



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONEXIONES DE MOMENTO  
USANDO PERFILES T SOLDADOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**CONSTANZA CAROLINA SALAS QUINTANILLA**

**PROFESOR GUÍA:**

RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

CARLOS MAXIMILIANO AGUIRRE AHUMADA

SANTIAGO DE CHILE

AÑO 2016

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil.

**POR:** Constanza Carolina Salas Quintanilla.

**FECHA:** 11/10/16

**PROFESOR GUÍA:** Ricardo Herrera Mardones.

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONEXIONES DE MOMENTO USANDO PERFILES T SOLDADOS**

Este trabajo de título estudia de forma experimental el comportamiento de uniones viga-columna de marco rígido en acero a escala real, bajo condiciones de carga cíclica. El tipo de conexión utilizada para materializar dicha unión es la llamada DST (*Double Split Tee*), que corresponde a una conexión apertada parcialmente rígida. Ésta fue propuesta por FEMA en el año 2000 en el marco de la investigación llevada a cabo por el SAC Steel Project sobre conexiones de momento, después de las fallas frágiles que éstas experimentaron durante el terremoto de Northridge de 1994, EEUU.

La conexión DST consiste en un par de perfiles T, o *T-stubs*, que conectan mediante pernos ambas alas de la viga con el ala de la columna. Su proceso de precalificación se llevó a cabo para T-stubs elaborados a partir de secciones laminadas, cuya disponibilidad es aún limitada en varios países, incluyendo Chile, y cuyo rango de relación de espesores entre alma y alas es acotado. Estas razones conllevaron a estudiar el uso de perfiles T soldados como una alternativa en la conexión DST, considerando que brindan una mayor libertad de dimensionamiento y un mayor aprovechamiento de material.

Se ensayaron tres uniones viga-columna utilizando T-stubs soldados, cuyo diseño tuvo como énfasis lograr un comportamiento dúctil, estable, y que permitiera determinar su capacidad sísmica. Las fallas inducidas en estos especímenes fueron: (a) plastificación en la conexión y (b) formación de rótulas plásticas en la viga.

Durante los ensayos, los especímenes se comportaron según lo pronosticado, presentando la respuesta dúctil esperada y sin daño en las soldaduras de los T-stubs, validando el uso de las recomendaciones de diseño actuales para este tipo de conexión cuando se utilizan perfiles T soldados. Los datos registrados indican que el efecto de apalancamiento experimentado por las alas de los T-stubs y el desarrollo de rótulas plásticas en las vigas son los mecanismos de falla que más contribuyen a la disipación de energía en la conexión. Finalmente, los tres especímenes cumplen con los requerimientos de resistencia para marcos rígidos especiales (SMF), debido a que fueron capaces de sostener una deformación angular entre piso de 0,04 radianes y de alcanzar una resistencia superior a un 80% del momento plástico de la viga para esa deformación.

Esta investigación se realizó gracias al financiamiento otorgado por el proyecto FONDECYT N° 1140628.

*Con mucho cariño para  
mis padres y hermano.*

# Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis papás, Hugo y María Teresa, que desde siempre creyeron en mi capacidad para lograr ser lo que yo me propusiera, alentándome a seguir adelante en mis momentos de mayor estrés, y haciéndome ver que con calma y esfuerzo las cosas “salen solas”. También agradezco a mi hermanito Juan Pablo, que durante estos años de estudios me acompañó y alegró con sus “regaloneos” de hermano menor.

Agradezco a mis abuelitas Ana y Javiera por ser siempre tan tiernas y adorables conmigo, a mis innumerables tíos y primos, y a mis abuelos Luis y Hugo que a pesar de no estar en persona con nosotros, me demuestran constantemente su cariño y preocupación.

Al profesor Ricardo Herrera por haber creído en mí para llevar a cabo esta investigación, guiándome durante todo su desarrollo con una paciencia envidiable y gran dedicación. A los profesores Juan Felipe Beltrán y Carlos Aguirre por haber sido parte de mi comisión, brindando una excelente disposición para resolver mis dudas, y al profesor Pedro Soto, por haber estado constantemente apoyándome en las labores experimentales, y por participar de manera activa en todos los ensayos.

Al proyecto FONDECYT N° 1140628 por el financiamiento otorgado a esta investigación.

A las demás personas que formaron parte de este gran proyecto: Andrés Núñez, Claudio Alarcón y Juan Cristóbal Arrau, les agradezco por el apoyo incondicional e intercambio de conocimiento para lograr que saliera de esto algo bueno.

Al “*team laboratorio*”: Sebastián “Abuelo” Díaz, Ignacio Manríquez, Gonzalo “Otu” Muñoz, Jorge Rivas, Fabián Escobedo, Fernando “Nemo” Muñoz, Francisco Nazar, y en particular, a Ernesto “Aru” Inzunza y a Víctor González por haberme ayudado en gran medida en todas las actividades dentro del laboratorio, por enseñarme a usar los equipos y herramientas, y por todas las conversaciones que amenizaron el trabajo.

Agradezco también a Eduardo Núñez por haber llegado con una disposición infinita, y en el momento más oportuno, a ayudarme en mi memoria, aportándome con todo su conocimiento sobre conexiones de acero. También le agradezco por hacerme ver lo valioso que es este trabajo y lo capaz que fui al llevarlo a cabo.

Finalmente, le agradezco a Sebastián Mengual por ser un apoyo incondicional en mi vida y por todo el cariño que constantemente me entrega. A las “SOCIAS”: Feña Martínez y Sol, por ser las mejores compañeras durante la carrera, a mi “hermana” Fernanda Salas por ser una tremenda amiga, a todos mis compañeros de *civil* que nunca pararon de hacerme reír durante estos años de estudio, y a mis amigos del colegio Chica, Dani, Javi, Maya, Val, Jano y Mauro por su valiosa amistad.

# Tabla de Contenido

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación.....	1
1.2. Antecedentes generales.....	1
1.3. Antecedentes específicos.....	2
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivos generales.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Organización de la Memoria de Título.....	4
<b>Capítulo 2. Marco teórico .....</b>	<b>6</b>
2.1. Tipos de conexiones en marcos de acero.....	6
2.2. Comportamiento de conexiones en marcos de momento .....	7
2.3. Conexión de momento DST .....	7
2.4. Swanson et al. (2000) .....	9
2.4.1. Ensayos sobre T-stubs aislados .....	9
2.4.2. Ensayo sobre conexiones DST a escala real.....	11
2.5. Piluso et al. (2001).....	12
2.6. Girão Coelho et al. (2004) .....	14
2.7. Experiencias realizadas en Chile .....	15
<b>Capítulo 3. Diseño de probetas.....</b>	<b>18</b>
3.1. Sistema estructural.....	18
3.2. Descripción de la instalación experimental .....	19
3.3. Protocolo de carga .....	19
3.4. Filosofía de diseño.....	21
3.4.1. Marco rígido especial (SMF).....	21
3.4.2. Diseño Columna Fuerte – Viga Débil .....	21
3.4.3. Diseño por Capacidad.....	22
3.5. Diseño de vigas y columnas .....	23
3.5.1. Capacidad sísmica .....	23
3.5.2. Diseño a compresión .....	24
3.5.3. Diseño a corte .....	25
3.5.4. Diseño a flexión.....	26
3.6. Diseño de perfiles T soldados.....	28
3.6.1. Corte en los pernos del alma.....	29
3.6.2. Fractura del área neta del alma .....	29
3.6.3. Fluencia de las alas .....	30
3.6.4. Tracción de los pernos del ala .....	30
3.6.5. Bloque de corte.....	31

3.7.	Placas de continuidad .....	32
3.8.	Zona panel .....	33
3.8.1.	Esfuerzo de corte en la zona panel .....	33
3.8.2.	Resistencia a la fluencia por corte de la zona panel .....	34
3.9.	Llave de corte .....	35
3.10.	Soldaduras .....	35
3.11.	Materiales .....	36
3.11.1.	Acero estructural.....	36
3.11.2.	Pernos de conexión.....	36
3.11.3.	Electrodo de soldadura .....	38
3.12.	Modificaciones en el diseño original.....	38
3.13.	Dimensiones finales.....	39
3.14.	Momentos de falla en la cara de la columna .....	42
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Ensayo de materiales .....</b>	<b>44</b>
4.1.	Probetas planas de acero ASTM A36.....	44
4.1.1.	Metodología de ensayo.....	44
4.1.2.	Presentación y análisis de resultados.....	46
4.2.	Pernos de acero ASTM A490.....	49
4.2.1.	Metodología de ensayo.....	49
4.2.2.	Presentación y análisis de resultados.....	50
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Metodología experimental e instrumentación.....</b>	<b>52</b>
5.1.	Montaje experimental.....	52
5.1.1.	Tensado de barras de anclaje .....	53
5.1.2.	Pretensión de pernos .....	54
5.2.	Actuador hidráulico .....	55
5.3.	Instrumentación de ensayo .....	56
5.3.1.	Deformación entre piso .....	57
5.3.2.	Rotación total en vigas y conexiones .....	58
5.3.3.	Deformación de la zona panel .....	58
5.3.4.	Desplazamiento en apoyos vigas y columna .....	59
5.3.5.	Fuerza aplicada por el actuador hidráulico.....	60
5.3.6.	Reacción en apoyos de viga.....	60
5.3.7.	Sistema de adquisición de datos .....	61
5.3.8.	Calibraciones .....	63
5.4.	Modificaciones a la instalación experimental .....	64
5.4.1.	Rectificación de pieza.....	64
5.4.2.	Restricción lateral adicional en vigas .....	64
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Presentación y análisis de resultados .....</b>	<b>66</b>
6.1.	Ecuaciones de reducción de datos .....	66
6.1.1.	Rotación entre piso .....	66

6.1.2.	Rotación total en la viga .....	66
6.1.3.	Rotación total en la conexión .....	67
6.1.4.	Deformación angular de la zona panel .....	67
6.1.5.	Momento.....	67
6.1.6.	Momento en la(s) viga(s).....	67
6.1.7.	Corte en la zona panel .....	68
6.1.8.	Energía disipada .....	68
6.2.	Respuesta general en especímenes de ensayo .....	68
6.3.	Especímen SE-01 .....	69
6.4.	Especímen SE-02(a) .....	75
6.5.	Especímen SE-02(b).....	82
6.6.	Comparación entre especímenes .....	91
<b>Capítulo 7.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>93</b>
7.1.	Conclusiones.....	93
7.2.	Recomendaciones .....	95
<b>Bibliografía.....</b>		<b>97</b>
<b>Apéndice A.</b>	<b>Diseño de probetas.....</b>	<b>99</b>
A.1.	Diseño de viga .....	99
A.2.	Diseño de columna .....	105
A.3.	Diseño de conexiones con perfiles T soldados.....	114
A.4.	Diseño de <i>End-Plate</i> en base de columna .....	137
A.5.	Diseño de <i>End-Plate</i> en zona superior de columna.....	140
<b>Apéndice B.</b>	<b>Resultados de ensayos de materiales.....</b>	<b>142</b>
B.1.	Probetas planas de acero ASTM A36.....	142
B.2.	Pernos de acero ASTM A490.....	155
<b>Apéndice C.</b>	<b>Resultados experimentales de conexiones de momento .....</b>	<b>161</b>
C.1.	Especímen SE-01.....	161
C.2.	Especímen SE-02(a) .....	165
C.3.	Especímen SE-02(b).....	169
<b>Apéndice D.</b>	<b>Planos de fabricación .....</b>	<b>173</b>

# Índice de Tablas

Tabla 2.1: Modos de falla de un perfil T-stub (Bravo, 2013).....	16
Tabla 3.1: Etapas de carga.....	20
Tabla 3.2: Características de cada ensayo. ....	23
Tabla 3.3: Dimensiones de vigas y columnas para cada espécimen. ....	39
Tabla 3.4: Parámetros de cada T–stub (ver Figura 3.11).....	39
Tabla 3.5: Valores asociados a la falla de cada espécimen. ....	42
Tabla 3.6: Valores de R (reacción en apoyos de vigas) y P (fuerza actuador) para alcanzar la falla. .....	43
Tabla 4.1: Parámetros iniciales de cada probeta e = 12mm. ....	45
Tabla 4.2: Resumen de muestras enviadas a SCI (Apéndice B). ....	45
Tabla 4.3: Parámetros iniciales de cada probeta confeccionada por SCI (Apéndice B). ....	46
Tabla 4.4: Dimensiones post-ruptura de las probetas planas de espesor 12 [mm]. ....	47
Tabla 4.5: Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de probetas planas de espesor 12 [mm]. .....	48
Tabla 4.6: Dimensiones post-ruptura de probetas ensayadas por SCI (Apéndice B).....	48
Tabla 4.7: Propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos realizados por SCI (Apéndice B)...	49
Tabla 4.8: Promedio de las propiedades mecánicas del acero ASTM A36.....	49
Tabla 4.9: Propiedades mecánicas de las probetas ensayadas por CESMEC (Apéndice B).....	50
Tabla 4.10: Promedio de las propiedades mecánicas del acero ASTM A490.....	51
Tabla 5.1: Tensión en barras de anclaje. ....	54
Tabla 5.2: Pernos y barras roscadas con torque aplicado. ....	54
Tabla 5.3: Canal en el que se conecta cada sensor .....	62
Tabla 5.4: Propiedades de LVDTs utilizados.....	63
Tabla 5.5: Propiedades de inclinómetros utilizados. ....	63
Tabla 5.6: Propiedades de la celda de carga ubicada en el actuador hidráulico.....	63
Tabla 5.7: Propiedades de las celdas de carga para medir la reacción en las vigas. ....	63
Tabla 6.1: Resumen de resultados. ....	69



# Índice de Figuras

Figura 1.1: Conexión WUF - utilizada antes del terremoto de Northridge (adaptada de FEMA 350, 2000).....	2
Figura 1.2: Criterio Columna Fuerte – Viga Débil.....	3
Figura 2.1: Curva momento-rotación típica bajo carga monotónica (Swanson et al., 2000). ....	7
Figura 2.2: Conexión DST. ....	8
Figura 2.3: Efecto de apalancamiento en el ala de un T-stub (Swanson, 2002).....	8
Figura 2.4: Componentes de un T-stub. ....	9
Figura 2.5: Modos de falla posibles en las alas del T-stub (Piluso et al. 2001). ....	12
Figura 2.6: Ensayo de las probetas (Piluso et al. 2001).....	13
Figura 2.7: T-stubs identificados en una conexión con placa de extremo apernada (Coelho et al. 2004).....	14
Figura 2.8: Modelo de elementos finitos de un T-stub en ANSYS (Desjouis, 2006). ....	15
Figura 3.1: Esquema del sistema estructural en análisis. ....	18
Figura 3.2: Instalación experimental (diseñada y ensamblada por Núñez, 2016).....	19
Figura 3.3: Protocolo de carga cíclica FEMA/SAC, idéntico al del código AISC 341 – Cap. K2.4b (2010).....	20
Figura 3.4: Geometría de un perfil T (FEMA 350, 2000). ....	28
Figura 3.5: Falla por bloque de corte en el centro (izquierda) y bordes (derecha) del alma del perfil T (FEMA, 2000). ....	31
Figura 3.6: Falla por bloque de corte en las alas de la viga (FEMA, 2000).....	31
Figura 3.7: Definición del “área-k” (Fuente: Alacero).....	33
Figura 3.8: Diagrama de cuerpo libre de la zona panel. ....	34
Figura 3.9: Pernos estructurales fuera de la conexión, involucrados directamente en cada ensayo. ....	37
Figura 3.10: Esquema del espécimen SE-02 modificado. ....	38
Figura 3.11: Dimensiones de un T-stub.....	39
Figura 3.12: Detalle de conexión de SE-01(DBT2). ....	40
Figura 3.13: Detalle de conexión de SE-02(DBT1). ....	40
Figura 3.14: Detalle de conexión de SE-03(DBT1). ....	41
Figura 3.15: Detalle de conexión de SE-04(DBT1). ....	41
Figura 4.1: Geometría y dimensiones en [mm] de cada probeta plana, según ASTM E8/E8M – 15. ....	44

Figura 4.2: (a) Probetas planas de espesor 12 [mm] antes de ser ensayadas; (b) probeta A36/12-01 con el extensómetro instalado (derecha). .....	45
Figura 4.3: Muestras enviadas a SCI (Apéndice B). .....	46
Figura 4.4: Geometría y dimensiones en [mm] de cada probeta cilíndrica A36, según ASTM E8. ....	46
Figura 4.5: Probetas planas de espesor 12 [mm] post-ruptura. ....	47
Figura 4.6: Probetas ensayadas por SCI post-ruptura (Apéndice B). .....	48
Figura 4.7: Geometría y dimensiones en [mm] de cada probeta cilíndrica, según ASTM E8 – 04. ....	50
Figura 4.8: (a) Probeta A490 – 01, (b) Probeta A490 – 02 y (c) Probeta A490 – 03 (Apéndice B). ....	50
Figura 5.1: Sistema de tensado de barras de anclaje (foto: Núñez, 2016). .....	53
Figura 5.2: (a) PROTORQ soltando un perno pretensado; (b) equipo Skidmore K (calibrador de tensión). ....	55
Figura 5.3: Actuador hidráulico instalado para aplicar la carga a cada espécimen. ....	55
Figura 5.4: (a) Bomba óleo-hidráulica que alimenta al actuador; (b) servo válvula. ....	56
Figura 5.5: Sensores utilizados para medir (a) desplazamiento, (b) rotación y (c) carga. ....	57
Figura 5.6: LVDT para medir el desplazamiento entre piso. ....	57
Figura 5.7: Inclínómetros para medir rotación total en las vigas y en conexiones. ....	58
Figura 5.8: LVDTs para medir la deformación de la zona panel. ....	58
Figura 5.9: LVDT que mide el desplazamiento vertical del apoyo de cada viga. ....	59
Figura 5.10: LVDTs que registran el desplazamiento vertical y horizontal de la base de la columna. ....	59
Figura 5.11: Celda de carga del actuador hidráulico. ....	60
Figura 5.12: Celda de carga para medir la reacción en vigas. ....	60
Figura 5.13: Sistema de adquisición de datos – vista frontal. ....	61
Figura 5.14: Sistema de adquisición de datos – vista trasera. ....	62
Figura 5.15: Pieza rectificada para garantizar la completa carrera del actuador en ambos sentidos. ....	64
Figura 5.16: Restricción lateral adicional para cada viga. ....	65
Figura 6.1: Especimen SE-01 listo para ser ensayado. ....	69
Figura 6.2: Desplazamiento entre piso para el espécimen SE-01. ....	70
Figura 6.3: Carga vs. Desplazamiento para el espécimen SE-01. ....	70
Figura 6.4: Momento vs. Rotación de la viga oeste para el espécimen SE-01. ....	71

Figura 6.5: Momento vs. Rotación de la viga este para el espécimen SE-01.....	71
Figura 6.6: Primera manifestación visible de fluencia en un T-stub en el espécimen SE-01 para $\theta=0,02$ [rad].....	72
Figura 6.7: (a) Inicio de fluencia en el alma de la viga para $\theta=0,02$ [rad], y (b) fluencia más notoria en la viga para $\theta=0,03$ [rad].....	72
Figura 6.8: Estado del espécimen SE-01 para (a) $\theta=0,03$ [rad] y (b) $\theta=0,04$ [rad]. .....	73
Figura 6.9: Volcamiento en la viga este del espécimen SE-01, para $\theta=0,04$ [rad]. .....	73
Figura 6.10: Fractura de los hilos de la celda de carga oeste. ....	74
Figura 6.11: T-stub inferior oeste post-ensayo SE-01.....	74
Figura 6.12: Momento vs. Rotación Total en la conexión (a) oeste y (b) este del espécimen SE-01. ....	75
Figura 6.13: Momento vs. Rotación Total en la viga (a) oeste y (b) este del espécimen SE-01... ..	75
Figura 6.14: Especimen SE-02(a) listo para ser ensayado. ....	76
Figura 6.15: Historial de desplazamiento para el espécimen SE-02. ....	76
Figura 6.16: Carga vs. Desplazamiento para el espécimen SE-02(a).....	77
Figura 6.17: Momento vs. Rotación para el espécimen SE-02(a).....	78
Figura 6.18: Momento vs. Rotación indicando que se cumplen los requerimientos de AISC 341 (2010b) para conexión viga-columna en SMF (“ <i>Special Moment Frame</i> ”). .....	78
Figura 6.19: Inicio de fluencia en (i) alas y (ii) alma en la viga.....	79
Figura 6.20: Inicio de pandeo local en las alas de la viga para $\theta=0,04$ [rad].....	79
Figura 6.21: Pandeo local excesivo en la viga para el ciclo 1 de la distorsión de piso $\theta=0,05$ [rad]. .....	80
Figura 6.22: Rótula plástica desarrollada para una distorsión de piso $\theta=0,05$ [rad].....	80
Figura 6.23: Momento vs. Rotación Total en la conexión del espécimen SE-02(a). ....	81
Figura 6.24: Momento vs. Rotación Total de la viga en la zona de rótula plástica para el espécimen SE-02(a).....	82
Figura 6.25: Especimen SE-02(b) listo para ser ensayado. ....	83
Figura 6.26: Historial de desplazamiento para el espécimen SE-02(b).....	83
Figura 6.27: Carga vs. Desplazamiento para el espécimen SE-02(b). ....	84
Figura 6.28: Deslizamiento observado en los pernos sometidos a corte para $\Theta=0,03$ [rad]. .....	84
Figura 6.29: Momento vs. Rotación para el espécimen SE-02(b).....	85
Figura 6.30: Momento vs. Rotación indicando que se cumplen los requerimientos de AISC 341 (2010b) para conexión viga-columna en SMF (“ <i>Special Moment Frame</i> ”). .....	85

Figura 6.31: Manifestaciones prematuras de deformación en el alma de la viga del espécimen SE-02(b). .....	86
Figura 6.32: Inicio de fluencia en alas y alma de la viga. ....	86
Figura 6.33: Deformación en la viga para $\theta=0,03$ [rad]. .....	87
Figura 6.34: Estado de la viga y conexión para $\theta=0,04$ [rad] (ciclo 2). .....	87
Figura 6.35: Inicio de pandeo local en las alas de la viga para $\theta=0,04$ [rad]. .....	88
Figura 6.36: Pandeo local alas y alma de la viga para el ciclo 1 de la distorsión de piso $\theta=0,05$ [rad]. .....	88
Figura 6.37: Deformación en el espécimen SE-02(b) para una distorsión de piso $\theta=0,05$ [rad] (ciclo 2). .....	89
Figura 6.38: Inicio de fractura del área neta de la viga en T-stub superior, para $\theta=0,05$ [rad] (ciclo 2). .....	89
Figura 6.39: Momento vs. Rotación Total en la conexión del espécimen SE-02(b). .....	90
Figura 6.40: Momento vs. Rotación Total de la viga en la zona de rótula plástica para el espécimen SE-02(b). .....	90
Figura 6.41: Energía disipada acumulada por las vigas de especímenes SE-01 y SE-02. ....	91
Figura 6.42: Rigidez secante de la curva M vs. $\theta$ de las vigas de especímenes SE-01 y SE-02... ..	92

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Motivación

El acero estructural es uno de los materiales más utilizados en la construcción de edificios y obras civiles en el mundo, debido a que se caracteriza por su resistencia, versatilidad y facilidad de montaje. Los estudios sobre el desempeño sísmico de estructuras lo han catalogado como un material capaz de brindar ductilidad, y de resistir las solicitaciones sísmicas bajo el cumplimiento de las recomendaciones de diseño existentes. Sin embargo, durante el terremoto de Northridge, EEUU, de 1994 ( $M_w=6,7$  California, USA) ocurrieron fracturas frágiles en conexiones de estructuras de acero de marco rígido, lo que condujo a modificar las disposiciones sísmicas del *American Institute of Steel Construction* (AISC 341, 2010), a proponer nuevos tipos de conexiones de momento en los criterios de diseño sísmico para edificios de marco rígido de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA 350, 2000), y a mejorar el detallamiento de algunas ya existentes. Entre los nuevos requerimientos, se obliga a usar conexiones precalificadas en construcciones de acero ubicadas en áreas de alta amenaza sísmica, donde se requieren mayores niveles de ductilidad, es decir, que los elementos posean la capacidad de experimentar grandes deformaciones antes de fallar.

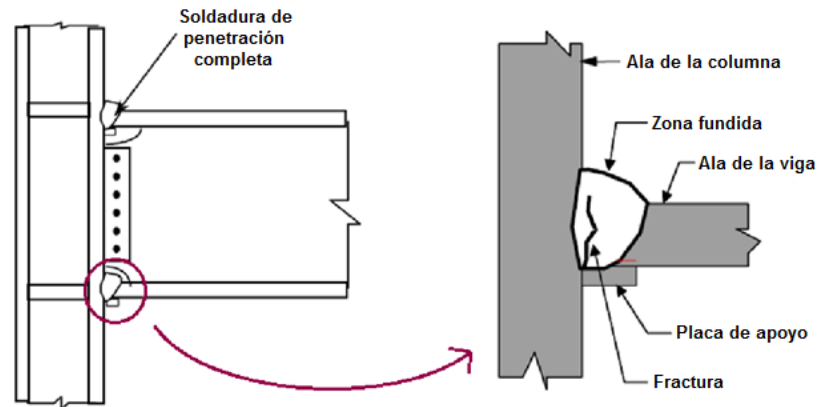
La conexión de tipo doble T cortada (DST: *Double Split T*), compuesta por dos perfiles T apernados llamados T-stubs, es una de las conexiones precalificadas incluida en las recomendaciones FEMA 350. Sin embargo, las investigaciones que avalan su uso se han llevado a cabo en T-stubs fabricados a partir de secciones laminadas, generando la necesidad de indagar más sobre T-stubs soldados, considerando que éstos presentan ventajas por sobre los laminados, en términos de mejor uso de material, libertad de dimensionamiento, y disponibilidad en Chile.

Este estudio corresponde a la etapa experimental de un proyecto que pretende generar conocimiento sobre conexiones de momento DST que utilizan perfiles T soldados, denominadas doble T armada (DBT: *Double Built-up T*), teniendo como hipótesis que éstas poseen resistencia y ductilidad adecuadas para estructuras de acero sismorresistentes. Actualmente, el uso de esta conexión en uniones de marcos rígidos no estaría permitido en Chile, debido a que posee un carácter parcialmente rígido (NCh 2369.Of2003). Sin embargo, las conclusiones obtenidas en conjunto con las demás etapas del proyecto podrían, eventualmente, cuestionar dicha restricción.

## 1.2. Antecedentes generales

Antes del terremoto de Northridge de 1994, y el de Kobe de 1995, la conexión de momento más utilizada era la denominada WUF (*Welded Unreinforced Flange*) de la Figura 1.1, en la que una soldadura de penetración completa unía ambas alas de la viga con el ala de la columna. Sin

embargo, durante dichos terremotos se observó el desarrollo de grietas originadas en la soldadura, propagándose incluso hasta la zona panel de la columna.



**Figura 1.1: Conexión WUF - utilizada antes del terremoto de Northridge (adaptada de FEMA 350, 2000).**

Del estudio de las causas de las fallas frágiles observadas, se concluyó que este tipo de conexión presenta varios inconvenientes, los que se relacionan con dos factores principales.

El primero es la geometría de la conexión, que genera grandes demandas de deformación en áreas críticas, las cuales se agravan por la susceptibilidad a la fractura que tienen los detalles soldados típicos. Incluso cuando las soldaduras son bien ejecutadas y hechas con materiales apropiados, estas demandas de deformación producen que el material base se deteriore en las cercanías de la perforación de acceso a la soldadura. Esto resulta en una baja ductilidad rotacional y en un desempeño pobre de la conexión bajo grandes ciclos reversibles de carga.

El segundo factor es la concepción estructural de los marcos rígidos, que por economía requiere que la resistencia lateral se concentre en relativamente pocas conexiones. Esto conlleva a proporcionar vigas pesadas para controlar el desplazamiento entre piso y esfuerzos muy grandes en las conexiones para mantener el mecanismo columna fuerte – viga débil, las que exacerban la concentración de deformaciones.

Los inconvenientes relacionados con la geometría se pueden solucionar mediante el uso de soldaduras más resistentes y un mejor detallamiento de la conexión, motivando la utilización de conexiones de momento alternativas, como las conexiones con T-stubs apernados que proporcionan un nivel de redundancia alto y una rigidez comparable con la de las conexiones completamente soldadas.

### **1.3. Antecedentes específicos**

El diseño de estructuras sismorresistentes busca que sus elementos proporcionen un comportamiento dúctil ante eventos sísmicos. La ductilidad se define como la capacidad de un

elemento para acomodar deformaciones importantes antes de que alcance la falla, o bien, su colapso. El criterio comúnmente utilizado para lograr este comportamiento dúctil es el denominado “Columna Fuerte – Viga Débil”, cuya característica principal es promover la formación de rótulas plásticas en las vigas de un edificio y sólo en la base de las columnas, permitiendo que la estructura trabaje en conjunto. La condición que se debe satisfacer para cumplir este criterio de diseño la estipula el *American Institute of Steel Construction (AISC)* en su norma AISC 341: *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (2010).

