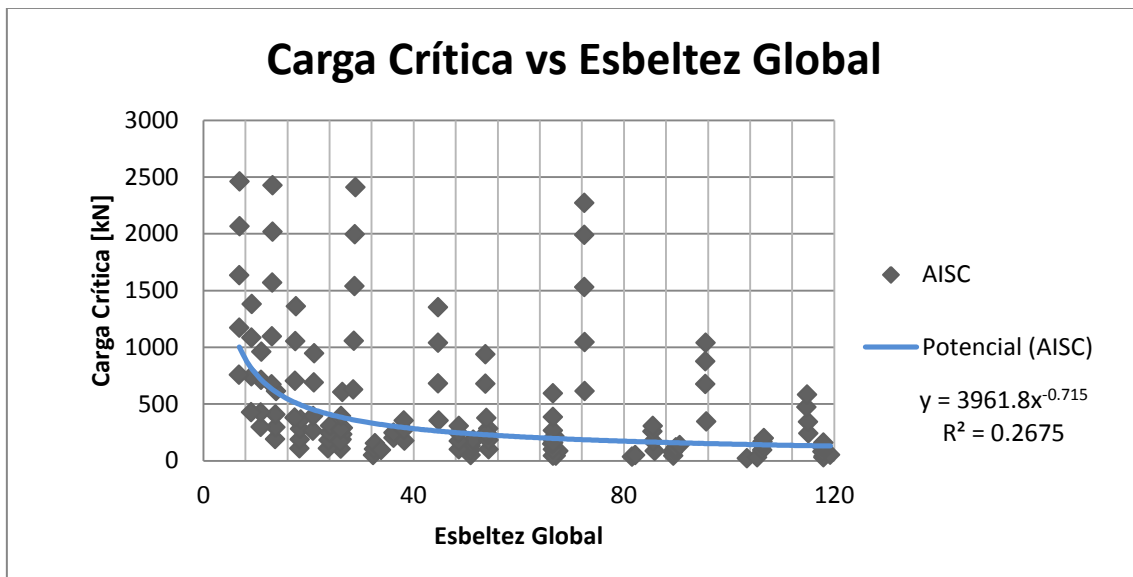


Figura 35: Carga crítica según esbeltez global, para los resultados de la AISC.

Según las fórmulas de Marsh.

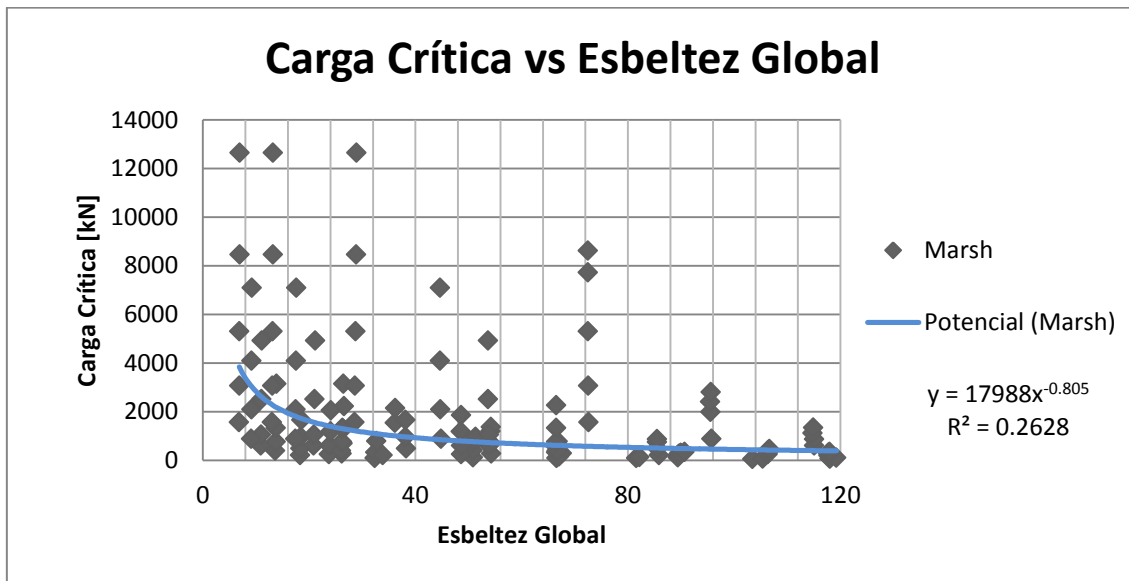


Figura 36: Carga crítica según esbeltez global, para los resultados según Marsh.

Por último según lo obtenido con ANSYS.

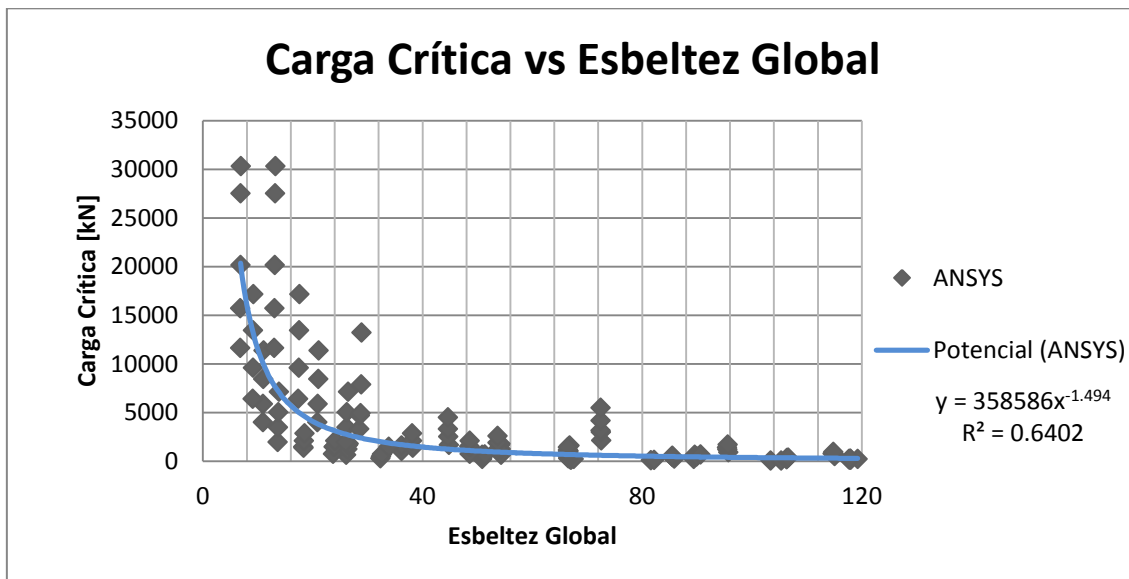


Figura 37: Carga crítica según esbeltez global, para los resultados de ANSYS.

IV.4. Fuerzas en los ejes Y-Z sobre las placas de conexión.

A continuación se presentan las cargas resultantes sobre las placas de conexión del centro y el extremo del arriostramiento determinadas en el momento de la falla por pandeo del elemento, mediante el análisis no lineal del programa ANSYS.

El detalle con los valores numéricos de los resultados obtenidos para la conexión del extremo se adjuntan en el Anexo B.2.1, mientras que los de la conexión del centro se encuentran en el Anexo B.2.

IV.4.1. Fuerzas en la placa del extremo

La disposición de ejes Y-Z utilizada se indica en la figura a continuación

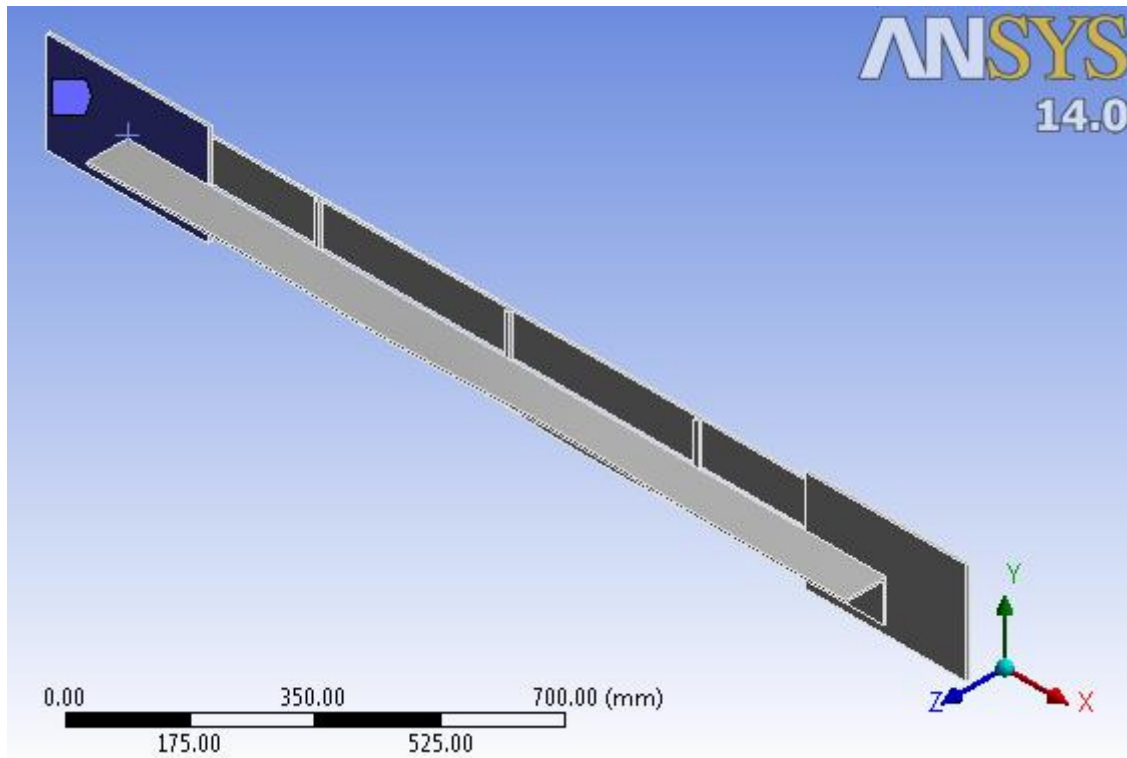


Figura 38: Disposición de ejes de la placa del extremo.

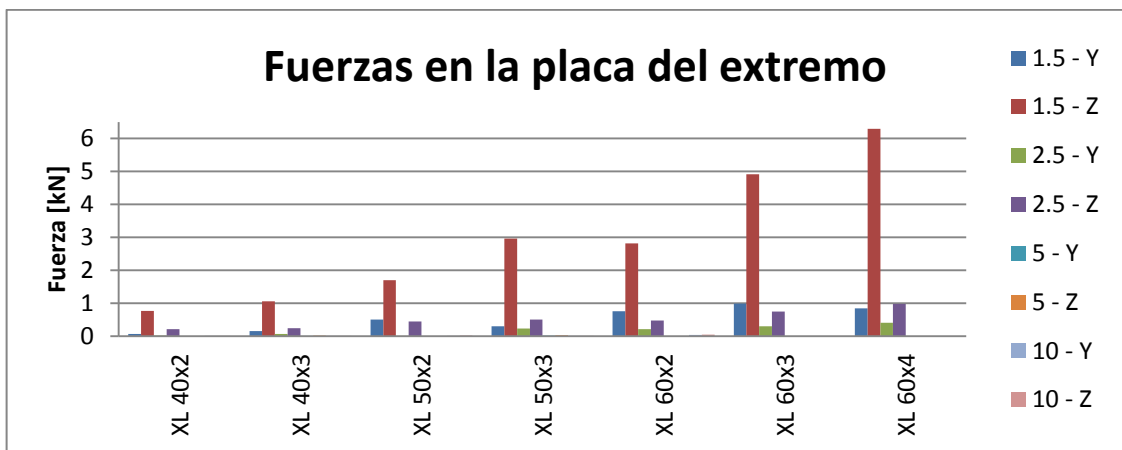


Figura 39: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

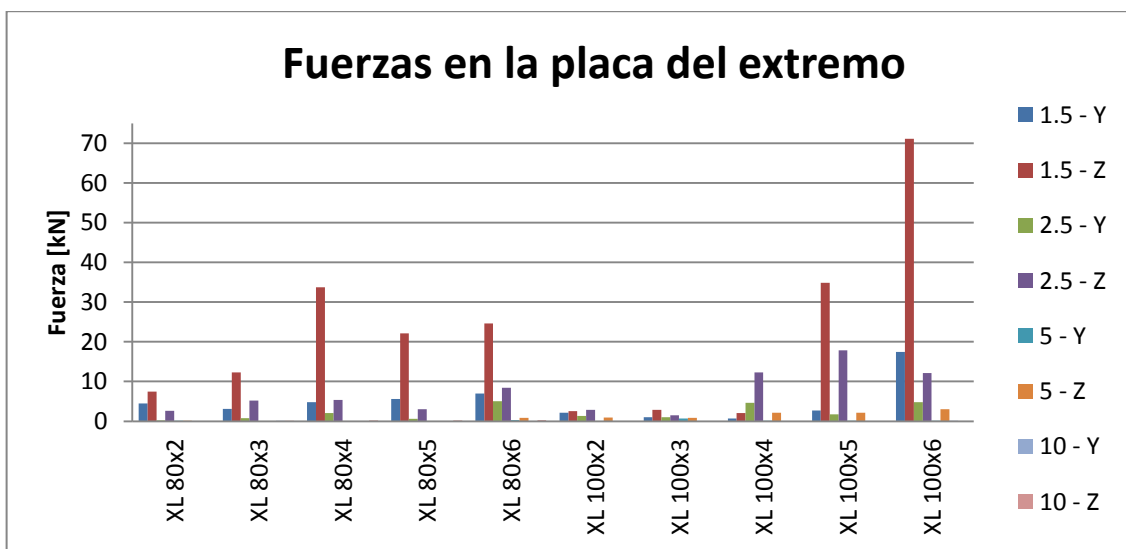


Figura 40: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

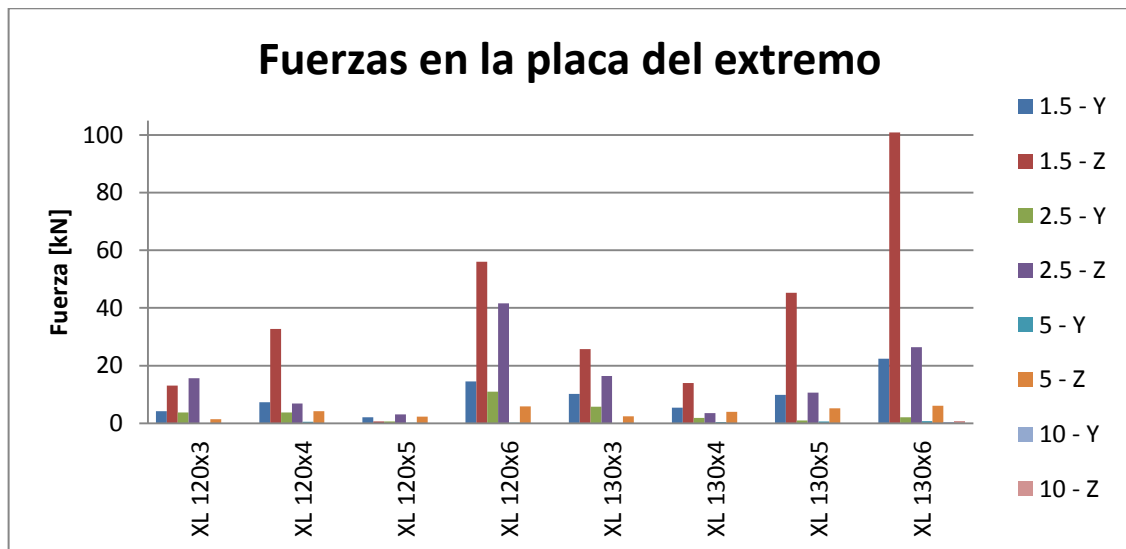


Figura 41: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

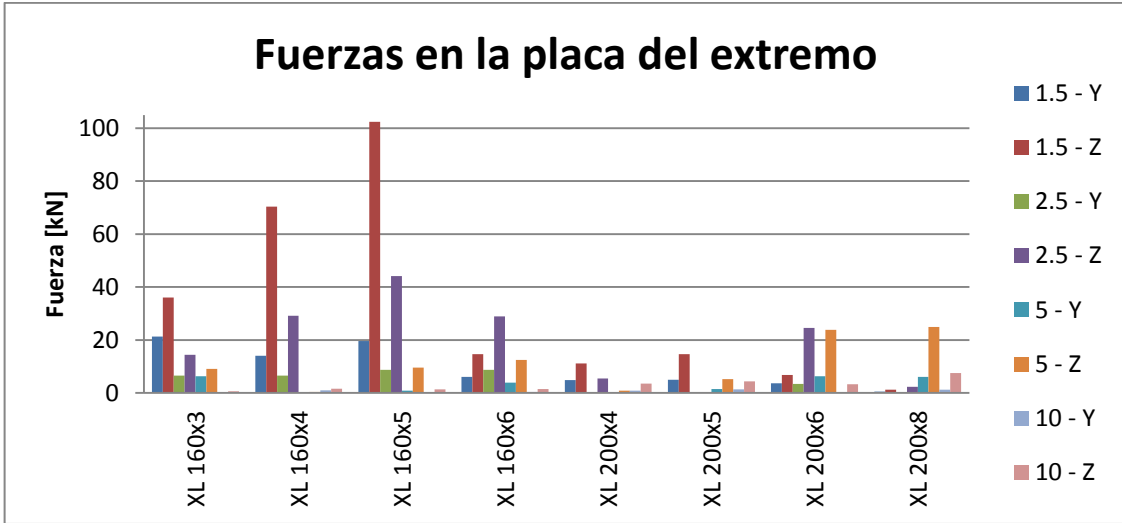


Figura 42: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

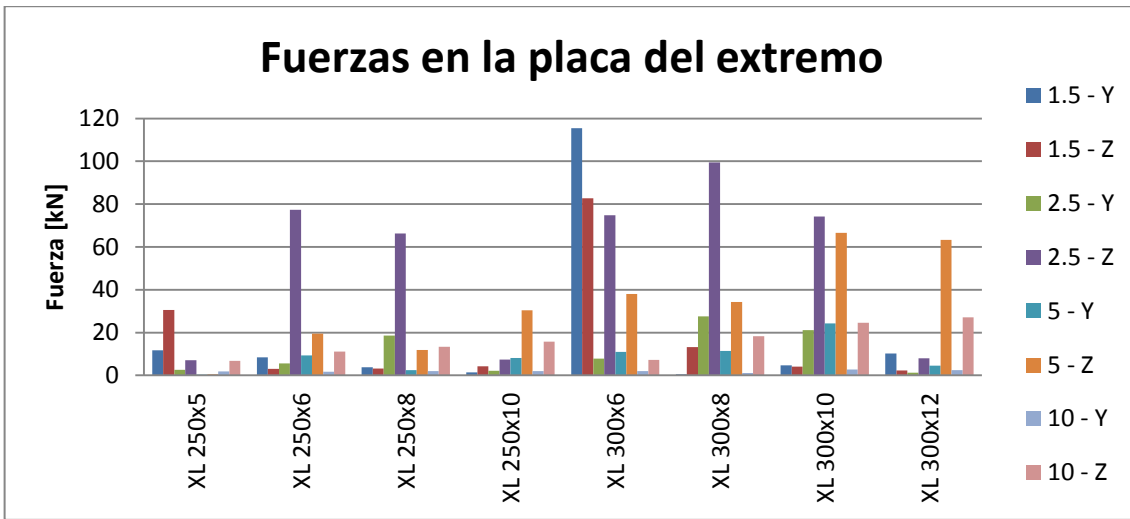


Figura 43: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

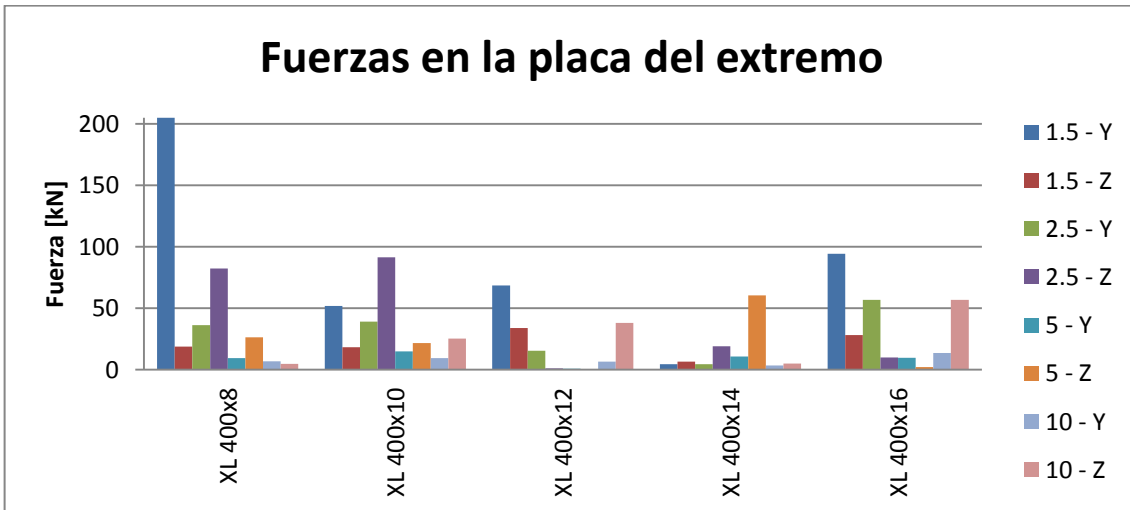


Figura 44: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

IV.4.2. Fuerzas en la placa central

La disposición de ejes utilizada de las fuerzas de torsión se indica a continuación

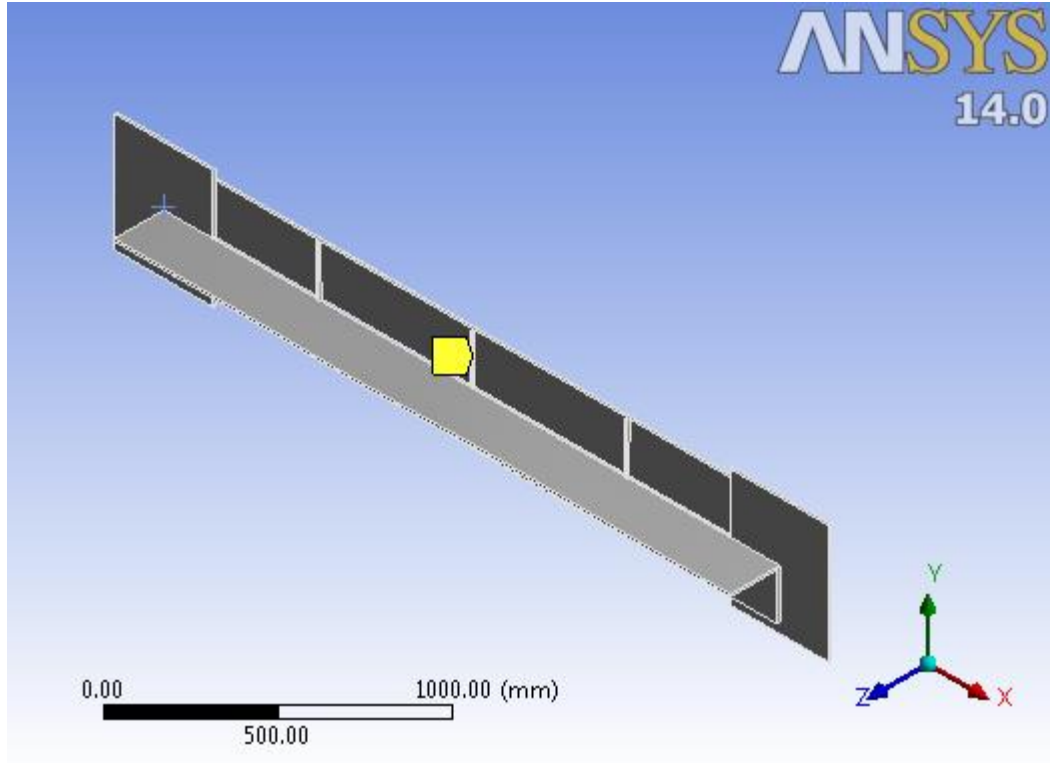


Figura 45: Disposición de ejes placa central.

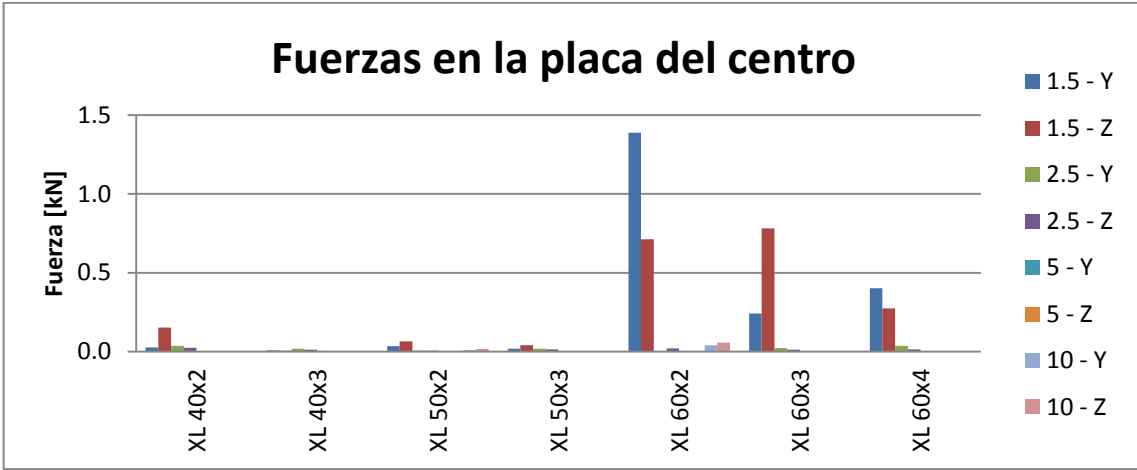


Figura 46: Fuerzas de torsión en la placa del centro.

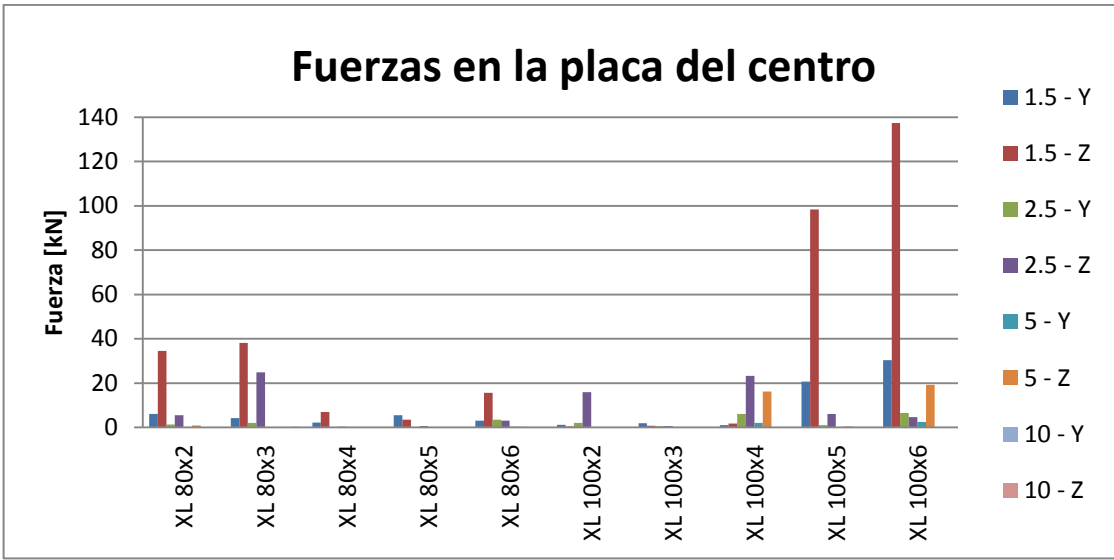


Figura 47: Fuerzas de torsión en la placa del centro.

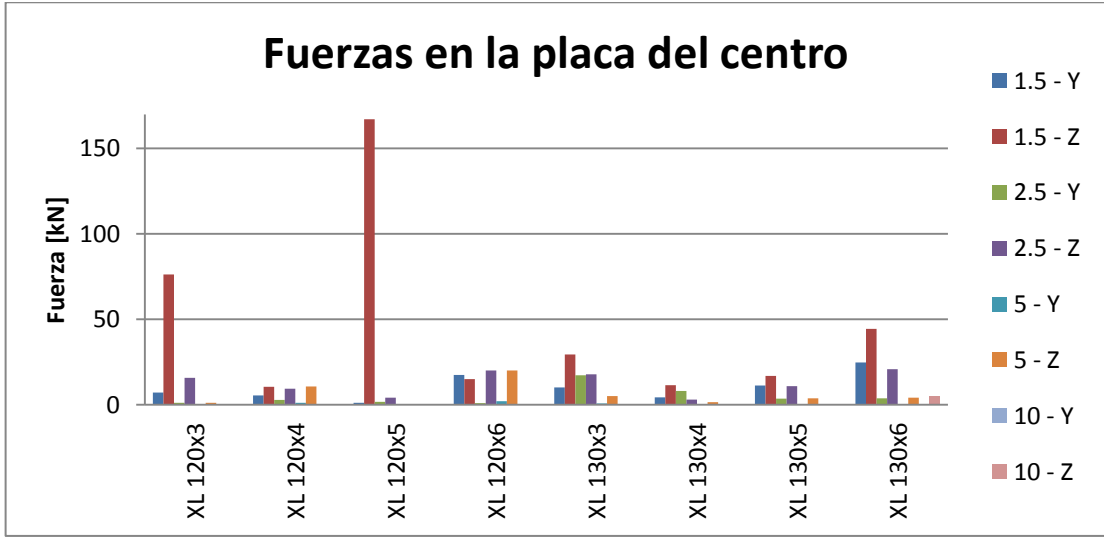


Figura 48: Fuerzas de torsión en la placa del centro.

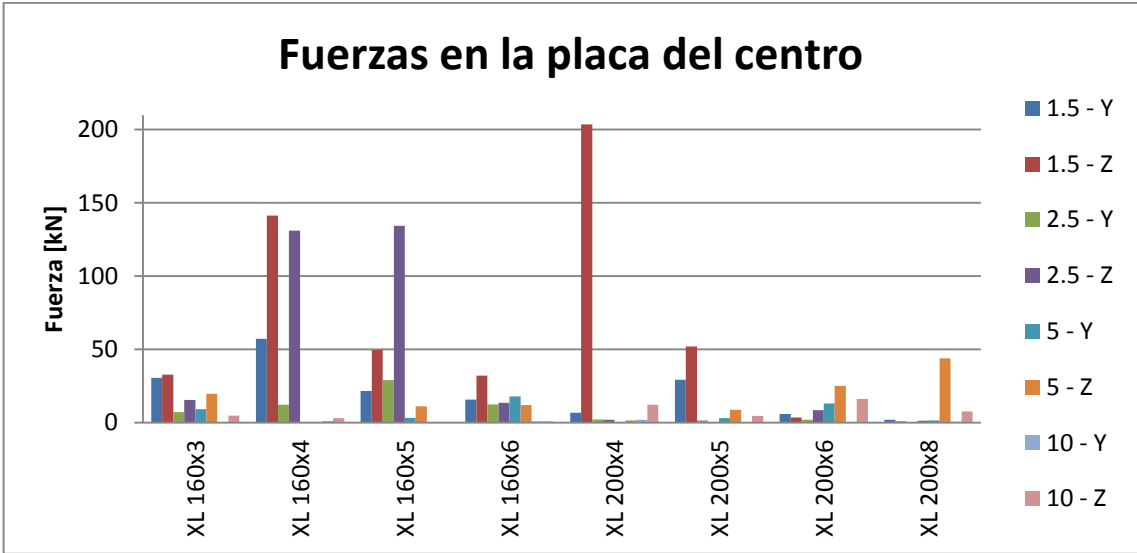


Figura 49: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

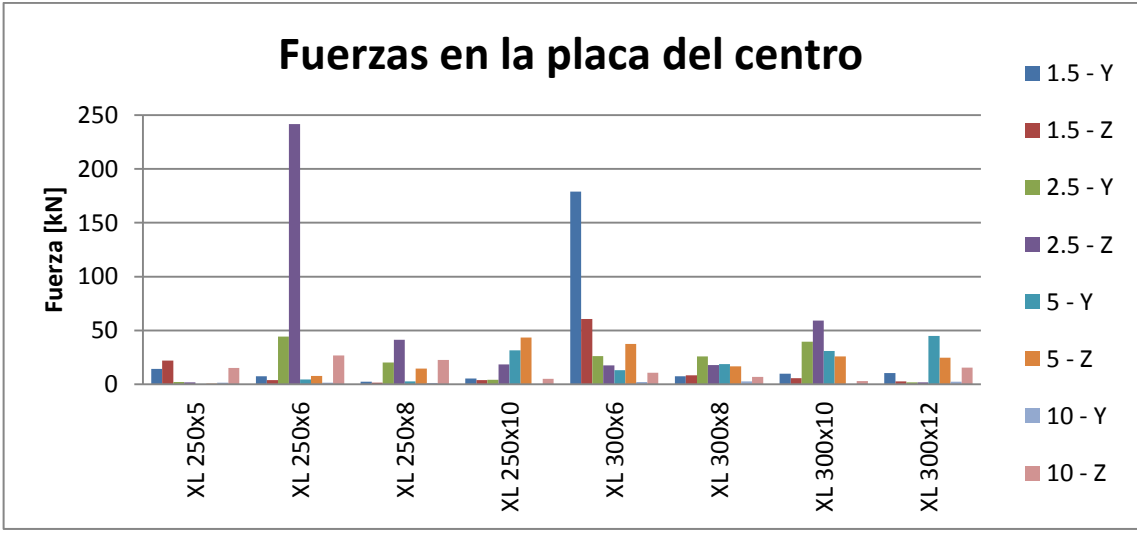


Figura 50: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

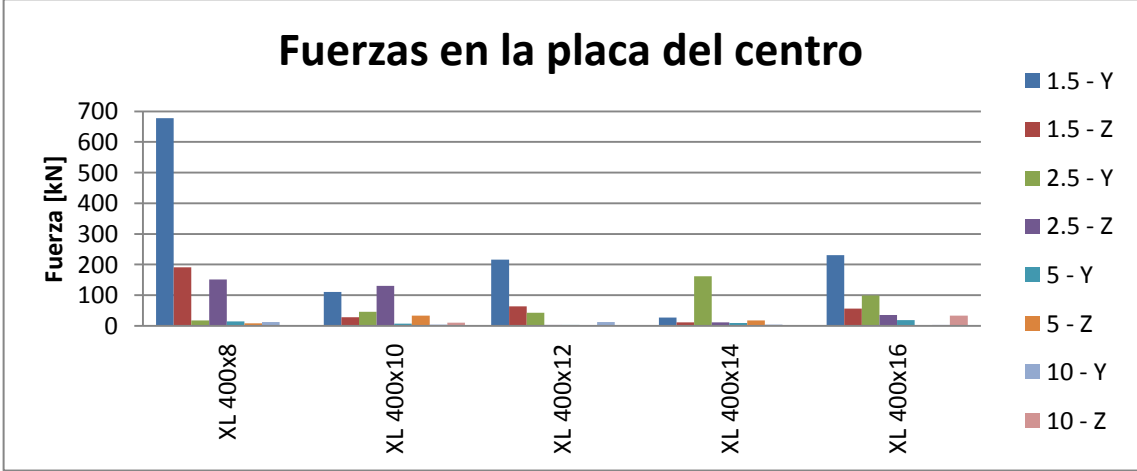


Figura 51: Fuerzas de torsión en la placa de extremo.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para facilitar la comparación entre los perfiles se propone una razón entre la esbeltez global y la esbeltez local de los perfiles, como se muestra a continuación.

$$\frac{\lambda_{Global}}{\lambda_{Local}} = \frac{\max(\lambda_m, \lambda_v)}{b/t} \quad (V.1)$$

El análisis se centró en los perfiles no esbeltos debido a que en la práctica se prefieren este tipo de secciones por sobre las esbeltas. Además, el estudio fue desarrollado de acuerdo a las limitaciones entregadas por la NCh 2369of2003.

V.1. Modos de falla

Con estas consideraciones se graficaron los modos de falla asociados a cada razón de esbeltez. Además, al igual que en la presentación de datos, se utilizó la siguiente nomenclatura para facilitar la presentación de datos.

- 1 = *Flexión*
- 2 = *Flexo torsión*
- 3 = *Torsión*

Los resultados según la AISC.

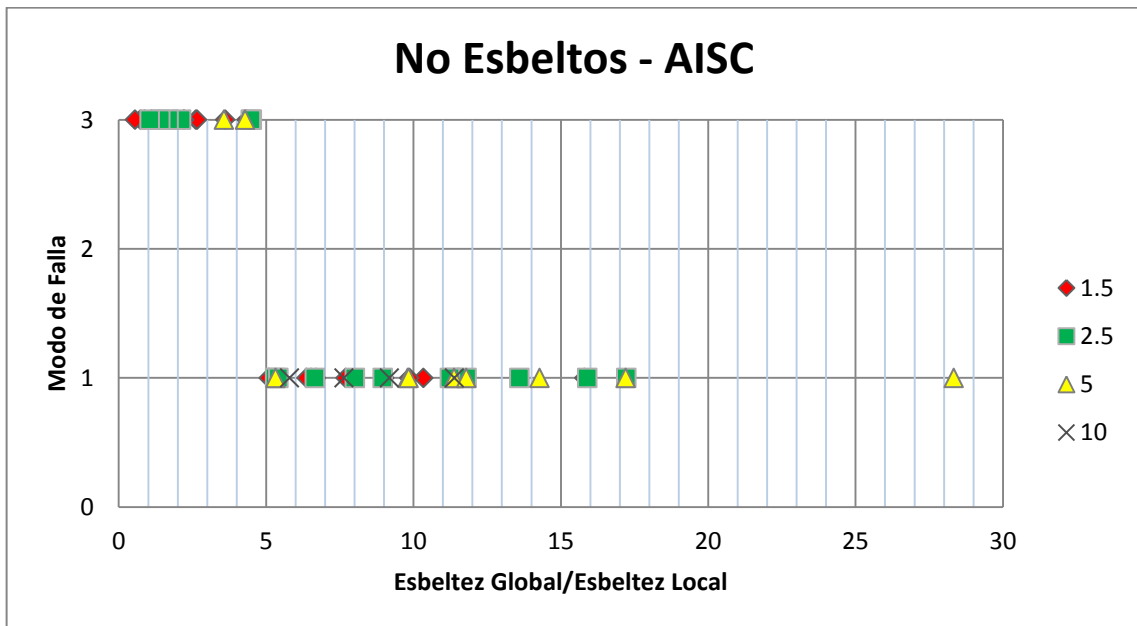


Figura 52: Tendencia de modos de falla según AISC, 1= Flexión; 3= Torsión.

Asociado a las ecuaciones de Marsh, se obtuvo.

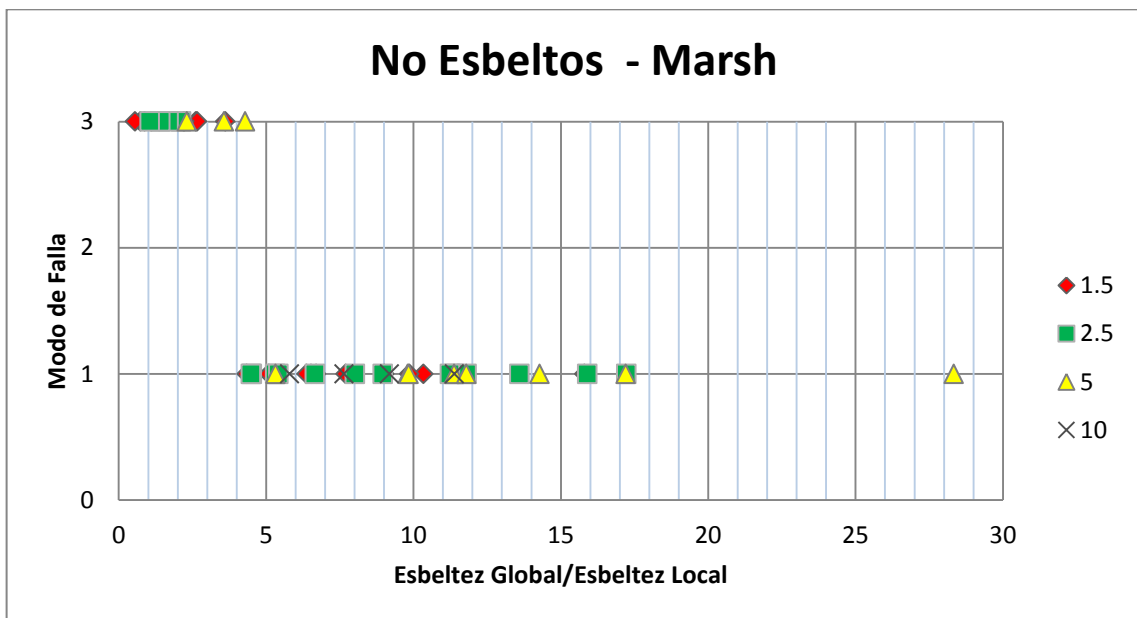


Figura 53: Tendencia de modos de falla según ANSYS, 1= Flexión; 3= Torsión.

Para los resultados entregados por ANSYS.

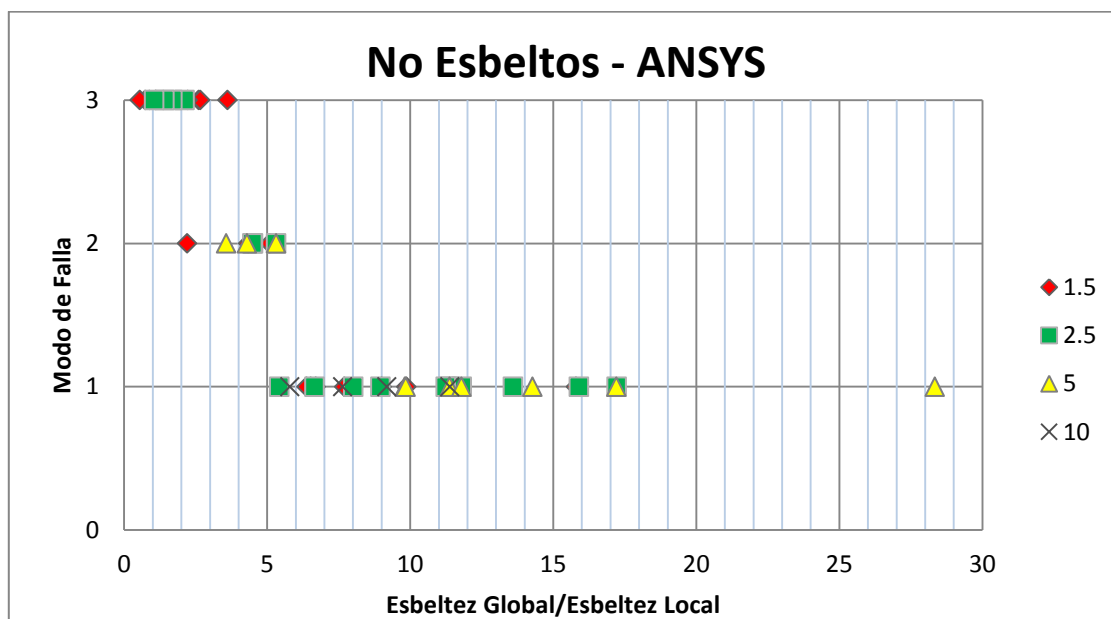


Figura 54: Tendencia de modos de falla según ANSYS, 1= Flexión; 2= Flexo torsión; 3= Torsión.

Como se puede observar existe una clara tendencia de falla relacionada con la razón de esbeltez. Para todos los casos se obtiene que a menor razón, los perfiles fallan por torsión. En cambio, cuando se obtienen razones mayores los elementos siguen una tendencia a la flexión.

Tanto para la AISC como para Marsh se obtiene un cambio abrupto entre la flexión y la torsión debido a que las ecuaciones asociadas a ambos casos no permiten distinguir el caso de flexo-torsión, encasillándolo dentro del caso de pandeo torsional. Por otro lado en el caso de ANSYS se obtiene una gama de resultados que permiten una transición más suave entre los tipos de falla.

Teniendo en cuenta los tres tipos de análisis, los resultados entregados por la AISC muestran un claro cambio de modo de falla en la razón de esbelteces igual a 5. Según las ecuaciones de Marsh se determina esta transición cercana al valor 4. Mientras que el análisis no lineal desarrollado en ANSYS permite diferenciar dos tendencias importantes en los modos de falla. La primera es un traspaso de torsión a flexo torsión en las cercanías de 4, semejante a lo que ocurre con Marsh. Y luego un cambio de flexo torsión a flexión próximo a 5, similar al caso de la AISC.

Con este análisis se puede establecer un punto común en la razón de esbelteces, cercano a 5, en donde se produce el cambio de falla importante de torsión a flexión.

V.2. Fuerzas sobre las placas

Al igual que el punto anterior, se ordenaron los datos asociando las fuerzas en los ejes Y-Z sobre las placas a la razón entre esbelteces de cada perfil. Para los resultados obtenidos por ANSYS en la conexión del extremo.

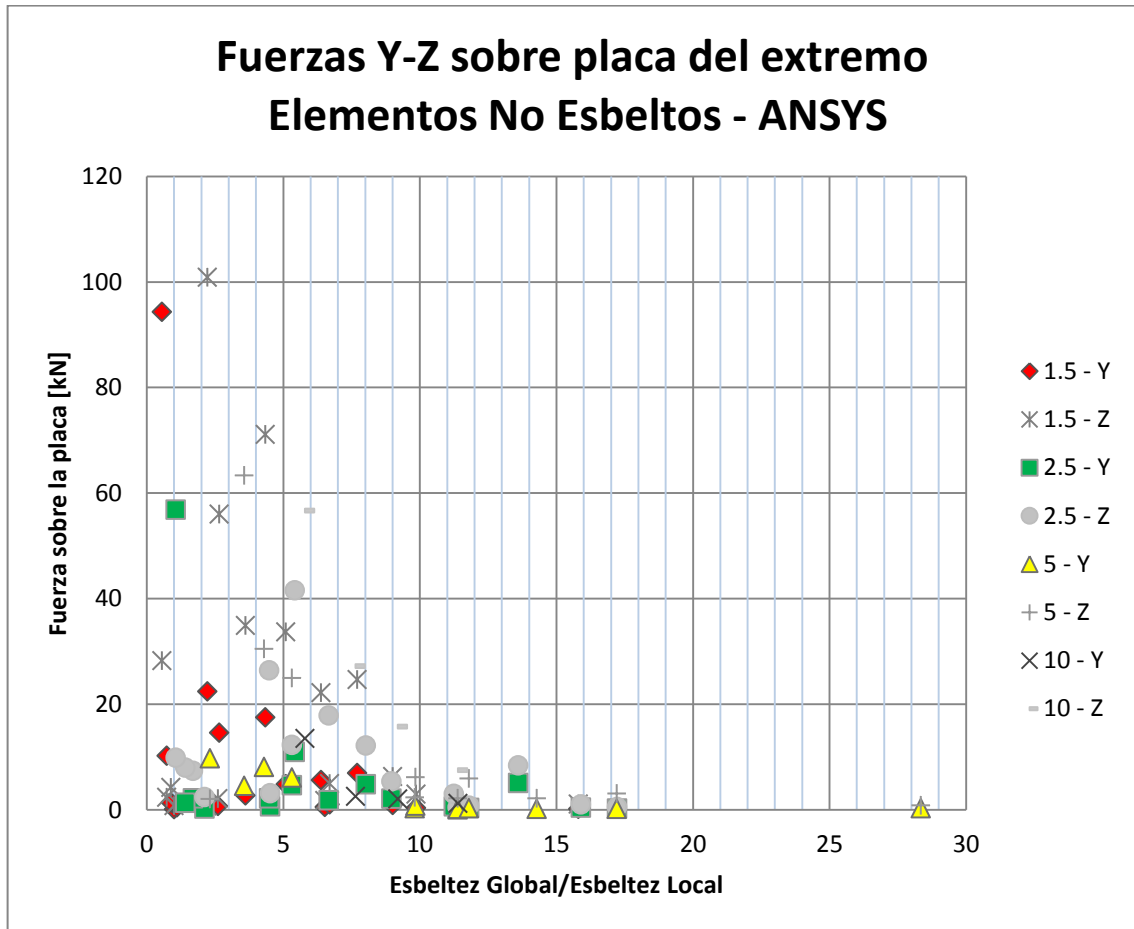


Figura 55: Fuerzas en la placa del extremo asociadas a la razón de esbeltez.