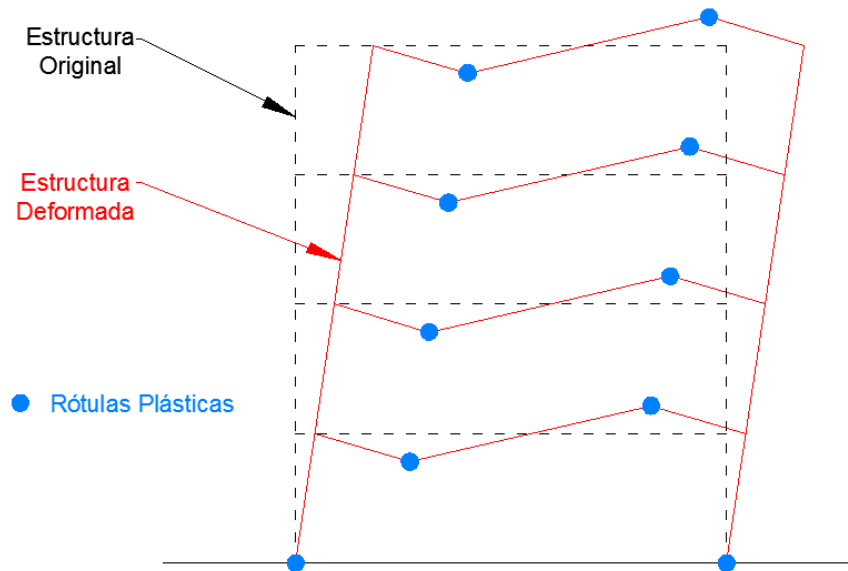


Figura 1.2: Criterio Columna Fuerte – Viga Débil.

Las rótulas plásticas corresponden a zonas donde se concentran deformaciones producto de la fluencia del elemento en el que se forman. A través de ellas, la estructura es capaz de disipar energía, evidenciando la importancia de ubicarlas de manera óptima.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivos generales

Estudiar el comportamiento de conexiones de momento viga-columna con perfiles T soldados sometidas a cargas cíclicas, empleando una metodología experimental.

### 1.4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes:

- Diseñar cuatro configuraciones de uniones viga-columna con conexiones de momento que usan perfiles T soldados, de tal manera de cubrir los modos de falla más significativos de la T soldada, de la viga y de la columna.
- Elaborar planos de fabricación de las probetas a ensayar a partir de su dimensionamiento previo, para que puedan ser fabricadas en una maestranza profesional.
- Determinar las propiedades reales del material base de los elementos de acero, y el comportamiento carga-deformación de los pernos cuando son sometidos a tracción.
- Ensayar los especímenes en las instalaciones de la Universidad de Chile, para luego analizar los resultados registrados, y así, identificar y documentar los estados límites de cada configuración.
- Evaluar la resistencia, rigidez y capacidad sísmica de la conexión DST con perfiles T soldados, y comparar los valores predichos por las recomendaciones de diseño con lo obtenido de forma experimental.
- Identificar ventajas y desventajas de esta conexión en cuanto a su uso en estructuras sismorresistentes, y determinar el tipo de marco rígido para el cual califica según su comportamiento experimental.

## 1.5. Organización de la Memoria de Título

La memoria de título se distribuye de la siguiente forma:

En el **Capítulo 2: Marco teórico** se presenta una revisión bibliográfica para conocer las características de la conexión DST propuesta después del terremoto de Northridge de 1994. Además, se estudian los ensayos realizados en T-stubs laminados y soldados para conocer cuáles son los modos de falla que predominan en estos elementos de conexión, cuando se encuentran en condiciones de cargas monotónicas y cíclicas.

En el **Capítulo 3: Diseño de probetas** se presentan las características de la instalación experimental disponible para ensaye de conexiones de momento en acero, las cuales definen el sistema estructural que se estudia y sus dimensiones preliminares necesarias para diseñar los diferentes especímenes. Se describe la filosofía de diseño y los parámetros a estudiar en los ensayos, considerando sus posibles modos de falla. Además, se explica el procedimiento de diseño de las diferentes configuraciones, y se presentan sus dimensiones finales y detalles.

En el **Capítulo 4: Ensayo de materiales** se presentan las propiedades reales de los materiales utilizados, a partir de ensayos sobre muestras del acero usado en la fabricación de las probetas,



siguiendo con las especificaciones actuales para ensayos de materiales, y sobre pernos que no se utilizaron sometidos a tracción para determinar su comportamiento carga-deformación real.

En el **Capítulo 5: Metodología experimental e instrumentación** se describe el procedimiento seguido para llevar a cabo los ensayos experimentales, los parámetros que se registran durante cada uno y la instrumentación implementada.

En el **Capítulo 6: Presentación y análisis de resultados** se describen los ensayos ejecutados y se exhiben los resultados experimentales obtenidos, junto con presentar un análisis completo de las curvas que representan la respuesta de cada espécimen.

En el **Capítulo 7: Conclusiones** se redactan las conclusiones más importantes que surgen de todo el proceso de investigación llevado a cabo, verificando haber cumplido con los objetivos definidos.

# Capítulo 2. Marco teórico

## 2.1. Tipos de conexiones en marcos de acero

Las conexiones utilizadas en marcos de acero, en general, se clasifican según tres principales características: resistencia, rigidez, y ductilidad (Tamboli, 2010).

Con respecto a la resistencia, se dividen según su capacidad de transferir el momento plástico proveniente de las vigas del marco:

- a) **Conexión FS (*Full strength*):** Conexión que es capaz de transmitir todo el momento plástico de las vigas a las columnas.
- b) **Conexión PS (*Partial strength*):** Conexión que sólo transmite una parte del momento plástico proveniente de las vigas hacia las columnas.

Con respecto a la rigidez, las disposiciones de diseño sísmicas del *American Institute of Steel Constructions* (AISC 341, 2010) clasifican las conexiones según los siguientes grupos:

- a) **Conexión de momento FR (*Fully restrained*):** Corresponde a una conexión que transmite más del 90% del momento con una rotación relativa despreciable entre la viga y la columna del marco. Lleva una placa de corte conectada al alma de la viga para transmitir este esfuerzo.
- b) **Conexión de momento PR (*Partially restrained*):** Es una conexión flexible semi-rígida que transmite entre el 20% y el 90% del momento. Además, la rotación entre la viga y la columna no es despreciable, por ende, en el análisis se debe incluir un elemento con su relación fuerza-deformación. Los elementos que componen esta conexión deben tener suficiente resistencia, rigidez y ductilidad en los estados límites de diseño.
- c) **Conexión simple (*Pinned*):** Esta conexión sólo es capaz de transmitir el esfuerzo de corte entre la viga y la columna del marco, ya que los extremos de la viga se encuentran libres y pueden rotar independientemente de la columna. Por esto, se considera como una conexión rotulada que no transmite momento alguno.

Finalmente, las conexiones pueden comportarse de forma frágil, o bien, de manera dúctil. Su uso en marcos rígidos corrientes (OMF), intermedios (IMF) o especiales (SMF) depende de su habilidad para alcanzar y mantener ciertas demandas rotacionales plásticas. Por ejemplo, una rotación plástica en una rótula de 0.03 rad, con una pérdida de resistencia menor al 20%, es el límite que diferencia entre conexiones frágiles o dúctiles para marcos rígidos especiales.

## 2.2. Comportamiento de conexiones en marcos de momento

Para establecer el comportamiento global de una conexión de momento es necesario determinar su curva momento-rotación (Figura 2.1), es decir, el momento solicitante ( $M$ ) para cada valor de rotación relativa entre la viga y la columna, o bien, de rotación plástica en una rótula ( $\Theta$ ). Actualmente, existen tres métodos para obtener esta curva: experimentación, modelamiento avanzado de elementos finitos, y ajustes de curvas existentes obtenidas con datos experimentales. Sin embargo, ninguno de éstos provee por sí solo una solución segura y eficiente.

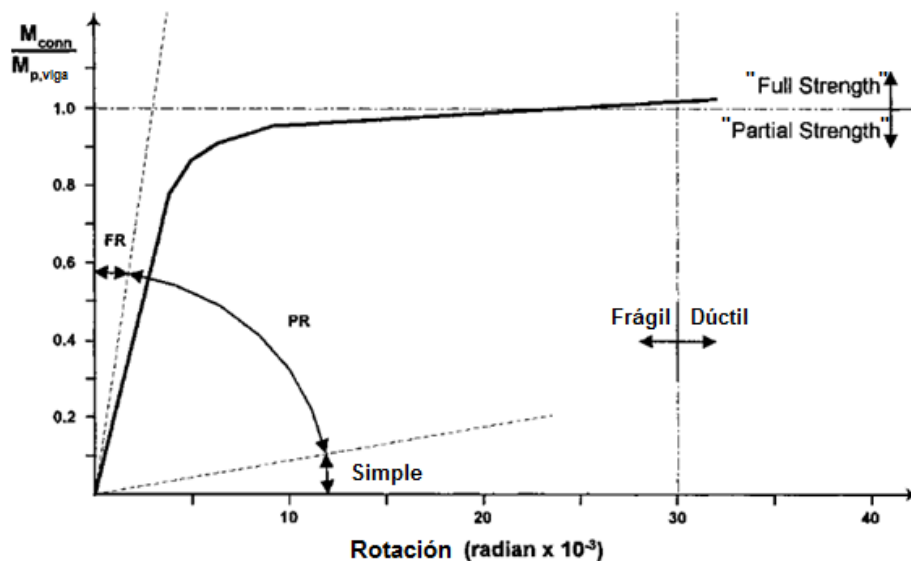
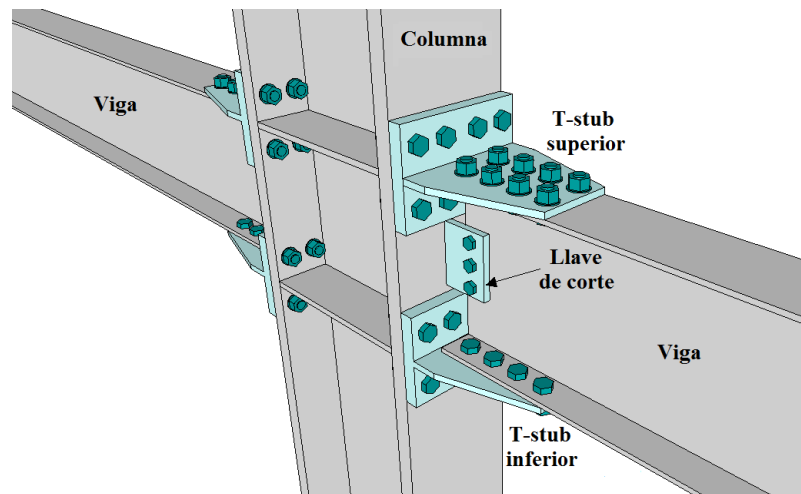


Figura 2.1: Curva momento-rotación típica bajo carga monotónica (Swanson et al., 2000).

En la Figura 2.1 se observa que la curva de momento-rotación típica de una conexión bajo carga monotónica comienza de forma lineal, rango en el que la conexión se comporta elásticamente y donde la rigidez es constante (pendiente de la curva). Luego, cuando entra al estado inelástico, su rigidez empieza a decrecer con el aumento del momento solicitante, debido a las deformaciones permanentes que se generan en ella. Si la conexión es capaz de alcanzar una deformación inelástica significativa antes de la falla, denominada deformación última  $\Theta_u$ , significa que posee una ductilidad alta.

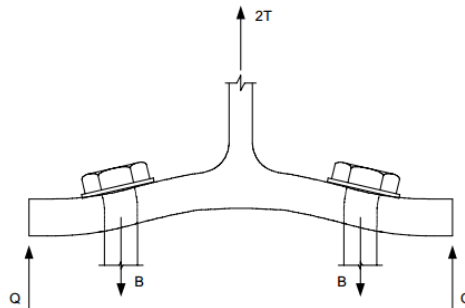
## 2.3. Conexión de momento DST

La conexión de momento DST (Double Split Tee) es una conexión de resistencia completa (FS), flexible parcialmente rígida (PR), de tipo apernada, y que forma parte de la lista de conexiones de momento precalificadas de la norma FEMA 350 (2000) para ser utilizada en edificios de marco rígido corrientes (OMF) y especiales (SMF). Consiste en dos perfiles T, o T-stubs, apernados a ambas alas de la viga y al ala de la columna, y en una llave de corte que une el alma de la viga con el ala de la columna, tal como se muestra en la Figura 2.2. Esta última se encuentra soldada a la columna y apernada a la viga.



**Figura 2.2: Conexión DST.**

El momento solicitante en la cara externa de la columna induce un par de fuerzas tracción/compresión en ambos T-stubs, las que se alternan producto de la carga cíclica experimentada en un sismo. Estas fuerzas axiales producen un esfuerzo de corte en los pernos ubicados en el alma del perfil T, y un esfuerzo a tracción en los pernos ubicados en sus alas. Esta tracción se ve incrementada por el efecto de apalancamiento que ocurre cuando el ala del T-stub comienza a fluir, como se muestra en la Figura 2.3, produciéndose una fuerza de apalancamiento  $Q$  en cada ala, que debe ser considerada en el diseño.

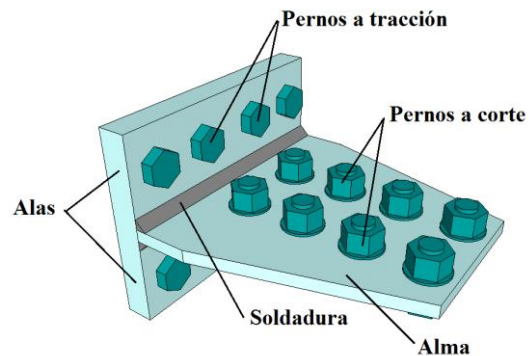


**Figura 2.3: Efecto de apalancamiento en el ala de un T-stub (Swanson, 2002).**

El procedimiento de diseño estipulado en la norma FEMA 350 para este tipo de conexión contempla los siguientes estados límites de falla para los elementos de un T-stub, indicados en la Figura 2.4: corte en los pernos del alma, rotura del área neta del alma, fluencia de las alas/apalancamiento, tracción de los pernos del ala, y falla por bloque de corte en el alma. Por otro lado, cabe decir que el diseño también debe verificar la falla en los demás elementos: corte de los pernos de la placa de corte, la fluencia del área neta y la rotura del área gruesa de dicha placa, el aplastamiento de todas las perforaciones sometidas a corte, la rotura del área neta del ala de la viga, y determinar la necesidad de incluir placas de continuidad y doble placas en la zona panel de la columna.

La norma establece que el diseño debe ser ejecutado de tal manera que el comportamiento inelástico esté controlado por la formación de rótulas plásticas en la viga en conjunto con la

plastificación de la zona panel de la columna, o por la ocurrencia de rótulas plásticas en la viga de forma individual. Al cumplir con esto, se espera que la estructura diseñada exhiba un comportamiento dúctil de manera global, y por lo tanto, en esta memoria de título se determina qué tan factible es alcanzar este diseño dúctil y cuáles son sus limitaciones cuando se usa un perfil T soldado. La soldadura que une el alma con el ala del perfil T es un parámetro característico que no se encuentra estipulado en la norma FEMA 350, por lo que se le debe poner especial atención durante esta investigación.



**Figura 2.4: Componentes de un T-stub.**

Con la intención de adquirir conocimiento previo sobre el desempeño de la conexión estudiada, se realiza una revisión bibliográfica de investigaciones desarrolladas que tienen directa relación con la materia en cuestión. A continuación se presenta un resumen de las publicaciones identificadas, cuyas metodologías de estudio sirven como guía para llevar a cabo este trabajo.

## **2.4. Swanson et al. (2000)**

Swanson y León (2000) en el marco de la fase 2 del proyecto SAC, financiado en 1994 por la *Federal Emergency of Management Agency* (FEMA), determinan el comportamiento de una conexión DST y de perfiles T con el objetivo de proponer criterios de diseño para una conexión que fuese de resistencia completa (*full strength*), dúctil, y con una rigidez cercana al rango de una completamente rígida.

Ellos ensayaron 48 T-stubs individuales sujetos a carga axial, todos fabricados con perfiles laminados, y también, seis conexiones de momento DST a escala real (Smallidge, 1999). Debido a la carencia de conocimiento que existía hasta la fecha sobre ensayos bajo carga cíclica, realizaron estos ensayos bajo carga monotónica y cíclica.

### **2.4.1. Ensayos sobre T-stubs aislados**

Los parámetros estudiados sobre los diferentes T-stubs fueron los siguientes: grado, espaciamiento y diámetro de los pernos, junto con el ancho de la probeta. Los T-stubs fueron

fabricados con acero ASTM A572 Grado 50, y los pernos con acero ASTM A325 y A490, de diámetros 7/8" y 1".

Los ensayos fueron ejecutados utilizando un marco compuesto por cuatro actuadores montados en paralelo entre dos vigas robustas. Los T-stubs estaban apernados a través de sus alas a una columna con atiesadores de rigidez, y a través de su alma a una sección T de gran longitud que simulaba una viga. La aplicación de carga se realizó según el protocolo de carga FEMA/SAC existente en ese entonces (Krawinkler, 2000).

De todas las probetas ensayadas, cuatro estuvieron sometidas a carga monotónica y las demás bajo carga cíclica. Al hacer esto, concluyeron que la curva monotónica representa de forma precisa la envolvente de la parte a tracción del ensayo cíclico, lo que permite validar el uso de ensayos monotónicos para determinar el comportamiento de la conexión DST.

La mayoría de los T-stubs falló por rotura del área neta de su alma y por fractura de los pernos a tracción, ésta última siendo la más repentina y frágil de todas las observadas. Lo único que advertía que iba a ocurrir era el levantamiento del ala, cuya deformación era mayor en los T-stubs con un mayor espaciamiento de las filas de pernos a tracción. Otros modos de falla observados incluyeron fractura de los pernos a corte, diseñados con los "hilos excluidos", y falla por bloque de corte en el alma cuando los pernos se encontraban a una menor distancia. Además, todos los T-stubs presentaron un estrechamiento en su alma, como consecuencia de la diferencia entre el ancho de la viga con el de la columna. Cabe destacar, que los T-stubs fallaron después de experimentar una plastificación significativa.

Las principales conclusiones fueron:

- Las mayores contribuciones a la deformación total del T-stub vienen dadas por la deformación del ala, alargamiento de pernos a tracción, deformación del alma, y desplazamiento relativo entre alma y viga.
- Los mecanismos de mayor disipación de energía son la fluencia del ala producto del apalancamiento y el deslizamiento entre alma y viga.
- La rigidez del ala del T-stub se puede aumentar de manera considerable al aumentar su espesor o al disminuir el espaciamiento entre las filas de pernos a tracción.
- La capacidad del alma del T-stub puede ser aumentada al utilizar un mayor espaciamiento entre las filas de pernos a corte. Esto reduce el estrechamiento del alma y aumenta el área efectiva, también llamada sección Whitmore.

- Las ecuaciones de diseño de ese entonces proporcionan estimaciones conservativas de la capacidad última de los T-stubs, pero no predicen necesariamente los modos de falla que controlan.

#### **2.4.2. Ensayo sobre conexiones DST a escala real**

Los ensayos a escala real sobre seis conexiones DST fueron ejecutados por Smallidge (1999) como parte de su tesis de magíster de Ingeniería Civil en el Georgia Institute of Technology, guiada por León. En ellos utilizaron un marco de reacción rígido para restringir el movimiento de las probetas en el otro plano al de estudio, y para sostener el actuador hidráulico que aplicó la carga. Cada espécimen contaba con una columna conectada a una viga mediante dos T-stubs y una placa de corte, y el actuador hidráulico ubicado al extremo de la viga.

Los parámetros variados fueron principalmente la cantidad y diámetro de los pernos, siendo todos de calidad ASTM A490 de diámetros 7/8" o 1", existencia de refuerzo en la zona panel, y calidad y tamaño de la viga. Todas las vigas y las columnas fueron fabricadas con acero ASTM A572 Grado 50, salvo una viga de calidad ASTM A36.

A partir de los resultados se formularon las siguientes conclusiones:

- Los T-stubs se comportaron de forma similar a los que se estudiaron individualmente, dejando en evidencia que no es necesario realizar ensayos a escala real para conocer cómo se comporta un T-stub en una conexión DST, sino que bastaría con llevar a cabo ensayos de estos elementos en forma individual, y a un menor costo, para calibrar un modelo de la conexión completa.
- Todas las conexiones DST alcanzaron los requerimientos de ductilidad establecidos por el AISC (0,03 rad de rotación plástica sin un deterioro de la capacidad mayor a un 20%). Los T-stubs pueden diseñarse como conexiones de resistencia total si se usa la capacidad completa de la viga (alcanzando  $M_p$  en los extremos de las almas de éstos). Cuatro de los seis ensayos fallaron por pandeo local en la viga, sin embargo, ésta experimentó una gran fluencia antes de alcanzar su capacidad total, proporcionando una rotación plástica sustancial.
- A pesar de que las vigas poseían alas y almas relativamente esbeltas, fueron capaces de mantener una rotación sustancial antes de presentar pandeo local. Se cree que las rótulas plásticas en las vigas excedieron la rotación plástica asociada comúnmente con el diseño plástico (tres veces la rotación de fluencia sin pandeo local), lo cual no se pudo confirmar por falta de instrumentos en esta zona.

- Aumentar el espaciamiento entre las filas de pernos a corte es una manera sensible de retrasar el tipo de falla por aplastamiento, que generó grandes deformaciones en los dos últimos pernos antes de alcanzar un desgarramiento entre ambas perforaciones.
- Finalmente, los ensayos mostraron que es difícil obtener la rigidez deseada en el marco ensayado sin la ayuda de un gran muro de reacción. La mayoría de los problemas presenciados tienen relación con la rigidez insuficiente del marco de reacción.

## 2.5. Piluso et al. (2001)

Piluso et al. (2001) estudiaron conexiones apernadas de resistencia parcial, modeladas mediante T-stubs laminados equivalentes, sujetos a condiciones de carga monotónica, y con el fin de predecir su capacidad para experimentar rotación plástica. Sólo se apunta al comportamiento de las alas, porque se trata de una unión viga-columna representada mediante un T-stub. Piluso et al. (2001a) presenta un modelo teórico sobre el comportamiento de un T-stub, y Piluso et al. (2001b) valida dicho modelo mediante experimentos.

El alcance teórico se basó en que existen tres mecanismos de falla posibles en ella, que dependen de la relación entre su capacidad a flexión y la resistencia de los pernos a tracción, esquematizados en la Figura 2.5. La resistencia última a la tracción de las alas del T-stub es proporcionada por el menor valor de  $F_u$  entre ellos.

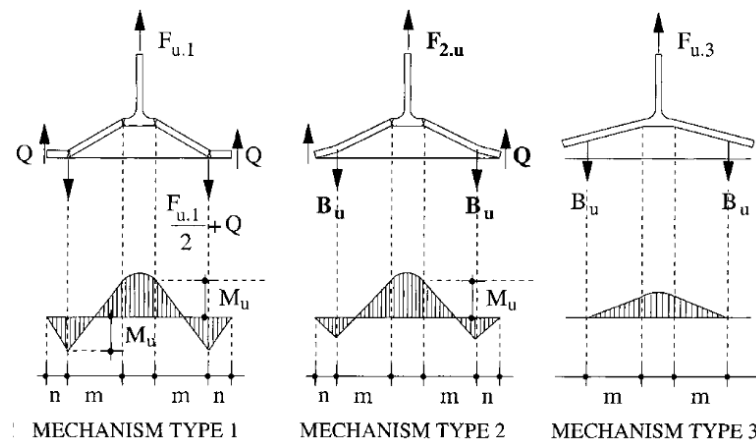


Figura 2.5: Modos de falla posibles en las alas del T-stub (Piluso et al. 2001).

En el mecanismo de tipo I se desarrollan cuatro rótulas plásticas producto de la fluencia del ala. Dos se ubican en los ejes de los pernos, y las otras en los puntos de unión entre el ala y el alma. Además, se asume que las fuerzas de apalancamiento ( $Q$ ) se concentran en los extremos del ala.

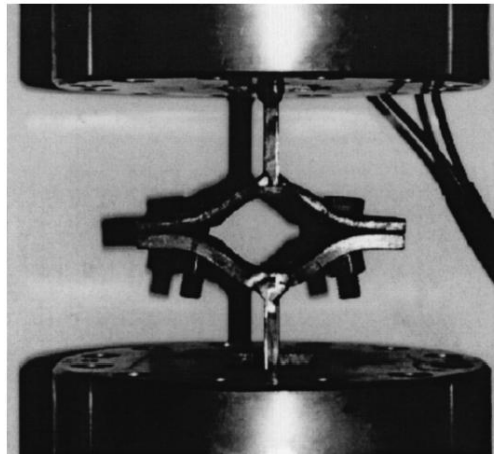
En el mecanismo de tipo II se desarrollan dos rótulas plásticas, ubicadas en los puntos de unión entre el ala y el alma, y fallan los pernos a tracción. En esta situación, las fuerzas de



apalancamiento  $Q$  emergen con mayor ímpetu, produciendo una tensión adicional en los pernos hasta lograr que estos se fracturen primero que el ala de la zona de pernos.

Finalmente, en el mecanismo de tipo III ocurre una falla frágil, caracterizada por la fractura de los pernos. En este escenario, el ala del T-stub no alcanza su estado último.

La etapa experimental consistió en ensayar 12 probetas, seleccionadas de manera que se encuentren dentro de los mecanismos I o II. El acero base de todos los perfiles es Fe 430. Once de las 12 probetas corresponden a perfiles T-stubs, donde en cada ensayo se situaron en pares de forma simétrica, conectados a través de sus alas por dos pernos de alta resistencia de tipo A325 y A490, y se sometieron a carga monotónica axial aplicada a través del alma por una máquina de ensayo bajo control de desplazamiento (Figura 2.6). El desplazamiento axial se fue aumentando gradualmente hasta llegar al colapso de las probetas.



**Figura 2.6: Ensayo de las probetas (Piluso et al. 2001).**

A partir de los resultados generados, los autores concluyen lo siguiente:

- La comparación entre los resultados teóricos y experimentales muestra un grado de precisión adecuado, validando así el modelo teórico formulado.
- Los resultados de ambas etapas de la investigación confirman la importancia de las características de falla sobre la capacidad de deformación plástica de los T-stubs apernados, obteniéndose como mecanismo más dúctil el de tipo I.
- La resistencia última a la fractura de estos T-stubs es significativamente mayor que la resistencia plástica, lo cual se explica por el efecto de endurecimiento del acero por deformación hasta la fractura, o *strain hardening*.

## 2.6. Girão Coelho et al. (2004)

Girão Coelho et al. (2004) estudiaron experimentalmente el efecto de diversos parámetros sobre el comportamiento de T-stubs soldados sujetos a carga monotónica, con el fin de estudiar una conexión apernada con placa de extremo soldada (ver Figura 2.7). Estos parámetros fueron el espesor y tipo de soldadura, calidad del acero, tamaño y calidad de los pernos, tamaño y orientación de los T-stubs y presencia de atiesadores, apuntando exclusivamente al comportamiento de las alas, y no del alma.

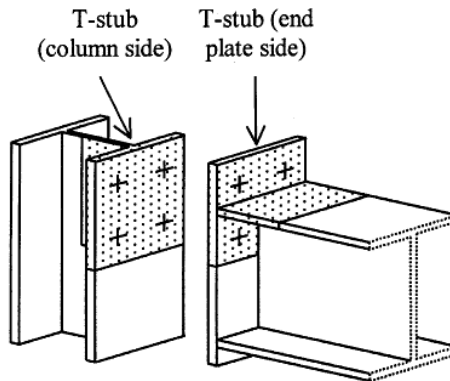


Figura 2.7: T-stubs identificados en una conexión con placa de extremo apernada (Coelho et al. 2004).

Se ensayaron 32 T-stubs, ubicados de forma similar a los de Piluso et al. (2001), es decir, dispuestos ala con ala y cargados a través de las almas. Los resultados indicaron que el modo de falla más común fue la fractura de los pernos a tracción debido al apalancamiento del ala de la T, sin embargo, algunos de los especímenes desarrollaron fracturas en la zona afectada por la temperatura en el alma de la T. Estas fracturas fueron atribuidas por los autores a defectos en el procedimiento de soldadura utilizado para fabricar los especímenes.

Las principales conclusiones formuladas fueron las siguientes:

- La deformación del ala y el alargamiento de los pernos a tracción son los que más contribuyen a la capacidad de deformación total de los T-stubs. Esta capacidad debería ser mayor si la falla del ala controla el diseño por sobre la fractura de los pernos.
- El aumento del tamaño de la soldadura mejora la resistencia y la rigidez, pero disminuye la capacidad de deformación. El mismo efecto se observa para el ancho del T-stub.
- Pernos de mayor diámetro aumentan la resistencia, realzando la rigidez, resistencia y ductilidad de la conexión.
- Para un mayor grado de acero, se observa una mayor resistencia y una menor capacidad de deformación.