En cuanto a lo entregado para la conexión del centro del arriostramiento.

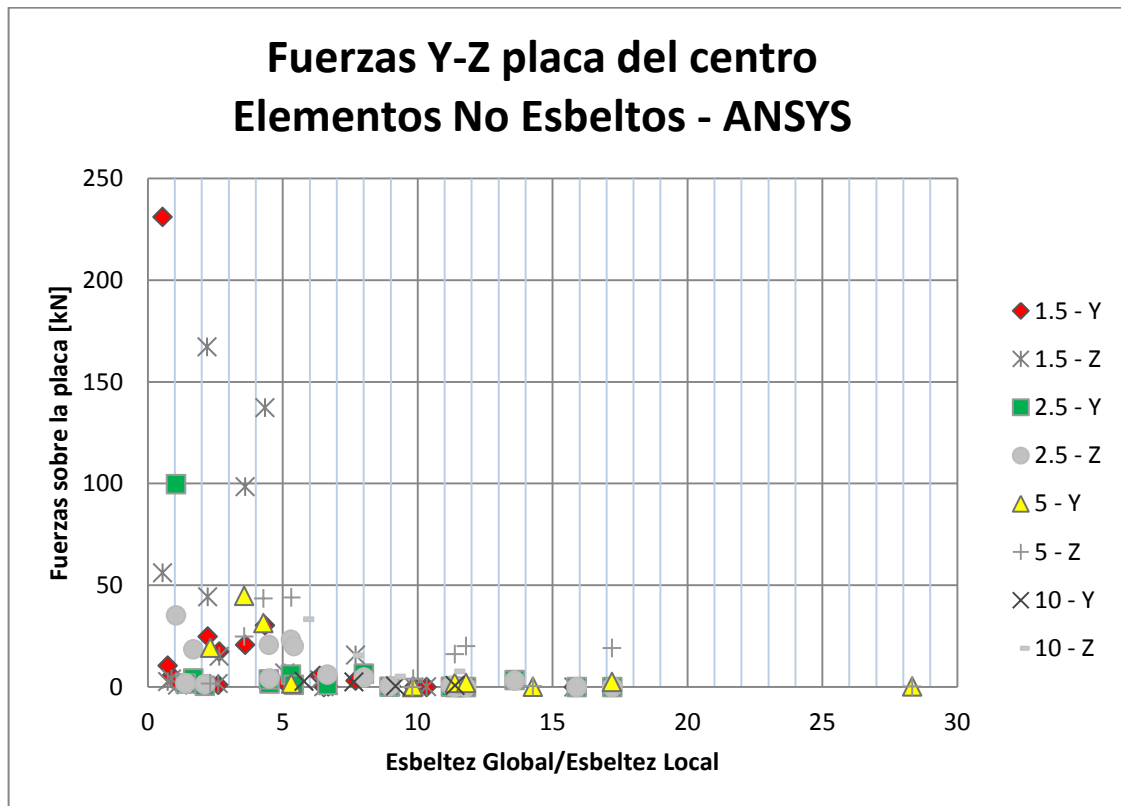


Figura 56: Fuerzas en la placa del centro asociadas a la razón de esbeltez.

Tanto para las fuerzas en la placa del extremo como en la del centro se observa una clara tendencia exponencial negativa de los valores máximos. Para el primer caso, se tiene una mayor concentración de fuerzas debajo de los 10 kN, mientras que para el centro, se encuentran debajo de los 25 kN. En ambos casos los valores máximos se ubican entre 1 y 10 de razón de esbeltez.

Se puede inferir de las figuras 55 y 56 que a menor razón de esbeltez, es posible desarrollar mayores fuerzas de torsión en las placas, tanto para el extremo como en el centro del arriostramiento. Además se observa que las mayores fuerzas están asociadas a arriostramientos de menor largo, lo que era de esperarse de los casos en que los perfiles estaban sobredimensionados con respecto al largo.

V.3. Fuerzas sobre las caras de la placa del extremo

Se realizó un análisis en detalle de las solicitaciones sobre la placa de conexión del extremo de los arriostramientos, esto permitió determinar las fuerzas que estaban actuando sobre la superficie mayor del conector.

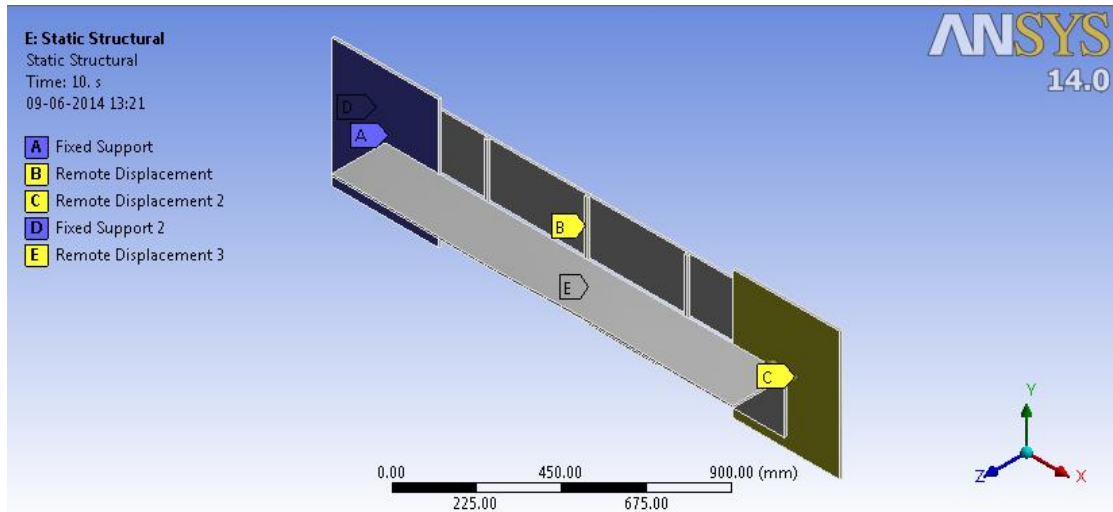


Figura 57: Restricciones sobre los modelos, vista isométrica

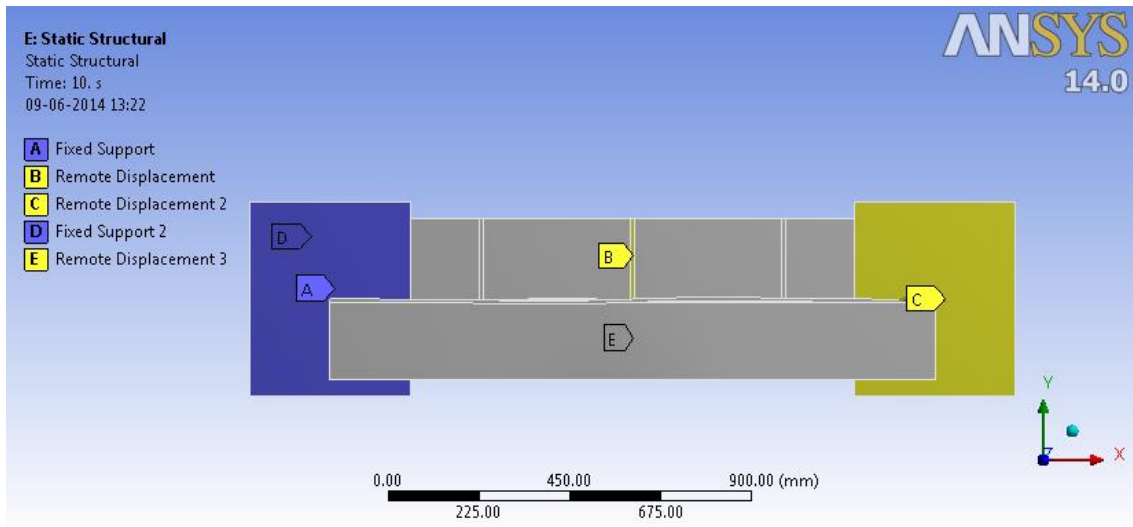


Figura 58: Restricciones sobre los modelos, vista lateral.

Se utilizó la siguiente nomenclatura para presentar los datos.

Cara 1 = Soporte fijo A

Cara 2 = Soporte fijo D

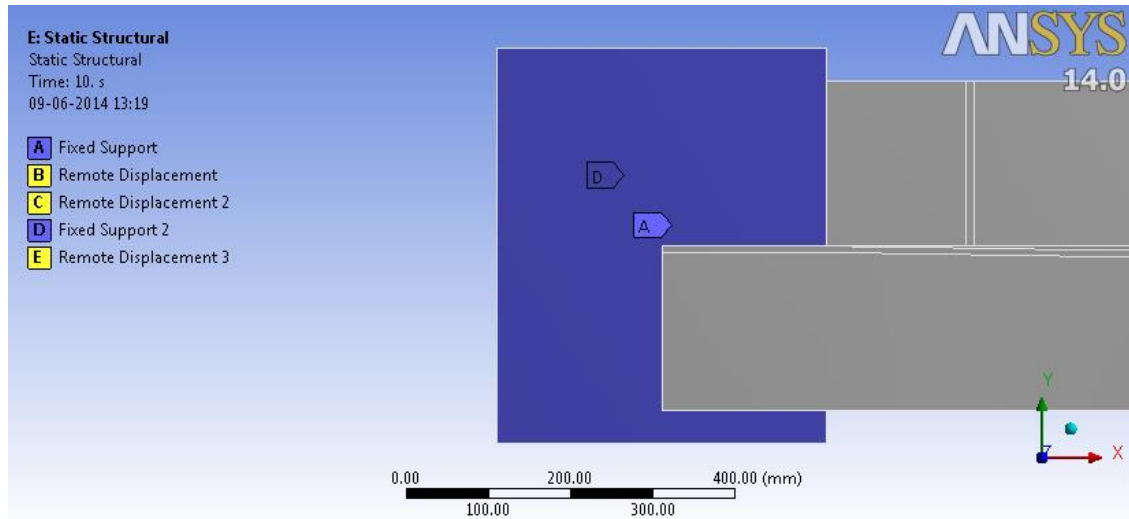


Figura 59: Detalle de conexión. Soporte A es la cara anterior, soporte D la posterior.

En este desarrollo no se utilizó la gama completa de perfiles estudiados anteriormente, sólo fueron analizados los modelos que presentaron grandes magnitudes de fuerza sobre las placas de conexión en los ejes Y - Z.

Además para simplificar el análisis de los datos obtenidos se usó la razón entre la fuerza de la cara y la fuerza total sobre la placa, como se indica a continuación.

$$\frac{P_{Cara\ 1,2}}{P_x} \quad (V.2)$$

En donde:

$P_{Cara\ 1,2}$: Fuerza sobre la cara 1 o 2, respectivamente.

P_x : Carga crítica del arriostamiento.

A continuación se entrega nuevamente el modo de falla asociado a cada perfil analizado, ahora en forma tabular, para facilitar la comparación con los resultados de las fuerzas sobre las caras de la placa.

Para los arriostramientos de 1.5 metros.

Tabla 5: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.

Perfil	XL 100x5	XL 100x6	XL 120x5	XL 130x6	XL 160x6	XL 200x8	XL 300x6	XL 400x8	XL 400x16
Modo de Falla	Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión
Esbeltez	NE	NE	NE	NE	E	NE	E	E	NE

Para los de 2.5 m.

Tabla 6: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.

Perfil	XL 80x4	XL 100x5	XL 120x6	XL 130x6	XL 160x4	XL 200x8	XL 300x6	XL 300x12
Modo de Falla	Flexión	Flexión	Flexión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión	Torsión	Torsión
Esbeltez	NE	NE	NE	NE	E	NE	E	NE

De 5 metros.

Tabla 7: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.

Perfil	XL 120x6	XL 130x6	XL 200x8	XL 250x10	XL 300x10	XL 300x12	XL 400x10
Modo de Falla	Flexión	Flexión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión
Esbeltez	NE	NE	NE	NE	E	NE	E

Los de 10 m.

Tabla 8: Modos de falla y esbeltez de los perfiles seleccionados.

Perfil	XL 250x10	XL 300x12	XL 400x16
Modo de Falla	Flexión	Flexión	Flexión
Esbeltez	NE	NE	NE

Con lo anterior los resultados obtenidos son los siguientes.

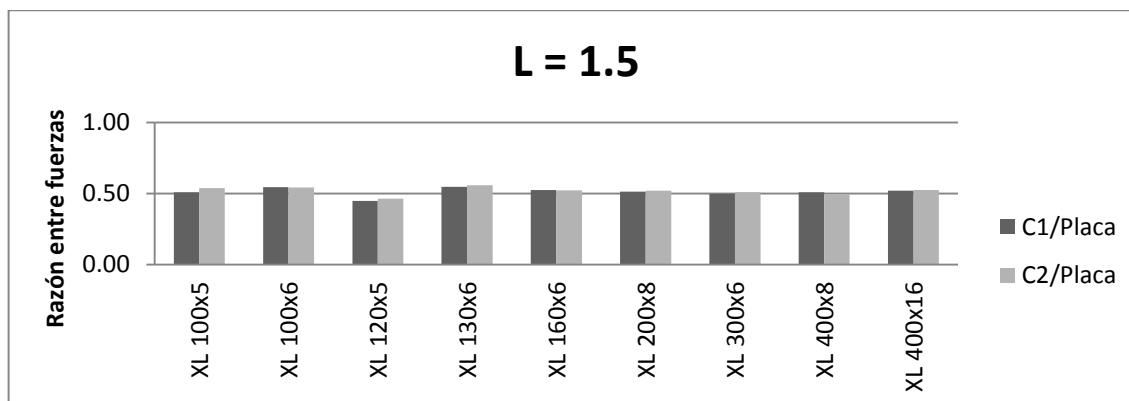


Figura 60: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 1.5 metros.

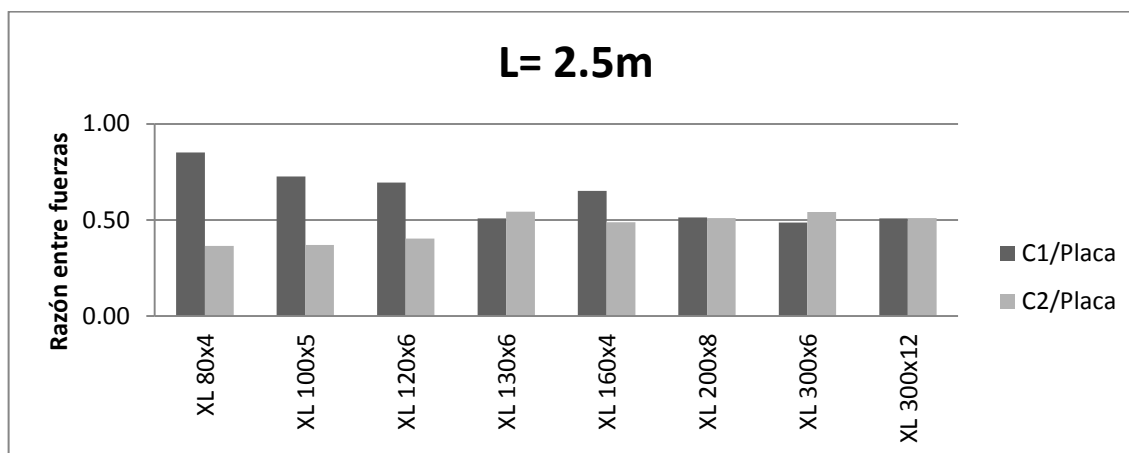


Figura 61: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 2.5 metros.

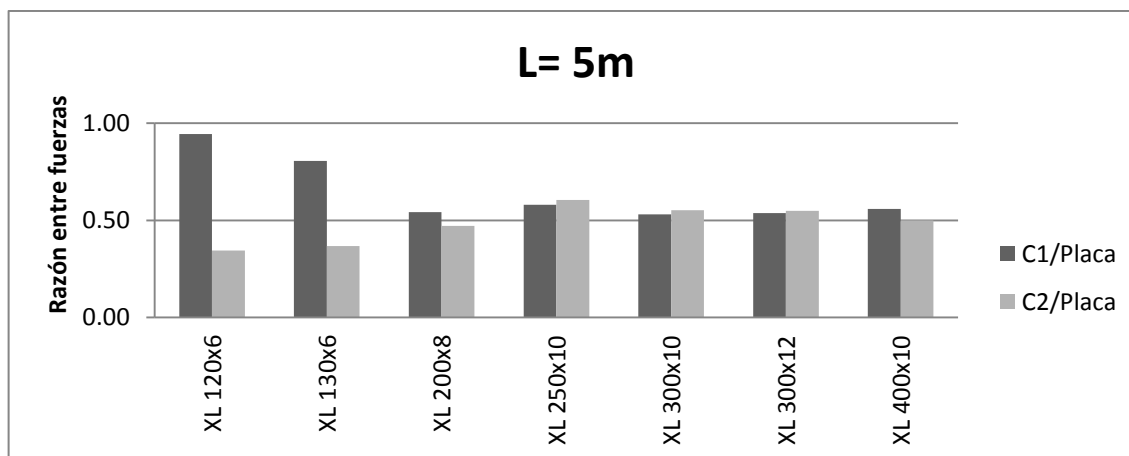


Figura 62: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 5 metros.

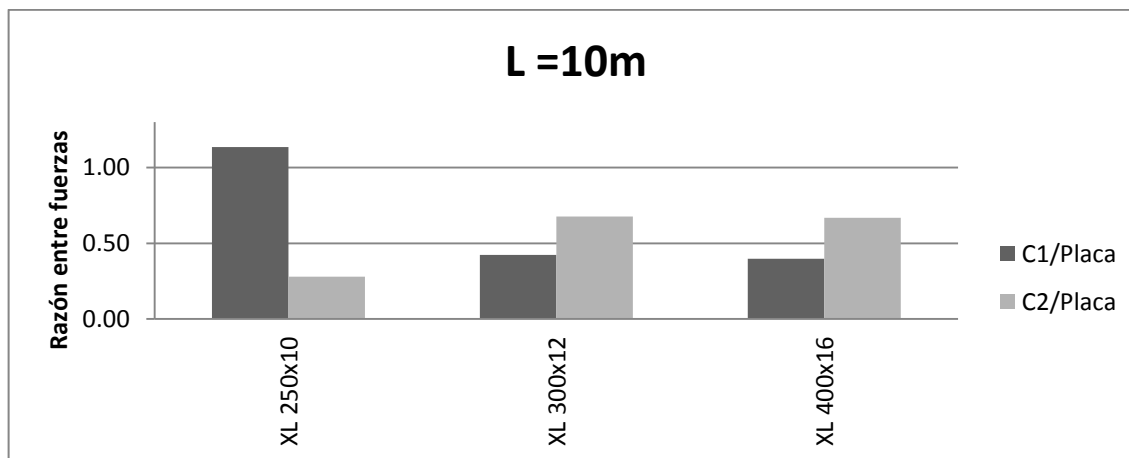


Figura 63: Razón entre la fuerza de las caras y la fuerza total de la placa, elementos de 10 metros.

Los resultados numéricos se encuentran en el Anexo C.

Es posible observar una clara predisposición de las cargas relacionado fuertemente al modo de falla de los perfiles. Los elementos que fallan por torsión tienden a dividir su carga equitativamente sobre las caras de la placa conectora, rondando los 50-55% hacia cada superficie. Por otro lado, los elementos con falla de flexión sobrecargan una cara por sobre la otra.

V.4. Momentos en la interfaz de placa de conexión y el perfil

En el análisis de los momentos sobre los elementos se utilizó la misma nomenclatura del punto V.3. Fuerzas sobre las caras de las placas.

Los resultados numéricos del análisis se encuentran en el Anexo D.

Para determinar los momentos sobre la interfaz de conexión, se utilizó la siguiente notación.

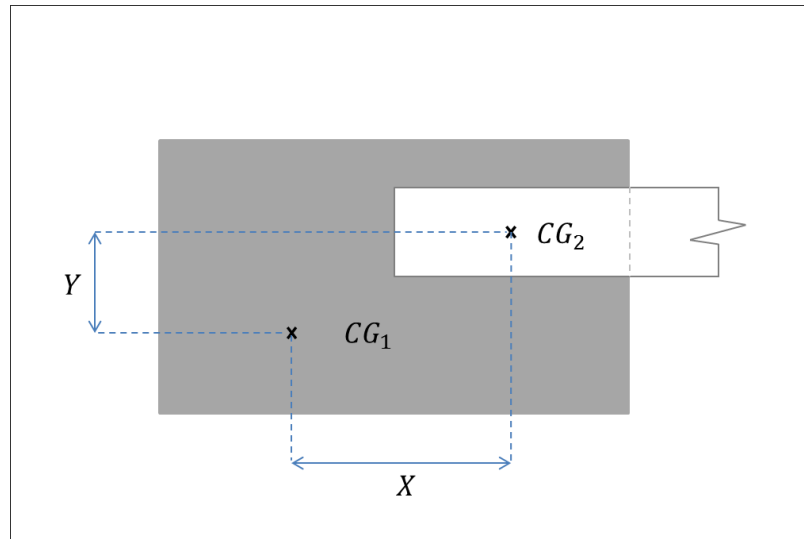


Figura 64: Centros de gravedad de las secciones y distancia relativa entre ellos.

En donde:

CG_1 : Centro de gravedad de la placa de conexión, sin considerar el área común entre el arriostramiento y la placa.

CG_2 : Centro de gravedad del área común entre la placa y el arriostramiento.

X, Y : Distancia entre centros de gravedad en ejes X e Y, respectivamente.

En cuanto a las fuerzas sobre la placa.

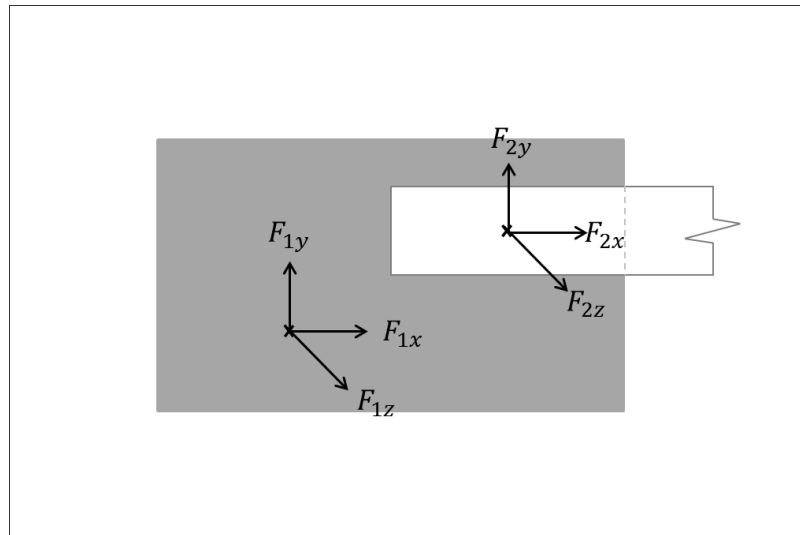


Figura 65: Fuerzas sobre los elementos en los ejes principales.

En donde:

F_{1x}, F_{1y}, F_{1z} : Fuerzas sobre la placa de conexión.

F_{2x}, F_{2y}, F_{2z} : Fuerzas sobre la interfaz de la placa y el arriostramiento.

Por último, la disposición de los momentos sobre el elemento.

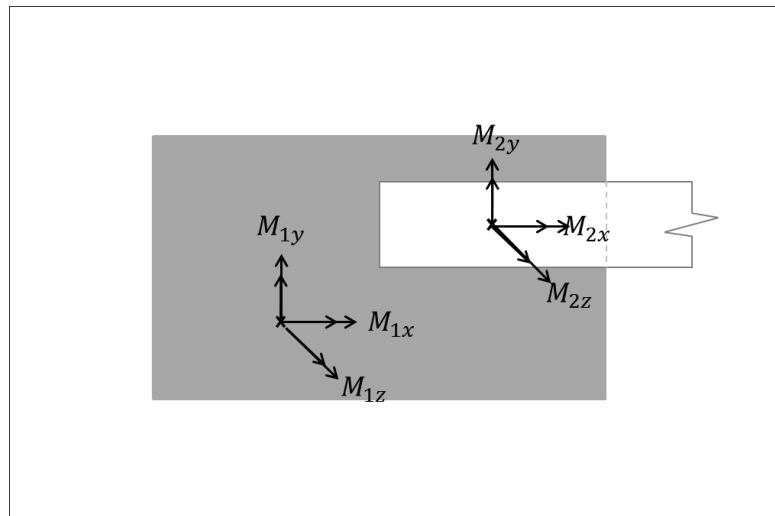


Figura 66: Momentos sobre los elementos en los ejes principales.

En donde:

M_{1x}, M_{1y}, M_{1z} : Momentos sobre la placa de conexión.

M_{2x}, M_{2y}, M_{2z} : Momentos sobre la interfaz de la placa y el arriostramiento.

Con esta nomenclatura se determinó que las fuerzas en la interfaz de la placa con el arriostramiento serán.

$$F_{2x} = -F_{1x} \quad (\text{V.3})$$

$$F_{2y} = -F_{1y} \quad (\text{V.4})$$

$$F_{2z} = -F_{1z} \quad (\text{V.5})$$

Mientras que los momentos.

$$M_{2x} = -M_{1x} - F_{2z} \cdot Y \quad (\text{V.6})$$

$$M_{2y} = -M_{1y} + F_{2z} \cdot X \quad (\text{V.7})$$

$$M_{2z} = -M_{1z} + F_{2x} \cdot Y - F_{2y} \cdot X \quad (\text{V.8})$$

En este desarrollo sólo fueron utilizados los perfiles que presentaban fuerzas de grandes magnitudes en los ejes Z e Y.

A continuación se presentan los resultados asociados al momento sobre el eje Z. Esto ya que es el más relevante en cuanto a las sollicitaciones sobre la interfaz, debido a la torsión que genera sobre la soldadura de conexión. Con esto se obtiene.

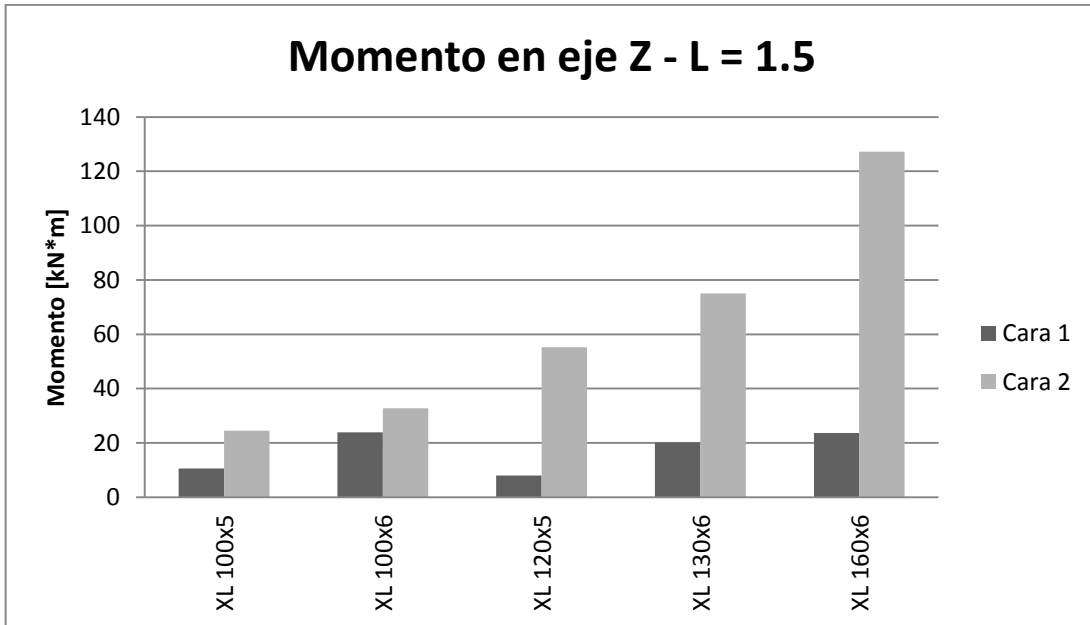


Figura 67: Momento en el eje Z en perfiles de 1.5 metros de largo.

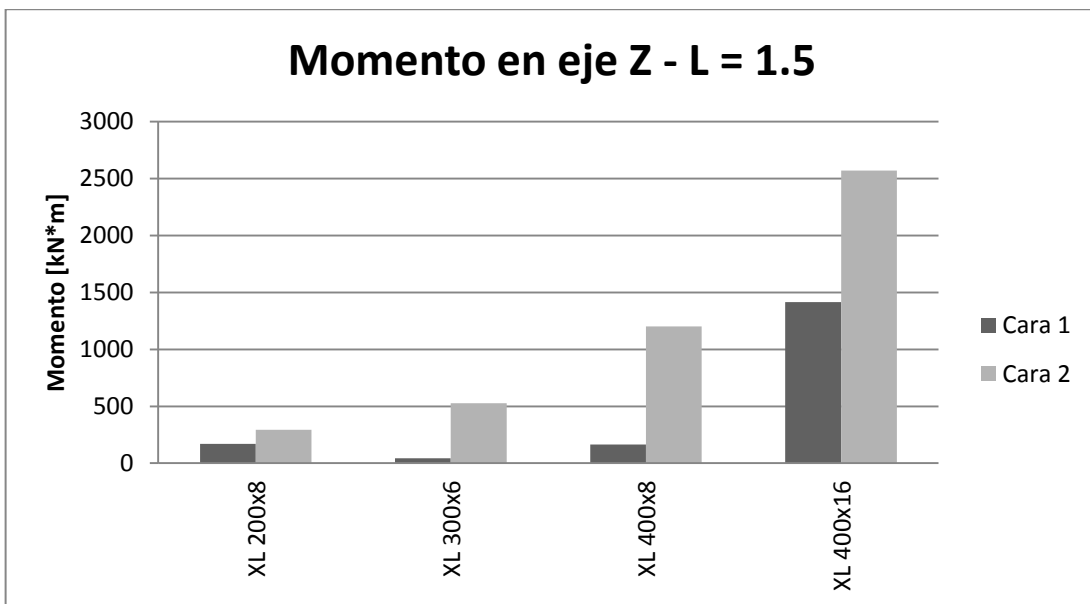


Figura 68: Momento en el eje Z en perfiles de 1.5 metros de largo.

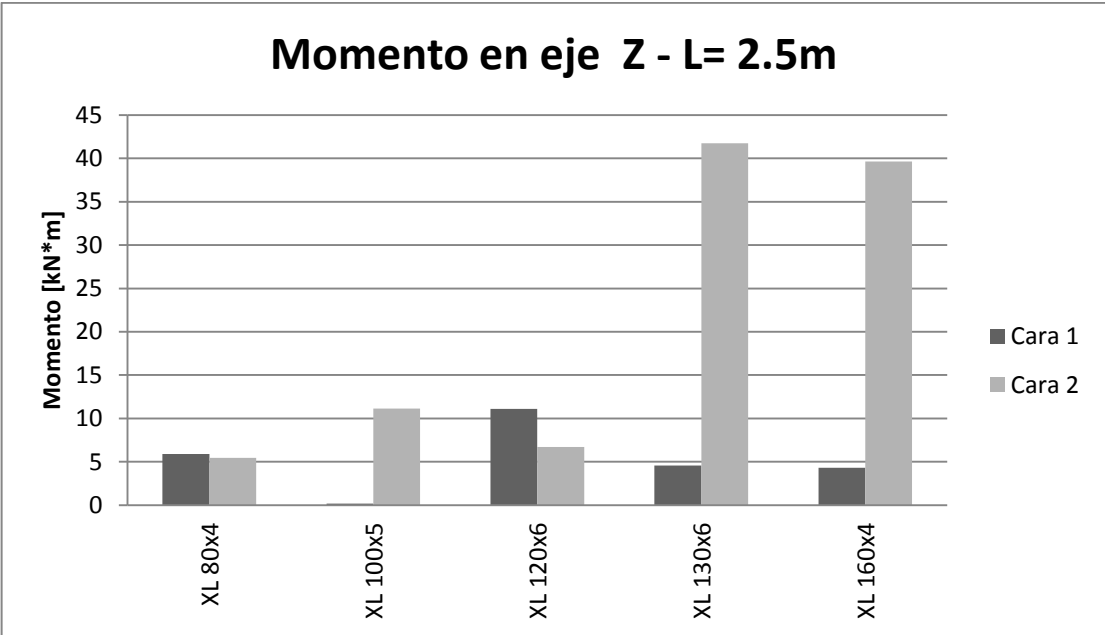


Figura 69: Momento en el eje Z en perfiles de 2.5 metros de largo.

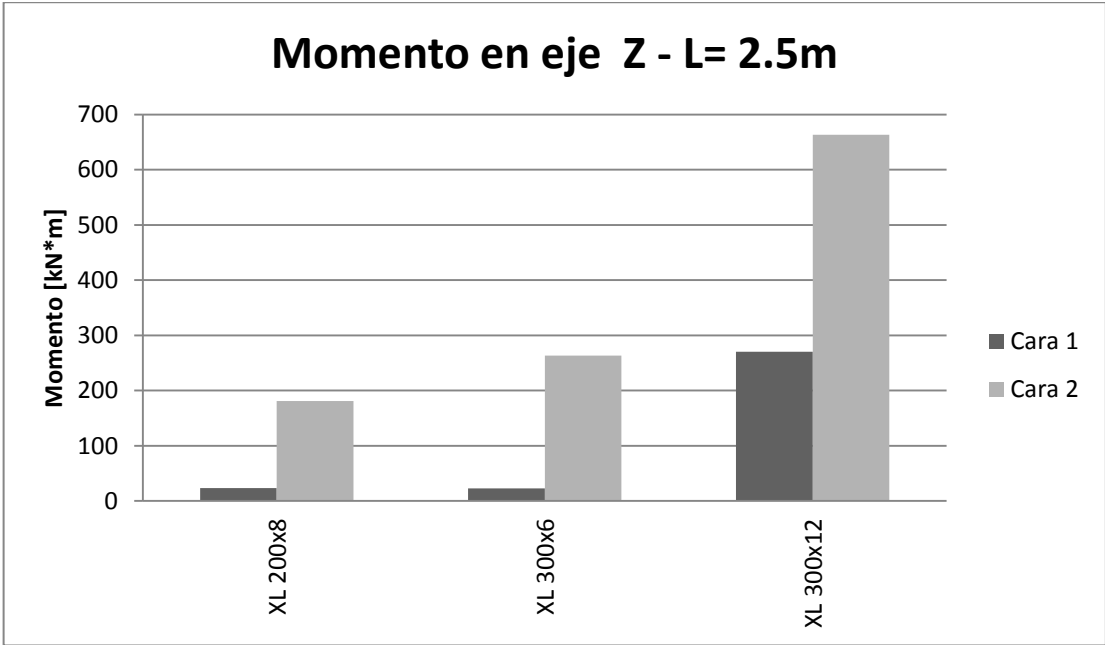


Figura 70: Momento en el eje Z en perfiles de 2.5 metros de largo.

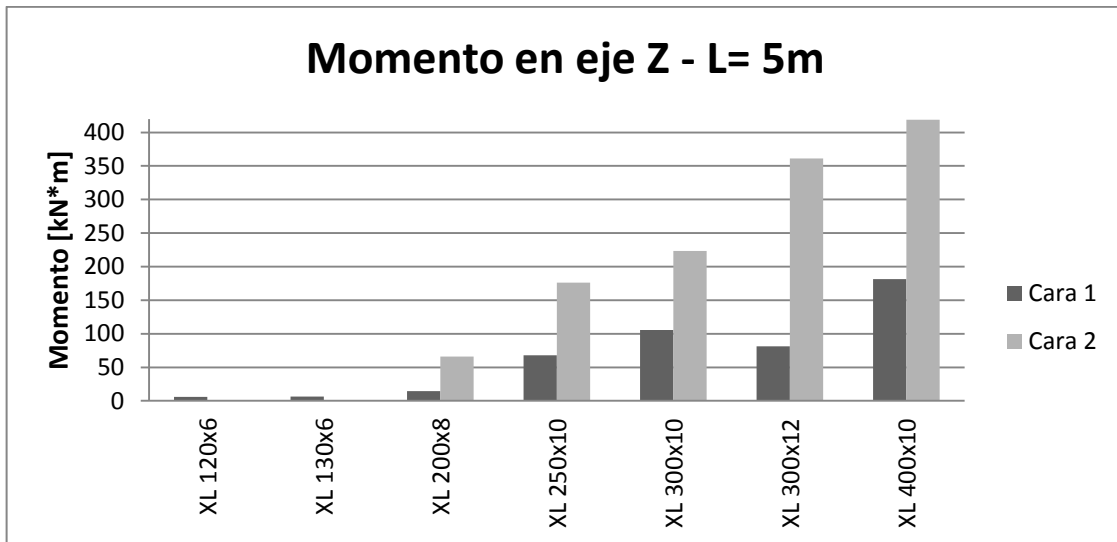


Figura 71: Momento en el eje Z en perfiles de 5 metros de largo.

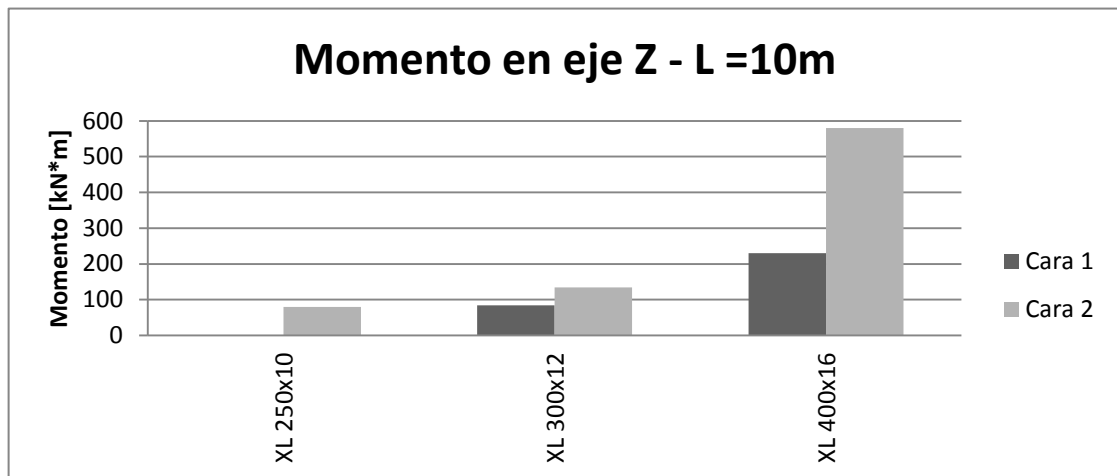


Figura 72: Momento en el eje X en perfiles de 10 metros de largo.

Se puede observar una ligera tendencia de los perfiles con falla flexural. Concretamente en las figuras 71 y 72 se aprecia que los primeros elementos, que fallan por flexión, poseen momentos considerablemente menores con respecto a los demás arriostramientos.

Dado el reducido número de perfiles analizados, no es posible concluir directamente que el comportamiento observado de los perfiles sea asociado al modo de falla.

V.5. Resistencia de las soldaduras de conexión

Se comparó resistencia de la soldadura entregada por la AISC, ecuación 1.19., con la mitad de la fuerza crítica sobre la conexión obtenida mediante el análisis con ANSYS. Esto debido a la suposición de que la carga se traspasa equitativamente sobre ambas caras de placa, por lo tanto, un 50% de carga crítica solicita a cada soldadura.

$$\frac{R_n}{F_x/2} \quad (\text{V.9})$$

Donde:

R_n : Resistencia de la soldadura

F_x : Fuerza crítica del arriostamiento

Se estudiaron 3 casos de análisis.

- Caso 1: Soldadura uniforme con el tamaño mínimo de garganta permitido por la AISC.

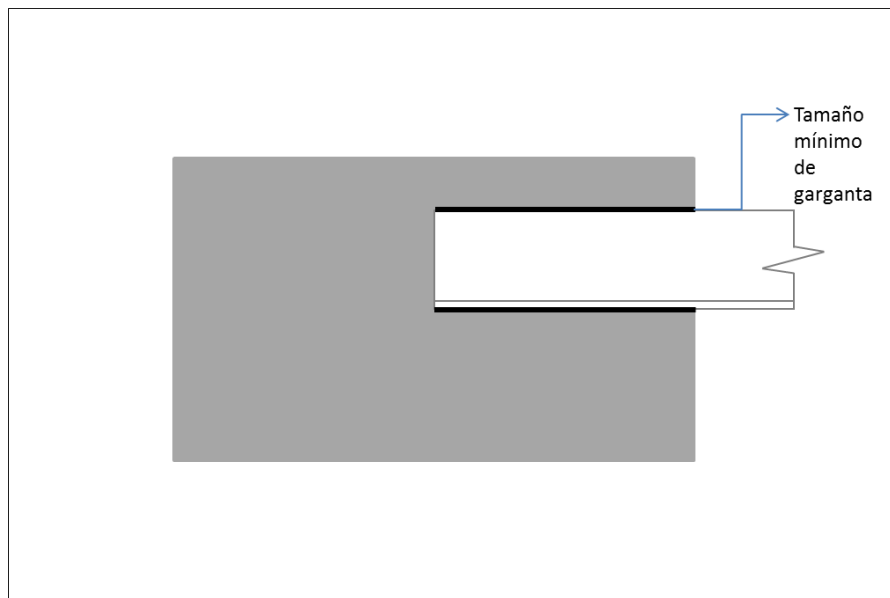


Figura 73: Patrón de soldadura utilizado en el caso 1.

- Caso 2: Mayor soldadura posible. Uniforme y con tamaño máximo de garganta permitido por la AISC.

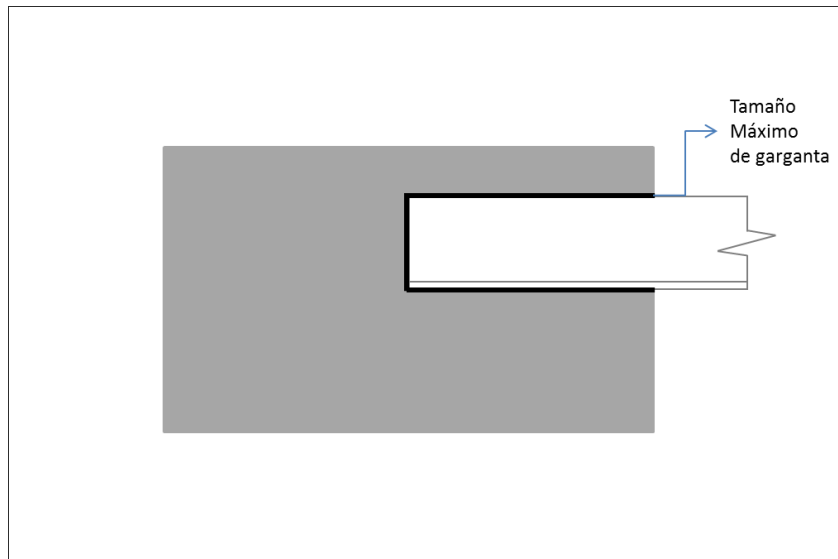


Figura 74: Patrón de soldadura utilizado en el caso 2.

- Caso 3: Soldadura balanceada con respecto al centro de gravedad de perfil individual. Con el tamaño máximo de garganta permitido por la AISC.

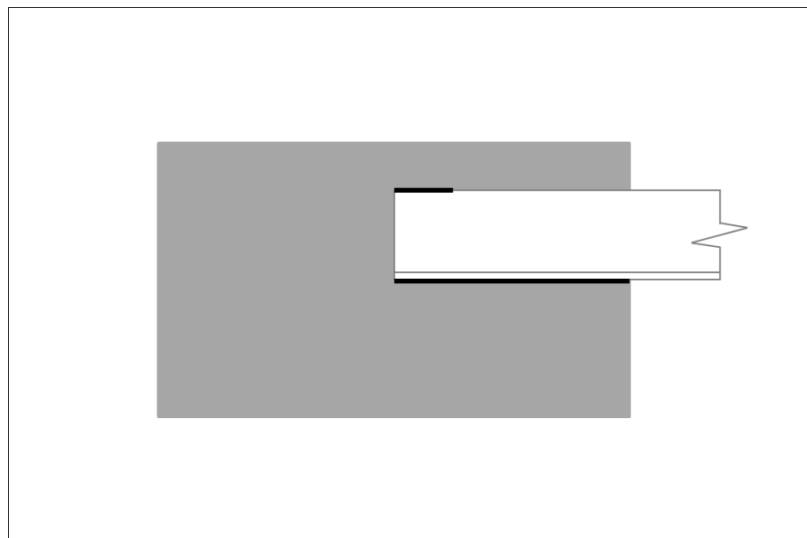


Figura 75: Patrón de soldadura utilizado en el caso 3.

V.5.1. Comparación con cargas críticas de ANSYS

Graficando los resultados obtenidos de la razón entre la resistencia de la soldadura y la carga crítica.

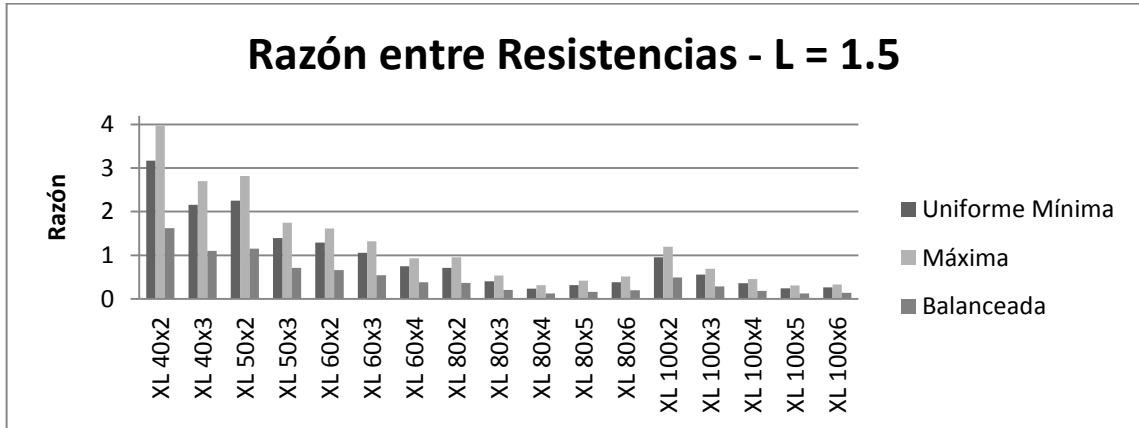


Figura 76: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, ANSYS.

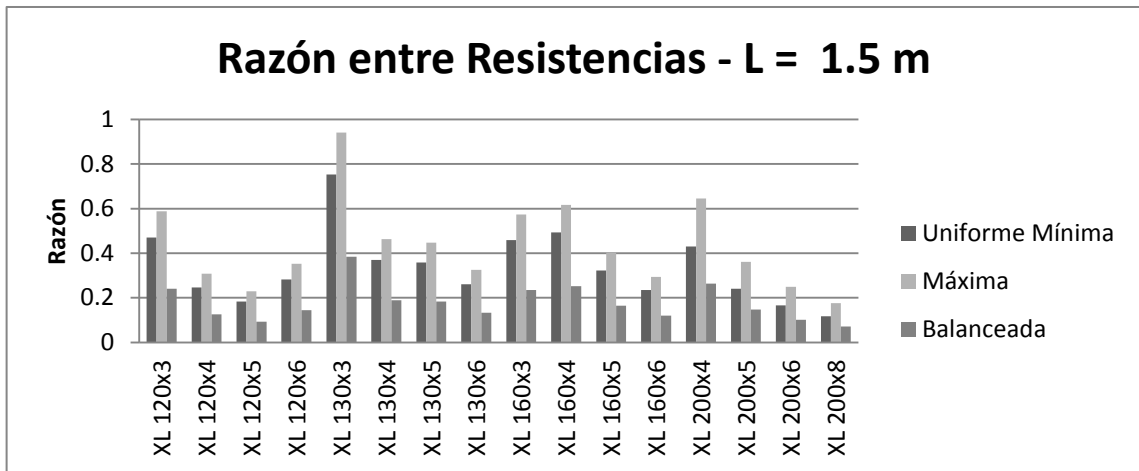


Figura 77: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, ANSYS.