## 2.7. Experiencias realizadas en Chile

Desjouis (2006) desarrolló un modelo de elementos finitos de la mitad de un T-stub soldado, aprovechando su simetría, utilizando el software ANSYS (ANSYS 2005) y sujeto a cargas de tracción monotónicas. Su objetivo era estudiar los efectos de la relación de espesores alma-ala y de la disposición de pernos sobre el comportamiento del perfil T. Los filetes de soldadura entre el ala y el alma fueron considerados de tamaños que comúnmente se emplean en la práctica, y se dejó un espacio entre estos dos elementos para simular la inexistente transferencia real de carga entre ellos, ya que éstas se transmiten a través de los filetes de soldadura (ver Figura 2.8).

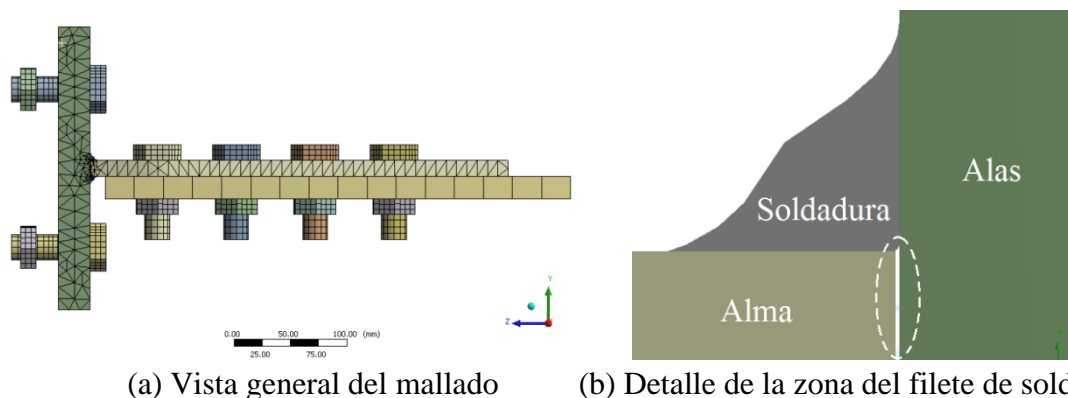


Figura 2.8: Modelo de elementos finitos de un T-stub en ANSYS (Desjouis, 2006).

Una vez que los pernos fueron pretensados, se le aplicó al T-stub una carga a tracción monotónicamente creciente a través de las alas de una viga simulada. Los resultados de los análisis indicaron que es difícil que la fluencia del alma de la T sea el estado límite que controle cuando se tiene presencia de soldadura, y que sería más apropiado permitir que controle el efecto de apalancamiento del ala.

Gómez (2008) condujo una etapa experimental con el fin de validar las conclusiones analíticas generadas por Desjouis. Ensayó dos series de 11 configuraciones de T-stubs soldados bajo carga a tracción monotónicamente creciente. Los parámetros variados fueron: (a) espesor de alma, (b) espesor de ala, (c) espaciamiento entre pernos a tracción y (d) disposición de los pernos para evaluar el efecto de escalonarlos sobre la resistencia y modo de falla de la T.

Todos los T-stubs fueron fabricados con acero ASTM A36 y soldados con filetes de soldaduras usando electrodos ER-70S-6. Las probetas fueron ensayadas bajo carga controlada usando una máquina universal de ensayos de 600 kN de capacidad. La instrumentación utilizada incluyó *strain gauges* para medir deformación unitaria en el alma de la T; *LVDTs* (transductores diferenciales de variación lineal) para medir la deformación total, el apalancamiento del ala, y la elevación en la línea de los pernos a tracción; y un sensor de presión para determinar la carga aplicada.

El modo de falla en todos los especímenes fue la fractura de los pernos a tracción debido al apalancamiento experimentado por las alas del T-stub, a excepción de los que tenían alma más delgada, que fallaron por fractura del área neta del alma de la T. Ninguna probeta mostró signos de daño en las soldaduras, hecho que motiva a continuar con el estudio sobre T-stubs soldados, y se observó que escalonar la ubicación de los pernos no tiene ningún efecto significativo. Al comparar los resultados experimentales con la información predicha por el AISC, se concluye que la capacidad de los elementos fue mayor que la predicha, y el modo de falla para los T-stubs con alma más delgada no concordó con lo predicho.

Bravo (2013) estudió el efecto de condiciones cíclicas aplicadas a un T-stub soldado aislado. Realizó una etapa analítica y una experimental, con el fin de precalificar su uso en conexiones de momento doble T soldadas en estructuras de acero sismorresistentes. Dicha investigación es esencial para la presente memoria de título, puesto que entrega el comportamiento individual de perfiles T soldados utilizados en conexiones de momento de una unión viga-columna ensayada bajo carga cíclica.

La parte experimental consistió en ensayar dos series de 10 T-stubs soldados de acero ASTM A36, diseñados de manera de reproducir los diversos modos de fallas que pueden generarse según la norma FEMA 350 en perfiles laminados, indicados en la Tabla 2.1. La geometría escogida repite la de Gómez (2008) para permitir una comparación entre el comportamiento monotónico abordado anteriormente con los resultados cíclicos de esta ocasión.

**Tabla 2.1: Modos de falla de un perfil T-stub (Bravo, 2013).**

<b>Modo de Falla</b>	<b>Frágil / Dúctil</b>	<b>Estado</b>
Fractura Pernos a Tracción	Frágil	Último
Levantamiento del Ala	Dúctil	Diseño
Corte Pernos	Frágil	Último
Fluencia Área Gruesa	Dúctil	Diseño
Fractura Área Neta	Frágil	Último
Bloque de Corte	Frágil	Último
Aplastamiento	Dúctil	Diseño

Los parámetros estudiados fueron los siguientes: ubicación y espaciamiento de los pernos a tracción y a corte, razón entre espesores ala – alma, tipo y calidad de los pernos a tracción y de la soldadura.

A partir de los resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El desempeño de los perfiles T soldados es homologable a los de confección laminada, pues los fenómenos observados están controlados por los mismos parámetros.
- La soldadura, si es correctamente materializada, no presenta problemas bajo ciclos de carga.
- El ala del perfil T soldado es el que más contribuye a la deformación y resistencia última.

Finalmente, se recomienda para el diseño usar una relación de espesor ala - alma cercana a 1.25, pues permite la deformación del ala sin alcanzar la fluencia de los pernos a tracción y, paralelamente, permite desarrollar la fluencia del alma.

# Capítulo 3. Diseño de probetas

En el presente capítulo se describe el sistema estructural en estudio, la instalación experimental disponible para ensaye de conexiones de momento en acero y el diseño de las cuatro uniones viga-columna con conexión DBT que se analizan experimentalmente. La instalación está ubicada dentro del Laboratorio Experimental de Estructuras que comparte el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile con IDIEM (Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales), cuyas dimensiones son fundamentales porque condicionan el tamaño de los elementos estructurales en estudio.

## 3.1. Sistema estructural

Los cuatro especímenes que se desean ensayar representan una unión viga-columna de un edificio de marco rígido de acero, a escala real. Cada uno consiste en dos vigas conectadas a una columna mediante una conexión de momento DST con perfiles T soldados. La columna se encuentra rotulada en su base, y las vigas se apoyan en bielas rígidas en sus extremos, los que se encuentran espaciados a 9 [m]. En la Figura 3.1 se muestra un esquema en elevación del sistema estructural descrito, en donde la columna es cargada de forma lateral por la fuerza cíclica proveniente de un actuador hidráulico, aplicada a 3,56 [m] de su rótula base. Adicionalmente, se emplea una restricción al movimiento fuera del plano en un punto de cada viga y de la columna.

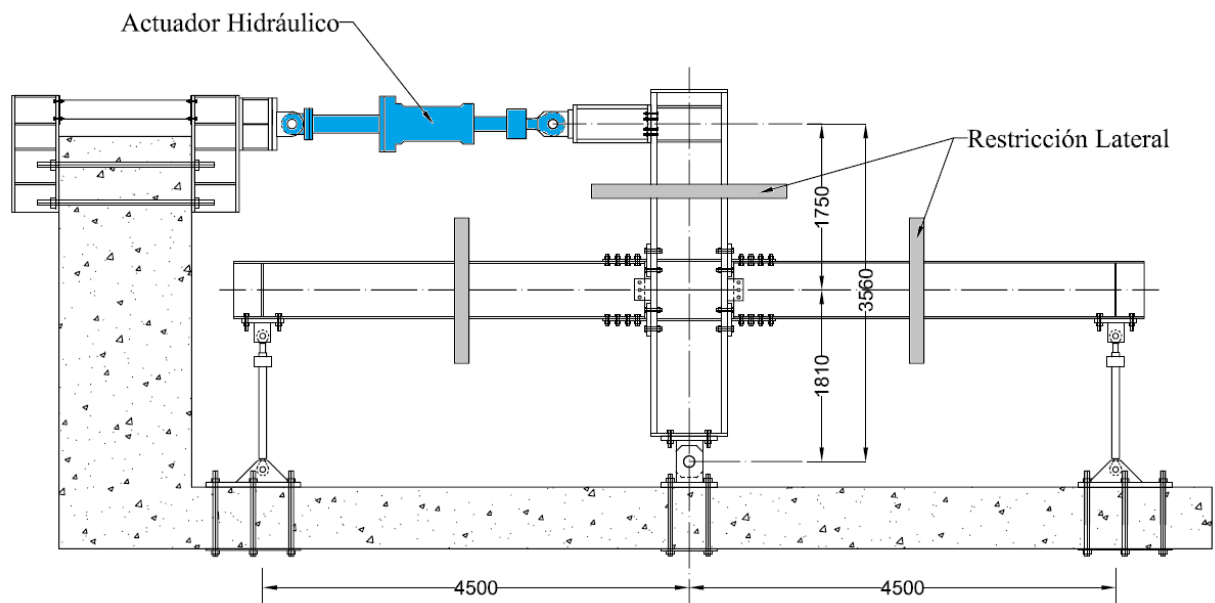


Figura 3.1: Esquema del sistema estructural en análisis.

### 3.2. Descripción de la instalación experimental

La instalación experimental utilizada para ensayar conexiones de momento viga-columna fue diseñada por Núñez (2016). Ésta consiste en un marco de reacción anclado a la losa del laboratorio (65 [cm] de espesor), y en una pieza anclada al muro de reacción (140 [cm] de espesor) destinada a sostener el actuador hidráulico requerido por los ensayos. El marco de reacción está compuesto por una viga, tres columnas y un conjunto de puntales horizontales, diagonales y perfiles ángulos, dispuestos de manera estratégica para proporcionar seguridad y restringir el movimiento fuera del plano de los especímenes durante los ensayos (ver Figura 3.2).

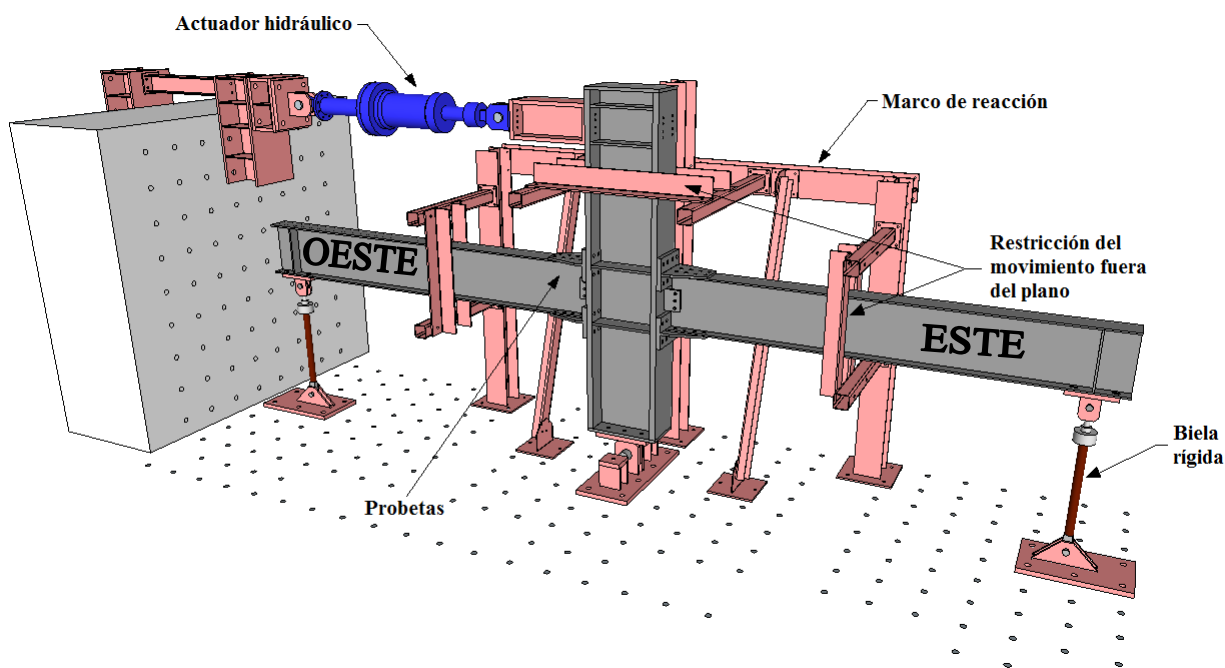


Figura 3.2: Instalación experimental (diseñada y ensamblada por Núñez, 2016).

La pieza base de la columna incluye dos elementos perforados que materializan la rótula al conectarse con un pasador, y un par de piezas para anclar las barras que participarían en la compresión axial de la columna, que en este caso no se emplea. El apoyo deslizante de cada viga se conforma con una biela rígida que posee un cabezal rotulado en ambos extremos, permitiendo generar las rótulas de la parte superior e inferior de la biela. La carga cíclica es aplicada por un actuador hidráulico que se encuentra anclado entre el muro de reacción el ala de la columna.

### 3.3. Protocolo de carga

El actuador hidráulico es un cilindro hidráulico que posee una capacidad efectiva de 100 [ton]. Durante cada ensayo, éste debe seguir y aplicar a cada probeta el protocolo de carga FEMA/SAC (Krawinkler, 2000), idéntico al protocolo estipulado en el Capítulo K del código AISC 341 (AISC, 2010). Ésta está definido por el ángulo de deformación entre piso ( $\Theta$ ) y el número de

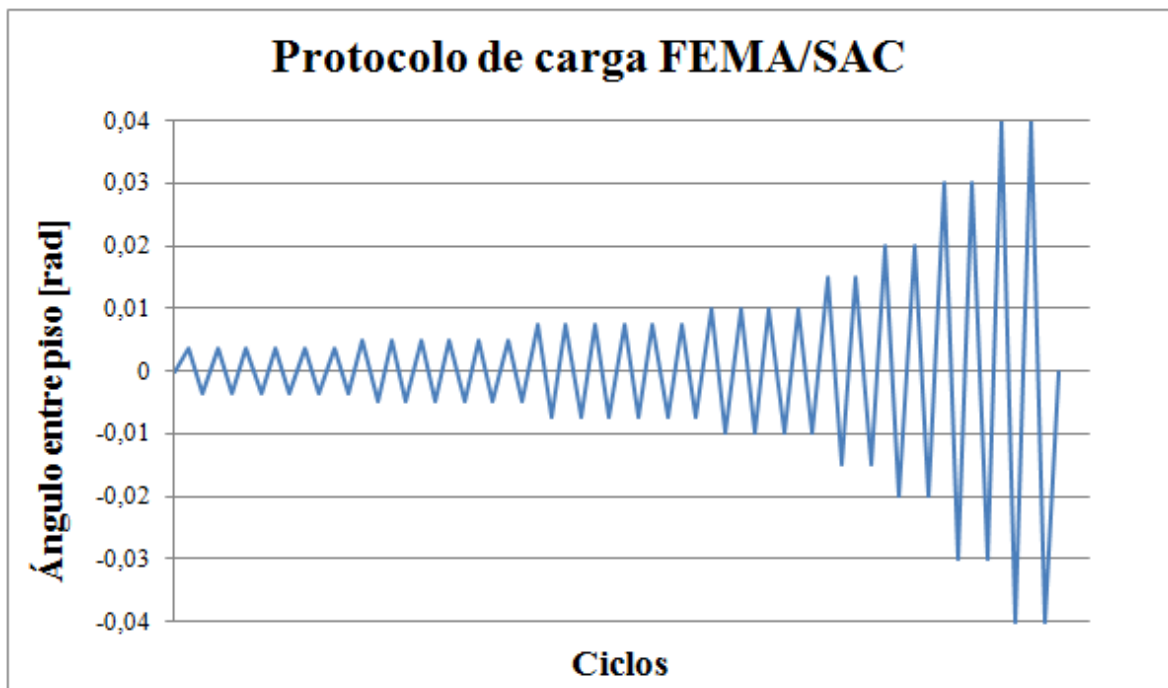
ciclos en cada etapa de carga (ver Tabla 3.1). El desplazamiento de la columna en el punto de aplicación se obtiene de la multiplicación entre el ángulo  $\Theta$  y 356 [cm] (distancia entre el punto de aplicación de la carga y la rótula de la columna).

**Tabla 3.1: Etapas de carga.**

Etapa de carga #	Deformación Peak $\theta$ [rad]	Número de Ciclos	Desplazamiento en punto de aplicación <sup>a</sup> [cm]
1	0,00375	6	1,34
2	0,005	6	1,78
3	0,0075	6	2,67
4	0,01	4	3,56
5	0,015	2	5,34
6	0,02	2	7,12
7	0,03	2	10,68
8	0,04	2	14,24
9 <sup>b</sup>	0,05	2	17,80

(a) Distancia entre el apoyo de la columna y el actuador es 3,56 [m].

(b) Se continúa con incrementos de 0,01 [rad], realizando dos ciclos en cada etapa de carga hasta que ocurra la falla del espécimen.



**Figura 3.3: Protocolo de carga cíclica FEMA/SAC, idéntico al del código AISC 341 – Cap. K2.4b (2010).**



### 3.4. Filosofía de diseño

Las probetas se diseñan para ser utilizadas en un marco rígido especial de acero (*SMF: Special Moment Frame*), de acuerdo con las disposiciones sísmicas para este tipo de marco. Por lo tanto, se debe aplicar el criterio de diseño Columna Fuerte – Viga Débil en conjunto con un diseño por capacidad de los elementos que componen el sistema estructural, con el fin de proporcionar un comportamiento dúctil y estable. Adicionalmente, el estado límite último de sus elementos se verifica mediante el método de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD).

#### 3.4.1. Marco rígido especial (SMF)

Las disposiciones sísmicas vigentes de la AISC establecen que un marco de acero rígido especial posee como característica principal el poder proporcionar una capacidad de deformación inelástica significativa, manifestándose a través de rótulas plásticas en las vigas y plastificación limitada en la zona panel de la columna. En particular, sus conexiones viga-columna deben ser capaces de sostener una deformación angular entre piso de al menos 0,04 radianes, y una capacidad a la flexión registrada en la viga de al menos  $0,8 \cdot M_p$  para dicho nivel de deformación angular, medida en la cara de la columna.

Donde,

$M_p$  = Momento plástico de la viga, en el punto donde es más probable que se desarrolle una rótula plástica. Corresponde a la capacidad nominal a flexión de la viga:

$$M_p = F_{yb} \cdot Z_b \quad (3-1)$$

Donde,

$F_{yb}$  = Tensión de fluencia mínima de la viga.

$Z_b$  = Módulo plástico de la sección de la viga.

En conclusión, las características de un marco rígido especial permiten emplearlo en zonas de alta actividad sísmica, como es el caso de nuestro país Chile.

#### 3.4.2. Diseño Columna Fuerte – Viga Débil

El criterio de diseño Columna Fuerte – Viga Débil (CF/VD) se emplea para prevenir la formación de rótulas plásticas en las columnas de un edificio de marco antes que en las vigas, y así, evitar que se desarrolle un mecanismo de colapso de piso. Para lograr esto, se verifica el cumplimiento de la siguiente condición que establecen las disposiciones sísmicas AISC 341-10.

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0 \quad (3-2)$$

Donde,

$\sum M_{pc}^*$  = Suma de las proyecciones de las resistencias nominales a la flexión de las columnas arriba y abajo de la unión con el eje central de la viga, con una reducción de carga axial en la columna.

$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c (F_{yc} - P_{uc}/A_{gc}) \quad (\text{LRFD})$$

$\sum M_{pb}^*$  = Suma de las proyecciones de las resistencias esperadas a la flexión de las vigas en la ubicación de las rótulas plásticas con el eje central de la columna.

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1R_y F_{yb} Z_b + M_{uv}) \quad (\text{LRFD})$$

$A_{gc}$  = Área gruesa de la columna.

$F_{yc}$  = Tensión de fluencia mínima de la columna.

$M_{uv}$  = Momento adicional debido a la amplificación de corte desde la ubicación de las rótulas plásticas hacia el eje central de la columna basado en LRFD.

$P_{uc}$  = Resistencia a la compresión requerida, incluyendo la carga sísmica amplificada.

$Z_c$  = Módulo plástico de la sección de la columna.

### 3.4.3. Diseño por Capacidad

El diseño por capacidad consiste en establecer la manera en que colapsaría eventualmente un sistema estructural, y el orden en el que se desarrolla cada falla de los elementos que lo componen. En la práctica, esta metodología de diseño se aplica para garantizar que la disipación de energía ocurra en las vigas, asegurando la estabilidad de piso.

Para aplicarlo, se deben seleccionar los elementos estructurales que se desea que fallen primero de tal manera que sean capaces de disipar energía mediante deformaciones inelásticas y que le otorguen al sistema una capacidad de rotación de 4%, resultando en un comportamiento dúctil. Luego, la capacidad de estos elementos es la que se define como la sollicitación de los elementos vecinos, asegurando que estos últimos aún resistan en el instante en que se alcanza la primera falla.

La norma FEMA 350 establece que la conexión DST se debe diseñar para que su comportamiento inelástico sea controlado por la fluencia a flexión de la viga, o bien, por este estado límite en conjunto con la fluencia a corte de la zona panel de la columna. Sin embargo, los sistemas viga-columna a ensayar, o especímenes, se diseñan de manera de observar distintos modos de falla, por lo que se incluyen los estados límites que deberían controlar según FEMA, y

otros dos especímenes donde se pretende ver una conexión débil y una zona panel débil por separado, fallas consideradas dúctiles por la literatura (AISC, 2010b; Bravo, 2013).

En la Tabla 3.2 se indica el elemento seleccionado para fallar primero en cada uno de los cuatro especímenes, junto con el código que representa a cada ensayo y sus componentes.

**Tabla 3.2: Características de cada ensayo.**

<b>Ensayo</b>	<b>Característica</b>	<b>Descripción de la falla</b>
SE-01(DBT2)	“Conexión débil”	Falla ocurre por la plastificación de las alas de los T-stubs.
SE-02(DBT1)	“Viga débil”	Falla ocurre por la formación de rótula plástica en la viga.
SE-03(DBT1)	“Zona panel débil”	Falla ocurre por la plastificación de la zona panel, debido a la fluencia por corte.
SE-04(DBT1)	“Falla balanceada”	La plastificación de la zona panel y la formación de rótulas plásticas en la viga ocurren simultáneamente.

SE: "Sistema Estructural".  
 DBT: "*Double Built-up T*", hace referencia al T-stub empleado.

### 3.5. Diseño de vigas y columnas

Las vigas y columnas son diseñadas bajo las ecuaciones de diseño establecidas por la norma AISC 360-10 para los esfuerzos axiales, de corte y flexión, y por las disposiciones de diseño sísmico de la AISC 341-10 que definen la compacidad sísmica de los perfiles seleccionados y requerimientos para las vigas y la zona panel de las columnas. Las dimensiones preliminares de estos perfiles son obtenidas a partir del diseño realizado por Alarcón (2016) de un edificio de acero habitacional de 12 pisos estructurado en base a marcos rígidos. Se selecciona una viga W24x84 y una columna W36x194 ubicadas en el último piso del edificio.

#### 3.5.1. Compacidad sísmica

Las disposiciones sísmicas para los tipos de marco SMF establecen que los perfiles seleccionados deben ser sísmicamente compactos, lo cual se logra cuando sus elementos cumplen con el límite de esbeltez para clasificarse como altamente dúctil, estipulado en la Tabla D1.1 de la norma AISC 341, 2010. A continuación se muestran las condiciones para las alas y el alma de cada perfil, respectivamente.

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 0,30 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3-3)$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \begin{cases} 2,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (1 - 0,93C_a) & \text{si } C_a \leq 0,125 \\ 0,77 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (2,93 - C_a) \geq 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} & \text{si } C_a > 0,125 \end{cases} \quad (3-4)$$

Donde,

$C_a$  = Factor de utilización a la compresión del elemento, definido por:

$$C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y} \quad (3-5)$$

$E$  = Módulo de elasticidad del acero.

$P_u$  = Solicitación a compresión en el elemento.

$P_y$  = Resistencia nominal a la fluencia por compresión.

$$P_y = F_y A_g \quad (3-6)$$

$A_g$  = Área gruesa del perfil.

$b_f$  = Ancho de ala.

$t_f$  = Espesor de ala.

$h_w$  = Distancia libre entre alas.

$t_w$  = Espesor de alma.

### 3.5.2. Diseño a compresión

Durante los ensayos, sólo las columnas están sometidas a un esfuerzo de compresión constante de 50 [tonf]. Su diseño se realiza según el Capítulo E de las disposiciones de la norma AISC 360, 2010, considerando que los perfiles seleccionados no contienen elementos esbeltos y que están orientados en el plano de estudio según su eje fuerte.

La resistencia de compresión nominal ( $P_n$ ) se define según la ecuación (3-7). La resistencia de diseño es  $\phi_c P_n$ .

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3-7)$$

$$\phi_c = 0,90 \text{ (LRFD)}$$

Donde,

$F_{cr}$  = Esfuerzo crítico al pandeo por flexión dado por la ecuación (3-8), donde el factor de longitud efectiva ( $K$ ) es mayor a 1 por tratarse de un marco rígido (no arriostrado).

$$F_{cr} = \begin{cases} \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y & \text{si } \frac{KL_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ 0,877 \cdot F_e & \text{si } \frac{KL_c}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \end{cases} \quad (3-8)$$

$F_e$  = Tensión de pandeo elástico, dada por:

$$F_e = \min \left\{ \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL_c}{r}\right)^2} ; \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_c)^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y} \right\} \quad (3-9)$$

$C_w$  = Constante de alabeo del perfil.

$G$  = Módulo elástico de corte del acero, igual a 77.200 MPa.

$I_x, I_y$  = Momento de inercia en torno a los ejes principales del perfil.

$J$  = Constante torsional del perfil.

$K_z$  = Factor de longitud efectiva para pandeo torsional, igual a 1.

$L_c$  = Longitud no arriostrada lateralmente del elemento.

$r$  = Radio de giro, según el eje x.

### 3.5.3. Diseño a corte

Las vigas y columnas se diseñan a corte según las disposiciones del Capítulo G de la norma AISC 360, 2010. El corte solicitante en ambos elementos viene dado por el corte máximo que experimentan cuando se aplica la máxima fuerza del actuador hidráulico, 100 [tonf].

Ninguno de estos elementos dispone de atiesadores de rigidez, pero sí de atiesadores en las zonas de carga concentrada. Por ende, el coeficiente de pandeo por corte es  $k_v = 5$ , asegurando que los perfiles cumplan con  $\frac{h_{bw}}{t_{bw}} < 260$ .

La resistencia nominal al corte ( $V_n$ ) se estima según la ecuación (3-10). La resistencia de diseño es  $\phi_v V_n$ .

$$V_n = 0,6 \cdot F_y A_w C_v \quad (3-10)$$

$$\phi_v = 0,90 \text{ (LRFD)}$$

Donde,

$A_w$  = Área del alma, dada por  $d \cdot t_w$ .

$d$  = Profundidad del perfil.

$C_v$  = Coeficiente de corte, que depende del grado de pandeo que experimenta la viga al corte. En este caso, al tratarse de un perfil sísmicamente compacto,  $C_v$  es igual a 1,0.

### 3.5.4. Diseño a flexión

El diseño a flexión se realiza siguiendo las disposiciones del Capítulo F de la norma AISC 360, 2010. Al tratarse de perfiles sísmicamente compactos, los estados límites que aplican son la fluencia y el volcamiento.

Con el fin de asegurar que el volcamiento no controle el diseño a flexión, se debe cumplir que la longitud de volcamiento ( $L_b$ ) debe ser menor o igual que el límite  $L_p$ , determinado según la siguiente ecuación:

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3-11)$$

Donde,

$L_b$  = Longitud de volcamiento. Para la viga es  $L/4$ , y para la columna  $L/2$ .

$r_y$  = Radio de giro del perfil con respecto a su eje y.

Finalmente, la resistencia nominal a la flexión ( $M_n$ ) se estima según la ecuación (3-12). La resistencia de diseño es  $\phi_b M_n$ .

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (3-12)$$

$$\phi_b = 0,90 \text{ (LRFD)}$$

Donde,

$M_p$  = Momento plástico del elemento.

$Z_x$  = Módulo plástico del perfil, con respecto a su eje x.

#### 3.5.4.1. *Momento plástico probable en las rótulas plásticas*

El diseño de las vigas asegura que el desarrollo de rótulas plásticas fuera de las zonas protegidas sea el modo de falla que controla en dos de las cuatro probetas (SE-02(DBT1) y SE-04(DBT1)). Las zonas protegidas en una viga corresponden a sus extremos, donde no se desea la plastificación debido a su proximidad con la columna, pudiendo comprometer la estabilidad estructural.

La conexión DST posee la ventaja de alejar las rótulas plásticas de la viga (Swanson y León, 2000), por lo que se supone que éstas se forman al término del T-stub. Determinar el momento

plástico probable en las rótulas plásticas es fundamental ( $M_{pr}$ ), puesto que corresponde a la capacidad que posee la viga ante las deformaciones plásticas.

$$M_{pr} = C_{pr}R_yZ_{be}F_{yb} \quad (3-13)$$

Donde,

$C_{pr}$  = Coeficiente aplicado para considerar distintas condiciones de la conexión, como su resistencia máxima, endurecimiento por deformación, refuerzo adicional, y otras. Se define como:

$$C_{pr} = \min \left\{ \frac{F_{yb} + F_{ub}}{2F_{yb}}; 1,2 \right\} \quad (3-14)$$

$R_y$  = Relación entre la tensión de fluencia esperada y la tensión mínima de fluencia del material (AISC 341, 2010 - Tabla A3.1). Considera la sobrerresistencia del material.  
 $Z_{be}$  = Módulo plástico efectivo en la zona de rótula plástica. En las probetas diseñadas la sección de la viga es constante, por lo que  $Z_{be} = Z_{bx}$ .  
 $F_{ub}$  = Tensión mínima de rotura a la tracción del material de la viga.

Los momentos de falla de todos los elementos se transfieren a la cara de la columna para definir las solicitaciones sobre la conexión y la zona panel, por lo que se requiere el esfuerzo de corte en las rótulas plásticas para poder realizar dicha transferencia del momento  $M_{pr}$ . Éste se determina mediante equilibrio estático de momentos, definido según la ecuación (3-15).

$$V_p = \frac{2M_{pr} + P\frac{L'}{2} + W\frac{L'^2}{2}}{L'} \quad (3-15)$$

Donde,

$L'$  = Distancia entre rótulas plásticas.  
 $P$  = Fuerza puntual aplicada en el centro de la viga, que en este caso es inexistente.  
 $W$  = Carga distribuida sobre la viga, que en este caso corresponde sólo a su peso propio.

El momento plástico probable en las rótulas plásticas, transferido a la cara de la columna ( $M_f$ ) y al centro de ésta ( $M_c$ ), se determina según las ecuaciones (3-16) y (3-18), respectivamente.

$$M_f = M_{pr} + V_p L_{Tstub} \quad (3-16)$$

$$M_c = M_{pr} + V_p \left( L_{Tstub} + \frac{d_c}{2} \right) \quad (3-17)$$

Donde,

$d_c$  = Profundidad de la columna.

$L_{Tstub}$  = Largo del T-stub, que incluye el espesor de su ala y el largo de su alma

### 3.5.4.2. Momento de fluencia de la viga

El momento de diseño de iniciación de la fluencia en la viga, medido en la cara de la columna, queda definido por la ecuación (3-18).

$$M_{yf} = C_y M_f \quad (3-18)$$

Donde,

$$C_y = \frac{1}{C_{pr} \frac{Z_{be}}{S_b}} \quad (3-19)$$

$S_b$  = Módulo elástico de la viga en la zona de rótula plástica.

El valor de  $M_{yf}$  es el que se considera como la capacidad de las vigas para efectos del diseño. En los especímenes donde las vigas no son el elemento fusible,  $M_{yf}$  es el momento de falla y debe ser mayor que el momento de falla establecido en ellos. Por otro lado, en los que sí fallan por desarrollo de rótulas plásticas en las vigas, el momento de falla se define como  $M_{yf}$  mayorado por 1,2. Este factor se estipula en la sección 3.7.1.2 de las recomendaciones FEMA 350 (FEMA, 2000).

## 3.6. Diseño de perfiles T soldados

El diseño de los perfiles T (*T-stubs*), que conectan el ala de la columna con ambas alas de la viga, se realiza siguiendo la sección 3.7 del código FEMA 350 (FEMA, 2000), cuyo procedimiento se detalla en esta sección. La geometría y los parámetros utilizados en el cálculo de los modos de falla de los perfiles T se indican en la Figura 3.4.

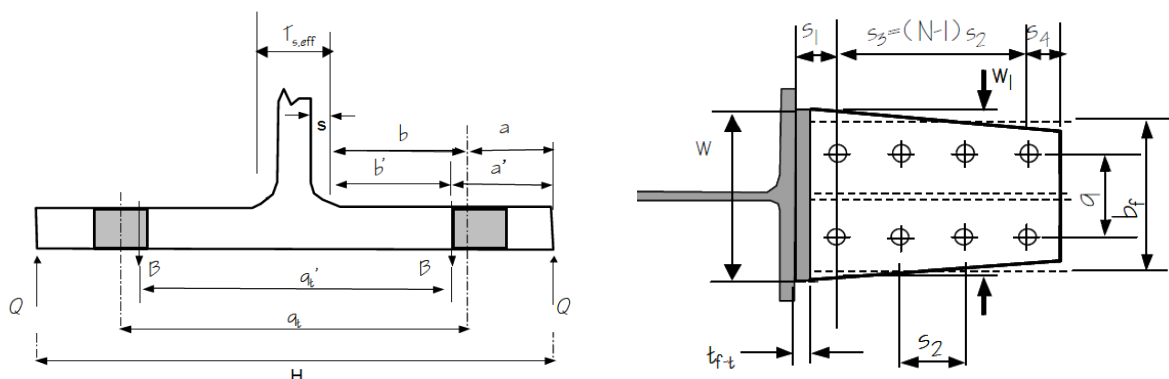


Figura 3.4: Geometría de un perfil T (FEMA 350, 2000).



### 3.6.1. Corte en los pernos del alma

El momento nominal en la cara de la columna para que ocurra la falla por corte de los pernos en el alma del T-stub se estima según la ecuación (3-20).

$$M_1 = 2n_v A_b F_{nv} d_b L_{TF1} \quad (3-20)$$

Donde,

$A_b$  = Área de un perno.

$F_{nv}$  = Capacidad nominal a corte de un perno (Tabla J3.2 - AISC 360, 2010).

$L_{TF1}$  = Razón para transferir el momento desde el centro del grupo de pernos a corte hasta la cara de la columna, dada por la ecuación (3-21).

$$L_{TF1} = \frac{L - d_c}{L - d_c - (2S_1 + S_3)} \quad (3-21)$$

$L$  = Distancia entre apoyos de las vigas.

$n_v$  = Número de pernos a corte por fila.

$d_b$  = Profundidad de la viga.

$d_c$  = Profundidad de la columna.

### 3.6.2. Fractura del área neta del alma

El momento nominal en la cara de la columna para que ocurra la falla por fractura del área neta del alma del T-stub se estima según la ecuación (3-22).

$$M_2 = F_{uT} (w_{eff} - 2(d_{perf} + 2mm)) t_{stem} (d_b + t_{stem}) L_{TF2} \quad (3-22)$$

Donde,

$F_{uT}$  = Esfuerzo nominal a la rotura del material base del perfil T.

$L_{TF2}$  = Razón para transferir el momento desde el centro de los pernos más cercanos al ala de la columna hasta la cara de esta, dada por la ecuación (3-23).

$$L_{TF2} = \frac{L - d_c}{L - d_c - 2S_1} \quad (3-23)$$

$d_{perf}$  = Diámetro de la perforación (Tabla J3.3 - AISC 360, 2010).

$t_{stem}$  = Espesor de alma del perfil T.

$w_{eff}$  = El menor valor entre el ancho de ala del perfil T ( $w$ ), el ancho de este en la primera línea de pernos, o la cantidad dada por la ecuación:

$$w_{whitmore} = g + 2 \cdot S_3 \tan \theta_{eff} \quad (3-24)$$

El valor de  $\theta_{eff}$  se fija en  $30^\circ$ , formando el ancho de Whitmore, utilizado para incluir el efecto del estrechamiento del alma producto de la diferencia de anchos entre la columna y la viga.

### 3.6.3. Fluencia de las alas

El momento nominal en la cara de la columna para que ocurra la falla por la iniciación de la fluencia de las alas del perfil T se estima según la ecuación (3-25).

$$M_3 = \frac{\left(2a' - \frac{d_{bolt}}{4}\right) wF_{yT} t_{fT}^2 (d_b - t_{stem})}{4a'b' - d_{bolt}(b' + a')} \quad (3-25)$$

Donde,

$$a' = a + \frac{d_{bolt}}{2} \quad (3-26)$$

$$b' = b - \frac{d_{bolt}}{2} \quad (3-27)$$

$F_{yT}$  = Esfuerzo nominal de fluencia del material base del perfil T.

$d_{bolt}$  = Diámetro de los pernos a tracción.

$t_{fT}$  = Espesor de ala del perfil T.

Además, se verifica el diseño de acuerdo a los mecanismos de falla propuestos por Piluso et al. (2001a) descritos en el Capítulo 2. Éste debe garantizar un mecanismo de falla tipo I o II.

### 3.6.4. Tracción de los pernos del ala

El momento nominal en la cara de la columna para que ocurra la falla por tracción de los pernos de las alas del perfil T se estima según la ecuación (3-28).

$$M_4 = 2n_t(d_b + t_{stem}) \left( F_{nt} A_b + \frac{wF_{yt} t_{fT}^2}{16a'} \right) \frac{a'}{a' + b'} \quad (3-28)$$

Donde,

$n_t$  = Número de pernos a tracción por fila.

$F_{nt}$  = Capacidad nominal a tracción de un perno (Tabla J3.2 - AISC 360, 2010).

### 3.6.5. Bloque de corte

El momento nominal en la cara de la columna para que ocurra la falla por bloque de corte en el alma del perfil T se estima según la ecuación (3-29), la cual se estipula en la sección J4.3 de la norma AISC 360 (AISC, 2010). La resistencia de diseño es  $\phi M_5$ .

$$M_5 = \begin{cases} d_b(0,6F_uA_{nv} + F_uA_{nt}) & \text{si } 0,6F_uA_{nv} \leq 0,6F_yA_{gv} \\ d_b(0,6F_yA_{gv} + F_uA_{nt}) & \text{si } 0,6F_uA_{nv} > 0,6F_yA_{gv} \end{cases} \quad (3-29)$$

$$\phi = 0,75 \text{ (LRFD)}$$

Donde,

$A_{gv}$  = Área gruesa sometida a corte.

$A_{nt}$  = Área neta sometida a tracción.

$A_{nv}$  = Área neta sometida a corte.

La falla por bloque de corte se puede manifestar de dos formas en el alma del perfil T (Figura 3.5) y de una forma en la zona de las alas de la viga conectada al perfil T (Figura 3.6). El cálculo de las áreas sometidas a tracción y a corte depende de cada forma, y se encuentra detallado a continuación.

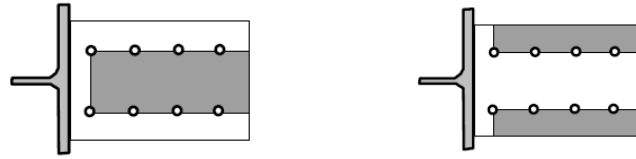


Figura 3.5: Falla por bloque de corte en el centro (izquierda) y bordes (derecha) del alma del perfil T (FEMA, 2000).

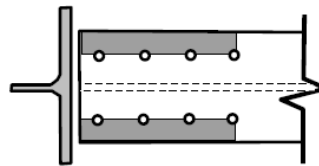


Figura 3.6: Falla por bloque de corte en las alas de la viga (FEMA, 2000).

#### 3.6.5.1. Bloque de corte en el centro del alma del T-stub

$$A_{gv} = 2t_{stem}(S_3 + S_4) \quad (3-30)$$

$$A_{nt} = (g - (d_{perf} + 2mm))t_{stem} \quad (3-31)$$

$$A_{nv} = 2t_{stem}(S_3 + S_4 - (n_v - 0,5)(d_{perf} + 2mm)) \quad (3-32)$$

### 3.6.5.2. *Bloque de corte en los bordes del alma del T-stub*

$$A_{gv} = 2t_{stem}(S_3 + S_4) \quad (3-33)$$

$$A_{nt} = (w - g - (d_{perf} + 2mm)) t_{stem} \quad (3-34)$$

$$A_{nv} = 2t_{stem} (S_3 + S_4 - (n_v - 0,5)(d_{perf} + 2mm)) \quad (3-35)$$

### 3.6.5.3. *Bloque de corte en las alas de la viga*

$$A_{gv} = 2t_{stem}(S_1 + S_3 - t_{fT}) \quad (3-36)$$

$$A_{nt} = (b_{bf} - g - (d_{perf} + 2mm)) t_{stem} \quad (3-37)$$

$$A_{nv} = 2t_{stem} (S_1 + S_3 - t_{fT} - (n_v - 0,5)(d_{perf} + 2mm)) \quad (3-38)$$

## 3.7. Placas de continuidad

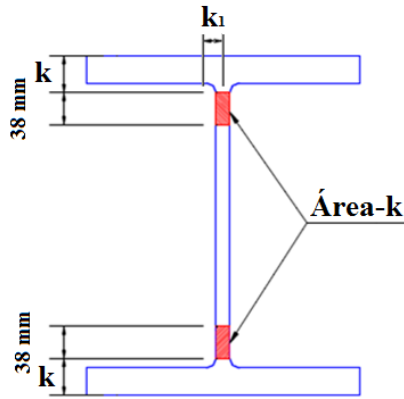
Las placas de continuidad se ubican entre las alas de la columna, al nivel de las alas de las vigas, delimitando la zona panel. Su función es rigidizar la zona de conexión para asegurar que se transfieran de forma adecuada las cargas de tracción y compresión que inducen las alas de las vigas sobre la columna. Para la conexión DST, las placas de continuidad se requieren cuando no se cumple alguna de las siguientes condiciones para los espesores de ala y alma de la columna, respectivamente (FEMA 350, 2000):

$$t_{cf} \geq 1,5 \cdot t_{fT} \quad (3-39)$$

$$t_{cw} \geq \frac{2 \cdot M_f}{(d_b - t_{stem})(6k + c)F_{yc}} \quad (3-40)$$

Donde,

- $k$  = Dimensión del espesor de ala de la columna más el tamaño de soldadura de filete entre las alas y el alma del perfil, o bien, más el radio de laminación de éste.
- $c$  = Longitud del “área-k” de la columna, correspondiente a la zona del alma de un perfil que se extiende desde el punto donde termina la dimensión  $k$ , hasta 38 [mm] dentro del alma (ver Figura 3.7).



**Figura 3.7: Definición del “área-k” (Fuente: Alacero).**

Si las placas de continuidad son requeridas, se verifica también la condición (3-41), y se dimensionan para que cumplan las especificaciones de la sección J10.8 de la AISC 360-10.

$$t_{cf} \geq t_{fT} \quad (3-41)$$

Además, por tratarse de una conexión de interior, el espesor de las placas de continuidad ( $t_{pc}$ ) debe ser igual al mayor espesor entre el alma del perfil T y las alas de las vigas.

$$t_{pc} \geq \max\{t_{stem}; t_{bf}\} \quad (3-42)$$

### 3.8. Zona panel

La zona panel se define como la región del alma de la columna a nivel de la unión con las vigas. Es una zona flexible, que experimenta fluencia por corte y deformación angular producto del par de fuerzas tracción-compresión proveniente de las vigas.

#### 3.8.1. Esfuerzo de corte en la zona panel

La sollicitación de corte en la zona panel es difícil de determinar, puesto que se requiere de modelos más refinados con un alto costo computacional y compleja definición. Por esta razón, se utiliza como alternativa estimar los esfuerzos internos en ella mediante un equilibrio de fuerzas en el nudo, indicado en la Figura 3.8.

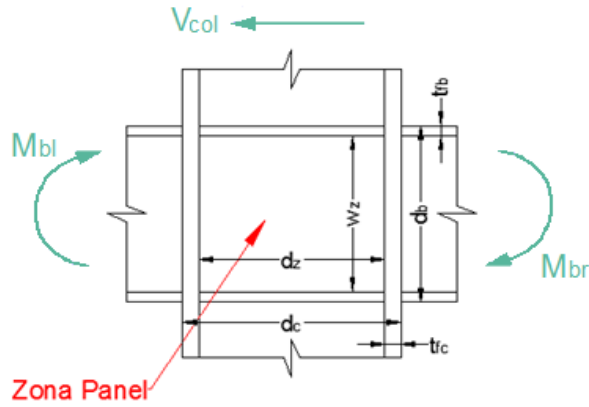


Figura 3.8: Diagrama de cuerpo libre de la zona panel.

La ecuación resultante para estimar la capacidad al corte de la zona panel ( $V_{zp}$ ) es la siguiente:

$$V_{zp} = \frac{M_{bl} + M_{br}}{d_b} - V_{col} \quad (3-43)$$

Donde,

$M_{bl}$  ( $M_{br}$ ) = Momento actuante en la cara izquierda (derecha) de la zona panel, correspondiente al momento de falla que controla en la cara de la columna: momento de fluencia en las vigas ( $M_{rot}$ ) para todas las probetas, salvo para SE-01(DBT2) donde controla la fluencia en las alas del T-stub ( $M_3$ ).

$V_{col}$  = Esfuerzo de corte en la columna ubicada por encima del nudo.

$$V_{col} = \frac{2 \cdot M_{br}}{L - d_c} \cdot \frac{L}{h} \quad (3-44)$$

$h$  = Altura entre piso, que en este caso corresponde a 3,56 [m].

### 3.8.2. Resistencia a la fluencia por corte de la zona panel

La resistencia nominal a la fluencia por corte de la zona panel ( $R_n$ ) está establecida en la sección J10.6 del código AISC 360-10. En este caso no se considera el efecto de su deformación en la estabilidad del marco, y se procura que se cumpla  $P_r \leq 0,4P_c$ . La resistencia de diseño es  $\phi R_n$ .

$$R_n = \begin{cases} 0,60F_{yc}d_c t_{pz} & \text{si } P_r \leq 0,4P_c \\ 0,6F_{yc}d_c t_{pz} \left(1,4 - \frac{P_r}{P_c}\right) & \text{si } P_r > 0,4P_c \end{cases} \quad (3-45)$$

$$\phi = 1,0 \text{ (LRFD)}$$

Donde,

$P_c$  = Resistencia axial nominal de fluencia de la columna ( $P_y$ , LRFD).

- $P_r$  = Solicitación axial en la columna ( $P_u$ ); nula en estos ensayos.  
 $t_{pz}$  = Espesor total de la zona panel, incluyendo planchas de refuerzo de existir.

Es importante que el diseño de esta zona no esté controlado por el pandeo local por corte en ella. Para evitar que éste ocurra antes de la fluencia por corte, se debe cumplir con la condición (3-46), establecida en las disposiciones sísmicas de la AISC.

$$t_{cw} \geq \frac{d_z + w_z}{90} \quad (3-46)$$

Dicho esto, en los especímenes donde no debe fallar la zona panel, se escoge un espesor de alma adecuado que le permita resistir el corte solicitante en ella, para no requerir de refuerzo adicional y evitar el pandeo local. En las probetas donde sí se espera que ésta se plastifique, SE-03(DBT1) y SE-04(DBT1), se provee una columna de espesor de alma que genere una resistencia  $\phi R_n$  menor e igual, respectivamente, a la solicitación de corte, pero asegurando de igual forma que no ocurra el pandeo local por corte antes.

### 3.9. Llave de corte

La llave de corte va soldada con doble filete al ala de la columna y apernada al alma de la viga. Ésta se dimensiona para un corte de diseño dado por la ecuación (3-47) y estipulado por la FEMA 350.

$$V_{st} = 2 \frac{M_f}{L - d_c} + V_g \quad (3-47)$$

Donde,

- $V_g$  = Fuerza gravitacional mayorada, sin embargo, en este caso no es representativo mayorar la carga existente para efectos de los ensayos.

Su resistencia se calcula para el estado límite de aplastamiento de los pernos según la sección J3.10 de la AISC 360-05, y para los estados límites de fluencia de su área gruesa, ruptura de su área neta, y falla por bloque de corte según la sección J4 de dicho código. Se escoge un espesor de placa de tal manera que ninguno de ellos controle en las probetas diseñadas.

### 3.10. Soldaduras

El diseño de todas las soldaduras requeridas se realiza según la sección J2 de la AISC 360-10. La soldadura que conecta el alma con las alas de un T-stub se ve solicitada por el esfuerzo de tracción generado por el momento de falla en la cara de la columna. El tipo de soldadura que se utiliza es doble filete en los dos T-stubs de un lado de la conexión, y de penetración completa

(CJP: *Complete Joint Penetration*) en los dos del otro lado, con el fin de comparar su desempeño bajo condiciones de carga cíclica.

La soldadura entre los atiesadores y las alas de la viga o columna debe ser de penetración completa. Las cuatro soldaduras CJP que se deben disponer se encuentran sometidas a tracción, y su resistencia nominal total a este esfuerzo está controlada por la resistencia del metal base.

La soldadura entre los atiesadores y el alma de la viga o columna puede ser de penetración completa o de filete. En este caso se utiliza doble soldadura de filete, y la sollicitación total sobre cada par de filetes ( $R_u$ ) se define según FEMA 350 como:

$$R_u = 0,6 \cdot t \cdot L_{net} \cdot F_y \quad (3-48)$$

Donde,

$L_{net}$  = Largo total del contacto entre el atiesador y el alma de la columna.

### 3.11. Materiales

#### 3.11.1. Acero estructural

El acero base empleado en las vigas, columnas y perfiles T es de calidad ASTM A36. Las propiedades nominales utilizadas en el diseño son las siguientes:

$\gamma_s = 7850 \left[ \frac{kg}{cm^3} \right]$  : Densidad.

$F_y = 250 [MPa]$  : Tensión nominal mínima de fluencia.

$F_u = 400 [MPa]$  : Tensión nominal mínima de rotura.

#### 3.11.2. Pernos de conexión

La conexión apernada viga-columna, de tipo pretensada, se materializa con pernos de alta resistencia de calidad ASTM A490-N, cuyas propiedades nominales están especificadas en la norma AISC 360-10, y son las siguientes:

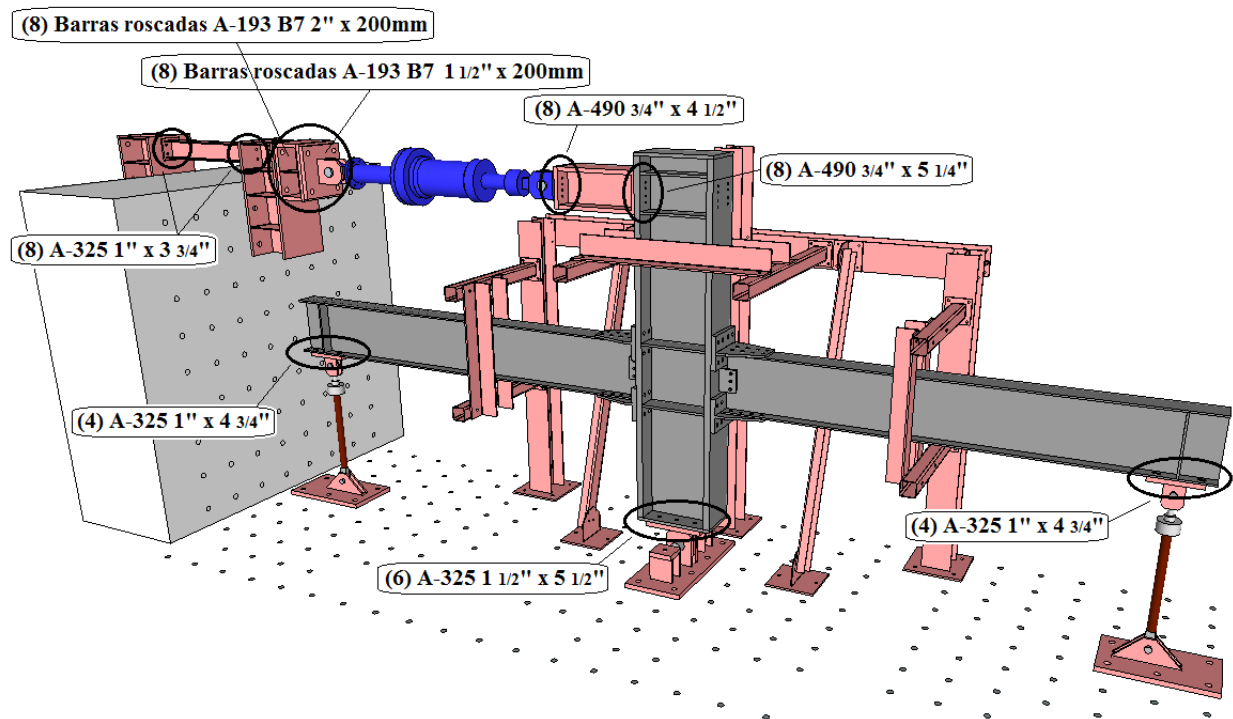
$F_{nt} = 780 [MPa]$  : Resistencia nominal a la tracción.

$F_{nv} = 457 [MPa]$  : Resistencia nominal al corte, cuando los hilos no se excluyen de los planos de corte.



El diámetro de los pernos que conectan los T-stubs con las alas de columnas y vigas es de 1 3/8", y el de los pernos que conectan las llaves de corte con el alma de las vigas es de 1". El largo de cada uno, el uso de golillas y tuercas y el tipo de apriete se determinan según la especificación RCSC "*Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts*" (RCSC, 2014). La pretensión de cada perno se realiza mediante el método del pretensado con llave de torque calibrada, por lo tanto, cada perno posee una tuerca de calidad ASTM A194 2H con una golilla plana F436 debajo de ésta.

Las conexiones apernadas necesarias para ensamblar cada espécimen y el actuador hidráulico también son de tipo pretensada, dado que se ven directamente involucradas en los ensayos. Los pernos estructurales utilizados en dichas conexiones se señalan en el esquema de la Figura 3.9, cuyos diámetros, calidad y largos fueron definidos por Núñez (2016).



**Figura 3.9: Pernos estructurales fuera de la conexión, involucrados directamente en cada ensayo.**

Las propiedades mecánicas nominales de los pernos estructurales ASTM A-325 son las siguientes (AISC 360-10):

$F_{nt} = 620 [MPa]$  : Resistencia nominal a la tracción.

$F_{nv} = 372 [MPa]$  : Resistencia nominal al corte, cuando los hilos no se excluyen de los planos de corte.

### 3.11.3. Electrodo de soldadura

El electrodo de soldadura especificado para todas las soldaduras de los especímenes es de calidad AWS E70xx, el que proporciona la siguiente resistencia:

$$F_{E_{xx}} = 70 [ksi] = 482,6 [MPa]$$

### 3.12. Modificaciones en el diseño original

El diseño original de las cuatro probetas contempla una columna y dos vigas por ensayo. Sin embargo, al final del primer ensayo llevado a cabo (SE-01) se fracturan los hilos de la celda de carga ubicada en el apoyo de la viga oeste, imposibilitando su uso para el resto de los ensayos. Es por esto, que el espécimen SE-02 se reduce a una columna y una viga, viéndose disminuidas en un 50% la sollicitación en su zona panel y la fuerza aplicada por el actuador hidráulico para alcanzar su falla. Al momento de ejecutar estas modificaciones ya se contaba con dos vigas y cuatro T-stubs para el ensayo del espécimen SE-02, por lo tanto, se decide repetir el ensayo de éste para ocupar de todas maneras la otra viga y los dos T-stubs sobrantes.

Adicionalmente, en el primer ensayo las vigas experimentan un volcamiento notorio en sus extremos. Para evitar este fenómeno en los siguientes ensayos, se diseña y construye una nueva restricción lateral dispuesta lo más cerca posible del extremo de cada viga, la cual se describe en el Capítulo 5. Dicho esto, el esquema para el segundo ensayo del espécimen SE-02 es el que se presenta en la Figura 3.10.