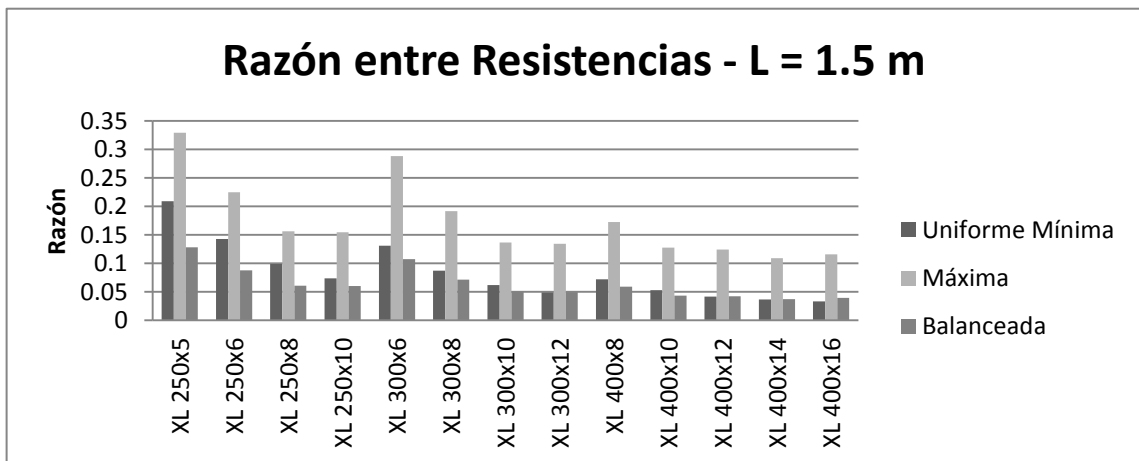


Figura 78: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, ANSYS.

Para los perfiles de 2.5 metros.

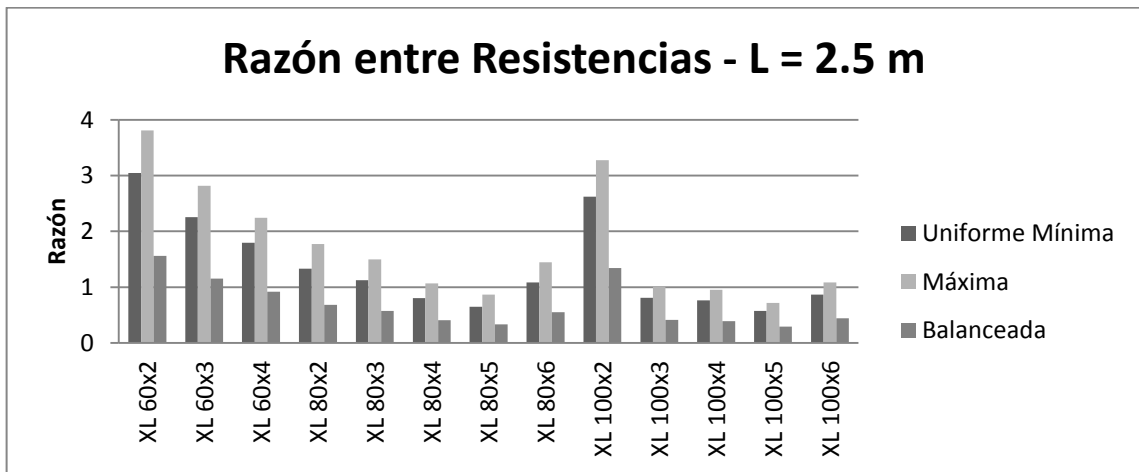


Figura 79: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 metros, ANSYS.

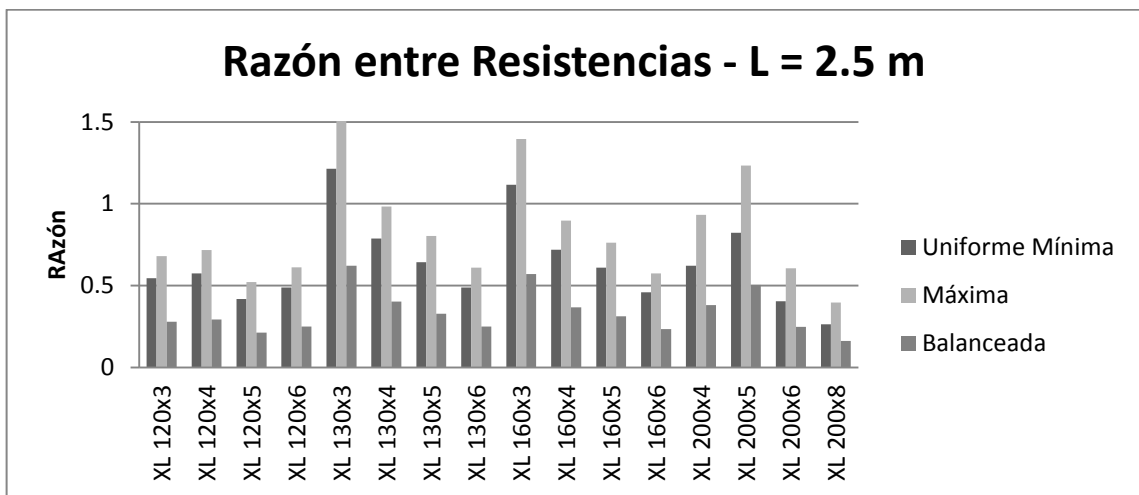


Figura 80: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 metros, ANSYS.

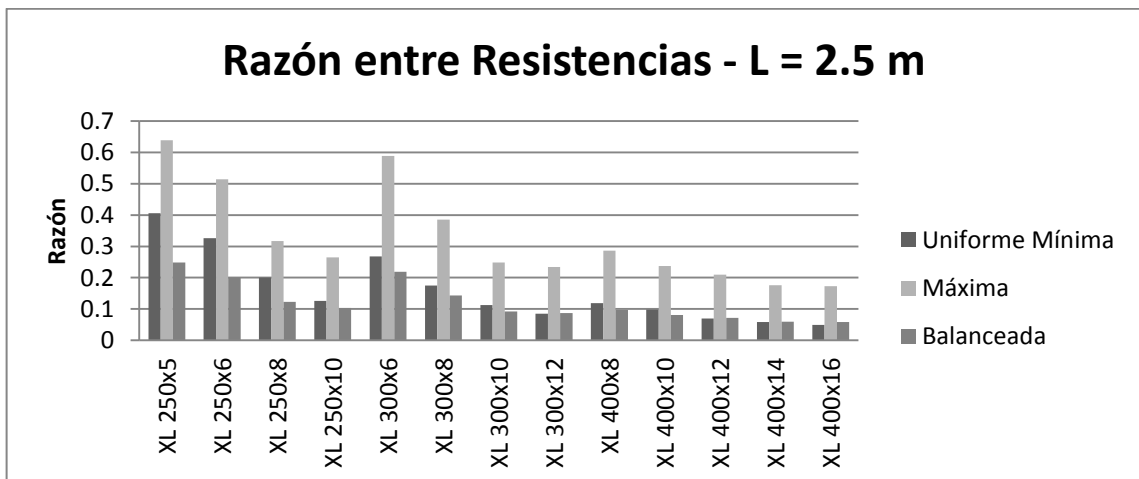


Figura 81: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 metros, ANSYS.

Los de 5 metros.

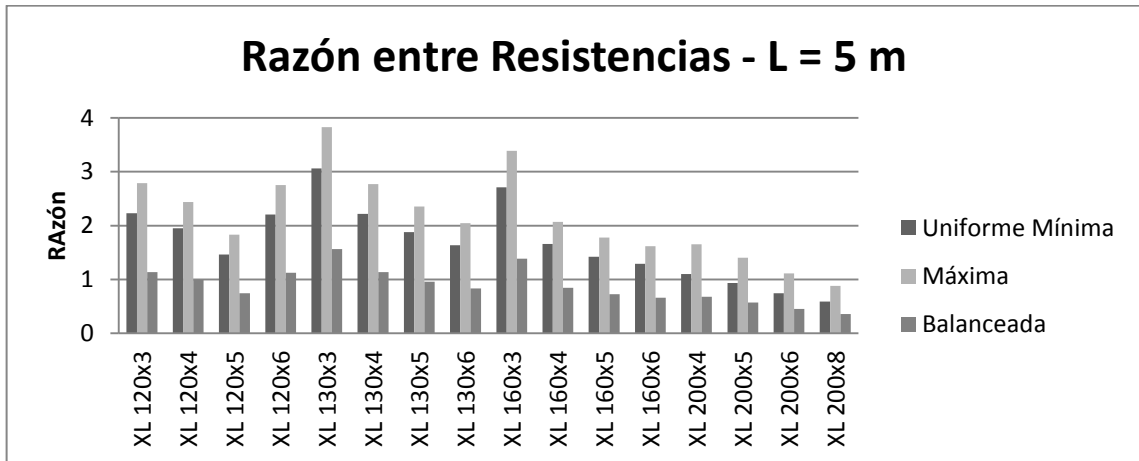


Figura 82: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 metros, ANSYS.

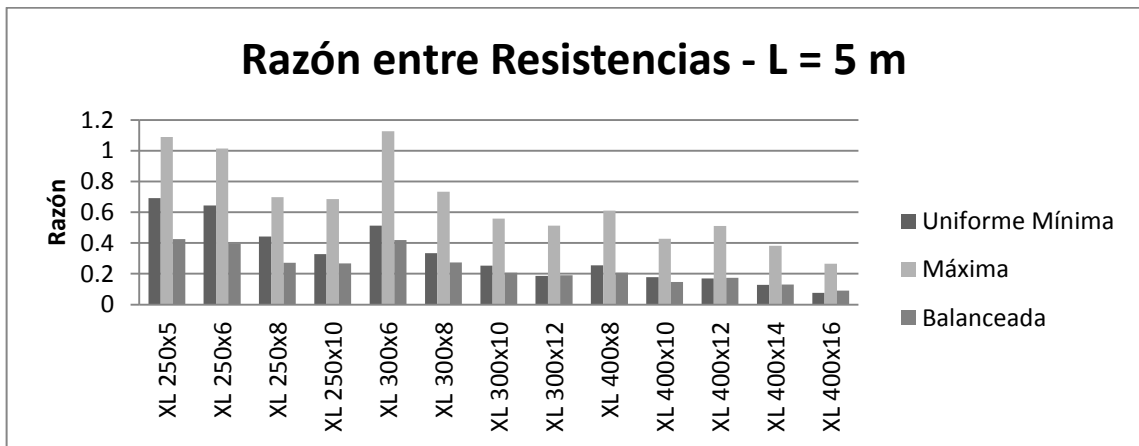


Figura 83: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 metros, ANSYS.

Finalmente los perfiles de 10 metros.

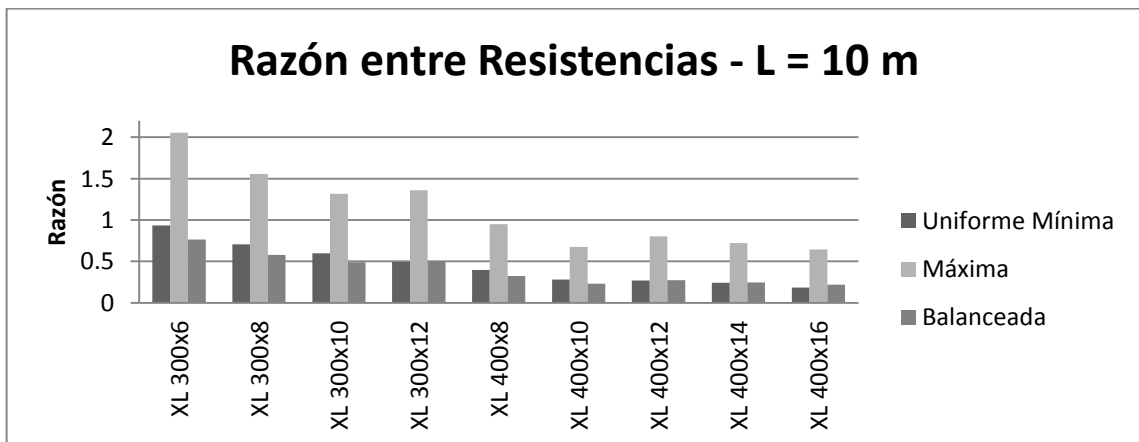


Figura 84: Razón entre resistencias para los perfiles de 10 metros, ANSYS.

Es posible notar que el caso de soldadura balanceada es la que tiene la menor resistencia en la gran parte de los casos. Mientras que la soldadura máxima es bastante superior a los otros dos casos.

Se observa que ninguno de los casos de soldaduras cumple cabalmente con la resistencia requerida por la conexión. El caso más cercano a satisfacer las demandas es la máxima soldadura, pero aun así sólo cumple con cerca del 35% de los casos. Los otros dos casos cumplen con el 24% y 9%, para la soldadura uniforme mínima y balanceada respectivamente.

V.5.2. Comparación con cargas críticas de AISC

Utilizando la razón entre las resistencias, se obtuvo para los perfiles de largo 1.5 metros.

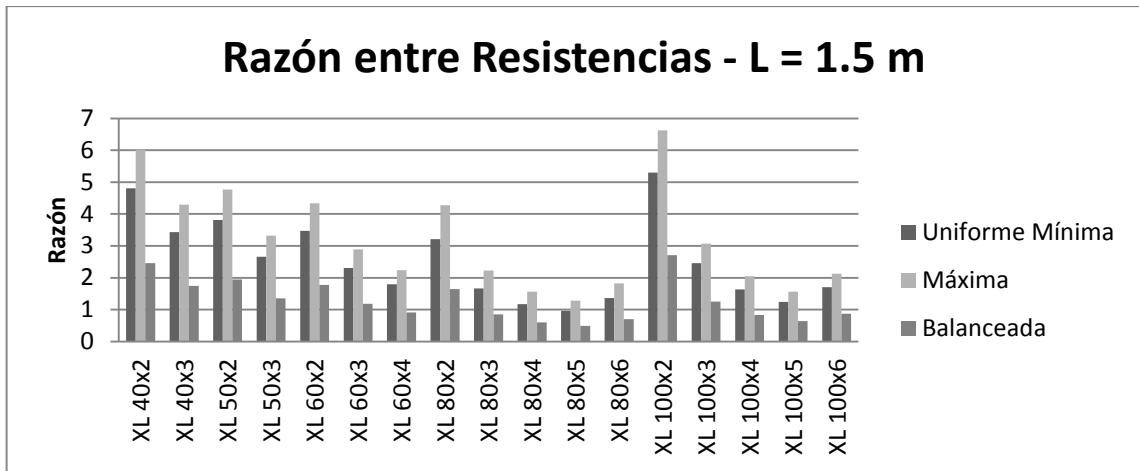


Figura 85: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, AISC.

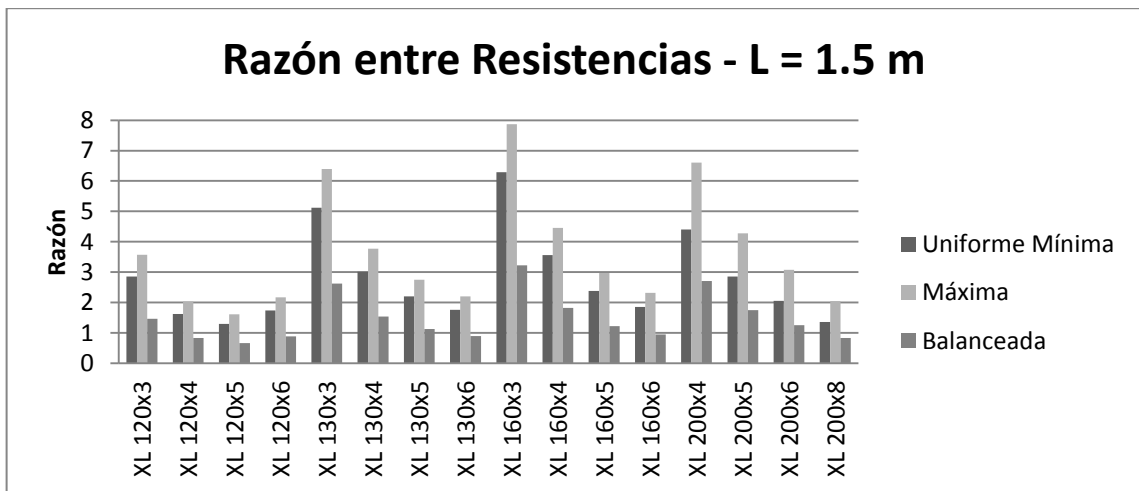


Figura 86: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, AISC.

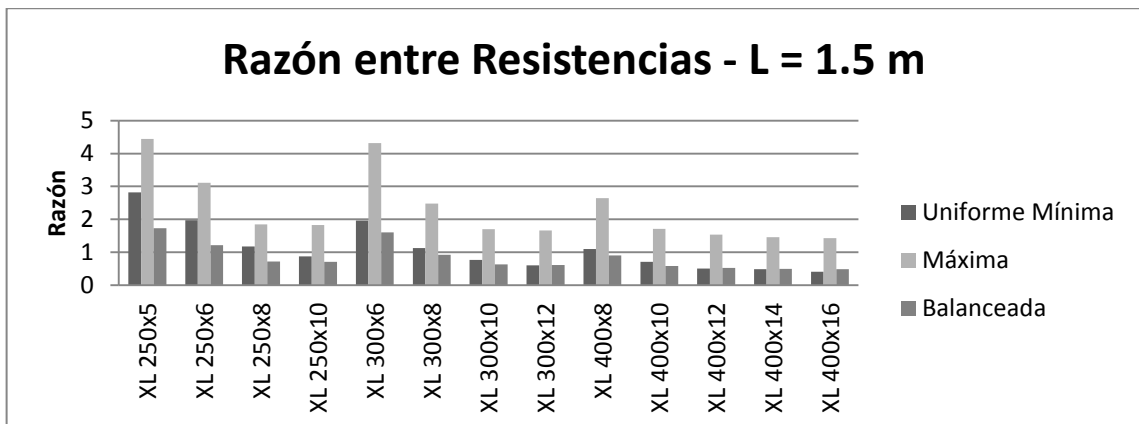


Figura 87: Razón entre resistencias para los perfiles de 1.5 m, AISC.

Los elementos de 2.5 metros.

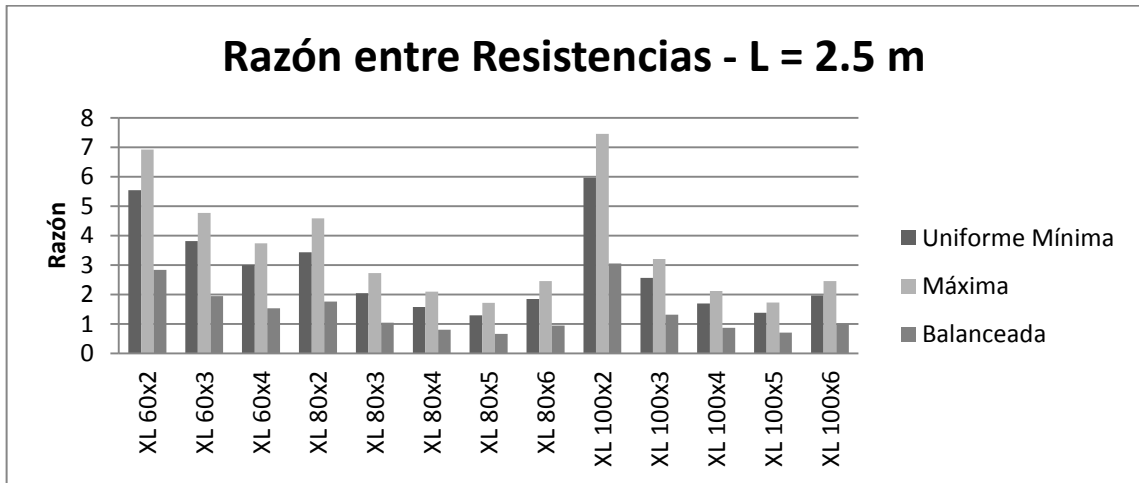


Figura 88: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 m, AISC.

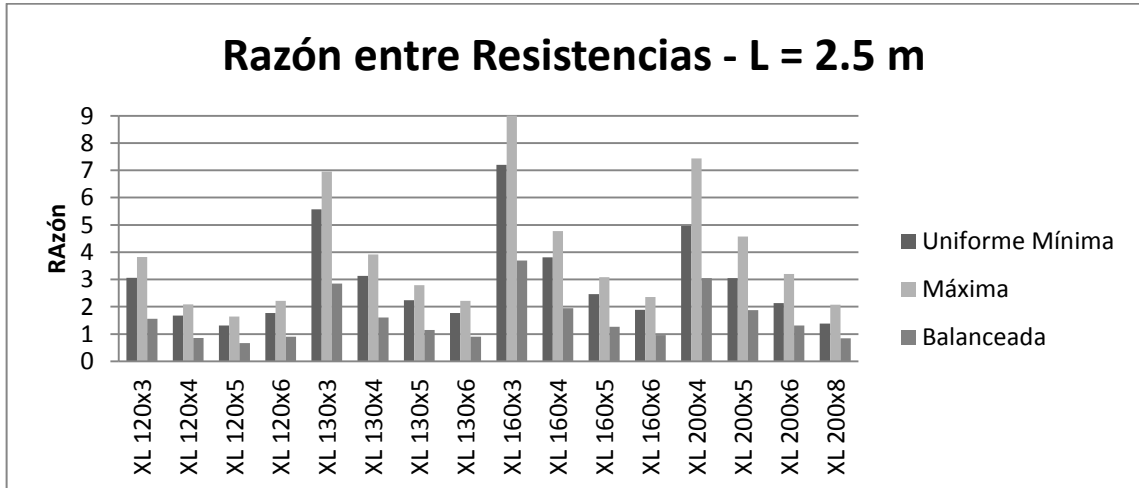


Figura 89: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 m, AISC.

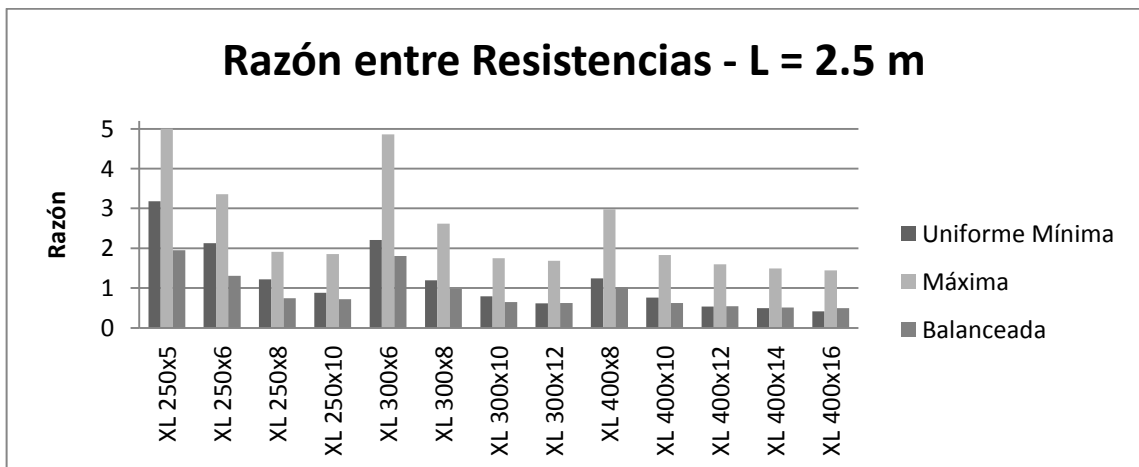


Figura 90: Razón entre resistencias para los perfiles de 2.5 m., AISC

De 5 metros.



Figura 91: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 m, AISC.

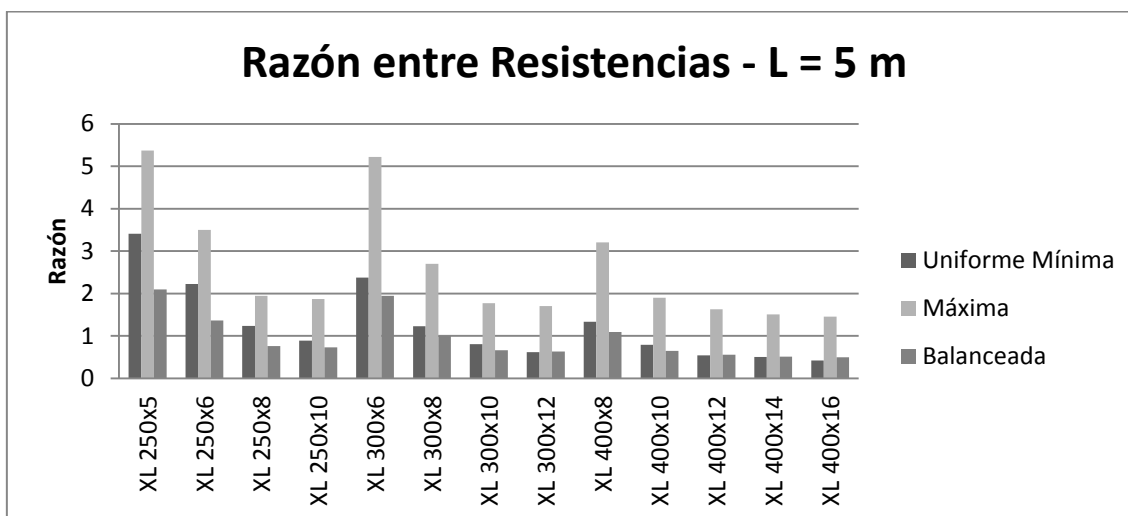


Figura 92: Razón entre resistencias para los perfiles de 5 m., AISC.