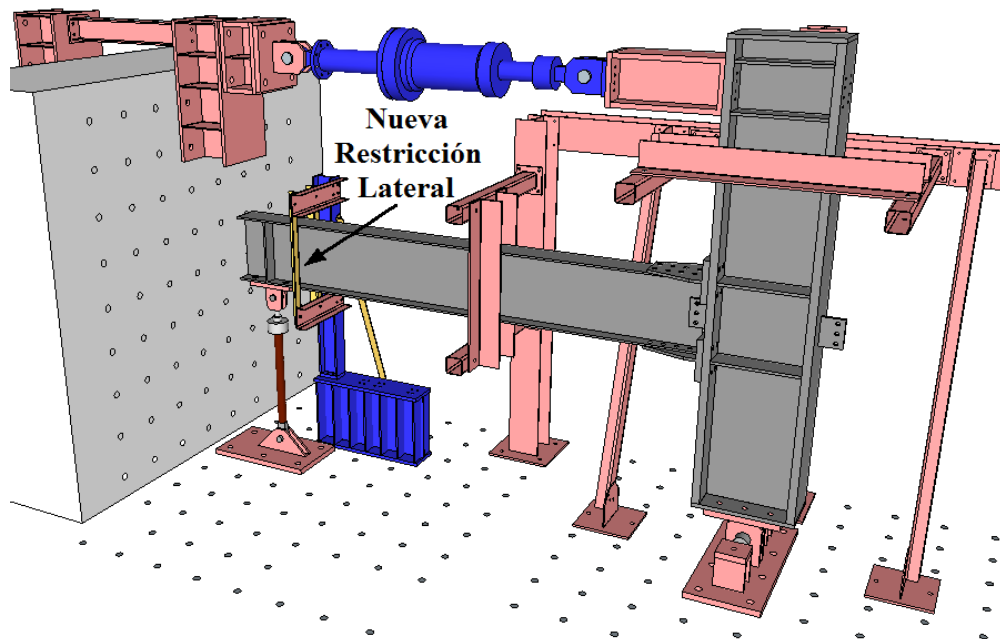


Figura 3.10: Esquema del espécimen SE-02 modificado.

### 3.13. Dimensiones finales

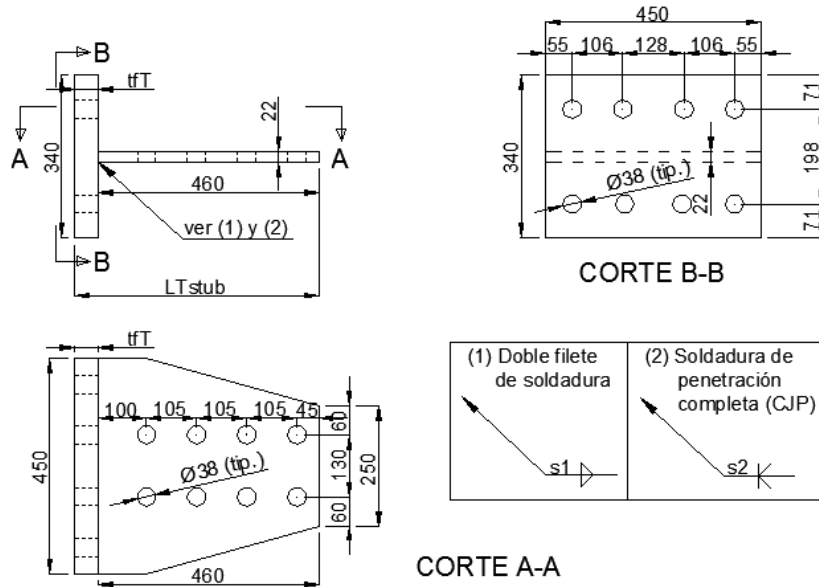
Las cuatro configuraciones en estudio se dimensionan a partir del diseño descrito en este capítulo, cuyos cálculos se presentan en detalle en el Apéndice A. Los parámetros más relevantes para las vigas, columnas y T-stubs se indican en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4.

**Tabla 3.3: Dimensiones de vigas y columnas para cada espécimen.**

Espécimen	$d_c$ mm	$b_{cf}$ mm	$t_{cf}$ mm	$t_{cw}$ mm	$L_{column}$ mm	$d_b$ mm	$b_{bf}$ mm	$t_{bf}$ mm	$t_{bw}$ mm	$L_{viga}$ mm
SE-01(DBT2)	800	450	63	35	3595	600	250	16	12	4330
SE-02(DBT1)	800	450	63	35	3595	600	250	16	12	4330
SE-03(DBT1)	800	450	63	18	3595	600	250	16	12	4330
SE-04(DBT1)	800	450	63	25	3595	600	250	16	12	4330

**Tabla 3.4: Parámetros de cada T-stub (ver Figura 3.11).**

T-stub	$t_{fT}$ mm	$t_{stem}$ mm	$L_{Tstub}$ mm	$W$ mm	$H$ mm	$s_1$ mm	$s_2$ mm	N° pernos a corte	N° pernos a tracción
DBT1	50	22	510	450	340	18	11	8	8
DBT2	25	22	485	450	340	8	11	8	8



**Figura 3.11: Dimensiones de un T-stub.**

A continuación se presenta el detalle de cada conexión, donde el color gris indica el(los) elemento(s) que debe(n) controlar la falla. Los parámetros que varían son el espesor de ala de los T-stubs y el espesor de alma de la columna. Cabe destacar que ninguna columna posee doble placa de refuerzo, pero sí todas cuentan con placas de continuidad.

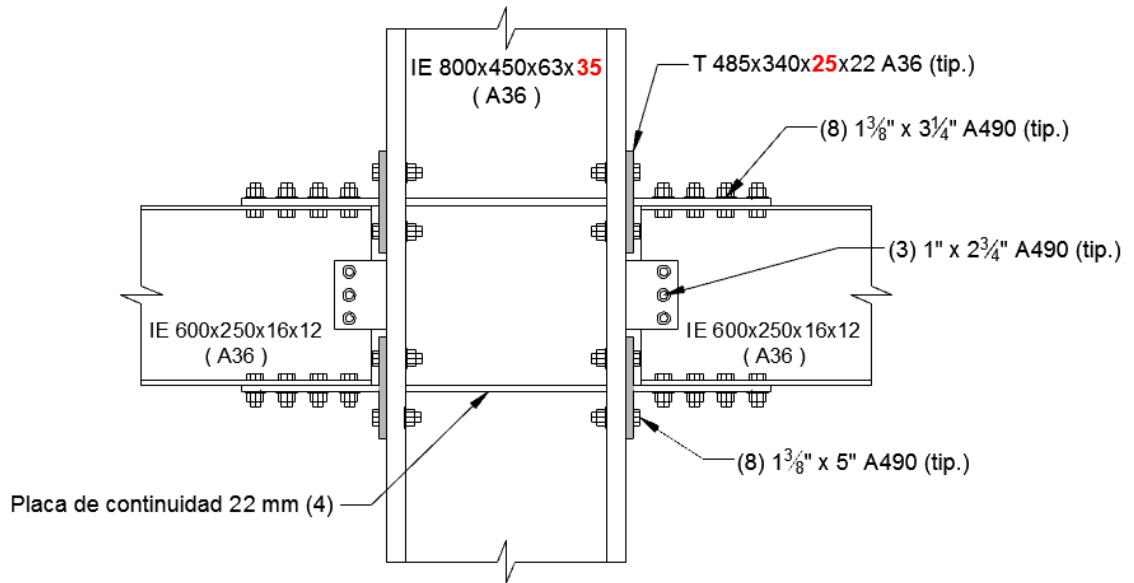


Figura 3.12: Detalle de conexión de SE-01(DBT2).

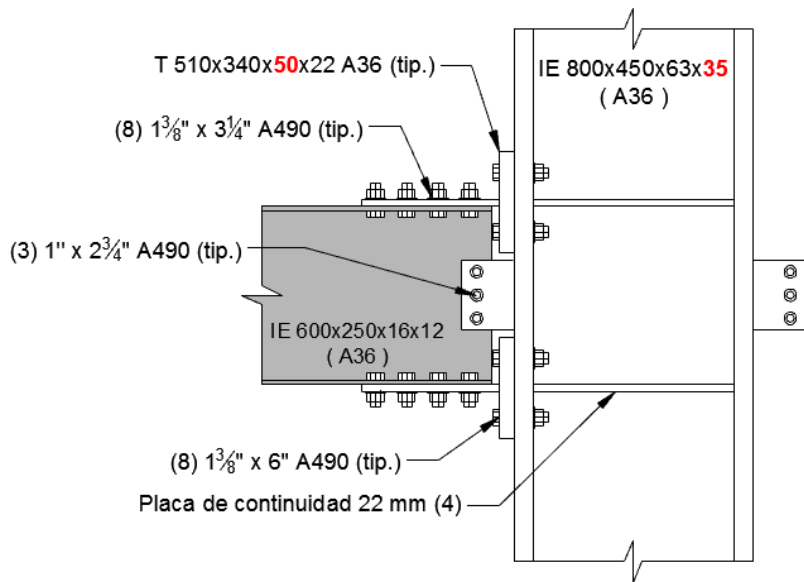
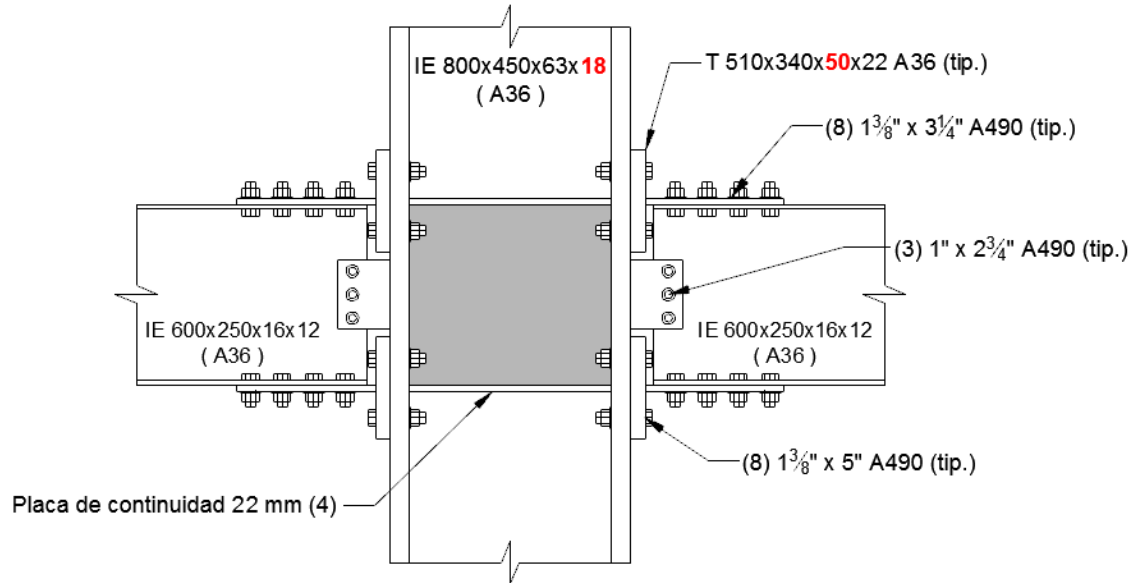
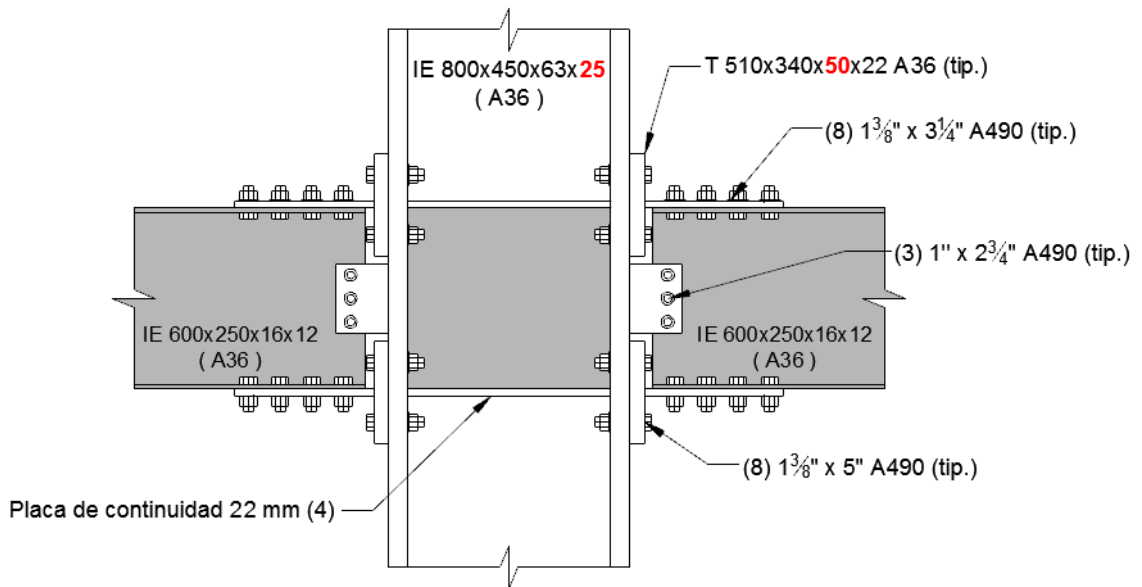


Figura 3.13: Detalle de conexión de SE-02(DBT1).



**Figura 3.14: Detalle de conexión de SE-03(DBT1).**



**Figura 3.15: Detalle de conexión de SE-04(DBT1).**

Una vez concretado el completo dimensionamiento de los especímenes, se elaboran los planos necesarios para su fabricación, los cuales se encuentran en el Apéndice D. Éstos son confeccionados utilizando la versión educacional del software *AutoCAD 2014*, y enviados a la maestría encargada de la fabricación: EDYCE Metalúrgica S.A.

### 3.14. Momentos de falla en la cara de la columna

Los momentos de falla en la cara de la columna  $M_{fail}$  predichos por las recomendaciones FEMA 350 para cada espécimen se muestran en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5: Valores asociados a la falla de cada espécimen.**

Espécimen	$t_{fT}$ mm	$t_{cw}$ mm	$1,2M_{yf}$ ton·m	$M_1$ ton·m	$M_2$ ton·m	$M_3$ ton·m	$M_4$ ton·m	$M_5$ ton·m	$M_{zp}$ ton·m
SE-01(DBT2)	25	35	130,2	230,1	215,2	67,6	234,4	153,4	157,6
SE-02(DBT1)	50	35	131,2	231,7	216,6	173,4	286,9	153,4	315,3
SE-03(DBT1)	50	18	131,2	231,7	216,6	173,4	286,9	153,4	105,4
SE-04(DBT1)	50	25	131,2	231,7	216,6	173,4	286,9	153,4	146,4

$M_{yf}$  : Momento de plastificación en la viga.

$M_1$  : Momento de falla de los pernos a corte en alma de los T-stubs.

$M_2$  : Momento de falla por ruptura del área neta del alma de los T-stubs.

$M_3$  : Momento de falla por fluencia de las alas de los T-stubs (apalancamiento).

$M_4$  : Momento de falla de los pernos a tracción en las alas de los T-stubs.

$M_5$  : Momento de falla por bloque de corte en el alma de los T-stubs.

$M_{zp}$  : Momento de falla por fluencia por corte de la zona panel.

Los valores de la reacción  $R$  que debe experimentar el apoyo de cada viga para alcanzar el momento de falla en cada ensayo, junto con la fuerza  $P$  que debe aplicar el actuador hidráulico en ese instante, se presentan en la Tabla 3.6. Estas fuerzas se definen según las ecuaciones (3-49), (3-50) y (3-51).

$$R = \frac{2 \cdot M_{fail}}{L - d_c} \quad (3-49)$$

$$P_{1viga} = R \cdot \frac{L}{h} \quad (3-50)$$

$$P_{2vigas} = \frac{1}{2} \cdot R \cdot \frac{L}{h} \quad (3-51)$$

Donde,

$h$  = Altura entre piso. Corresponde a la distancia entre la rótula base de la columna y el punto de aplicación de la fuerza del actuador hidráulico, cuyo valor es de 3,56 [m].

$L$  = Largo total de viga. Corresponde a la distancia entre los apoyos de las vigas, cuyo valor es de 9 [m].

**Tabla 3.6: Valores de R (reacción en apoyos de vigas) y P (fuerza actuador) para alcanzar la falla.**

Espécimen	$M_{fail}$ ton·m	R ton	P ton
SE-01(DWT2)	67,6	16,5	41,7
SE-02(DWT1)	131,2	32	40,5
SE-03(DWT1)	105,4	25,7	65
SE-04(DWT1)	131,2	32	80,9

# Capítulo 4. Ensayo de materiales

En el presente capítulo se entregan las propiedades mecánicas reales de los materiales utilizados en la fabricación y ensamble de cada espécimen, junto con una descripción de la metodología de ensayo sobre los cupones de material elaborados para obtener dichas propiedades.

## 4.1. Probetas planas de acero ASTM A36

### 4.1.1. Metodología de ensayo

Se confeccionan nueve probetas planas a partir de las tres planchas de acero ASTM A36 entregadas por maestranza, material con el que fueron fabricados los especímenes. Las planchas poseen espesores  $T = 12$  [mm],  $22$  [mm] y  $25$  [mm], correspondientes al alma de las vigas, alma de los T-stubs, y alas de cuatro de los 16 T-stubs, respectivamente.

La metodología de ensayo cumple con lo estipulado en la norma internacional ASTM E8/E8M – 15. La geometría y dimensiones de cada probeta son las establecidas para una probeta estándar de  $40$  mm de ancho en la FIG. 1 de la norma mencionada, y que se observan en la Figura 4.1 a continuación.

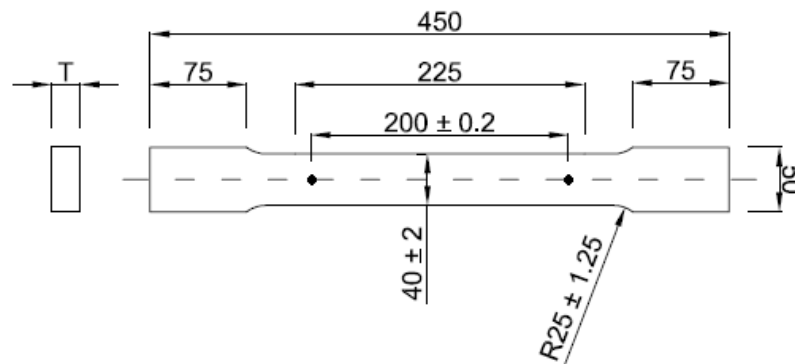


Figura 4.1: Geometría y dimensiones en [mm] de cada probeta plana, según ASTM E8/E8M – 15.

Las probetas de espesor  $12$  [mm] se ensayan en el Departamento de Ingeniería Civil de la U. de Chile, y cuyas dimensiones iniciales de interés se encuentran en la Tabla 4.1. Son sometidas a tracción por una máquina universal de carga hasta la ruptura de cada una, la cual va registrando la carga y desplazamiento durante el ensayo. Adicionalmente, se emplea un extensómetro para medir de forma precisa la deformación de la probeta como se muestra en la Figura 4.2, cuya zona libre inicial es  $25$  [mm].



**Tabla 4.1: Parámetros iniciales de cada probeta e = 12mm.**

Probeta	Espesor	Ancho	$L_o$
	[mm]	[mm]	[mm]
A36/12-01	12,15	40,05	206,5
A36/12-02	12,15	40,10	205,50
A36/12-03	12,20	40,15	204,00



(a)



(b)

**Figura 4.2: (a) Probetas planas de espesor 12 [mm] antes de ser ensayadas; (b) probeta A36/12-01 con el extensómetro instalado (derecha).**

Los ensayos de las probetas de 22 y 25 [mm] son encargados a SCI CHILE S.A. (Control & Inspección), y ejecutados bajo la norma ASTM E8M. Las dimensiones iniciales de las seis probetas enviadas a la empresa se encuentran en la Tabla 4.2 y se muestran en la Figura 4.3.

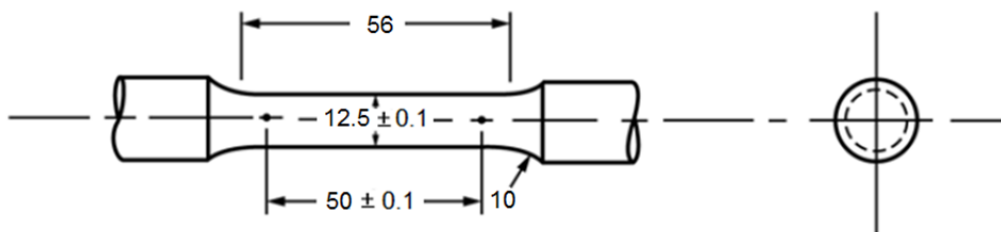
**Tabla 4.2: Resumen de muestras enviadas a SCI (Apéndice B).**

Número de Muestra	Espesor [mm]	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Norma del Material	Norma de Ensayo
E-160035-1	25,35	450	38,30	ASTM A36	ASTM E8
E-160035-2	25,50	450	38,20		
E-160035-3	25,20	450	39,15		
E-160035-4	22,30	450	39,45		
E-160035-5	22,35	450	39,60		
E-160035-6	22,40	450	39,50		



**Figura 4.3: Muestras enviadas a SCI (Apéndice B).**

A partir de las probetas planas enviadas, SCI confecciona probetas cilíndricas estándar según la geometría y dimensiones nominales establecidas para la “probeta 1” de la FIG. 8 de la norma ASTM E8, y que se encuentran indicadas en la Figura 4.5. Las dimensiones iniciales reales de interés se encuentran en la Tabla 4.3.



**Figura 4.4: Geometría y dimensiones en [mm] de cada probeta cilíndrica A36, según ASTM E8.**

**Tabla 4.3: Parámetros iniciales de cada probeta confeccionada por SCI (Apéndice B).**

Probeta	Diámetro [mm]	Sección inicial [mm <sup>2</sup> ]	Longitud inicial [mm]
E-160035-1	12,54	123,51	50
E-160035-2	12,51	122,91	50
E-160035-3	12,51	122,91	50
E-160035-4	12,45	121,74	50
E-160035-5	12,51	122,72	50
E-160035-6	12,51	122,91	50

#### 4.1.2. Presentación y análisis de resultados

Los resultados registrados proporcionan los siguientes parámetros de interés: Esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, módulo de Young, alargamiento y estricción.

Las curvas Tensión/Deformación de las tres probetas de 12 [mm] de espesor ensayadas en el Dpto. de Ingeniería Civil se encuentran en la sección B.1 del Apéndice B. En la Figura 4.5 se muestran estas probetas después de ser ensayadas, cuyas dimensiones finales se observan en la Tabla 4.4 y son las que permiten determinar los porcentajes de alargamiento y estricción.



Figura 4.5: Probetas planas de espesor 12 [mm] post-ruptura.

Tabla 4.4: Dimensiones post-ruptura de las probetas planas de espesor 12 [mm].

Probeta	Espesor post-ruptura [mm]	Ancho post-ruptura [mm]	L post-ruptura [mm]
A36/12-01	9,00	29,80	270,00
A36/12-02	9,65	30,65	259,00
A36/12-03	9,65	30,65	259,00

Es fundamental destacar que los valores de deformación proporcionados por la máquina universal no son confiables, por lo tanto, el esfuerzo de fluencia y el módulo de Young se obtienen a partir de los datos que brinda el extensómetro empleado, aplicando el método “*Offset method 0,2%*” descrito en la sección 7.71 de la norma ASTM E8/E8M – 15. De todas maneras, en la sección B.1 del Apéndice B se encuentran las deformaciones registradas por ambos equipos: máquina universal de carga y extensómetro.

Los valores de carga que brinda la máquina universal sí son utilizados para determinar la resistencia a la tracción del acero ensayado. En la Tabla 4.5 se presentan las propiedades mecánicas obtenidas para las probetas planas de 12 [mm] de espesor.

**Tabla 4.5: Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de probetas planas de espesor 12 [mm].**

Probeta	Esfuerzo de fluencia, $F_y$ [MPa]	Resistencia a la tracción, $F_u$ [MPa]	Módulo de Young, $E$ [MPa]	Alargamiento $\epsilon$ [%]	Estricción [%]
A36/12-01	288,9	437,3	189380	30,8	44,9
A36/12-02	291,8	444,4	199770	26,0	39,3
A36/12-03	301,0	451,8	213070	27,0	39,6
Promedio:	293,9	444,5	200740	27,9	41,3

Las curvas Tensión/Deformación de las seis probetas de 22 y 25 [mm] de espesor ensayadas por SCI CHILE se encuentran en el informe de la sección B.1 del Apéndice B. En la Figura 4.6 se muestran estas probetas después de ser ensayadas, cuyas dimensiones finales se observan en la Tabla 4.6.

Las propiedades mecánicas obtenidas para las probetas ensayadas por SCI se muestran en la Tabla 4.7.

**Figura 4.6: Probetas ensayadas por SCI post-ruptura (Apéndice B).****Tabla 4.6: Dimensiones post-ruptura de probetas ensayadas por SCI (Apéndice B).**

Probeta	Sección final [mm <sup>2</sup> ]	Longitud final [mm]
E-160035-1	47,05	68,40
E-160035-2	42,55	66,63
E-160035-3	45,00	65,76
E-160035-4	40,15	65,94
E-160035-5	57,72	67,97
E-160035-6	38,26	67,38

**Tabla 4.7: Propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos realizados por SCI (Apéndice B).**

Probeta	Esfuerzo de fluencia, $F_y$ [MPa]	Resistencia a la tracción, $F_u$ [MPa]	Alargamiento $\epsilon$ [%]	Estricción [%]
E-160035-1	268	452	36,8	61,9
E-160035-2	262	448	33,3	65,4
E-160035-3	268	451	31,5	63,4
E-160035-4	272	449	31,9	67,0
E-160035-5	283	450	35,9	69,3
E-160035-6	272	451	34,8	68,9
Promedio:	270,8	450,2	34,0	66,0

El promedio de los resultados de todas las probetas de acero ensayadas se presentan en la Tabla 4.8. Estos valores se encuentran dentro del rango aceptable por la especificación estándar ASTM A36 (2008), donde se exige una resistencia a la tracción entre 400 y 550 [MPa], una tensión mínima de fluencia de 250 [MPa], y un alargamiento mínimo de 23%.

**Tabla 4.8: Promedio de las propiedades mecánicas del acero ASTM A36.**

Propiedades		Promedio
$F_y$	[MPa]	282,4
$F_u$	[MPa]	447,3
$E$	[MPa]	200740
$\epsilon$	[%]	31,0

## 4.2. Pernos de acero ASTM A490

### 4.2.1. Metodología de ensayo

Se ensayan a tracción tres pernos de calidad ASTM A490 de alta resistencia, con el fin de conocer las propiedades mecánicas reales de los pernos utilizados en la conexión DST de los cuatro especímenes. Éstos fueron encargados a CESMEC S.A. (Centro de Estudios de Medición y Certificación de Calidad), y ejecutados bajo la norma ASTM E8M – 04.

El diámetro de los tres pernos es de 1 3/8”, sin embargo, se confeccionan probetas cilíndricas estándar a partir de cada uno con la geometría y dimensiones establecidas para la “probeta 2” con sección reducida de cuatro veces el diámetro de la FIG. 8 de la norma mencionada. Estas dimensiones son las que se observan en la Figura 4.7.

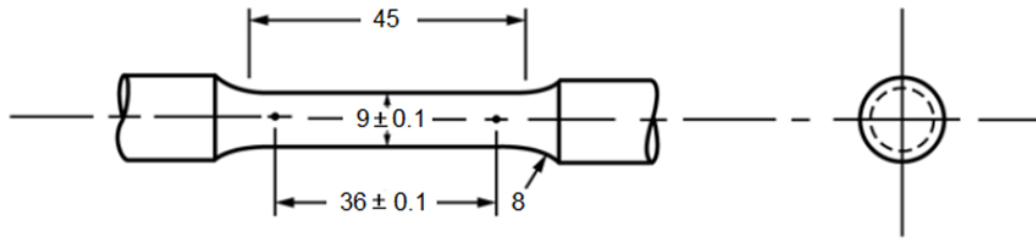


Figura 4.7: Geometría y dimensiones en [mm] de cada probeta cilíndrica, según ASTM E8 – 04.

#### 4.2.2. Presentación y análisis de resultados

Los parámetros de interés que se pueden determinar a partir de los datos registrados son: Esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, módulo de Young, alargamiento y estricción. Las curvas Tensión/Deformación obtenidas de los ensayos realizados por CESMEC de las tres probetas cilíndricas de acero ASTM A490 se presentan en el informe de la sección B.2 del Apéndice B. Sus propiedades mecánicas se muestran en Tabla 4.9 y fotografías de cada probeta ensayada en la Figura 4.8.

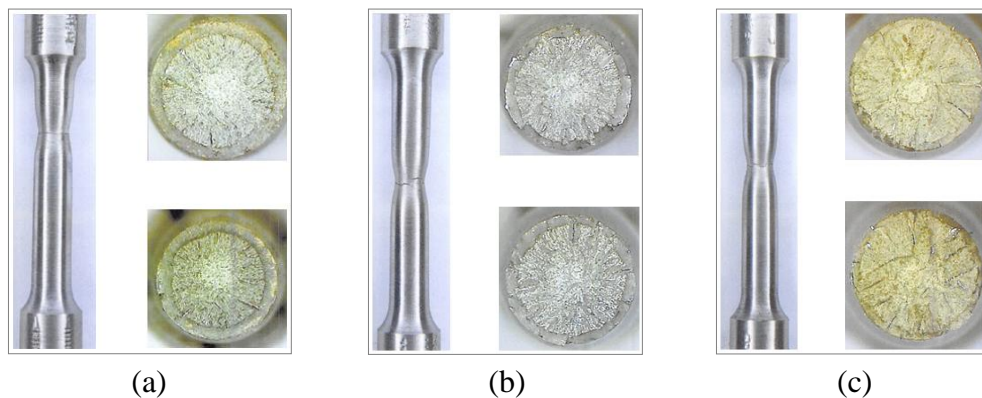


Figura 4.8: (a) Probeta A490 – 01, (b) Probeta A490 – 02 y (c) Probeta A490 – 03 (Apéndice B).