Finalmente los de 10 metros.

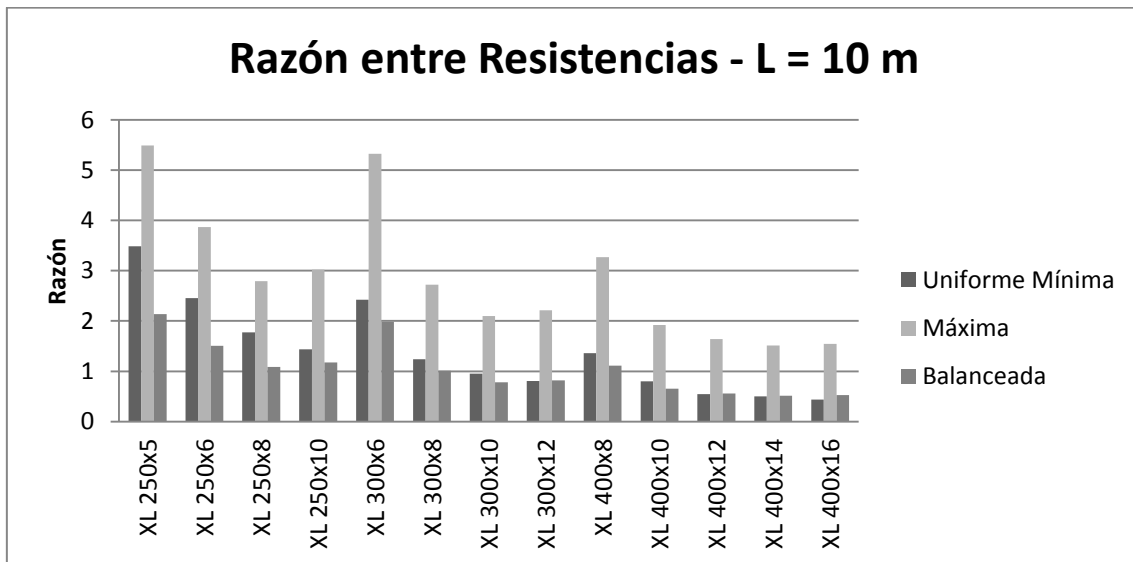


Figura 93: Razón entre resistencias para los perfiles de 10 m, AISC.

Se observa que la soldadura máxima es la única que cumple en todos los casos la resistencia requerida por la conexión. Los otros dos casos cumplen con el 78% y 53%, para la soldadura uniforme mínima y balanceada respectivamente.

La comparación numérica de resultados se adjunta en el Anexo E.

A continuación se entregan las recomendaciones de largo de soldadura de filete con la garganta máxima recomendada por la AISC, para las diferentes secciones.

Tabla 9: Recomendación de largos y gargantas de soldadura para los diferentes perfiles.

				Largo perfil [m]			
				1.5	2.5	5	10
XL	H	Peso	w	Largo Soldadura			
	cm	kgf/m	mm	mm	mm	mm	mm
XL	4	1.15	3	26	-	-	-
		1.65	3	38	-	-	-
XL	5	1.47	3	45	19	-	-
		2.12	3	72	29	-	-
XL	6	1.78	3	93	40	-	-
		2.59	3	114	54	-	-
		3.35	3	161	67	-	-
XL	8	2.41	3	169	91	-	-
		3.54	3	301	107	-	-
		4.61	3	511	150	-	-
		5.63	3	382	185	-	-
		6.61	5	314	111	-	-
XL	10	3.04	3	210	77	52	-
		4.48	3	362	248	69	-
		5.87	3	554	264	72	-
		7.2	3	820	350	90	-
		8.49	5	756	231	62	-
XL	12	5.42	3	511	441	108	-
		7.12	3	972	418	124	-
		8.77	3	1310	574	165	-
		10.4	5	851	491	109	-
XL	13	5.89	5	346	215	86	-
		7.75	5	702	331	118	-
		9.56	5	727	405	139	-
		11.3	5	1000	534	160	-

XL	H	Peso	w	Largo perfil [m]			
				1.5	2.5	5	10
				Largo Soldadura			
	cm	kgf/m	mm	mm	mm	mm	mm
XL	16	7.3	5	699	287	119	36
		9.63	5	649	446	194	41
		11.9	5	992	525	226	56
		14.1	5	1360	696	248	62
XL	20	12.1	6	776	537	303	93
		15.1	6	1383	406	357	116
		17.9	6	2002	826	449	111
		23.5	6	2840	1262	567	160
XL	25	19.0	6	1596	823	482	201
		22.6	6	2339	1022	518	245
		29.7	6	3364	1660	753	309
		36.7	8	3401	1983	765	274
XL	30	27.3	8	1908	935	488	268
		36	8	2869	1427	750	354
		44.5	8	4022	2213	986	418
		52.8	10	4103	2351	1073	405
XL	40	48.6	8	3476	2096	984	632
		60.2	8	4699	2528	1402	891
		71.6	10	4822	2864	1175	746
		82.9	12	5494	3402	1568	830
		93.9	14	5186	3468	2256	932

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue identificar los modos de falla predominantes en perfiles XL, y determinar una tendencia en la forma de pandeo de los elementos que pudiera ser relacionada con las propiedades del perfil. Esto se realizó comparando los resultados entregados por el procedimiento de diseño de la norma AISC, por las fórmulas para el pandeo de ángulos dobles descritos en el artículo de Marsh (1997) y según un análisis no lineal de desplazamiento controlado con el programa de elementos finitos ANSYS.

Los modelos estudiados utilizaron dimensiones consistentes con la realidad de diseño actual de las naves industriales, tanto las propiedades de los perfiles, como los largos de los elementos. Las placas de los extremos fueron simplificadas, excluyendo las posibles perforaciones que se pueden presentar debido a la conexión apernada con el marco de la nave. Las restricciones de desplazamiento y rotación utilizadas son similares al caso real, siguiendo las consideraciones permitidas por la NCh 2369 descritas en el punto II.1.2.3. Con estas consideraciones fue posible realizar un análisis simplificado de lo que ocurre con los arriostramientos al momento de ser solicitados hasta su límite de falla.

Comparando los modos de falla del punto V.2., se puede apreciar a grandes rasgos que los resultados son similares para los 3 análisis. Se observa que los modos entregados por la AISC y ANSYS varían en 4 casos, mientras que con Marsh, la AISC difiere en 5 modelos. Con esto, se puede concluir que tanto el análisis no lineal de ANSYS como las expresiones de Marsh, son consistentes con respecto al diseño tradicional de la AISC. Es importante rescatar que la cantidad de elementos que difieren son ínfimos comparado con el universo analizado, cerca de un 3% del total de elementos estudiados.

Con el estudio de la razón entre la esbeltez global y la esbeltez local del Capítulo VI, puntos 1 y 2, se logran analizar las formas de falla y las fuerzas en los eje Y-Z de las conexiones. En cuanto a la primera materia, es claro que existe un punto de transición de la torsión a la flexión de los arriostramientos, según la AISC es cerca de 5 y para Marsh es 4. Para el caso de ANSYS, se obtiene un traspaso de torsión a flexo-torsión en la razón 4, similar al comportamiento de Marsh, y de flexo-torsión a flexión en 5, que concuerda con la AISC. La transición suave entre fallas entregada por ANSYS no se observa en los otros dos casos, esta situación es debido a que estos métodos no distinguen entre flexo-torsión y torsión, sino que las encasillan en una misma falla.

Respecto a las fuerzas en los ejes Y-Z sobre las conexiones, también muestran una reducción de magnitud en cuanto aumenta la razón entre esbelteces, tanto para la placa del extremo como la central. Según esto, se observa que es más probable que los elementos con una razón de esbeltez mayor a 5 tengan solicitaciones menores en sus conexiones, como se puede observar en las figuras 55 y 56.

Con lo anteriormente expuesto, para mejorar el desempeño de las estructuras se recomienda utilizar perfiles con una razón entre la esbeltez global y esbeltez local mayor a 5.5, esto pretende evitar problemas de pandeo torsional y fuerzas excesivas en las conexiones, que pueden generar distorsiones en los elementos que interactúan junto con los arriostramientos.

Al realizar un análisis más detallado de las fuerzas sobre la placa de conexión del extremo, se advierte una predisposición de las fuerzas en las caras mayores que se encuentra asociada al modo de falla del elemento. Los arriostramientos con falla torsional consiguen una división equitativa de la fuerza, como se observa de la figuras 60 a la 63. Mientras que los que fallan por pandeo flexural, reparten sólo en una de sus caras un 70% o más de la carga crítica. Por lo tanto, se indica que para los elementos que fallan por flexión es necesario diseñar las conexiones de cada cara para la carga total obtenida. Por otro lado, para los arriostramientos con pandeo torsional es posible utilizar el 50% de la carga crítica.

Lo anterior es consistente con algunos de los problemas observados durante el terremoto del 27 de Febrero del 2010, que estuvieron asociados a la unión entre la placa conectora con el ala del perfil. Esto se encuentra relacionado con una mala consideración en la distribución de las cargas sobre las caras de la placa, lo que genera un diseño de conexión sub-dimensionada con respecto a las solicitaciones reales. Además, es posible que ocurra la situación contraria, en donde se puede sobre-dimensionar la conexión, lo que podría rigidizar un sector de unión provocando una ruptura en la cara más débil del perfil al momento de cargar al límite el elemento.

El momento correspondiente al eje Z sobre la interfaz de la cara del perfil y la conexión del extremo, tiene una ligera inclinación a disminuir para los perfiles con falla flexural, pero esto no es concluyente, ya que no se logra observar la misma tendencia para todos los casos. Este es otro punto que puede afectar directamente el desempeño de los arriostramientos, ya que genera una solicitación adicional sobre las soldaduras que no se encuentra considerado al momento del diseño.

Las resistencias de las soldaduras entregadas por los tres casos de estudio no cumplieron a cabalidad con las solicitaciones obtenidas por ANSYS. La soldadura máxima disponible es la única que tuvo un buen rendimiento para los resultados entregados por la AISC, mientras que comparada con las soluciones de ANSYS, sólo cumplió con el 35% de los casos. Para este análisis se utilizó sólo un 50% de la carga crítica de los elementos, lo que no siempre es sucede según lo descrito en el punto V.3., por lo tanto, alerta acerca de la situación real que ocurre en las uniones entre los elementos. Debido a lo anterior, se establece que este sector es crítico en el diseño de los arriostramiento y para evitar problemas que afecten la estabilidad global merece un análisis detallado de los elementos, agregando los posibles efectos que generan los momentos y la distribución de cargas sobre las caras de las placas.

Con estos resultados es posible generar una elección más provechosa de los perfiles, privilegiando las fallas de pandeo flexural, y con esto, facilitar la reparación y comportamiento de los elementos luego de un acontecimiento aislado, como son sismos, choques o accidentes. Además las consideraciones en el diseño de las conexiones entre placas y perfil, permitiría un mejor desempeño de la unión, evitando sub-dimensionar las soldaduras de unión, que como se analizó, puede ser un punto crítico en el diseño de los elementos.

A partir de este estudio es posible seguir profundizando el análisis de las placas de conexión, agregando singularidades como perforaciones debido a las uniones apernadas con el marco de la nave industrial. También se recomienda analizar cómo la rigidización local que producen las planchuelas separadoras en los extremos del arriostamiento afecta el comportamiento de las conexiones y qué efectos tiene sobre el ala del perfil, sector que puede transformarse en un punto débil dentro del elemento.

BIBLIOGRAFÍA

- AISC, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10, Chicago, Illinois, USA, American Institute Of Steel Construction, 2010.
- ANSYS, Theory Reference, Canonsburg, PA, USA, ANSYS Inc., 2005.
- Montecinos, R., Herrera, R., Verdugo, A. y 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.
- Marsh, C. “Design of single and multiple angle columns and beams”. Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 7, July, 1997, 847-856.
- NCh 2369, Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, Santiago, Chile, Instituto Nacional de Normalización, 2003.

ANEXO A. CARGAS CRÍTICAS Y MODOS DE FALLA

A.1. AISC

A continuación se presentan los resultados del análisis bajo el criterio del AISC.

Tabla 10: Cargas críticas y modos de falla por método AISC.

Designación			Largo [m]							
			1.5		2.5		5		10	
H	Peso	P	Modo	P	Modo	P	Modo	P	Modo	
cm	kgf/m	kN		kN		kN		kN		
XL 4	1.15	20.84	Flexural	7.96	Flexural	1.89	Flexural	0.46	Flexural	
	1.65	29.15	Flexural	10.94	Flexural	2.59	Flexural	0.63	Flexural	
XL 5	1.47	32.85	Flexural	16.00	Flexural	3.75	Flexural	0.91	Flexural	
	2.12	47.18	Flexural	22.69	Flexural	5.30	Flexural	1.28	Flexural	
XL 6	1.78	43.30	Torsional	27.12	Flexural	6.53	Flexural	1.57	Flexural	
	2.59	65.03	Flexural	39.42	Flexural	9.46	Flexural	2.28	Flexural	
	3.35	83.79	Flexural	50.22	Flexural	11.97	Flexural	2.88	Flexural	
XL 8	2.41	46.83	Torsional	43.75	Torsional	15.40	Flexural	3.71	Flexural	
	3.54	90.10	Torsional	73.65	Flexural	22.55	Flexural	5.43	Flexural	
	4.61	127.92	Flexural	95.86	Flexural	29.22	Flexural	7.03	Flexural	
	5.63	156.37	Flexural	116.91	Flexural	35.43	Flexural	8.52	Flexural	
	6.61	183.03	Flexural	136.16	Flexural	40.83	Flexural	9.81	Flexural	
XL 10	3.04	47.29	Torsional	42.00	Torsional	32.56	Flexural	7.77	Flexural	
	4.48	101.87	Torsional	97.87	Torsional	48.74	Flexural	11.43	Flexural	
	5.87	153.08	Torsional	147.79	Flexural	63.89	Flexural	14.96	Flexural	
	7.2	200.70	Torsional	181.40	Flexural	77.94	Flexural	18.24	Flexural	
	8.49	245.15	Torsional	213.11	Flexural	90.94	Flexural	21.26	Flexural	
XL 12	5.42	105.25	Torsional	98.33	Torsional	79.84	Flexural	19.93	Flexural	
	7.12	185.03	Torsional	179.90	Torsional	116.21	Flexural	27.99	Flexural	
	8.77	232.69	Torsional	229.83	Torsional	134.29	Flexural	32.32	Flexural	
	10.4	288.60	Torsional	282.37	Flexural	157.80	Flexural	37.90	Flexural	
XL 13	5.89	106.05	Torsional	97.49	Torsional	93.01	Torsional	26.38	Flexural	
	7.75	180.01	Torsional	173.46	Torsional	134.84	Flexural	34.64	Flexural	
	9.56	246.72	Torsional	242.65	Torsional	167.36	Flexural	42.78	Flexural	
	11.3	308.35	Torsional	305.77	Torsional	197.02	Flexural	50.22	Flexural	

Designación			Largo [m]							
			1.5		2.5		5		10	
XL	H	Peso	P	Modo	P	Modo	P	Modo	P	Modo
cm	kgf/m	kN			kN		kN		kN	
XL 16	7.3	106.10	Torsional		92.68	Torsional	85.14	Torsional	49.18	Flexural
	9.63	187.54	Torsional		175.14	Torsional	168.80	Torsional	65.46	Flexural
	11.9	280.62	Torsional		270.91	Torsional	257.42	Flexural	81.02	Flexural
	14.1	360.47	Torsional		353.93	Torsional	305.39	Flexural	95.75	Flexural
XL 20	12.1	189.44	Torsional		168.28	Torsional	156.68	Torsional	130.18	Flexural
	15.1	292.97	Torsional		273.70	Torsional	263.85	Torsional	164.29	Flexural
	17.9	407.43	Torsional		391.43	Torsional	383.63	Torsional	194.93	Flexural
	23.5	612.85	Torsional		604.09	Torsional	591.27	Flexural	255.16	Flexural
XL 25	19.0	295.86	Torsional		262.82	Torsional	244.71	Torsional	239.68	Torsional
	22.6	422.81	Torsional		391.87	Torsional	375.88	Torsional	340.07	Flexural
	29.7	709.83	Torsional		687.13	Torsional	676.22	Torsional	471.36	Flexural
	36.7	957.50	Torsional		943.85	Torsional	937.55	Torsional	580.03	Flexural
XL 30	27.3	425.52	Torsional		378.06	Torsional	352.05	Torsional	344.82	Torsional
	36	742.05	Torsional		701.01	Torsional	680.40	Torsional	674.89	Torsional
	44.5	1081.64	Torsional		1051.69	Torsional	1037.41	Torsional	874.05	Flexural
	52.8	1379.53	Torsional		1359.81	Torsional	1350.69	Torsional	1036.50	Flexural
XL 40	48.6	756.80	Torsional		672.27	Torsional	625.92	Torsional	613.04	Torsional
	60.2	1169.95	Torsional		1092.96	Torsional	1053.64	Torsional	1043.03	Torsional
	71.6	1631.98	Torsional		1567.96	Torsional	1536.74	Torsional	1528.47	Torsional
	82.9	2065.05	Torsional		2016.96	Torsional	1994.23	Torsional	1988.30	Torsional
	93.9	2459.48	Torsional		2424.30	Torsional	2408.05	Torsional	2270.87	Flexural

A.2. C. Marsh

A continuación se presentan los resultados del análisis bajo el criterio desarrollado en el trabajo de Marsh.

Tabla 11: Cargas críticas y modos de falla según C. Marsh.

Designación			Largo [m]							
			1.5		2.5		5		10	
XL	H	Peso	P	Modo	P	Modo	P	Modo	P	Modo
	cm	kgf/m	kN		kN		kN		kN	
XL 4	1.15	49.78	Flexión	17.92	Flexión	4.48	Flexión	1.12	Flexión	
	1.65	65.70	Flexión	23.65	Flexión	5.91	Flexión	1.48	Flexión	
XL 5	1.47	98.61	Flexión	35.50	Flexión	8.88	Flexión	2.22	Flexión	
	2.12	134.03	Flexión	48.25	Flexión	12.06	Flexión	3.02	Flexión	
XL 6	1.78	163.87	Torsión	61.69	Flexión	15.42	Flexión	3.86	Flexión	
	2.59	237.24	Flexión	85.41	Flexión	21.35	Flexión	5.34	Flexión	
	3.35	290.78	Flexión	104.68	Flexión	26.17	Flexión	6.54	Flexión	
XL 8	2.41	122.54	Torsión	122.54	Torsión	36.86	Flexión	9.22	Flexión	
	3.54	414.72	Torsión	207.90	Flexión	51.98	Flexión	12.99	Flexión	
	4.61	728.01	Flexión	262.08	Flexión	65.52	Flexión	16.38	Flexión	
	5.63	852.67	Flexión	306.96	Flexión	76.74	Flexión	19.19	Flexión	
	6.61	960.31	Flexión	345.71	Flexión	86.43	Flexión	21.61	Flexión	
XL 10	3.04	97.86	Torsión	97.86	Torsión	77.70	Flexión	19.43	Flexión	
	4.48	331.02	Torsión	331.02	Torsión	111.60	Flexión	27.90	Flexión	
	5.87	787.37	Torsión	567.25	Flexión	141.81	Flexión	35.45	Flexión	
	7.2	1543.88	Torsión	674.82	Flexión	168.71	Flexión	42.18	Flexión	
	8.49	2142.14	Flexión	771.17	Flexión	192.79	Flexión	48.20	Flexión	
XL 12	5.42	275.42	Torsión	275.42	Torsión	192.85	Flexión	48.21	Flexión	
	7.12	700.25	Torsión	700.25	Torsión	264.28	Flexión	66.07	Flexión	
	8.77	1285.41	Torsión	1194.59	Flexión	298.65	Flexión	74.66	Flexión	
	10.4	2219.96	Torsión	1371.37	Flexión	342.84	Flexión	85.71	Flexión	
XL 13	5.89	254.08	Torsión	254.08	Torsión	254.08	Torsión	64.48	Flexión	
	7.75	603.91	Torsión	603.91	Torsión	332.88	Flexión	83.22	Flexión	
	9.56	1185.11	Torsión	1185.11	Torsión	401.88	Flexión	100.47	Flexión	
	11.3	2046.92	Torsión	1859.72	Flexión	464.93	Flexión	116.23	Flexión	

			Largo [m]							
Designación			1.5		2.5		5		10	
XL	H	Peso	P	Modo	P	Modo	P	Modo	P	Modo
		cm	kgf/m	kN		kN		kN		kN
XL 16	7.3		206.16	Torsión	206.16	Torsión	206.16	Torsión	118.42	Flexión
	9.63		490.97	Torsión	490.97	Torsión	490.97	Torsión	155.15	Flexión
	11.9		960.28	Torsión	960.28	Torsión	752.45	Flexión	188.11	Flexión
	14.1		1658.87	Torsión	1658.87	Torsión	874.06	Flexión	218.51	Flexión
XL 20	12.1		391.94	Torsión	391.94	Torsión	391.94	Torsión	310.60	Flexión
	15.1		766.39	Torsión	766.39	Torsión	766.39	Torsión	379.94	Flexión
	17.9		1324.08	Torsión	1324.08	Torsión	1324.08	Torsión	444.35	Flexión
	23.5		3151.58	Torsión	3151.58	Torsión	2265.78	Flexión	566.45	Flexión
XL 25	19.0		611.93	Torsión	611.93	Torsión	611.93	Torsión	611.93	Torsión
	22.6		1057.29	Torsión	1057.29	Torsión	1057.29	Torsión	866.06	Flexión
	29.7		2514.59	Torsión	2514.59	Torsión	2514.59	Torsión	1118.91	Flexión
	36.7		4922.36	Torsión	4922.36	Torsión	4922.36	Torsión	1347.70	Flexión
XL 30	27.3		879.97	Torsión	879.97	Torsión	879.97	Torsión	879.97	Torsión
	36		2091.73	Torsión	2091.73	Torsión	2091.73	Torsión	1989.30	Flexión
	44.5		4093.23	Torsión	4093.23	Torsión	4093.23	Torsión	2411.76	Flexión
	52.8		7093.69	Torsión	7093.69	Torsión	7093.69	Torsión	2808.84	Flexión
XL 40	48.6		1565.23	Torsión	1565.23	Torsión	1565.23	Torsión	1565.23	Torsión
	60.2		3061.58	Torsión	3061.58	Torsión	3061.58	Torsión	3061.58	Torsión
	71.6		5302.12	Torsión	5302.12	Torsión	5302.12	Torsión	5302.12	Torsión
	82.9		8465.77	Torsión	8465.77	Torsión	8465.77	Torsión	7722.71	Flexión
	93.9		12648.47	Torsión	12648.47	Torsión	12648.47	Torsión	8618.16	Flexión

A.3. ANSYS: Análisis no lineal

A continuación se presentan los resultados del análisis no lineal mediante el programa ANSYS.

Tabla 12: Cargas críticas y modos de falla según ANSYS.