Tabla 4.9: Propiedades mecánicas de las probetas ensayadas por CESMEC (Apéndice B).

Probeta	Diámetro [mm]	Esfuerzo de fluencia, $F_y$ [MPa]	Resistencia a la tracción, $F_u$ [MPa]	Módulo de Young, $E$ [MPa]	Alargamiento $L_o=36$ mm [%]	Estricción [%]
A490 - 01	9,07	1209	1281	198347	16,2	42,0
A490 - 02	9,04	1142	1226	196551	14,2	47,0
A490 - 03	8,98	1096	1232	192546	14,5	49,8
Promedio:		1149	1246,3	195814,7	15	46,3

La especificación estándar para pernos de alta resistencia ASTM A490M (2010) demanda una tensión mínima de fluencia de 940 [MPa], una resistencia a la tracción entre 1040 y 1210 [MPa], un alargamiento mínimo de 14% y una reducción de área mínima de 40%. El promedio de los

resultados cumple con todos los requerimientos mencionados (Tabla 4.10), salvo con la resistencia máxima a la tracción, superándola en un 3%.

**Tabla 4.10: Promedio de las propiedades mecánicas del acero ASTM A490.**

Propiedades		Promedio
$F_y$	[MPa]	1149,0
$F_u$	[MPa]	1246,3
$E$	[GPa]	195,8
$\varepsilon$	[%]	15,0

# Capítulo 5. Metodología experimental e instrumentación

En el presente capítulo se detalla el procedimiento seguido durante la etapa experimental, el cual involucra el posicionamiento y conexión de piezas, tensado de barras de anclaje, pretensión de pernos de alta resistencia e instrumentación de los especímenes de ensayo.

## 5.1. Montaje experimental

El montaje experimental que contempla este estudio se lleva a cabo en el Laboratorio Experimental de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, tal como se menciona en el Capítulo 3. Desde el principio, este lugar alberga todo el material fabricado y despachado por la maestranza EDYCE, el cual consta de 3 columnas, 8 vigas y 16 perfiles T. Al momento del despacho, se verifican las dimensiones de cada elemento, incluyendo el tamaño y posición de las perforaciones.

El laboratorio cuenta con un puente grúa marca *Felco* de 10 [ton] de capacidad, sin embargo, por su antigüedad recomiendan no usarlo para izar más de 5 [ton]. Éste se utiliza durante toda la etapa experimental, previa capacitación por personal de IDIEM, para desplazar y posicionar las piezas de acero.

Antes de comenzar a posicionar las probetas de ensayo, se termina de montar la estructura diseñada por Núñez (2016) y se procede a tensar las barras de anclaje de todos sus apoyos como se describe en la sección 5.1.1. Se verifica que coincidan las perforaciones de las probetas con las piezas que se conectan a ellas, y se ajustan aquellas que no lo hagan con un taladro magnético y una fresa anular HSS toma *weldon* adecuada. En paralelo, se manda a fabricar una rótula para el actuador hidráulico al Taller de Procesos Mecánicos del Dpto. de Ingeniería Mecánica, y se compran dos planchas de acero 446x200x25 para suplir 25 [mm] de altura faltantes en los apoyos de las vigas.

El paso siguiente es montar la columna contemplada para el primer y segundo espécimen en su posición final, para luego conectarle la(s) viga(s) mediante los perfiles T soldados. En el primer ensayo (SE-01), los T-stubs del lado oeste poseen soldadura de filete y los del lado este poseen soldadura de penetración completa, mientras que para el espécimen SE-02, en su primer ensayo (SE-02(a)) los dos únicos T-stubs poseen soldadura de penetración completa, y en el segundo (SE-02(b)) ambos poseen soldadura de filete. Al tener montado cada espécimen completo, se aplica un torque a cada perno involucrado directamente en el ensayo (conexión, apoyos de vigas y piezas que sostienen el actuador hidráulico) para garantizar la pretensión mínima que indica la



especificación AISC 360 (2010), actividad que se detalla en la sección 5.1.2. Luego de esto, se pinta con una mezcla de cal Pintacal y agua la zona de la conexión y vigas con el fin de observar claramente las deformaciones que experimentan.

El actuador hidráulico es el último elemento en ser montado. Éste va rotulado en ambos extremos, conectándose a las piezas perforadas mediante pasadores  $\phi 100$  mm. Finalmente, se instrumenta el espécimen en puntos estratégicos como se describe en la sección 5.3.

A continuación se tratan con más detalle las actividades de tensado de barras de anclaje y pretensión de pernos estructurales.

### 5.1.1. Tensado de barras de anclaje

Las barras de anclaje de las piezas en contacto con la losa y muro de reacción son tensadas para evitar el deslizamiento de los apoyos de la estructura. Este procedimiento se realiza utilizando un gato hidráulico de la marca *Power Team* (capacidad 150 [ton]), piezas de apoyo para éste, una celda de carga a compresión de la marca *Brosa* (capacidad 150 [ton]), una copla, una barra roscada adicional, una golilla y una tuerca (ver Figura 5.1). La tensión aplicada a cada barra se mide y controla con un sistema de control que involucra a la bomba de aceite conectada al gato hidráulico y a un PLC (Controlador Lógico Programable) conectado a la celda de carga.



Figura 5.1: Sistema de tensado de barras de anclaje (foto: Núñez, 2016).

En la Tabla 5.1 se presenta la tensión aplicada en las barras de anclaje de los apoyos de los especímenes y del actuador hidráulico.

**Tabla 5.1: Tensión en barras de anclaje.**

Diámetro [mm]	Largo [cm]	Ubicación	Tensión [tonf]	Cantidad de barras	Tensión Total [tonf]
φ50	120	Base viga oeste	15	6	90
φ50	120	Base columna (*)	15	7	105
φ50	120	Base columna (**)	25	7	175
φ50	200	Muro de HA	30	4	120

Calidad de las barras de anclaje: GW 50  $f_{0,2k}/f_{tk} = 500/550$  [MPa].

(\*) Tensión sólo en ensayo SE-01.

(\*\*) Tensión en el resto de los ensayos, aplicada por la empresa Protorq.

### 5.1.2. Pretensión de pernos

La correcta instalación de pernos estructurales se encuentra establecida en la especificación RCSC (2014), la cual indica cuatro métodos de pretensión para uniones pretensadas. Se escoge entre éstos el método de Pretensado con Llave Calibrada (“*Calibrated Wrench Pretensioning*”).

El servicio de torque a pernos estructurales mediante el método mencionado lo ejecuta la empresa PROTORQ. La aplicación del torque se realiza con llaves hidráulicas Hydratight RSL-4 y RSL-6 de 3000 [lb-pie] de rango máximo, controladas por una bomba electro hidráulica. Después de cada ensayo, la misma empresa se encarga de soltar los pernos para permitir el desmontaje (ver Figura 5.2 (a)).

En la primera visita se emplea el equipo Skidmore K para realizar una prueba de carga a un perno ASTM A490 1 3/8” (ver Figura 5.2 (b)). Se le aplican 2800 [lb-pie], comprobándose una tensión de 130 [kips]. En la Tabla 5.2 se presenta el torque aplicado a cada perno.

**Tabla 5.2: Pernos y barras roscadas con torque aplicado.**

Calidad ASTM	Diámetro	Largo	Pretensión mínima [kips] (tonf)	Torque aplicado [lb-pie]	Ubicación
A490	1"	2 3/4"	64 (29)	1100	Llaves de corte
A490	1 3/8"	3 1/4"	121 (55)	2800	Alma perfiles T
A490	1 3/8"	5"	121 (55)	2800	Alas perfiles T
A490	1 3/8"	6"	121 (55)	2800	Alas perfiles T
A490	3/4"	5 1/4"	35 (16)	500	Piezas al este de actuador
A490	3/4"	4 1/2"	35 (16)	500	Piezas al este de actuador
A193 B7	2"	200 mm	231 (105)	3000	Piezas al oeste de actuador
A193 B7	1 1/2"	200 mm	130 (59)	2000	Piezas al oeste de actuador
A325	1"	4 3/4"	51 (23)	900	Apoyos vigas
A325	1"	3 3/4"	51 (23)	900	Viga sobre MHA



(a)



(b)

Figura 5.2: (a) PROTORQ soltando un perno pretensado; (b) equipo Skidmore K (calibrador de tensión).

## 5.2. Actuador hidráulico

El actuador corresponde a un cilindro hidráulico de 100 [tonf] de capacidad y de +/- 250mm de carrera, encargado de aplicar la carga cíclica de manera cuasi-estática durante cada ensayo, y montado como muestra la Figura 5.3. Es dirigido por un software de control de desplazamientos y alimentado por una unidad de potencia óleo-hidráulica de 6 litros de capacidad, observada en la Figura 5.4 (a). El software de control requiere que el actuador tenga instalada una servo válvula para ser manejado de forma digital, a la cual se le conecta un cable que va al computador que dirige y las mangueras que van hacia la bomba óleo-hidráulica. Ésta válvula es de la marca *MOOG*, tipo G76 y va ubicada según la Figura 5.4 (b). Además, se le instala un sensor de desplazamiento conectado al sistema de control, que mide cuánto se abre o retrae el pistón. Para hacerlo funcionar, en el software de control se debe ingresar el voltaje al que se desea llegar en el sensor de desplazamiento y en cuánto tiempo.

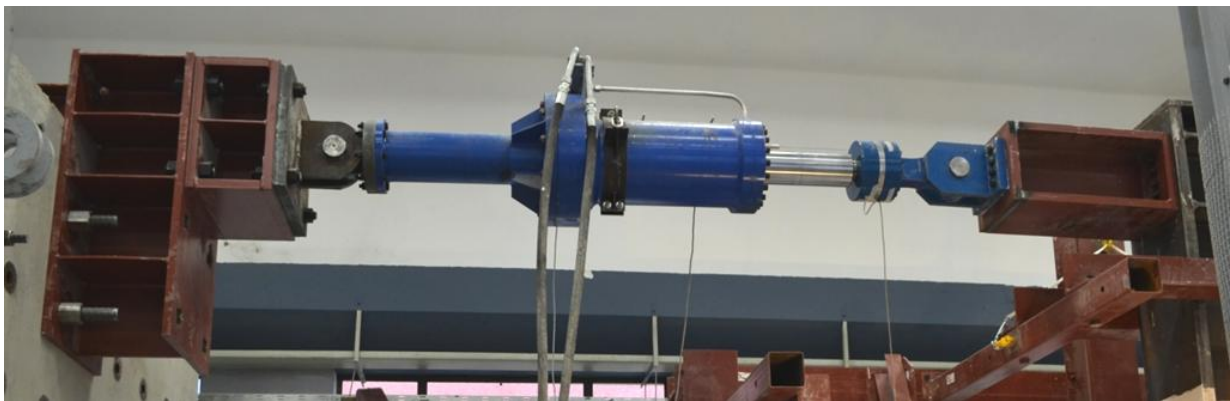
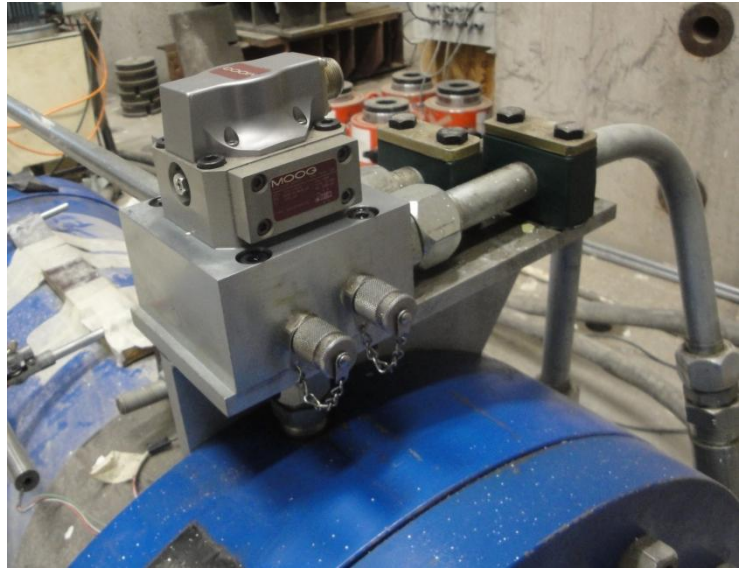


Figura 5.3: Actuador hidráulico instalado para aplicar la carga a cada espécimen.



(a)



(b)

Figura 5.4: (a) Bomba óleo-hidráulica que alimenta al actuador; (b) servo válvula.

### 5.3. Instrumentación de ensayo

El tipo de instrumentación queda definido por los parámetros y propiedades de la conexión que se quieren medir. Éstos son: (1) Deformación entre piso, (2) rotación total en la viga y en la conexión, (3) deformación de la zona panel, (4) desplazamiento en apoyos de vigas y columna, (5) fuerza aplicada por el actuador hidráulico y (6) reacción en apoyos de vigas.

Los sensores disponibles en el laboratorio para la adquisición de datos son los siguientes:

- **LVDTs** (*Linear Variable Differential Transformers*): Sensores de desplazamiento de tipo inductivo, marca *Schaevitz* y *Macro Sensors*. Miden desplazamiento lineal asociado a un cambio de voltaje producto del movimiento de su núcleo (“*core*”). Los LVDT utilizados de marca *Schaevitz* poseen una carrera de  $\pm 1''$  y un rango de voltaje de 0 a +6 [V]; los de marca *Macro Sensors* poseen una carrera de  $\pm 1''$ ,  $\pm 2''$  y  $\pm 10''$  y un rango de voltaje de  $\pm 10$  [V]. El *core* de cada LVDT permite unirles un vástago roscado en ambos extremos, que luego se extiende hasta el punto de fijación.
- **Inclinómetros**: Sensores de rotación electrónicos, modelo *AccuStar* del fabricante *Schaevitz*. Miden inclinación y ángulo, y cuyo principio de funcionamiento es capacitivo puro. Esto último quiere decir que cuando giran o se inclinan, su capacidad aumenta o disminuye, variando así su salida asociada a un cambio de voltaje. Poseen una carrera única de  $\pm 60^\circ$ , y su rango de voltaje es de +5 a +15 [V].
- **Celdas de Carga**: Sensores de fuerza en ambas direcciones de carga: tracción y compresión. Se cuenta con tres celdas de carga para cada ensayo: la primera ya está

integrada en el actuador hidráulico, es de la marca *Interface*, modelo 1200HC.1244, y cuya capacidad nominal es de 1200 [kN]; las otras dos son de la marca *HBM*, modelo U15, y cuya capacidad nominal es de 500 [kN]. Éstas poseen una entrada *hembra* y una salida *macho*, ambas con hilo, para poder ser conectadas a la estructura.

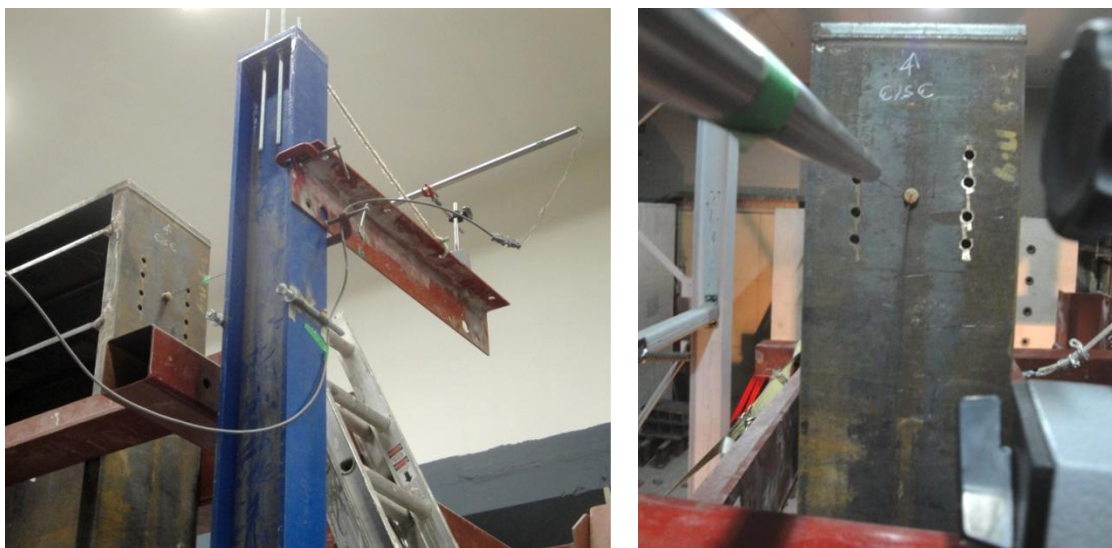


(a) LVDT *Schaevitz*    (b) Inclinómetro *AccuStar*    (c) Celda de carga *HBM*

**Figura 5.5:** Sensores utilizados para medir (a) desplazamiento, (b) rotación y (c) carga.

### 5.3.1. Deformación entre piso

La deformación entre piso queda determinada por el desplazamiento horizontal en el punto de la columna donde se aplica la carga cíclica. Este valor se mide con un LVDT marca *Macro Sensors*, de carrera  $\pm 10''$  ( $\pm 25,4\text{cm}$ ), ubicado en el lado este de la columna sobre un soporte magnético (ver Figura 5.6). La varilla que va desde el LVDT hasta la columna se fija en un trozo de corcho adherido a esta última.



**Figura 5.6:** LVDT para medir el desplazamiento entre piso.

### 5.3.2. Rotación total en vigas y conexiones

La rotación total que experimenta cada viga y conexión se mide con dos inclinómetros *AccuStar* fijados donde parte y termina la zona deseada. Para el caso de las vigas, uno se ubica justo donde termina el perfil T, y el otro espaciado a una altura de viga del primero, suponiendo de la teoría que ese es el largo de rótula plástica. Para las conexiones, se utiliza el mismo inclinómetro ubicado donde termina el perfil T, y el otro se fija en el ala de la columna adyacente. En la Figura 5.6 se muestra cómo van adheridos los inclinómetros mediante placas de acrílico, tuercas y barras con hilo  $\phi 8\text{mm}$ .

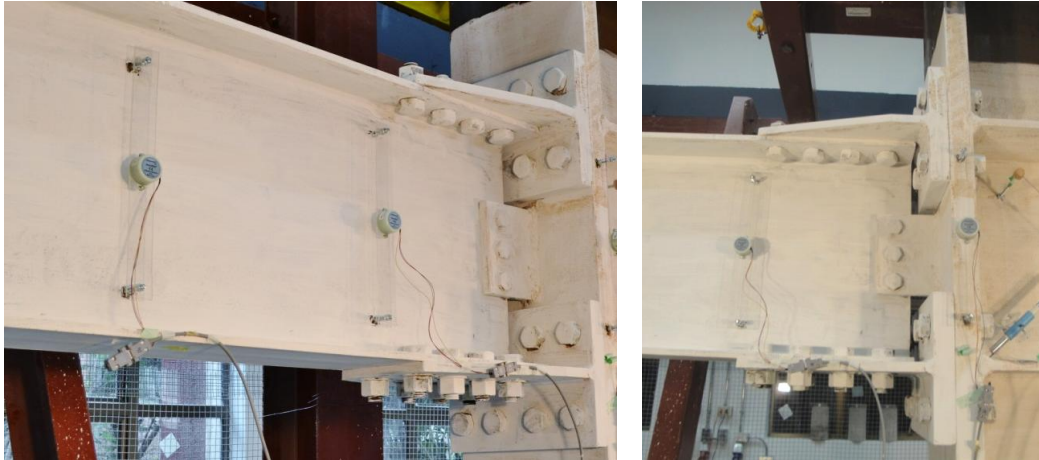


Figura 5.7: Inclinómetros para medir rotación total en las vigas y en conexiones.

### 5.3.3. Deformación de la zona panel

La deformación angular de la zona panel se mide con dos LVDT's *Macro Sensors* de carrera  $\pm 2''$  ( $\pm 5\text{cm}$ ), montados de manera cruzada y en diagonal entre las placas de continuidad de cada espécimen, tal como se observa en la Figura 5.8. Estos sensores se fijan al alma de la columna mediante un soporte de acrílico que sostiene al LVDT contenido dentro de un tubo de PVC, sistema diseñado por Núñez (2016).



Figura 5.8: LVDTs para medir la deformación de la zona panel.

### 5.3.4. Desplazamiento en apoyos vigas y columna

El desplazamiento en la dirección de la biela en los apoyos de las vigas se mide con un único LVDT *Schaevitz* de carrera  $\pm 1''$  ( $\pm 2,5\text{cm}$ ), fijado al alma de éstas con el mismo soporte de acrílico mencionado anteriormente. La varilla que se extiende desde el *core* del sensor se adentra en un trozo de corcho adherido a la pieza base del apoyo como se observa en la Figura 5.9.



Figura 5.9: LVDT que mide el desplazamiento vertical del apoyo de cada viga.

El desplazamiento vertical y horizontal en la base de la columna se mide con tres LVDTs *Macro Sensors* de carrera  $\pm 1''$  ( $\pm 2,5\text{cm}$ ). Éstos son ubicados sobre soportes magnéticos abajo y al lado de la columna, respectivamente. La varilla que se extiende desde el *core* de cada sensor se fija en un trozo de corcho adherido a la columna y a la pieza base de ésta, como se puede ver en la Figura 5.10.



Figura 5.10: LVDTs que registran el desplazamiento vertical y horizontal de la base de la columna.

### 5.3.5. Fuerza aplicada por el actuador hidráulico

La fuerza que debe aplicar el actuador hidráulico para alcanzar el desplazamiento entre piso deseado se registra con la celda de carga marca *Interface*, modelo 1200HC.1244, con capacidad nominal de 1200 [kN]. Ésta se encuentra conectada directamente a un cabezal articulado por un lado, y al actuador a través de una barra con hilo por el otro, tal como se observa en la Figura 5.11.



Figura 5.11: Celda de carga del actuador hidráulico.

### 5.3.6. Reacción en apoyos de viga

La reacción que experimenta cada viga en su apoyo se registra con una celda de carga marca *HBM*, modelo U15. Estas celdas van ensambladas a la biela rígida por un lado y a un cabezal por el otro, de la forma que indica la Figura 5.12.



Figura 5.12: Celda de carga para medir la reacción en vigas.



### 5.3.7. Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos durante los ensayos se realiza mediante una serie de equipos conectados entre sí, que juntos van captando y almacenando las variaciones de voltaje que emite cada sensor:

- **Caja de conectores DB9:** Caja que cuenta con 31 canales para conectar diferentes LVDTs e inclinómetros. Ésta fue diseñada y construida por Muñoz (2016).
- **Fuente de alimentación:** Equipo marca RIGOL, modelo DP832, que se conecta a la caja de conectores DB9 para alimentar a los sensores conectados en ella con  $\pm 12$  [V].
- **Tarjetas de adquisición de datos:** Tarjetas de la marca *National Instruments* que captan la variación de voltaje de todos los sensores, las cuales incluyen un acondicionador de señal que filtra y adapta las señales. La tarjeta NI 9205 capta la señal emitida por LVDTs e inclinómetros conectados en alguno de sus 31 a través de un cable proveniente de la caja de conectores DB9, y la tarjeta NI 9237 capta la señal emitida por las celdas de carga, las cuales se conectan en alguno de los cuatro terminales que posee esta tarjeta.
- **Chasis:** Equipo NI CompactDAQ Ethernet de 8 ranuras de la marca *National Instruments*, modelo NI cDAQ-9188XT, al que se le conectan las tarjetas de adquisición de datos para que las señales análogas captadas sean digitalizadas y enviadas al computador. Este chasis se conecta a una fuente de alimentación NI PS-15 que va enchufada a la corriente, y al computador a través de un cable Ethernet.
- **Computador:** El computador portátil cuenta con un programa del software LabVIEW “*cDaqxp2E*” compatible con las tarjetas de adquisición, programado para recibir y almacenar las medidas digitales que le entrega el chasis. Antes de empezar a registrar las señales con él, se debe verificar en el software del chasis NI-DAQmx que todos los sensores estén bien conectados.

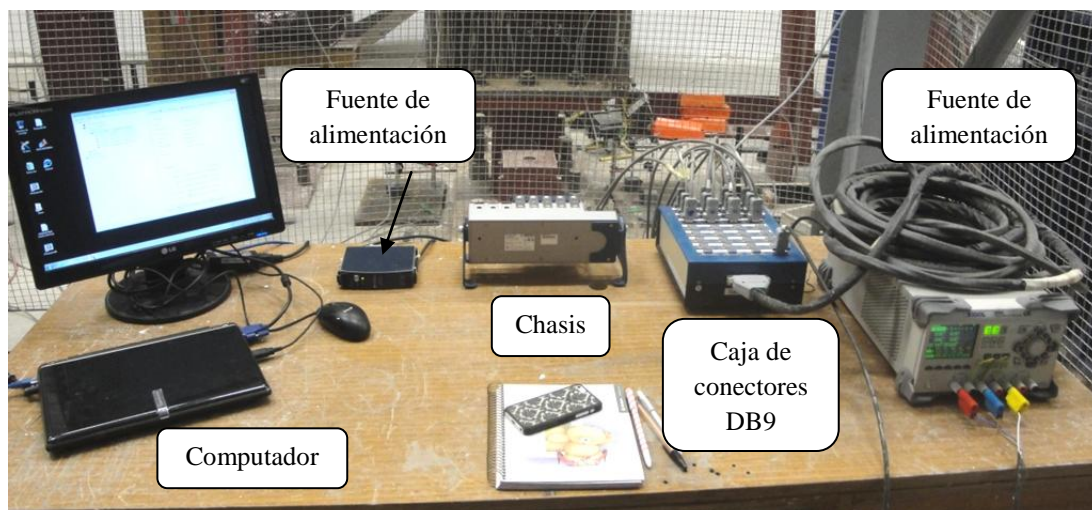


Figura 5.13: Sistema de adquisición de datos – vista frontal.



**Figura 5.14: Sistema de adquisición de datos – vista trasera.**

En la Tabla 5.3 se indica el canal en el que son conectados en cada ensayo realizado los LVDTs, inclinómetros y celdas de carga a la tarjeta de adquisición correspondiente.

**Tabla 5.3: Canal en el que se conecta cada sensor**

Sensor	Espécimen SE-01	Espécimen SE-02
LVDT Actuador	0	0
LVDT Deriva entre piso	1	1
LVDT Zona panel oeste	2	2
LVDT Zona panel este	3	3
LVDT Apoyo viga oeste	4	4
LVDT Apoyo viga este	5	-
LVDT Base columna, horizontal	6	5
LVDT Base columna, vertical oeste	7	6
LVDT Base columna, vertical este	8	7
Inclinómetro Rótula plástica oeste	9	8
Inclinómetro T-stub oeste	10	9
Inclinómetro Ala columna oeste	11	10
Inclinómetro Ala columna este	12	11
Inclinómetro T-stub este	13	-
Inclinómetro Rótula plástica este	14	-
Celda de carga Actuador	0	0
Celda de carga Apoyo viga este	1	-
Celda de carga Apoyo viga oeste	2	1

### 5.3.8. Calibraciones

En las siguientes tablas se presentan las propiedades de cada sensor utilizado y el factor de conversión para obtener los datos en las unidades de medida deseadas.

**Tabla 5.4: Propiedades de LVDTs utilizados.**

Ubicación LVDTs	Marca	Carrera	S/N	Factor [mm/V]
Actuador Hidráulico	<i>Macro Sensors</i>	+/- 254 mm	86005	25,324 <sup>a</sup>
Drift Entre Piso (Columna)	<i>Macro Sensors</i>	+/- 254 mm	6165466	25,400 <sup>a</sup>
Zona Panel Oeste	<i>Macro Sensors</i>	+/- 50,8 mm	6172316	5,096 <sup>a</sup>
Zona Panel Este	<i>Macro Sensors</i>	+/- 50,8 mm	6172318	5,093 <sup>a</sup>
Apoyo Viga Oeste	<i>Schaevitz</i>	+/- 25,4 mm	J7529	10,087 <sup>a</sup>
Apoyo Viga Este	<i>Schaevitz</i>	+/- 25,4 mm	J7530	10,052 <sup>a</sup>
Base Columna, Horizontal	<i>Macro Sensors</i>	+/- 25,4 mm	6165454	2,529 <sup>a</sup>
Base Columna, Vertical Oeste	<i>Macro Sensors</i>	+/- 25,4 mm	6165456	2,520 <sup>a</sup>
Base Columna, Vertical Este	<i>Macro Sensors</i>	+/- 25,4 mm	6165457	2,525 <sup>a</sup>

**Tabla 5.5: Propiedades de inclinómetros utilizados.**

Ubicación Inclinómetros	Modelo	Carrera	S/N	Factor [rad/V]
Rótula Plástica Oeste	<i>AccuStar</i>	+/- 60 °	D2390176	-0,447 <sup>b</sup>
T-Stub Oeste	<i>AccuStar</i>	+/- 60 °	D2120051	-0,426 <sup>b</sup>
Ala Columna Oeste	<i>AccuStar</i>	+/- 60 °	D2390155	-0,422 <sup>b</sup>
Ala Columna Este	<i>AccuStar</i>	+/- 60 °	D2390171	-0,422 <sup>b</sup>
T-Stub Este	<i>AccuStar</i>	+/- 60 °	D2390177	-0,437 <sup>b</sup>
Rótula Plástica Este	<i>AccuStar</i>	+/- 60 °	D2390168	-0,439 <sup>b</sup>

**Tabla 5.6: Propiedades de la celda de carga ubicada en el actuador hidráulico.**

Ubicación Celda de Carga	Modelo / Marca	Capacidad	S/N	Valores eléctricos [mV/V]	Valores físicos [N/V]
Actuador Hidráulico	<i>1200HC.1244 / Interface</i>	1200 [kN]	392520	+/- 4,11	+/- 1,2·10 <sup>6</sup>

**Tabla 5.7: Propiedades de las celdas de carga para medir la reacción en las vigas.**

Ubicación Celdas de Cargas	Modelo / Marca	Capacidad	S/N	Factor [kgf/V]	Null [kgf]
Apoyo Viga Este	<i>U15 / HBM</i>	50 [kN]	C18243s	0,0408395	37,72559 <sup>b</sup>
Apoyo Viga Oeste	<i>U15 / HBM</i>	50 [kN]	C18244s	0,0408395	37,72559 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Calibración nominal.

<sup>b</sup> Calibración real.

## 5.4. Modificaciones a la instalación experimental

En esta sección se detallan las modificaciones realizadas a la instalación experimental original debido a los problemas ocurridos durante el primer ensayo SE-01.

### 5.4.1. Rectificación de pieza

La pieza disponible para suplir la distancia entre el actuador hidráulico y la columna de ensayo es originalmente de 970 [mm] de largo, sin embargo, esta longitud obliga al actuador a partir retraído 130 [mm] en el primer ensayo. Esto no es detectado sino hasta intentar alcanzar un desplazamiento entre piso de 142 [mm] ( $\Theta=0,04$  [rad]) hacia el muro de reacción, en donde el pistón del actuador se para a los 120 [mm] aproximadamente. Para evitar este problema en los siguientes ensayos, se encarga la rectificación de la pieza de acero a la maestranza Metalmecánica Sinsay, quienes la cortan y quitan los 130 [mm] que tenía de sobra, soldándola nuevamente después. El plano que se envía a dicha maestranza con las indicaciones correspondientes se presenta en el Apéndice D y la pieza lista y montada se observa en la Figura 5.15.



Figura 5.15: Pieza rectificada para garantizar la completa carrera del actuador en ambos sentidos.

### 5.4.2. Restricción lateral adicional en vigas

Durante el primer ensayo, las vigas sufren un volcamiento significativo en sus extremos debido a la holgura que poseen sus apoyos para que se muevan fuera del plano. Para disminuir este volcamiento en los siguientes ensayos, se diseña una nueva restricción lateral para las vigas ubicada lo más cerca posible de sus extremos, tal como se muestra en la Figura 5.16. Ésta se construye a partir de piezas de acero ASTM A36 disponibles en el laboratorio y de unos perfiles ángulo 80x80x8 y placas 540x250x16 del mismo acero donados al proyecto por la maestranza Delgado.

Los pernos de alta resistencia utilizados para conectar todas las piezas son de calidad ASTM A325 y de diámetro  $\frac{3}{4}$ ", las barras de anclaje son de diámetro  $\phi 32$ mm, y la diagonal que se ve en la figura mencionada se suelda a su placa base con un electrodo de soldadura E7018.



**Figura 5.16: Restricción lateral adicional para cada viga.**

Los planos de esta restricción lateral se adjuntan en el Apéndice D.

# Capítulo 6. Presentación y análisis de resultados

En el presente capítulo se exhiben los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los especímenes SE-01 y SE-02. Como se menciona anteriormente, éste último se repite con una nueva viga, perfiles T y pernos, por lo que se hace distinción entre SE-02(a) y SE-02(b). En la sección 6.1 se presentan las ecuaciones utilizadas para obtener las características importantes de cada conexión a partir de las mediciones registradas por los sensores de desplazamiento, rotación y carga. El procesamiento de estos datos se lleva a cabo mediante una rutina programada en el software *Matlab R2015b*, donde se cargan los datos, se aplican las ecuaciones mencionadas, y se generan las curvas presentadas en las secciones 6.3 y 6.4 para su posterior análisis.

## 6.1. Ecuaciones de reducción de datos

### 6.1.1. Rotación entre piso

La rotación entre piso  $\theta$  queda definida según la ecuación (6-1)(6-2).

$$\theta_p = \frac{\Delta}{h} \quad (6-1)$$

Donde,

$\Delta$  = Desplazamiento entre piso, medido por el Lvdt ubicado al lado este de la columna en el punto de aplicación de la carga.

$h$  = Altura entre piso: distancia entre punto de aplicación de la carga y el centro del apoyo rotulado de la columna.

### 6.1.2. Rotación total en la viga

La rotación total en la viga  $\theta_b$  queda definida según la ecuación (6-2).

$$\theta_b = Incl_1 - Incl_2 \quad (6-2)$$

Donde,

$Incl_1$  = Rotación que registra el inclinómetro ubicado a una altura de viga de la conexión.

$Incl_2$  = Rotación que registra el inclinómetro ubicado donde termina la conexión.

### 6.1.3. Rotación total en la conexión

La rotación total en la conexión  $\theta_c$  queda definida según la ecuación (6-3).

$$\theta_c = Incl_3 - Incl_4 \quad (6-3)$$

Donde,

$Incl_3$  = Rotación que registra el inclinómetro ubicado donde termina la conexión.

$Incl_4$  = Rotación que registra el inclinómetro ubicado en el ala de la columna correspondiente.

### 6.1.4. Deformación angular de la zona panel

La deformación angular de la zona panel  $\gamma$  queda definida según la ecuación (6-4).

$$\gamma = \frac{\sqrt{d_z^2 + w_z^2}}{d_z \cdot w_z} \cdot \frac{|Lvdt_E| + |Lvdt_O|}{2} \quad (6-4)$$

Donde,

$d_z$  = Altura de la zona panel.

$w_z$  = Ancho de la zona panel.

$Lvdt_E$  = Desplazamiento que registra el Lvdt ubicado en el lado este de la zona panel.

$Lvdt_O$  = Desplazamiento que registra el Lvdt ubicado en el lado oeste de la zona panel.

### 6.1.5. Momento

El momento  $M$  en la conexión de cada espécimen queda definido según la ecuación (6-5).

$$M = R \cdot L_{viga} \quad (6-5)$$

Donde,

$R$  = Fuerza de reacción registrada por la celda de carga ubicada en la viga.

$L_{viga}$  = Longitud medida entre el apoyo de la viga y la cara de la columna.

### 6.1.6. Momento en la(s) viga(s)

El momento  $M_{viga}$  en la(s) viga(s) de cada espécimen queda definido según la ecuación (6-6).

$$M_{viga} = R \cdot L_p \quad (6-6)$$

Donde,

- $R$  = Fuerza de reacción registrada por la celda de carga ubicada en la viga.  
 $L_p$  = Longitud medida entre el apoyo de la viga y la zona de rótula plástica.

### 6.1.7. Corte en la zona panel

El corte en la zona panel de cada espécimen ( $V_{zp}$ ) queda definido según la ecuación (3-43) indicada en la sección 3.8.

### 6.1.8. Energía disipada

La energía disipada  $E_{dis}$  por el espécimen queda definida según la ecuación (6-7).

$$E_{dis} = \int P(\Delta) \quad (6-7)$$

Donde,

- $\Delta$  = Desplazamiento entre piso, medido por el Lvdt ubicado al lado este de la columna en el punto de aplicación de la carga.  
 $P$  = Fuerza aplicada por el actuador hidráulico para cada valor de  $\Delta$ .

## 6.2. Respuesta general en especímenes de ensayo

El diseño de los especímenes apunta a que la conexión sea capaz de resistir las cargas solicitantes a través de ciclos de histéresis estables, alcanzando una rotación entre piso de 0,04 [rad] sin una pérdida significativa de resistencia (que no se alcance un valor menor a  $0,8M_p$ ). Los tres especímenes ensayados, SE-01, SE-02(a) y SE-02(b), se comportan de forma satisfactoria durante cada ensayo cíclico, pues logran la respuesta dúctil y estable esperada acorde a su diseño. En el primero se observa fluencia en las alas de los perfiles T soldados, cuyos centros se despegan levemente del ala de la columna adyacente, mientras que en el segundo y tercero se desarrolla una notoria rótula plástica en ambas ocasiones, manifestándose a través de un excesivo pandeo local en las alas y alma de la viga. Ningún espécimen experimenta una falla de tipo frágil en algún elemento estructural antes de una distorsión entre piso de 0,04 [rad], sin embargo, en el primero se fracturan los hilos de la celda de carga ubicada en el apoyo de una de las vigas, y en el espécimen SE-02(b) se produce una iniciación de fractura por área neta en una de las perforaciones de la última fila de pernos del ala superior de la viga.

En la Tabla 6.1 se presenta un resumen general de los resultados de cada uno, donde se observa que por un lado, la fuerza máxima aplicada por el actuador hidráulico  $P_{max}$  en el primer ensayo es casi el doble que en los otros dos debido a la falta de la viga del lado este en éstos, y por el otro, el momento máximo alcanzado en la cara de la columna  $M_{max}$  supera al momento plástico de la viga en ambos casos. El momento de falla experimental no supera en más de un 32% al predicho,



lo que indica que las fórmulas de las recomendaciones FEMA 350 son confiables cuando controla la fluencia de las alas de los T-stubs y la formación de rótula plástica en la viga.

**Tabla 6.1: Resumen de resultados.**

Espécimen	P <sub>max</sub> [ton]	M <sub>max</sub> [ton·m]	M <sub>p</sub> [ton·m]	M <sub>max</sub> /M <sub>p</sub>	M <sub>fail</sub> predicho [ton·m]	M <sub>fail</sub> experimental [ton·m]	Exp./pred.
SE-01	80,2	128,5	82,6	1,56	67,6	89,3	1,32
SE-02(a)	43,9	142,9	82,6	1,73	131,2	139,9	1,07
SE-02(b)	44	146,2	82,6	1,74	131,2	146,2	1,11

### 6.3. Espécimen SE-01

El espécimen SE-01 posee como elementos fusibles los T-stubs de la conexión. La foto de la Figura 6.1 muestra su estado inicial antes de partir la aplicación de la carga. Durante el ensayo, el actuador hidráulico se desplaza siguiendo el protocolo de carga descrito en la sección 3.3 a una velocidad de 20 [mm/min]. Al mismo tiempo, el sistema de adquisición de datos trabaja a una tasa de muestreo de 40 [datos/s]. La duración de este ensayo es de aproximadamente 8 horas.



**Figura 6.1: Espécimen SE-01 listo para ser ensayado.**

El historial de desplazamiento registrado por el LVDT 1 se muestra en la Figura 6.2. Éste indica claramente que al término del ensayo, con el espécimen en equilibrio, la deformación remanente de la probeta es de 75 [mm]. Como se menciona anteriormente, en este ensayo no se alcanza el desplazamiento entre piso requerido para los *peaks* negativos del 4% de deriva, lo cual también se observa en dicha figura, llegando a un promedio de 118 [mm] en los último dos ciclos, en vez de los 142 [mm] deseados. Por otro lado, el LVDT 0, utilizado para controlar el actuador hidráulico, no registra exactamente lo mismo que el LVDT 1. Esta diferencia se observa en la Figura C.3 del Apéndice C y se atribuye a las deformaciones que experimentan los elementos ubicados entre ambos sensores. La máxima diferencia entre ambos es de 11,6 [mm], detectada en

el primer ciclo de la etapa de carga  $\Theta=0,04$  [rad], lo cual verifica que es una buena decisión utilizar como guía al LVDT 1.

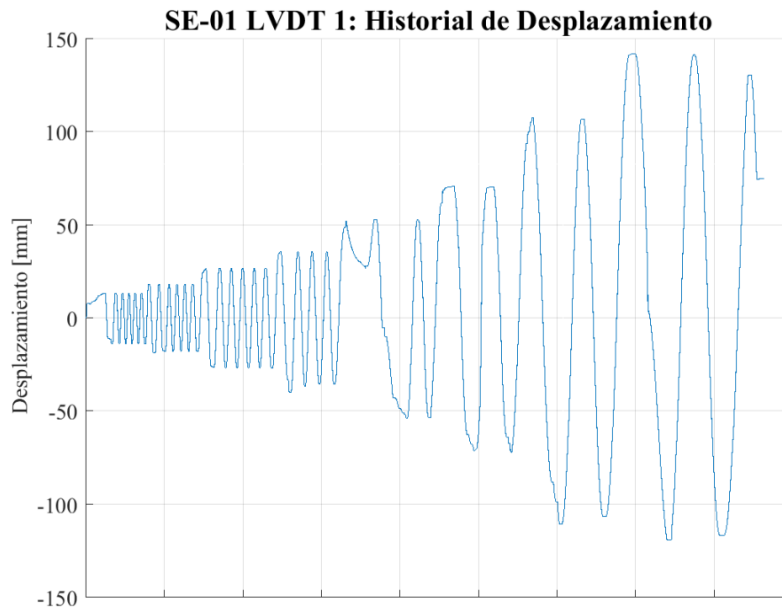


Figura 6.2: Desplazamiento entre piso para el espécimen SE-01.

El ciclo de histéresis que representa la respuesta global de la probeta SE-01 se exhibe en la curva de la Figura 6.3, donde se puede observar un efecto de estrechamiento o “*pinching*” atribuible al deslizamiento que experimentan los pernos y al efecto de apalancamiento en los T-stubs. Adicionalmente, esta curva presenta caídas en la carga en la zona central, lo cual se podría atribuir a la fricción entre el espécimen y el sistema de restricción lateral, manifestándose a través de ruidos intensos cuando éste se desplaza cercano a su posición inicial, y no a degradación de su resistencia. La fuerza máxima que aplica el actuador  $P_{\max}$  es de 80,2 [tonf] para  $\Delta=118,6$  [mm].

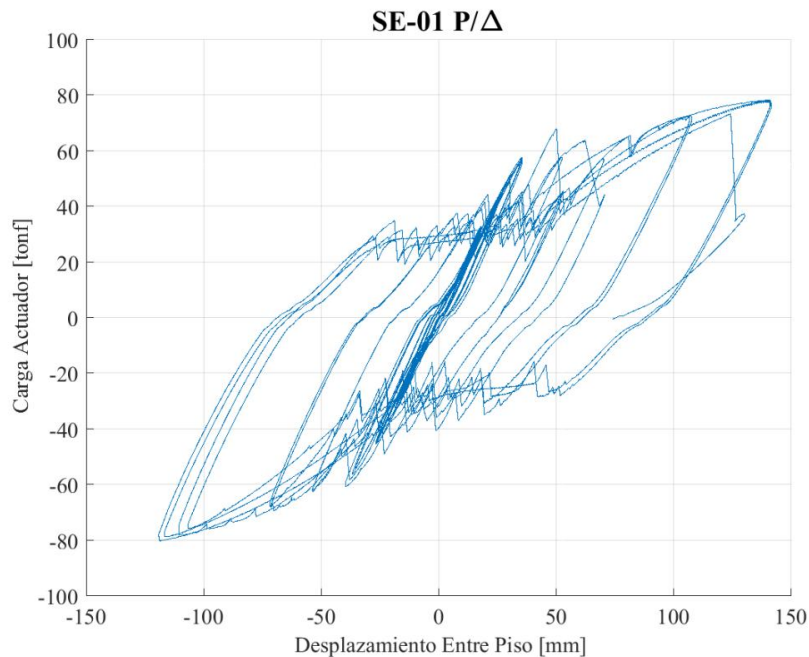
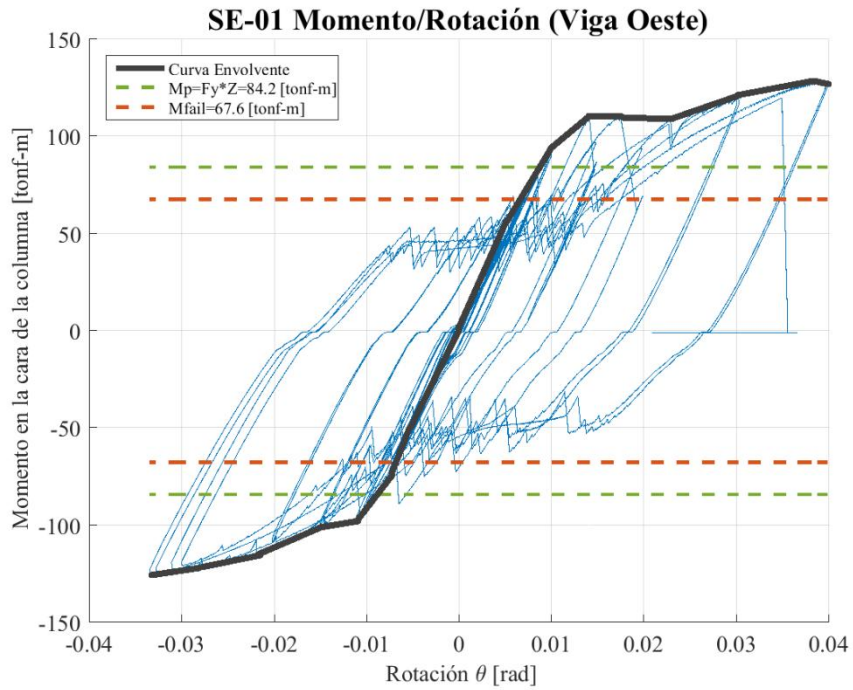
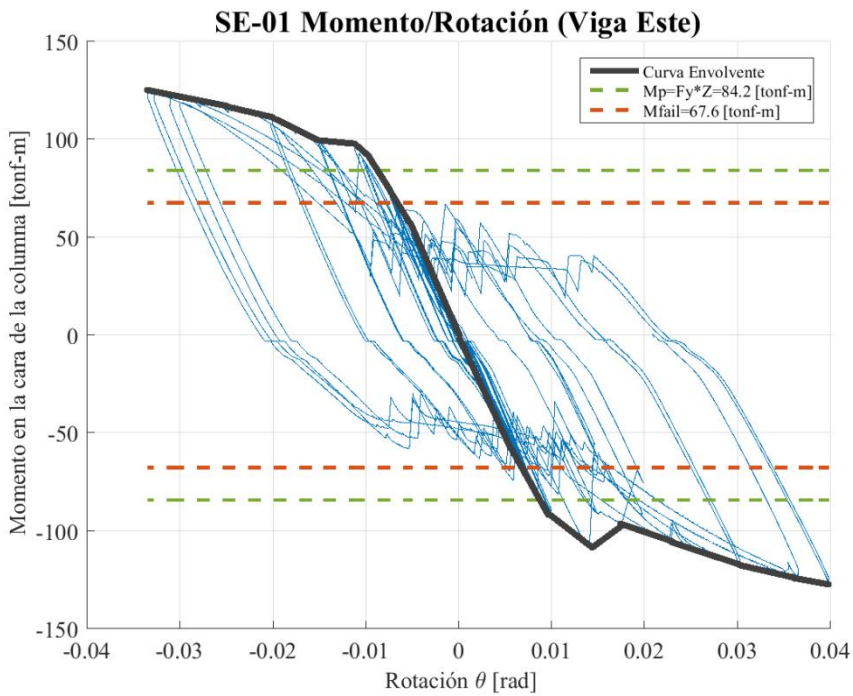


Figura 6.3: Carga vs. Desplazamiento para el espécimen SE-01.

Para hacer un análisis del ciclo de histéresis de cada viga, se generan las curvas Momento vs. Rotación mostradas en la Figura 6.4 y Figura 6.5.



**Figura 6.4: Momento vs. Rotación de la viga oeste para el espécimen SE-01.**



**Figura 6.5: Momento vs. Rotación de la viga este para el espécimen SE-01.**

En ambas figuras se indica la curva envolvente (“*backbone curve*”), la cual permite identificar que la fluencia se presenta cuando se alcanzan en promedio  $M=89,3$  [tonf·m] para  $\theta=0,01$  [rad],

valor que supera en un 32% al inicio de fluencia nominal en las alas de los T-stubs ( $M_{fail}$ ). Como no se observa degradación de resistencia, el momento máximo se alcanza en el instante de máxima rotación entre piso de  $\theta=0,04$  [rad], el cual supera por un 56% al momento plástico de la viga, cumpliéndose la condición establecida por las disposiciones sísmicas AISC 341 (2010b) para una conexión viga-columna cuando se usa en un marco rígido especial.

La primera manifestación visible de fluencia en los perfiles T se presenta en el primer ciclo donde se alcanza una rotación entre piso de  $\theta=0,02$  [rad], la cual se muestra en la Figura 6.6. Para este instante, el espécimen ya se encuentra en su rango plástico según las curvas Momento vs. Rotación. La viga también manifiesta un inicio de fluencia en el segundo ciclo para este mismo  $\theta$ , pero se hace más notoria para  $\theta=0,03$  [rad] (ver Figura 6.7).

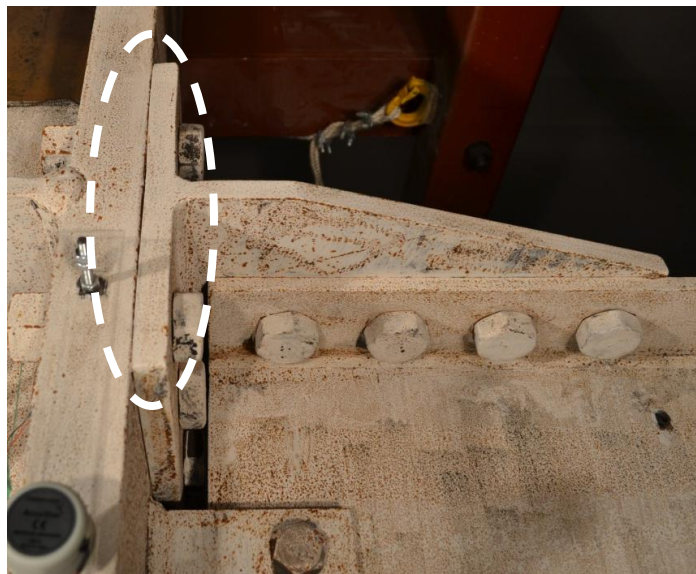


Figura 6.6: Primera manifestación visible de fluencia en un T-stub en el espécimen SE-01 para  $\theta=0,02$  [rad].



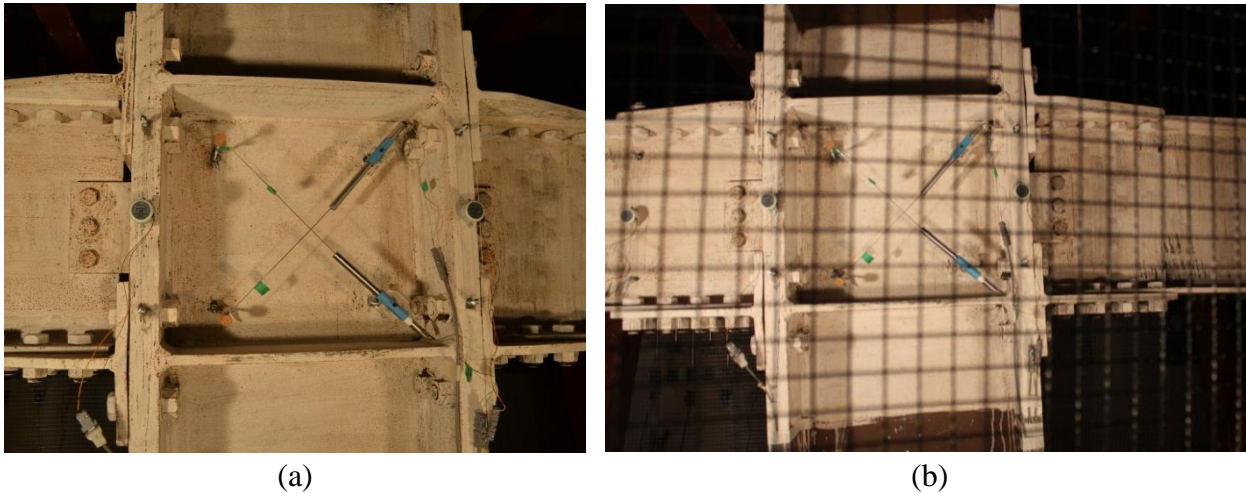
(a)



(b)

Figura 6.7: (a) Inicio de fluencia en el alma de la viga para  $\theta=0,02$  [rad], y (b) fluencia más notoria en la viga para  $\theta=0,03$  [rad].

El efecto de apalancamiento en los T-stubs se hizo más visible a medida que se avanza en las etapas de carga, hasta que en el último ciclo para  $\theta=0,04$  [rad] éstos se ven como muestra la Figura 6.8, donde también se observa fluencia en el alma de la viga este.

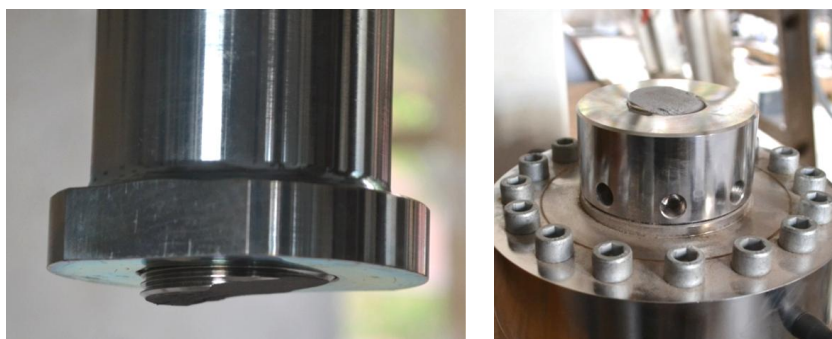


**Figura 6.8:** Estado del espécimen SE-01 para (a)  $\theta=0,03$  [rad] y (b)  $\theta=0,04$  [rad].

Al terminar el segundo ciclo para  $\theta=0,04$  [rad], se decide continuar con el ensayo y se intenta llevar a la probeta a  $\theta=0,05$  [rad]. Sin embargo, antes de sobrepasar el desplazamiento de la etapa de carga anterior (en  $\theta=0,035$  [rad]), los hilos de la celda de carga de la viga oeste se fracturan, quedando dicha viga en voladizo. Como ya se ha mencionado, esta falla se puede atribuir al excesivo volcamiento que experimentan las vigas que pudiese inducirle una fuerza lateral a la celda. El volcamiento en la viga este se observa en la Figura 6.9. La celda de carga desmontada y sus hilos fracturados se muestran en la Figura 6.10.



**Figura 6.9:** Volcamiento en la viga este del espécimen SE-01, para  $\theta=0,04$  [rad].



**Figura 6.10: Fractura de los hilos de la celda de carga oeste.**

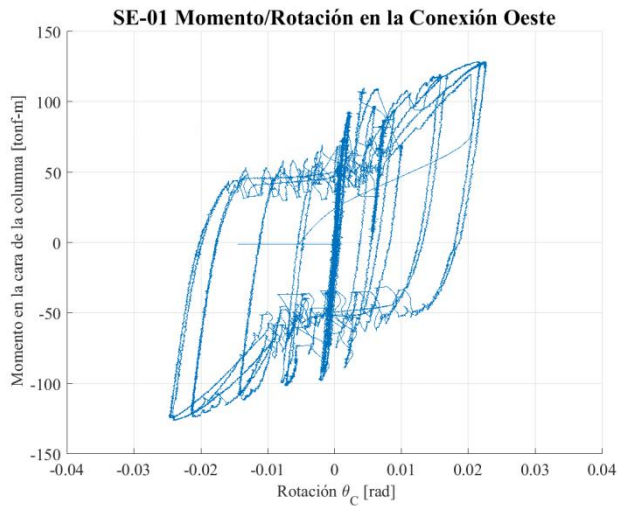
Con respecto a la zona panel, los sensores en ella no estaban completamente fijos, pues sus curvas (Apéndice C) muestran un corrimiento en ellos. Sin embargo, el valor máximo que registran es de 1,2 [mm] indicando que no se presenta deformación angular significativa en la zona panel. De hecho, en la curva de Corte en la zona panel vs. Deformación angular no se observa un ángulo mayor a 0,0021 [rad] (0,12 [°]).

En los apoyos de las vigas, los LVDTs dispuestos registran un corrimiento de 6,7 [mm] y -2,3 [mm] en la viga oeste y este, respectivamente. Esta información no significa que hay una deformación de esa magnitud en los apoyos, pues influye el volcamiento en la viga y la holgura del mismo sensor para moverse. Cabe mencionar que el LVDT del lado oeste se suelta durante el ciclo para  $\theta=0,02$  [rad], invalidando sus mediciones desde justo antes de ocurrido esto. Por otro lado, en el apoyo rotulado de la columna, el LVDT que mide el desplazamiento horizontal registra un corrimiento del apoyo de 3,5 [mm] hacia el este, y los que miden el desplazamiento vertical registran en promedio un levantamiento del apoyo de 4,4 [mm].