Designación			Largo [m]							
			1.5		2.5		5		10	
XL	H	Peso	P	Modo	P	Modo	P	Modo	P	Modo
	cm	kgf/m	kN		kN		kN		kN	
XL 4	1.15	31.57	Flexión	-	-	-	-	-	-	-
	1.65	46.38	Flexión	-	-	-	-	-	-	-
XL 5	1.47	55.61	Flexión	22.87	Flexión	-	-	-	-	-
	2.12	89.73	Flexión	36.03	Flexión	-	-	-	-	-
XL 6	1.78	116.39	Torsión	49.31	Flexión	-	-	-	-	-
	2.59	142.39	Flexión	66.71	Flexión	-	-	-	-	-
	3.35	201.00	Flexión	83.73	Flexión	-	-	-	-	-
XL 8	2.41	210.70	Torsión	112.94	Torsión	-	-	-	-	-
	3.54	375.92	Torsión	133.64	Flexión	-	-	-	-	-
	4.61	638.89	Flexo Torsión	187.47	Flexión	-	-	-	-	-
	5.63	477.79	Flexión	231.56	Flexión	-	-	-	-	-
	6.61	654.06	Flexión	230.84	Flexión	-	-	-	-	-
XL 10	3.04	262.67	Torsión	95.54	Flexo Torsión	63.95	Flexión	-	-	-
	4.48	452.87	Torsión	309.93	Flexo Torsión	85.61	Flexión	-	-	-
	5.87	693.54	Torsión	329.40	Flexo Torsión	89.83	Flexión	-	-	-
	7.2	1026.30	Torsión	438.09	Flexión	112.00	Flexión	-	-	-
	8.49	1576.40	Flexo Torsión	481.60	Flexión	128.56	Flexión	-	-	-
XL 12	5.42	638.69	Torsión	551.80	Torsión	134.94	Flexión	-	-	-
	7.12	1216.70	Torsión	523.35	Flexo Torsión	154.32	Flexión	-	-	-
	8.77	1639.40	Torsión	718.78	Torsión	205.42	Flexión	-	-	-
	10.4	1775.80	Torsión	1023.60	Flexión	227.34	Flexión	-	-	-
XL 13	5.89	721.47	Torsión	446.87	Torsión	177.42	Flexo Torsión	-	-	-
	7.75	1464.70	Torsión	689.55	Torsión	244.71	Flexión	-	-	-
	9.56	1516.70	Torsión	844.40	Flexo Torsión	288.40	Flexión	-	-	-
	11.3	2085.10	Torsión	1112.70	Flexo Torsión	331.85	Flexión	-	-	-

			Largo [m]							
Designación			1.5		2.5		5		10	
XL	H	Peso	P	Modo	P	Modo	P	Modo	P	Modo
cm	kgf/m	kN			kN		kN		kN	
XL 16	7.3	1457.30	Torsión	598.19	Torsión	246.59	Flexión	-	-	-
	9.63	1352.90	Torsión	929.84	Flexo Torsión	403.15	Flexión	-	-	-
	11.9	2070.10	Torsión	1094.00	Torsión	470.25	Flexión	-	-	-
	14.1	2837.20	Torsión	1451.80	Flexo Torsión	517.00	Flexión	-	-	-
XL 20	12.1	1941.10	Torsión	1343.60	Torsión	756.50	Torsión	230.97	Flexión	Flexión
	15.1	3462.50	Torsión	1015.60	Torsión	891.72	Flexo Torsión	289.20	Flexión	Flexión
	17.9	5011.80	Torsión	2068.00	Torsión	1122.20	Torsión	276.38	Flexión	Flexión
	23.5	7112.00	Torsión	3159.80	Torsión	1419.20	Flexo Torsión	398.45	Flexión	Flexión
XL 25	19.0	3996.90	Torsión	2060.30	Torsión	1206.60	Torsión	501.85	Flexión	Flexión
	22.6	5856.30	Torsión	2559.30	Torsión	1295.30	Flexo Torsión	611.45	Flexión	Flexión
	29.7	8424.50	Torsión	4155.90	Torsión	1884.00	Torsión	771.51	Flexión	Flexión
	36.7	11356.00	Torsión	6619.00	Torsión	2553.60	Flexo Torsión	914.95	Flexión	Flexión
XL 30	27.3	6370.50	Torsión	3122.10	Torsión	1629.50	Flexo Torsión	893.56	Flexo Torsión	Flexo Torsión
	36	9578.40	Torsión	4763.50	Torsión	2502.90	Flexo Torsión	1181.10	Flexo Torsión	Flexo Torsión
	44.5	13428.00	Torsión	7389.70	Torsión	3290.60	Flexo Torsión	1393.70	Flexión	Flexión
	52.8	17126.00	Torsión	9811.10	Torsión	4475.30	Flexo Torsión	1690.20	Flexión	Flexión
XL 40	48.6	11606.00	Torsión	6996.60	Torsión	3284.30	Torsión	2110.30	Torsión	Torsión
	60.2	15690.00	Torsión	8439.90	Torsión	4679.10	Torsión	2972.80	Torsión	Torsión
	71.6	20126.00	Torsión	11954.00	Torsión	4903.30	Torsión	3113.40	Torsión	Torsión
	82.9	27515.00	Torsión	17036.00	Torsión	7849.10	Torsión	4157.20	Torsión	Torsión
	93.9	30304.00	Torsión	20263.00	Torsión	13183.00	Torsión	5446.00	Flexión	Flexión

ANEXO B. FUERZAS EN EJES Y-Z SOBRE LAS PLACAS

B.1. Fuerzas en los ejes Y-Z de la placa de conexión del extremo

Tabla 13: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del extremo.

Designación			Largo [m]					
			1.5			2.5		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL	4	1.15	0.07	-0.77	Flexión	0.01	-0.21	Flexión
		1.65	0.15	-1.05	Flexión	-0.06	0.24	Flexión
XL	5	1.47	-0.50	-1.69	Flexión	0.01	-0.44	Flexión
		2.12	-0.30	2.96	Flexión	0.23	-0.50	Flexión
XL	6	1.78	0.75	2.81	Torsión	-0.21	0.47	Flexión
		2.59	-0.99	-4.92	Flexión	0.30	-0.75	Flexión
		3.35	0.84	-6.29	Flexión	0.41	-0.98	Flexión
XL	8	2.41	-4.47	-7.43	Torsión	-0.25	2.62	Torsión
		3.54	-3.12	-12.27	Torsión	0.79	5.19	Flexión
		4.61	4.83	-33.70	Flexo Torsión	-2.08	5.35	Flexión
		5.63	5.61	-22.12	Flexión	0.63	-3.01	Flexión
		6.61	6.95	-24.62	Flexión	5.03	-8.41	Flexión
XL	10	3.04	-2.11	-2.51	Torsión	1.37	2.88	Flexo Torsión
		4.48	-1.00	-2.83	Torsión	0.99	1.46	Flexo Torsión
		5.87	0.66	-2.07	Torsión	4.65	12.28	Flexo Torsión
		7.2	-2.67	34.87	Torsión	-1.77	17.86	Flexión
		8.49	17.48	-71.07	Flexo Torsión	4.84	-12.16	Flexión
XL	12	5.42	4.25	13.13	Torsión	3.78	15.68	Torsión
		7.12	7.27	-32.75	Torsión	3.76	6.86	Flexo Torsión
		8.77	2.13	-0.69	Torsión	0.65	3.11	Torsión
		10.4	14.57	-55.98	Torsión	-10.93	41.57	Flexión
XL	13	5.89	10.19	25.77	Torsión	-5.78	-16.42	Torsión
		7.75	-5.43	-14.00	Torsión	1.84	3.50	Torsión
		9.56	9.89	-45.25	Torsión	-1.02	-10.67	Flexo Torsión
		11.3	-22.41	100.84	Torsión	2.14	26.39	Flexo Torsión

Designación			Largo [m]					
			1.5			2.5		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL 16	7.3	21.35	-35.99	Torsión	-6.51	-14.38	Torsión	
	9.63	-13.98	70.36	Torsión	-6.52	-29.17	Flexo Torsión	
	11.9	-19.62	102.39	Torsión	8.70	44.12	Torsión	
	14.1	6.03	14.61	Torsión	8.69	28.95	Flexo Torsión	
XL 20	12.1	4.84	11.08	Torsión	-0.14	5.49	Torsión	
	15.1	-5.01	-14.68	Torsión	-0.24	0.29	Torsión	
	17.9	3.70	6.78	Torsión	-3.35	-24.60	Torsión	
	23.5	0.45	1.21	Torsión	0.18	2.36	Torsión	
XL 25	19.0	-11.76	30.60	Torsión	2.61	7.03	Torsión	
	22.6	8.39	3.04	Torsión	5.53	-77.30	Torsión	
	29.7	3.88	3.27	Torsión	-18.66	66.29	Torsión	
	36.7	-1.39	4.20	Torsión	-2.15	-7.34	Torsión	
XL 30	27.3	-115.44	82.76	Torsión	7.89	74.75	Torsión	
	36	0.56	13.29	Torsión	27.54	-99.51	Torsión	
	44.5	4.64	4.06	Torsión	-21.22	-74.21	Torsión	
	52.8	-10.18	2.34	Torsión	-1.28	7.94	Torsión	
XL 40	48.6	204.82	18.77	Torsión	-36.13	-82.26	Torsión	
	60.2	51.77	18.18	Torsión	39.07	-91.47	Torsión	
	71.6	68.43	33.87	Torsión	-15.49	1.01	Torsión	
	82.9	-4.39	-6.53	Torsión	-88.29	-18.94	Torsión	
	93.9	-94.31	-28.25	Torsión	-56.82	-9.82	Torsión	

Tabla 14: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del extremo.

Designación			Largo [m]					
			5			10		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL 4	4	1.15	-	-	-	-	-	-
		1.65	-	-	-	-	-	-
XL 5	5	1.47	-	-	-	-	-	-
		2.12	-	-	-	-	-	-
XL 6	6	1.78	-	-	-	-	-	-
		2.59	-	-	-	-	-	-
		3.35	-	-	-	-	-	-
XL 8	8	2.41	-	-	-	-	-	-
		3.54	-	-	-	-	-	-
		4.61	-	-	-	-	-	-
		5.63	-	-	-	-	-	-
		6.61	-	-	-	-	-	-
XL 10	10	3.04	0.00	0.97	Flexión	-	-	-
		4.48	0.67	-0.86	Flexión	-	-	-
		5.87	-0.16	-2.15	Flexión	-	-	-
		7.2	0.12	-2.13	Flexión	-	-	-
		8.49	0.14	-3.03	Flexión	-	-	-
XL 12	12	5.42	-0.05	1.47	Flexión	-	-	-
		7.12	0.54	4.21	Flexión	-	-	-
		8.77	-0.25	2.35	Flexión	-	-	-
		10.4	-0.28	5.92	Flexión	-	-	-
XL 13	13	5.89	0.11	2.42	Flexo Torsión	-	-	-
		7.75	-0.48	4.04	Flexión	-	-	-
		9.56	-0.66	5.16	Flexión	-	-	-
		11.3	-0.74	6.15	Flexión	-	-	-

Designación			Largo [m]					
			5			10		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL 16	7.3	-6.31	9.12	Flexión	-	-	-	
	9.63	0.13	-0.43	Flexión	-	-	-	
	11.9	-0.90	9.62	Flexión	-	-	-	
	14.1	3.90	12.42	Flexión	-	-	-	
XL 20	12.1	-0.04	0.85	Torsión	0.91	-3.55	Flexión	
	15.1	1.52	5.18	Flexo Torsión	1.36	-4.36	Flexión	
	17.9	-6.24	-23.88	Torsión	0.16	-3.30	Flexión	
	23.5	-6.08	24.97	Flexo Torsión	-1.20	7.49	Flexión	
XL 25	19.0	-0.43	-0.52	Torsión	1.82	-6.84	Flexión	
	22.6	-9.32	-19.49	Flexo Torsión	1.72	-11.07	Flexión	
	29.7	2.46	11.93	Torsión	1.96	-13.32	Flexión	
	36.7	8.09	30.48	Flexo Torsión	-2.00	15.75	Flexión	
XL 30	27.3	-10.96	-38.01	Flexo Torsión	2.03	7.25	Flexo Torsión	
	36	11.39	34.25	Flexo Torsión	-1.09	-18.35	Flexo Torsión	
	44.5	-24.26	66.53	Flexo Torsión	2.70	-24.61	Flexión	
	52.8	4.50	63.30	Flexo Torsión	2.52	-27.20	Flexión	
XL 40	48.6	-9.34	-26.33	Torsión	-6.87	-4.76	Torsión	
	60.2	-14.76	21.56	Torsión	-9.45	-25.14	Torsión	
	71.6	-0.83	0.42	Torsión	-6.41	37.94	Torsión	
	82.9	-10.76	-60.43	Torsión	3.53	-4.96	Torsión	
	93.9	-9.74	-1.99	Torsión	13.50	-56.65	Flexión	

B.2. Fuerzas en los ejes Y-Z de la placa central

Tabla 15: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del centro.

Designación			Largo [m]					
			1.5			2.5		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL	4	1.15	-0.03	0.15	Flexión	0.04	0.02	Flexión
		1.65	-0.01	0.01	Flexión	0.02	0.01	Flexión
XL	5	1.47	0.03	0.07	Flexión	0.01	0.01	Flexión
		2.12	0.02	-0.04	Flexión	-0.02	0.02	Flexión
XL	6	1.78	1.39	-0.71	Torsión	0.00	0.02	Flexión
		2.59	0.24	0.78	Flexión	-0.02	0.01	Flexión
		3.35	0.40	0.27	Flexión	-0.04	0.01	Flexión
XL	8	2.41	6.18	34.61	Torsión	1.27	-5.48	Torsión
		3.54	-4.17	38.11	Torsión	2.04	-24.88	Flexión
		4.61	-2.18	6.96	Flexo Torsión	0.09	-0.39	Flexión
		5.63	-5.50	3.47	Flexión	-0.16	-0.66	Flexión
		6.61	-3.14	15.67	Flexión	-3.44	3.13	Flexión
XL	10	3.04	1.18	0.47	Torsión	-2.12	15.99	Flexo Torsión
		4.48	-1.97	0.82	Torsión	0.62	0.65	Flexo Torsión
		5.87	-1.12	1.75	Torsión	-6.14	23.26	Flexo Torsión
		7.2	-20.75	-98.41	Torsión	-1.11	-6.08	Flexión
		8.49	-30.31	137.35	Flexo Torsión	-6.53	-4.65	Flexión
XL	12	5.42	-7.11	76.21	Torsión	-1.17	-15.73	Torsión
		7.12	5.56	10.62	Torsión	-2.94	9.34	Flexo Torsión
		8.77	-1.18	167.15	Torsión	1.66	4.18	Torsión
		10.4	-17.42	15.05	Torsión	-1.03	20.17	Flexión
XL	13	5.89	-10.19	-29.46	Torsión	-17.30	17.88	Torsión
		7.75	4.33	-11.52	Torsión	8.07	-3.10	Torsión
		9.56	-11.36	16.84	Torsión	-3.60	-10.83	Flexo Torsión
		11.3	24.85	-44.36	Torsión	-3.73	-20.76	Flexo Torsión

Designación			Largo [m]					
			1.5			2.5		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL 16	7.3	7.3	-30.62	-32.79	Torsión	7.23	15.66	Torsión
	9.63	9.63	57.37	-141.35	Torsión	-12.37	131.07	Flexo Torsión
	11.9	11.9	-21.81	-49.70	Torsión	29.20	-134.45	Torsión
	14.1	14.1	15.77	32.26	Torsión	-12.51	13.68	Flexo Torsión
XL 20	12.1	12.1	-6.79	-203.63	Torsión	2.20	-2.07	Torsión
	15.1	15.1	29.46	-52.10	Torsión	1.52	-0.50	Torsión
	17.9	17.9	-6.03	-3.49	Torsión	-2.15	8.68	Torsión
	23.5	23.5	2.08	-0.86	Torsión	0.58	-1.46	Torsión
XL 25	19.0	19.0	14.28	-21.96	Torsión	2.09	-1.99	Torsión
	22.6	22.6	-7.49	-4.07	Torsión	44.21	-241.57	Torsión
	29.7	29.7	-2.37	-1.69	Torsión	20.40	41.46	Torsión
	36.7	36.7	-5.44	-3.97	Torsión	4.29	-18.47	Torsión
XL 30	27.3	27.3	179.02	-60.65	Torsión	-26.28	-17.61	Torsión
	36	36	7.48	-8.42	Torsión	-26.03	-17.84	Torsión
	44.5	44.5	-9.79	-5.61	Torsión	39.57	59.05	Torsión
	52.8	52.8	10.57	2.72	Torsión	1.77	-1.88	Torsión
XL 40	48.6	48.6	-677.54	190.84	Torsión	17.33	-151.00	Torsión
	60.2	60.2	-110.35	-28.65	Torsión	-45.61	-130.03	Torsión
	71.6	71.6	-216.32	-63.77	Torsión	42.84	3.55	Torsión
	82.9	82.9	26.62	11.21	Torsión	162.19	11.71	Torsión
	93.9	93.9	231.04	56.17	Torsión	99.65	35.22	Torsión

Tabla 16: Fuerzas de torsión y modos de falla según ANSYS, en la conexión del centro.

Designación			Largo [m]					
			5			10		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL	4	1.15	-	-	-	-	-	-
		1.65	-	-	-	-	-	-
XL	5	1.47	-	-	-	-	-	-
		2.12	-	-	-	-	-	-
XL	6	1.78	-	-	-	-	-	-
		2.59	-	-	-	-	-	-
		3.35	-	-	-	-	-	-
XL	8	2.41	-	-	-	-	-	-
		3.54	-	-	-	-	-	-
		4.61	-	-	-	-	-	-
		5.63	-	-	-	-	-	-
		6.61	-	-	-	-	-	-
XL	10	3.04	0.00	0.14	Flexión	-	-	-
		4.48	-0.02	0.03	Flexión	-	-	-
		5.87	2.03	-16.15	Flexión	-	-	-
		7.2	-0.15	0.44	Flexión	-	-	-
		8.49	-2.46	19.18	Flexión	-	-	-
XL	12	5.42	-0.10	-1.09	Flexión	-	-	-
		7.12	1.08	-10.77	Flexión	-	-	-
		8.77	0.04	0.03	Flexión	-	-	-
		10.4	2.03	-20.17	Flexión	-	-	-
XL	13	5.89	-0.74	5.17	Flexo Torsión	-	-	-
		7.75	-0.15	-1.50	Flexión	-	-	-
		9.56	0.36	-3.70	Flexión	-	-	-
		11.3	0.35	-4.07	Flexión	-	-	-

Designación			Largo [m]					
			5			10		
XL	H	Peso	Y	Z	Modo	Y	Z	Modo
	cm	kgf/m	kN	kN		kN	kN	
XL	16	7.3	9.31	-19.83	Flexión	-	-	-
		9.63	-0.25	0.33	Flexión	-	-	-
		11.9	3.43	-11.14	Flexión	-	-	-
		14.1	-18.00	12.17	Flexión	-	-	-
XL	20	12.1	0.47	-1.59	Torsión	-2.11	12.28	Flexión
		15.1	3.19	8.76	Flexo Torsión	-0.55	4.61	Flexión
		17.9	13.20	25.16	Torsión	-0.15	16.28	Flexión
		23.5	-1.69	43.96	Flexo Torsión	0.75	-7.70	Flexión
XL	25	19.0	0.07	0.62	Torsión	1.66	-15.25	Flexión
		22.6	4.53	-7.75	Flexo Torsión	1.65	26.95	Flexión
		29.7	2.67	14.55	Torsión	-1.33	22.71	Flexión
		36.7	-31.43	43.56	Flexo Torsión	-0.41	-5.23	Flexión
XL	30	27.3	-13.13	37.45	Flexo Torsión	-2.23	10.80	Flexo Torsión
		36	-18.90	16.66	Flexo Torsión	2.72	-7.01	Flexo Torsión
		44.5	30.93	-25.83	Flexo Torsión	-0.48	-3.06	Flexión
		52.8	-44.85	24.86	Flexo Torsión	2.43	-15.51	Flexión
XL	40	48.6	-14.12	-8.25	Torsión	-12.30	2.10	Torsión
		60.2	-7.17	33.86	Torsión	-4.36	10.71	Torsión
		71.6	3.50	-2.08	Torsión	12.64	1.94	Torsión
		82.9	-9.42	17.67	Torsión	4.15	1.69	Torsión
		93.9	19.27	1.65	Torsión	2.76	18.29	Flexión

ANEXO C. FUERZAS SOBRE LAS CARAS DE LA PLACA DEL EXTREMO

A continuación se presenta la comparación entre la fuerza sobre la cara de la placa conexión extrema y la fuerza crítica del arriostramiento. Las fuerzas se presentan en kN.

Para los arriostramientos de 1.5 metros de largo.

Tabla 17: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 1.5 m.

Perfil		XL 100x5	XL 100x6	XL 120x5	XL 130x6	XL 160x6	XL 200x8	XL 300x6	XL 400x8	XL 400x16
X	Placa	1026	1576	1639	2085	2837	7112	6371	11606	30304
	Cara 1	523	859	733	1141	1490	3647	3167	5902	15755
	Cara 2	553	857	761	1164	1484	3706	3236	5740	15877
	C1/Placa	0.51	0.54	0.45	0.55	0.53	0.51	0.50	0.51	0.52
	C2/Placa	0.54	0.54	0.46	0.56	0.52	0.52	0.51	0.49	0.52
	Falla	Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión

Para los arriostramientos de 2.5 metros de largo.

Tabla 18: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 2.5 m.

Perfil		XL 80x4	XL 100x5	XL 120x6	XL 130x6	XL 160x4	XL 200x8	XL 300x6	XL 300x12
X	Placa	187	438	1024	1113	930	3160	3122	9811
	Cara 1	160	318	710	572	606	1621	1517	4989
	Cara 2	68	162	413	608	454	1610	1692	5000
	C1/Placa	0.85	0.73	0.69	0.51	0.65	0.51	0.49	0.51
	C2/Placa	0.36	0.37	0.40	0.55	0.49	0.51	0.54	0.51
	Falla	Flexión	Flexión	Flexión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión	Torsión	Torsión

Para los arriostramientos de 5 metros.

Tabla 19: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 5 m.

Perfil		XL 120x6	XL 130x6	XL 200x8	XL 250x10	XL 300x10	XL 300x12	XL 400x10
X	Placa	227	332	1419	2554	3291	4475	4679
	Cara 1	214	267	770	1482	1748	2402	2613
	Cara 2	78	122	668	1543	1817	2458	2336
	C1/Placa	0.94	0.81	0.54	0.58	0.53	0.54	0.56
	C2/Placa	0.34	0.37	0.47	0.60	0.55	0.55	0.50
	Falla	Flexión	Flexión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión

Para los de 10 metros

Tabla 20: Fuerzas sobre las placas y razón entre fuerzas de los perfiles de 10 m.

Perfil		XL 250x10	XL 300x12	XL 400x16
X	Placa	915	1690	5446
	Cara 1	1039	715	2168
	Cara 2	255	1143	3639
	C1/Placa	1.14	0.42	0.40
	C2/Placa	0.28	0.68	0.67
	Falla	Flexión	Flexión	Flexión

ANEXO D. MOMENTO EN EL EJE Z EN LAS CARAS DE LA PLACA DEL EXTREMO

A continuación se presentan los resultados del punto V.4. Para los arriostramientos de 1.5 metros.

Tabla 21: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 1.5 metros.

Perfil	XL 100x5	XL 100x6	XL 120x5	XL 130x6	XL 160x6	XL 200x8	XL 300x6	XL 400x8	XL 400x16
Cara 1	2.1	3.9	1.1	2.0	1.6	0.4	1.4	2.2	5.8
Cara 2	4.87	5.35	7.91	7.49	8.82	14.75	16.48	15.86	10.44
Modo de Falla	Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión	Torsión

Los de 2.5 metros.

Tabla 22: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 2.5 metros.

Perfil	XL 80x4	XL 100x5	XL 120x6	XL 130x6	XL 160x4	XL 200x8	XL 300x6	XL 300x12
Cara 1	2.7	0.04	1.3	0.5	0.6	0.8	0.8	2.6
Cara 2	2.51	2.33	0.78	4.20	5.66	6.00	9.29	6.50
Modo de Falla	Flexión	Flexión	Flexión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión	Torsión	Torsión

Los largo igual 5 metros.

Tabla 23: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 5 metros.

Perfil	XL 120x6	XL 130x6	XL 200x8	XL 250x10	XL 300x10	XL 300x12	XL 400x10
Cara 1	0.66	0.66	0.5	1.2	1.3	0.8	1.7
Cara 2	0.06	0.06	2.18	2.99	2.83	3.54	3.83
Modo de Falla	Flexión	Flexión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Flexo Torsión	Torsión

Por último, los de 10 metros.

Tabla 24: Momento en Z sobre las caras de la placa del extremo, perfiles de 10 metros.

Perfil	XL 250x10	XL 300x12	XL 400x16
Cara 1	0.01	0.8	0.9
Cara 2	1.35	1.32	2.39
Modo de Falla	Flexión	Flexión	Flexión

ANEXO E. RESISTENCIA DE SOLDADURAS

A continuación se presentan los resultados entregados en el punto V.5.

E.1. Comparación con ANSYS

Con los perfiles de 1.5 metros de largo se obtuvo.

Tabla 25: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 1.5 metros, ANSYS.

XL	H	Peso	Esbeltez	Soldaduras					
				Resistencia Uniforme Mínima	Razón	Resistencia Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL 4	4	1.15	NE	50	3.2	63	4.0	26	1.6
		1.65	NE	50	2.2	63	2.7	26	1.1
XL 5	5	1.47	NE	63	2.3	78	2.8	32	1.2
		2.12	NE	63	1.4	78	1.7	32	0.7
XL 6	6	1.78	E	75	1.3	94	1.6	38	0.7
		2.59	NE	75	1.1	94	1.3	38	0.5
		3.35	NE	75	0.7	94	0.9	38	0.4
XL 8	8	2.41	E	75	0.7	100	1.0	38	0.4
		3.54	E	75	0.4	100	0.5	38	0.2
		4.61	NE	75	0.2	100	0.3	38	0.1
		5.63	NE	75	0.3	100	0.4	38	0.2
		6.61	NE	125	0.4	167	0.5	64	0.2
XL 10	10	3.04	E	125	1.0	157	1.2	64	0.5
		4.48	E	125	0.6	157	0.7	64	0.3
		5.87	NE	125	0.4	157	0.5	64	0.2
		7.2	NE	125	0.2	157	0.3	64	0.1
		8.49	NE	209	0.3	261	0.3	106	0.1
XL 12	12	5.42	E	150	0.5	188	0.6	77	0.2
		7.12	E	150	0.2	188	0.3	77	0.1
		8.77	NE	150	0.2	188	0.2	77	0.1
		10.4	NE	250	0.3	313	0.4	128	0.1
XL 13	13	5.89	E	271	0.8	339	0.9	139	0.4
		7.75	E	271	0.4	339	0.5	139	0.2
		9.56	E	271	0.4	339	0.4	139	0.2
		11.3	NE	271	0.3	339	0.3	139	0.1

				Soldaduras					
XL	H	Peso	Esbeltez	Resistencia Uniforme Mínima	Razón	Resistencia Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	0.46	417	0.57	171	0.23
		9.63	E	334	0.49	417	0.62	171	0.25
		11.9	E	334	0.32	417	0.40	171	0.16
		14.1	E	334	0.24	417	0.29	171	0.12
XL	20	12.1	E	417	0.43	626	0.65	256	0.26
		15.1	E	417	0.24	626	0.36	256	0.15
		17.9	E	417	0.17	626	0.25	256	0.10
		23.5	NE	417	0.12	626	0.18	256	0.07
XL	25	19.0	E	417	0.21	657	0.33	256	0.13
		22.6	E	417	0.14	657	0.22	256	0.09
		29.7	E	417	0.10	657	0.16	256	0.06
		36.7	NE	417	0.07	877	0.15	341	0.06
XL	30	27.3	E	417	0.13	918	0.29	342	0.11
		36	E	417	0.09	918	0.19	342	0.07
		44.5	E	417	0.06	918	0.14	341	0.05
		52.8	NE	417	0.05	1148	0.13	426	0.05
XL	40	48.6	E	417	0.07	1002	0.17	342	0.06
		60.2	E	417	0.05	1002	0.13	342	0.04
		71.6	E	417	0.04	1252	0.12	427	0.04
		82.9	E	501	0.04	1503	0.11	512	0.04
		93.9	NE	501	0.03	1753	0.12	597	0.04

Los arriostramientos de 2.5 metros.

Tabla 26: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 2.5 metros ANSYS.

XL	H	Peso	Esbeltez	Soldaduras					
				Resistencia Uniforme Mínima	Razón	Resistencia Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL 4	4	1.15	NE	-	-	-	-	-	-
		1.65	NE	-	-	-	-	-	-
XL 5	5	1.47	NE	63	5.48	78	6.84	32	2.80
		2.12	NE	63	3.48	78	4.34	32	1.77
XL 6	6	1.78	E	75	3.05	94	3.81	38	1.56
		2.59	NE	75	2.25	94	2.82	38	1.15
		3.35	NE	75	1.79	94	2.24	38	0.91
XL 8	8	2.41	E	75	1.33	100	1.77	38	0.68
		3.54	E	75	1.12	100	1.50	38	0.57
		4.61	NE	75	0.80	100	1.07	38	0.41
		5.63	NE	75	0.65	100	0.87	38	0.33
		6.61	NE	125	1.08	167	1.45	64	0.55
XL 10	10	3.04	E	125	2.62	157	3.28	64	1.34
		4.48	E	125	0.81	157	1.01	64	0.41
		5.87	NE	125	0.76	157	0.95	64	0.39
		7.2	NE	125	0.57	157	0.71	64	0.29
		8.49	NE	209	0.87	261	1.08	106	0.44
XL 12	12	5.42	E	150	0.54	188	0.68	77	0.28
		7.12	E	150	0.57	188	0.72	77	0.29
		8.77	NE	150	0.42	188	0.52	77	0.21
		10.4	NE	250	0.49	313	0.61	128	0.25
XL 13	13	5.89	E	271	1.21	339	1.52	139	0.62
		7.75	E	271	0.79	339	0.98	139	0.40
		9.56	E	271	0.64	339	0.80	139	0.33
		11.3	NE	271	0.49	339	0.61	138.52	0.25

				Soldaduras					
XL	H	Peso	Esbeltez	Resistencia Uniforme Mínima	Razón	Resistencia Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	1.12	417	1.40	171	0.57
		9.63	E	334	0.72	417	0.90	171	0.37
		11.9	E	334	0.61	417	0.76	171	0.31
		14.1	E	334	0.46	417	0.58	171	0.24
XL	20	12.1	E	417	0.62	626	0.93	256	0.38
		15.1	E	417	0.82	626	1.23	256	0.50
		17.9	E	417	0.40	626	0.61	256	0.25
		23.5	NE	417	0.26	626	0.40	256	0.16
XL	25	19.0	E	417	0.41	657	0.64	256	0.25
		22.6	E	417	0.33	657	0.51	256	0.20
		29.7	E	417	0.20	657	0.32	256	0.12
		36.7	NE	417	0.13	877	0.26	341	0.10
XL	30	27.3	E	417	0.27	918	0.59	342	0.22
		36	E	417	0.18	918	0.39	342	0.14
		44.5	E	417	0.11	918	0.25	341	0.09
		52.8	NE	417	0.09	1148	0.23	426	0.09
XL	40	48.6	E	417	0.12	1002	0.29	342	0.10
		60.2	E	417	0.10	1002	0.24	342	0.08
		71.6	E	417	0.07	1252	0.21	427	0.07
		82.9	E	501	0.06	1503	0.18	512	0.06
		93.9	NE	501	0.05	1753	0.17	597	0.06

Para los elementos de 5 metros.

Tabla 27: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 5 metros ANSYS.

XL	H	Peso	Esbeltez	Soldaduras					
				Resistencia Uniforme Mínima	Razón	Resistencia Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL 4	4	1.15	NE	-	-	-	-	-	-
		1.65	NE	-	-	-	-	-	-
XL 5	5	1.47	NE	-	-	-	-	-	-
		2.12	NE	-	-	-	-	-	-
XL 6	6	1.78	E	-	-	-	-	-	-
		2.59	NE	-	-	-	-	-	--
		3.35	NE	-	-	-	-	-	-
XL 8	8	2.41	E	-	-	-	-	-	-
		3.54	E	-	-	-	-	-	-
		4.61	NE	-	-	-	-	-	-
		5.63	NE	-	-	-	-	-	-
		6.61	NE	-	-	-	-	-	-
XL 10	10	3.04	E	125	3.92	157	4.90	64	2.00
		4.48	E	125	2.93	157	3.66	64	1.50
		5.87	NE	125	2.79	157	3.49	64	1.42
		7.2	NE	125	2.24	157	2.80	64	1.14
		8.49	NE	209	3.25	261	4.06	106	1.66
XL 12	12	5.42	E	150	2.23	188	2.78	77	1.14
		7.12	E	150	1.95	188	2.43	77	1.00
		8.77	NE	150	1.46	188	1.83	77	0.75
		10.4	NE	250	2.20	313	2.75	128	1.12
XL 13	13	5.89	E	271	3.06	339	3.82	139	1.56
		7.75	E	271	2.22	339	2.77	139	1.13
		9.56	E	271	1.88	339	2.35	139	0.96
		11.3	NE	271	1.64	339	2.04	138.52	0.83

				Soldaduras					
XL	H	Peso	Esbeltez	Resistencia Uniforme Mínima	Razón	Resistencia Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	2.71	417	3.39	171	1.39
		9.63	E	334	1.66	417	2.07	171	0.85
		11.9	E	334	1.42	417	1.78	171	0.73
		14.1	E	334	1.29	417	1.61	171	0.66
XL	20	12.1	E	417	1.10	626	1.66	256	0.68
		15.1	E	417	0.94	626	1.40	256	0.57
		17.9	E	417	0.74	626	1.12	256	0.46
		23.5	NE	417	0.59	626	0.88	256	0.36
XL	25	19.0	E	417	0.69	657	1.09	256	0.42
		22.6	E	417	0.64	657	1.02	256	0.40
		29.7	E	417	0.44	657	0.70	256	0.27
		36.7	NE	417	0.33	877	0.69	341	0.27
XL	30	27.3	E	417	0.51	918	1.13	342	0.42
		36	E	417	0.33	918	0.73	342	0.27
		44.5	E	417	0.25	918	0.56	341	0.21
		52.8	NE	417	0.19	1148	0.51	426	0.19
XL	40	48.6	E	417	0.25	1002	0.61	342	0.21
		60.2	E	417	0.18	1002	0.43	342	0.15
		71.6	E	417	0.17	1252	0.51	427	0.17
		82.9	E	501	0.13	1503	0.38	512	0.13
		93.9	NE	501	0.08	1753	0.27	597	0.09

Finalmente, los de 10 metros de largo.

Tabla 28: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 10 metros, ANSYS.

XL	H	Peso	Esbeltez	Soldaduras					
				Resistencia Uniforme Mínima	Razón	Resistencia Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	9.10	417	11.38	171	4.66
		9.63	E	334	7.98	417	9.98	171	4.08
		11.9	E	334	5.76	417	7.19	171	2.94
		14.1	E	334	5.21	417	6.51	171	2.66
XL	20	12.1	E	417	3.61	626	5.42	256	2.22
		15.1	E	417	2.89	626	4.33	256	1.77
		17.9	E	417	3.02	626	4.53	256	1.85
		23.5	NE	417	2.10	626	3.14	256	1.28
XL	25	19.0	E	417	1.66	657	2.62	256	1.02
		22.6	E	417	1.37	657	2.15	256	0.84
		29.7	E	417	1.08	657	1.70	256	0.66
		36.7	NE	417	0.91	877	1.92	341	0.75
XL	30	27.3	E	417	0.93	918	2.06	342	0.77
		36	E	417	0.71	918	1.56	342	0.58
		44.5	E	417	0.60	918	1.32	341	0.49
		52.8	NE	417	0.49	1148	1.36	426	0.50
XL	40	48.6	E	417	0.40	1002	0.95	342	0.32
		60.2	E	417	0.28	1002	0.67	342	0.23
		71.6	E	417	0.27	1252	0.80	427	0.27
		82.9	E	501	0.24	1503	0.72	512	0.25
		93.9	NE	501	0.18	1753	0.64	597	0.22

E.2. Comparación con AISC

Con los perfiles de 1.5 metros de largo se obtuvo.

Tabla 29: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 1.5 metros, AISC.

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	4	1.15	NE	50	4.8	62.6	6.0	25.6	2.45
		1.65	NE	50	3.4	62.6	4.3	25.5	1.75
XL	5	1.47	NE	63	3.8	78.3	4.8	32.0	1.95
		2.12	NE	63	2.7	78.3	3.3	31.9	1.35
XL	6	1.78	E	75	3.5	93.9	4.3	38.4	1.77
		2.59	NE	75	2.3	93.9	2.9	38.3	1.18
		3.35	NE	75	1.8	93.9	2.2	38.3	0.91
XL	8	2.41	E	75	3.2	100.2	4.3	38.4	1.64
		3.54	E	75	1.7	100.2	2.2	38.4	0.85
		4.61	NE	75	1.2	100.2	1.6	38.3	0.60
		5.63	NE	75	1.0	100.2	1.3	38.3	0.49
		6.61	NE	125	1.4	167.0	1.8	63.8	0.70
XL	10	3.04	E	125	5.3	156.5	6.6	64.1	2.71
		4.48	E	125	2.5	156.5	3.1	64.0	1.26
		5.87	NE	125	1.6	156.5	2.0	64.0	0.84
		7.2	NE	125	1.2	156.5	1.6	63.9	0.64
		8.49	NE	209	1.7	260.9	2.1	106.4	0.87
XL	12	5.42	E	150	2.9	187.8	3.6	76.9	1.46
		7.12	E	150	1.6	187.8	2.0	76.8	0.83
		8.77	NE	150	1.3	187.8	1.6	76.8	0.66
		10.4	NE	250	1.7	313.1	2.2	127.8	0.89
XL	13	5.89	E	271	5.1	339.1	6.4	138.8	2.62
		7.75	E	271	3.0	339.1	3.8	138.7	1.54
		9.56	E	271	2.2	339.1	2.7	138.6	1.12
		11.3	NE	271	1.8	339.1	2.2	138.5	0.90

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	6.29	417	7.87	171	3.22
		9.63	E	334	3.56	417	4.45	171	1.82
		11.9	E	334	2.38	417	2.97	171	1.22
		14.1	E	334	1.85	417	2.32	171	0.95
XL	20	12.1	E	417	4.41	626	6.61	256	2.71
		15.1	E	417	2.85	626	4.27	256	1.75
		17.9	E	417	2.05	626	3.07	256	1.26
		23.5	NE	417	1.36	626	2.04	256	0.84
XL	25	19.0	E	417	2.82	657	4.44	256	1.73
		22.6	E	417	1.97	657	3.11	256	1.21
		29.7	E	417	1.18	657	1.85	256	0.72
		36.7	NE	417	0.87	877	1.83	341	0.71
XL	30	27.3	E	417	1.96	918	4.32	342	1.61
		36	E	417	1.13	918	2.48	342	0.92
		44.5	E	417	0.77	918	1.70	341	0.63
		52.8	NE	417	0.61	1148	1.66	426	0.62
XL	40	48.6	E	417	1.10	1002	2.65	342	0.90
		60.2	E	417	0.71	1002	1.71	342	0.58
		71.6	E	417	0.51	1252	1.53	427	0.52
		82.9	E	501	0.49	1503	1.46	512	0.50
		93.9	NE	501	0.41	1753	1.43	597	0.49

Los arriostramientos de 2.5 metros.

Tabla 30: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 2.5 metros, AISC.

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	4	1.15	NE	50	12.6	62.6	15.7	25.6	6.42
		1.65	NE	50	9.2	62.6	11.5	25.5	4.66
XL	5	1.47	NE	63	7.8	78.3	9.8	32.0	4.00
		2.12	NE	63	5.5	78.3	6.9	31.9	2.81
XL	6	1.78	E	75	5.5	93.9	6.9	38.4	2.83
		2.59	NE	75	3.8	93.9	4.8	38.3	1.95
		3.35	NE	75	3.0	93.9	3.7	38.3	1.52
XL	8	2.41	E	75	3.4	100.2	4.6	38.4	1.76
		3.54	E	75	2.0	100.2	2.7	38.4	1.04
		4.61	NE	75	1.6	100.2	2.1	38.3	0.80
		5.63	NE	75	1.3	100.2	1.7	38.3	0.66
		6.61	NE	125	1.8	167.0	2.5	63.8	0.94
XL	10	3.04	E	125	6.0	156.5	7.5	64.1	3.05
		4.48	E	125	2.6	156.5	3.2	64.0	1.31
		5.87	NE	125	1.7	156.5	2.1	64.0	0.87
		7.2	NE	125	1.4	156.5	1.7	63.9	0.70
		8.49	NE	209	2.0	260.9	2.4	106.4	1.00
XL	12	5.42	E	150	3.1	187.8	3.8	76.9	1.56
		7.12	E	150	1.7	187.8	2.1	76.8	0.85
		8.77	NE	150	1.3	187.8	1.6	76.8	0.67
		10.4	NE	250	1.8	313.1	2.2	127.8	0.91
XL	13	5.89	E	271	5.6	339.1	7.0	138.8	2.85
		7.75	E	271	3.1	339.1	3.9	138.7	1.60
		9.56	E	271	2.2	339.1	2.8	138.6	1.14
		11.3	NE	271	1.8	339.1	2.2	138.5	0.91

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	7.21	417	9.01	171	3.69
		9.63	E	334	3.81	417	4.77	171	1.95
		11.9	E	334	2.47	417	3.08	171	1.26
		14.1	E	334	1.89	417	2.36	171	0.96
XL	20	12.1	E	417	4.96	626	7.44	256	3.05
		15.1	E	417	3.05	626	4.58	256	1.87
		17.9	E	417	2.13	626	3.20	256	1.31
		23.5	NE	417	1.38	626	2.07	256	0.85
XL	25	19.0	E	417	3.18	657	5.00	256	1.95
		22.6	E	417	2.13	657	3.36	256	1.31
		29.7	E	417	1.21	657	1.91	256	0.75
		36.7	NE	417	0.88	877	1.86	341	0.72
XL	30	27.3	E	417	2.21	918	4.86	342	1.81
		36	E	417	1.19	918	2.62	342	0.97
		44.5	E	417	0.79	918	1.75	341	0.65
		52.8	NE	417	0.61	1148	1.69	426	0.63
XL	40	48.6	E	417	1.24	1002	2.98	342	1.02
		60.2	E	417	0.76	1002	1.83	342	0.63
		71.6	E	417	0.53	1252	1.60	427	0.54
		82.9	E	501	0.50	1503	1.49	512	0.51
		93.9	NE	501	0.41	1753	1.45	597	0.49

Para los elementos de 5 metros.

Tabla 31: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 5 metros, AISC.

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	4	1.15	NE	50	53.1	62.6	66.4	25.6	27.09
		1.65	NE	50	38.7	62.6	48.4	25.5	19.71
XL	5	1.47	NE	63	33.4	78.3	41.8	32.0	17.08
		2.12	NE	63	23.6	78.3	29.5	31.9	12.04
XL	6	1.78	E	75	23.0	93.9	28.8	38.4	11.77
		2.59	NE	75	15.9	93.9	19.8	38.3	8.10
		3.35	NE	75	12.6	93.9	15.7	38.3	6.40
XL	8	2.41	E	75	9.8	100.2	13.0	38.4	4.99
		3.54	E	75	6.7	100.2	8.9	38.4	3.40
		4.61	NE	75	5.1	100.2	6.9	38.3	2.62
		5.63	NE	75	4.2	100.2	5.7	38.3	2.16
		6.61	NE	125	6.1	167.0	8.2	63.8	3.12
XL	10	3.04	E	125	7.7	156.5	9.6	64.1	3.94
		4.48	E	125	5.1	156.5	6.4	64.0	2.63
		5.87	NE	125	3.9	156.5	4.9	64.0	2.00
		7.2	NE	125	3.2	156.5	4.0	63.9	1.64
		8.49	NE	209	4.6	260.9	5.7	106.4	2.34
XL	12	5.42	E	150	3.8	187.8	4.7	76.9	1.93
		7.12	E	150	2.6	187.8	3.2	76.8	1.32
		8.77	NE	150	2.2	187.8	2.8	76.8	1.14
		10.4	NE	250	3.2	313.1	4.0	127.8	1.62
XL	13	5.89	E	271	5.8	339.1	7.3	138.8	2.98
		7.75	E	271	4.0	339.1	5.0	138.7	2.06
		9.56	E	271	3.2	339.1	4.1	138.6	1.66
		11.3	NE	271	2.8	339.1	3.4	138.5	1.41

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	7.84	417	9.81	171	4.02
		9.63	E	334	3.96	417	4.95	171	2.02
		11.9	E	334	2.59	417	3.24	171	1.33
		14.1	E	334	2.19	417	2.73	171	1.12
XL	20	12.1	E	417	5.33	626	7.99	256	3.27
		15.1	E	417	3.16	626	4.75	256	1.94
		17.9	E	417	2.18	626	3.26	256	1.34
		23.5	NE	417	1.41	626	2.12	256	0.87
XL	25	19.0	E	417	3.41	657	5.37	256	2.10
		22.6	E	417	2.22	657	3.50	256	1.36
		29.7	E	417	1.23	657	1.94	256	0.76
		36.7	NE	417	0.89	877	1.87	341	0.73
XL	30	27.3	E	417	2.37	918	5.22	342	1.94
		36	E	417	1.23	918	2.70	342	1.00
		44.5	E	417	0.80	918	1.77	341	0.66
		52.8	NE	417	0.62	1148	1.70	426	0.63
XL	40	48.6	E	417	1.33	1002	3.20	342	1.09
		60.2	E	417	0.79	1002	1.90	342	0.65
		71.6	E	417	0.54	1252	1.63	427	0.56
		82.9	E	501	0.50	1503	1.51	512	0.51
		93.9	NE	501	0.42	1753	1.46	597	0.50

Finalmente, los de 10 metros de largo.

Tabla 32: Resistencia de soldaduras y razón con respecto a la carga crítica, perfiles de 10 metros, AISC.

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	4	1.15	NE	50	218.0	62.6	272.4	25.6	111.23
		1.65	NE	50	159.1	62.6	198.8	25.5	80.98
XL	5	1.47	NE	63	138.1	78.3	172.6	32.0	70.53
		2.12	NE	63	97.6	78.3	122.0	31.9	49.75
XL	6	1.78	E	75	95.7	93.9	119.6	38.4	48.90
		2.59	NE	75	66.0	93.9	82.5	38.3	33.70
		3.35	NE	75	52.3	93.9	65.3	38.3	26.63
XL	8	2.41	E	75	40.5	100.2	54.0	38.4	20.73
		3.54	E	75	27.7	100.2	36.9	38.4	14.15
		4.61	NE	75	21.4	100.2	28.5	38.3	10.91
		5.63	NE	75	17.6	100.2	23.5	38.3	8.99
		6.61	NE	125	25.5	167.0	34.0	63.8	13.00
XL	10	3.04	E	125	32.2	156.5	40.3	64.1	16.49
		4.48	E	125	21.9	156.5	27.4	64.0	11.21
		5.87	NE	125	16.7	156.5	20.9	64.0	8.55
		7.2	NE	125	13.7	156.5	17.2	63.9	7.01
		8.49	NE	209	19.6	260.9	24.5	106.4	10.01
XL	12	5.42	E	150	15.1	187.8	18.8	76.9	7.71
		7.12	E	150	10.7	187.8	13.4	76.8	5.49
		8.77	NE	150	9.3	187.8	11.6	76.8	4.75
		10.4	NE	250	13.2	313.1	16.5	127.8	6.74
XL	13	5.89	E	271	20.6	339.1	25.7	138.8	10.52
		7.75	E	271	15.7	339.1	19.6	138.7	8.01
		9.56	E	271	12.7	339.1	15.9	138.6	6.48
		11.3	NE	271	10.8	339.1	13.5	138.5	5.52

Designación			Esbeltez	Soldaduras					
XL	H	Peso		Uniforme Mínima	Razón	Máxima	Razón	Balanceada	Razón
	cm	kgf/m		kN		kN		kN	
XL	16	7.3	E	334	13.58	417	16.98	171	6.95
		9.63	E	334	10.20	417	12.75	171	5.22
		11.9	E	334	8.24	417	10.30	171	4.21
		14.1	E	334	6.97	417	8.72	171	3.56
XL	20	12.1	E	417	6.41	626	9.62	256	3.94
		15.1	E	417	5.08	626	7.62	256	3.12
		17.9	E	417	4.28	626	6.42	256	2.63
		23.5	NE	417	3.27	626	4.91	256	2.01
XL	25	19.0	E	417	3.48	657	5.49	256	2.14
		22.6	E	417	2.45	657	3.87	256	1.51
		29.7	E	417	1.77	657	2.79	256	1.09
		36.7	NE	417	1.44	877	3.02	341	1.18
XL	30	27.3	E	417	2.42	918	5.33	342	1.98
		36	E	417	1.24	918	2.72	342	1.01
		44.5	E	417	0.96	918	2.10	341	0.78
		52.8	NE	417	0.81	1148	2.21	426	0.82
XL	40	48.6	E	417	1.36	1002	3.27	342	1.12
		60.2	E	417	0.80	1002	1.92	342	0.66
		71.6	E	417	0.55	1252	1.64	427	0.56
		82.9	E	501	0.50	1503	1.51	512	0.52
		93.9	NE	501	0.44	1753	1.54	597	0.53