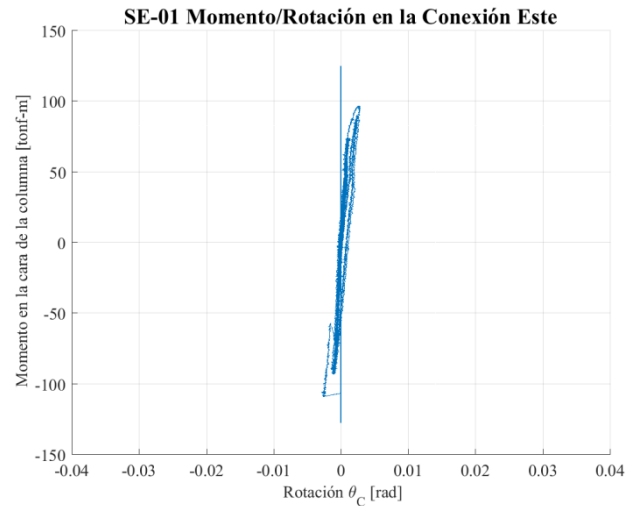
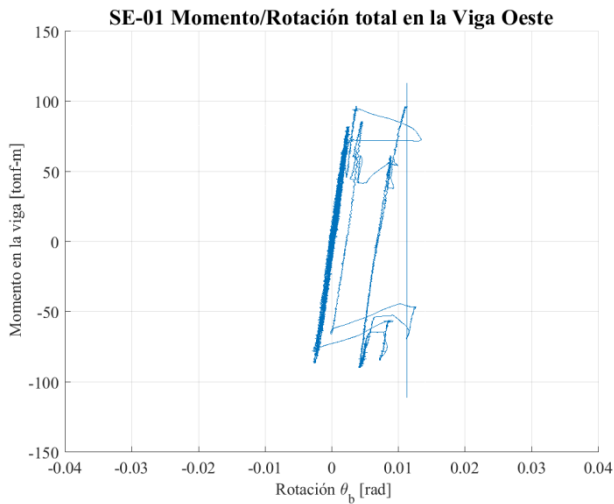
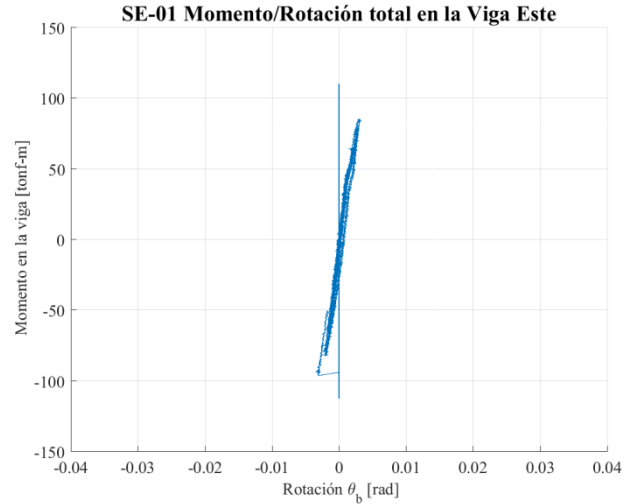
Las medidas registradas por los inclinómetros instalados para medir la rotación total en las vigas y conexiones permiten generar las curvas de la Figura 6.12 y Figura 6.13. No obstante, los inclinómetros 9, 13 y 14 de la Figura C.1 (Apéndice C) se sueltan o desprenden completamente luego del primer sonido y vibración fuerte que experimenta el espécimen lo que ocurre casi al llegar al primer *peak* de  $\theta=0,015$  [rad]. La curva de la Figura 6.12 (b) y ambas de la Figura 6.13 no están graficadas hasta el final del ensayo. La que sí está completa es la gráfica Momento vs. Rotación de la conexión del lado oeste del espécimen, donde se observa que ésta sí superó su límite elástico, disipando energía mediante una respuesta histerética estable. La Figura 6.11 muestra la zona donde experimenta deformación el T-stub inferior oeste.



**Figura 6.11: T-stub inferior oeste post-ensayo SE-01.**



(a)

(b) Curva hasta  $\theta=0,014$  [rad]**Figura 6.12: Momento vs. Rotación Total en la conexión (a) oeste y (b) este del espécimen SE-01.**(a) Curva hasta  $\theta=0,015$  [rad](b) Curva hasta  $\theta=0,014$  [rad]**Figura 6.13: Momento vs. Rotación Total en la viga (a) oeste y (b) este del espécimen SE-01.**

Un buen comportamiento es el que se registra en las soldaduras con las que se fabrican los perfiles T soldados, debido que no se observa daño en ninguno de los dos tipos utilizados: filete y de penetración completa. Esto habla de la buena calidad de la soldadura y de la mano de obra, así como también del diseño, exacerbando la motivación para seguir estudiando el uso de perfiles T soldados en este tipo de conexión de momento.

#### 6.4. Especimen SE-02(a)

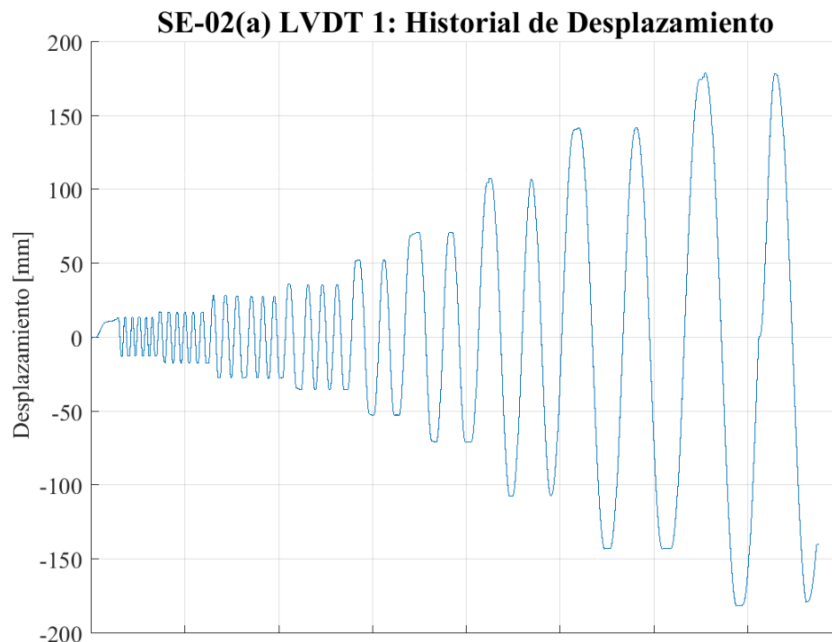
El espécimen SE-02 se ensaya sólo con una viga, debido a la falla de la celda de carga ocurrida en el espécimen anterior. Durante su primer ensayo, denominado SE-02(a), el actuador hidráulico se desplaza siguiendo el protocolo de carga descrito en la sección 3.3 a una velocidad superior

que en el ensayo anterior de 25 [mm/min], bajando su duración a 6 horas. La tasa de muestreo del sistema de adquisición se mantiene en 40 [datos/s].



**Figura 6.14:** Espécimen SE-02(a) listo para ser ensayado.

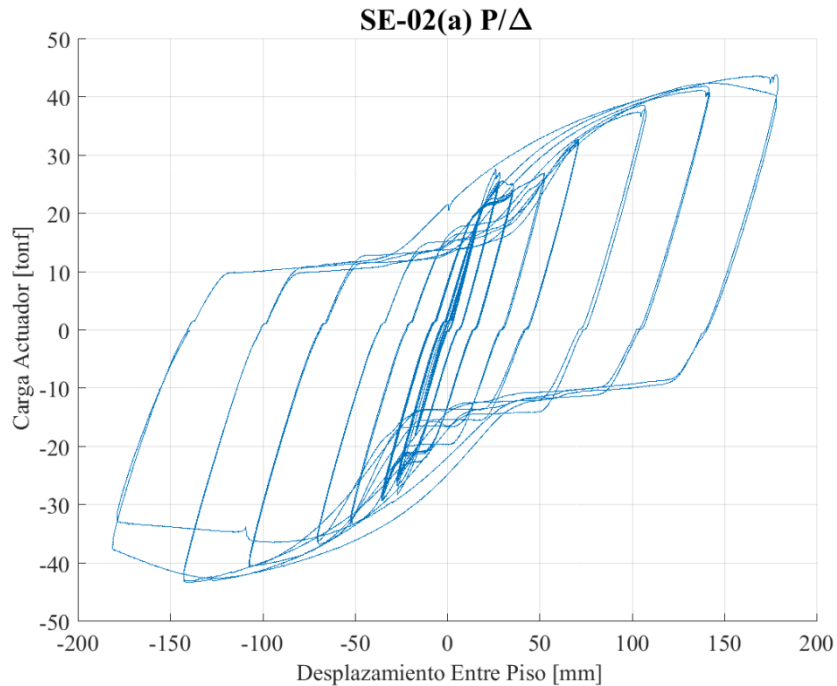
El historial de desplazamiento registrado por el LVDT 1 se muestra en la Figura 6.15. En él se observa una simetría en los ciclos, pues se alcanzan de forma satisfactoria todos los desplazamientos entre piso deseados hasta la etapa de carga de  $\theta=0,05$  [rad]. El último ciclo para dicha rotación entre piso no se completa, porque se alcanza el último *peak* y luego se deja el espécimen en equilibrio, quedando con una deformación remanente de 140 [mm].



**Figura 6.15:** Historial de desplazamiento para el espécimen SE-02.



El ciclo de histéresis que representa la respuesta global de la probeta SE-02 se exhibe en la curva de la Figura 6.16, donde también se observa un efecto de estrechamiento o “*pinching*”, pero la curva es más suave y limpia que en la probeta anterior, lo que se puede atribuir a la disminución en la fricción entre el espécimen y el sistema de restricción lateral. La fuerza máxima aplicada por el actuador hidráulico  $P_{\max}$  es de 43,9 [tonf], para un desplazamiento entre piso de 178,4 [mm].



**Figura 6.16: Carga vs. Desplazamiento para el espécimen SE-02(a).**

La respuesta de la viga se representa según el gráfico Momento vs. Rotación de la Figura 6.17. La curva envolvente o “*backbone curve*” caracteriza de buena manera su comportamiento, y permite identificar que la fluencia se alcanza en  $M = 85$  [tonf·m] para una distorsión de piso de  $\theta=0,009$  [rad], coincidiendo con el momento plástico de la viga  $M_p=84,2$  [tonf·m]. Ya en su rango plástico se inicia la etapa de endurecimiento por deformación del acero, donde la viga sigue tomando carga hasta alcanzar una distorsión de piso de  $\theta=0,05$  [rad]. Para dicha rotación ésta presenta su primera pérdida de resistencia: de un 12% con respecto a  $M_{\max}$  en el *peak* positivo, y de un 30% con respecto a  $M_{\max}$  en el negativo. La línea amarilla de esta curva señala el momento de falla predicho por las ecuaciones de FEMA 350, valor que prácticamente coincide con la resistencia máxima alcanzada por la viga. Sin embargo, un diseño más conservador considera el valor del momento  $M_f$  como la resistencia esperada de la viga, con el fin de diseñar por capacidad los elementos vecinos de la conexión con una sollicitación superior en caso de contar con una viga de acero con una mayor sobrerresistencia.

La Figura 6.18 pretende validar el cumplimiento del requerimiento de la especificación AISC 341 (2010b) para conexiones viga-columna en marcos rígidos especiales SMF. En ella se observa que efectivamente la conexión es capaz de sostener una rotación entre piso ( $\theta$ ) de al menos 0,04 [rad],

y que su capacidad a flexión medida en la cara de la columna es de al menos  $0,8M_p$  de la viga conectada para dicha rotación entre piso.

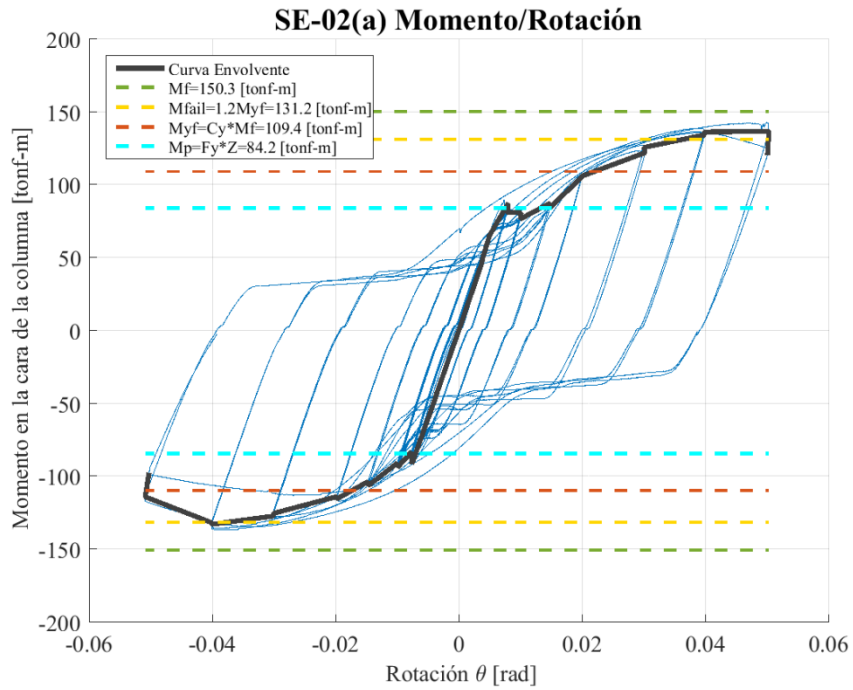


Figura 6.17: Momento vs. Rotación para el espécimen SE-02(a).

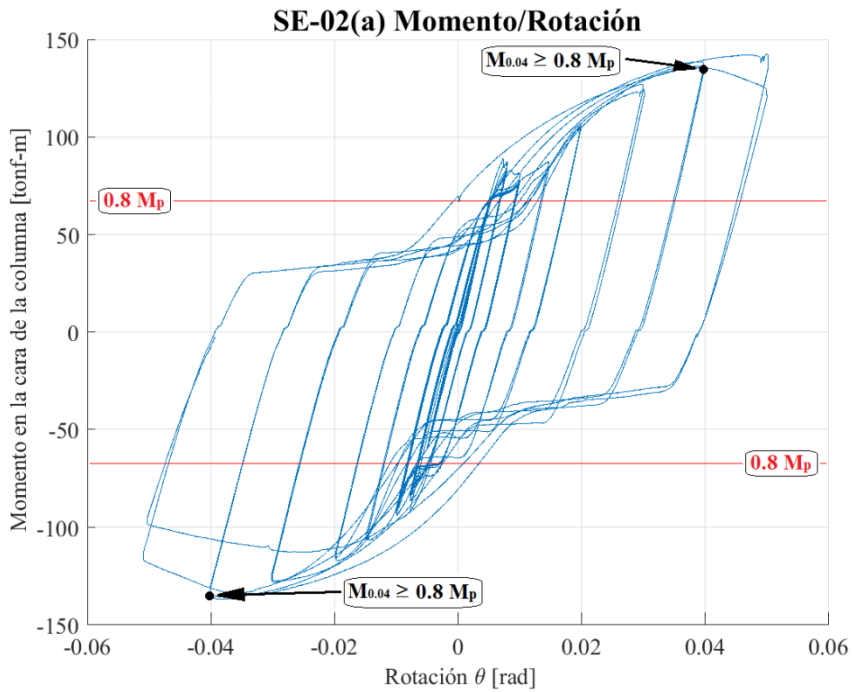
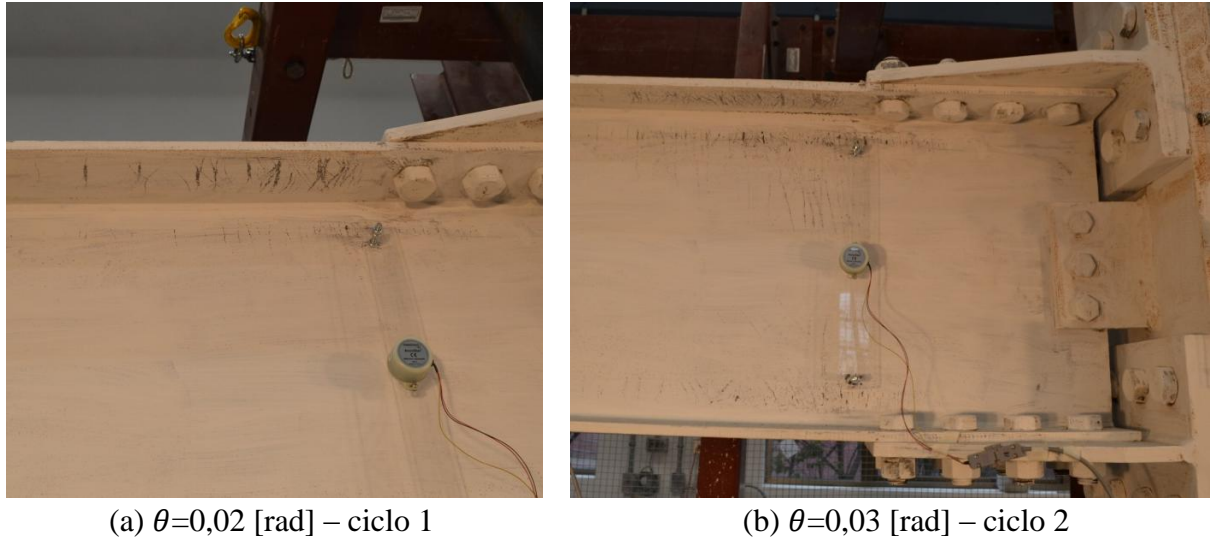


Figura 6.18: Momento vs. Rotación indicando que se cumplen los requerimientos de AISC 341 (2010b) para conexión viga-columna en SMF (“Special Moment Frame”).

Haciendo un análisis cualitativo de lo observado durante el ensayo, los primeros indicios de fluencia se presentan en las alas de la viga para una distorsión de piso de  $\theta=0,02$  [rad], para luego manifestarse en el alma de ésta ya en  $\theta=0,03$  [rad], como muestra la Figura 6.19. Para estos valores de  $\theta$ , el espécimen está en pleno rango plástico según la curva Momento vs. Rotación de la Figura 6.17.



**Figura 6.19: Inicio de fluencia en (i) alas y (ii) alma en la viga.**

El efecto de pandeo local en las alas de la viga se manifiesta cuando se alcanza una distorsión de piso de  $\theta=0,04$  [rad], y se hace más notorio al completar el segundo ciclo para este  $\theta$ . Se puede concluir que éste no conlleva una degradación en la resistencia a flexión del espécimen, pues se sigue transfiriendo momento desde la columna a la viga.



**Figura 6.20: Inicio de pandeo local en las alas de la viga para  $\theta=0,04$  [rad].**

El espécimen comienza a manifestar la rótula plástica con mayores deformaciones al llegar a una rotación entre piso de  $\theta=0,05$  [rad]. Los dos ciclos que se realizan para esta etapa de carga son distintos entre sí, pues en el primero el pandeo local se hace más notorio, pero se nota una pérdida de capacidad recién en el segundo *peak* de este ciclo (ver Figura 6.21), mientras que en el

segundo ciclo ésta se degrada definitivamente pandeándose incluso el alma de la viga. La rótula plástica se puede observar claramente en la Figura 6.22, donde se observa que su largo coincide con una altura de viga (distancia entre inclinómetros).



(a) Ciclo 1 – *peak* positivo



(b) Ciclo 1 – *peak* negativo

**Figura 6.21: Pandeo local excesivo en la viga para el ciclo 1 de la distorsión de piso  $\theta=0,05$  [rad].**



(a) Ciclo 2 – *peak* positivo



(b) Ciclo 2 – *peak* negativo



(c) Ciclo 2 – *peak* negativo

**Figura 6.22: Rótula plástica desarrollada para una distorsión de piso  $\theta=0,05$  [rad].**

Volviendo a los datos registrados por los sensores, en este ensayo todos ellos se mantienen fijos en su posición, a diferencia del ensayo anterior. Los dos LVDTs ubicados en la zona panel presentan un corrimiento inferior a 0,5 [mm] y registran deformaciones inferiores al milímetro, concluyendo que esta zona no presenta deformación angular.

El apoyo de la viga sí presenta un corrimiento significativo de 6,5 [mm], registrando un valor máximo de casi 16 [mm] y mínimo de -4 [mm]. Esos 6,5 [mm] se pueden atribuir a deformaciones en las piezas de acero entre la viga y su base anclada a la losa de reacción, aunque excluyendo a la biela rígida, pues ésta fluye cuando alcanza una fuerza axial de 212 [tonf] (acero SAE 1045 laminado y diámetro 80 [mm]) y la celda de carga no registra más de 44 [tonf].

El apoyo rotulado de la columna no presenta un asentamiento vertical según los LVDTs dispuestos en él, pero sí uno horizontal máximo de 5,4 [mm], el cual se comienza a manifestar a partir de  $\theta=0,01$  [rad] (Apéndice C). Este valor corresponde a un 3% del desplazamiento entre piso en el instante en el que se manifiesta ese corrimiento, por lo tanto, no es necesario corregir el valor del desplazamiento entre piso.

Los inclinómetros ubicados en la viga y alas de la columna registran los datos necesarios para concebir las curvas de rotación total en la conexión y en la viga. La Figura 6.23 muestra el Momento vs. Rotación Total en la conexión, donde se ve que alcanza una rotación total  $\theta_c$  de 0,04 en sentido anti-horario (hacia el muro de reacción) y de casi 0,03 hacia el lado este.

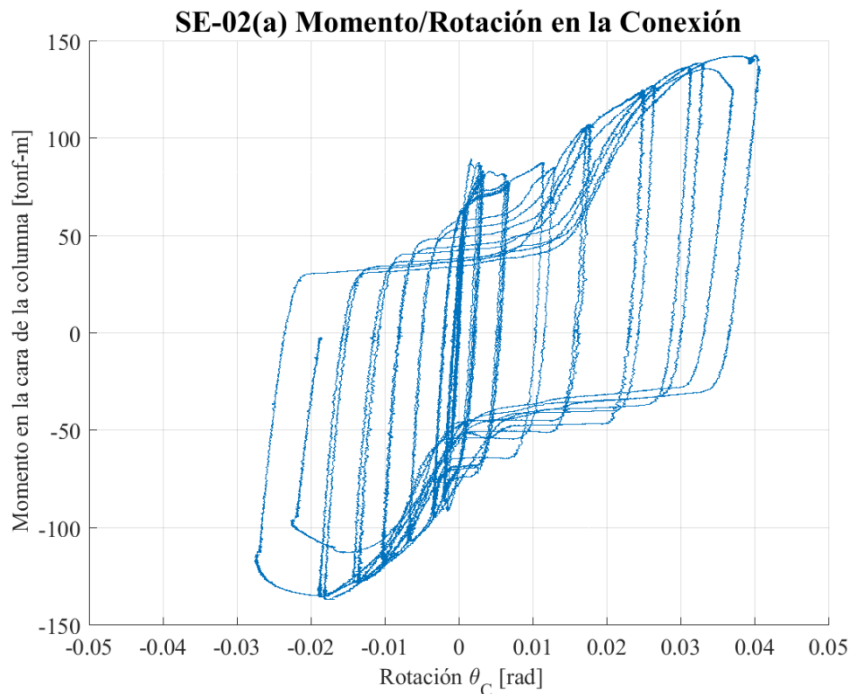
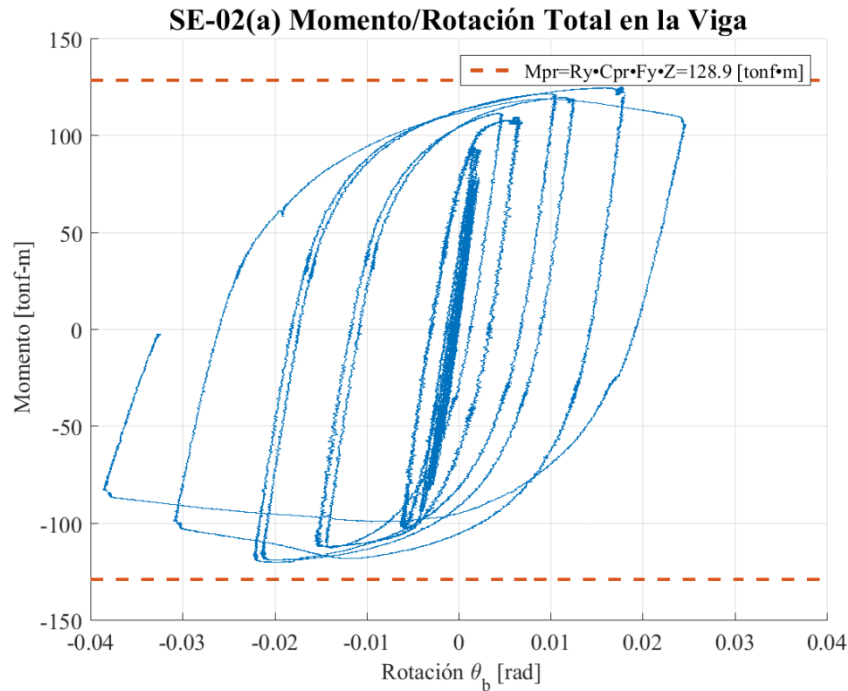


Figura 6.23: Momento vs. Rotación Total en la conexión del espécimen SE-02(a).

La Figura 6.24 exhibe la respuesta de la viga durante el ensayo, donde el ciclo de histéresis presenta degradación de resistencia para los máximos valores de rotación total. El momento

máximo alcanzado en la zona de rótula plástica es de 125,29 [tonf·m] en los *peaks* positivos y de 119,9 [tonf·m] en los negativos, valores muy cercanos al momento plástico probable en la viga  $M_f=128,9$  [tonf·m]. Esto indica que el coeficiente de sobrerresistencia ( $R_y$ ) y el de conexión *peak* ( $C_{pr}$ ) están bien estimados.



**Figura 6.24: Momento vs. Rotación Total de la viga en la zona de rótula plástica para el espécimen SE-02(a).**

En relación a la soldadura de penetración completa en ambos T-stubs utilizados, ésta no presenta daño visible alguno.

## 6.5. Especimen SE-02(b)

El espécimen SE-02(b) es ensayado con la viga, perfiles T y pernos contemplados originalmente para ir conectados en el lado oeste del ensayo SE-02, pero que finalmente no se utilizan por razones ya mencionadas. Las condiciones de este ensayo se mantienen respecto del ensayo SE-2(a): el actuador hidráulico sigue el protocolo de carga descrito en la sección 3.3 a una velocidad de 25 [mm/min], dura 6 horas, y la tasa de muestreo del sistema de adquisición es de 40 [datos/s]. En la Figura 6.25 se muestra el espécimen listo para ser ensayado.

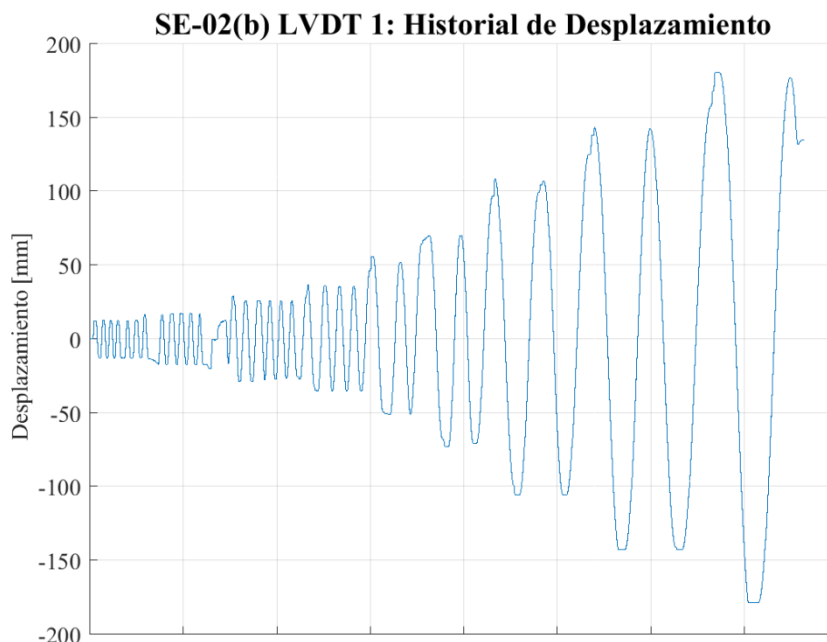
En su posición inicial, la columna y la biela donde se apoya la viga no se encuentran niveladas, por lo tanto, se endereza la columna con el actuador hidráulico para partir el ensayo. Se ejecutan los ciclos de las dos primeras etapas de carga, pero luego se detiene el ensayo y se devuelve el espécimen a su posición de equilibrio, con el fin de partir el ensayo con carga cero en el actuador

hidráulico. Éste se retoma realizando un ciclo de la primera etapa de carga, para luego continuar con el protocolo de carga desde la tercera etapa.



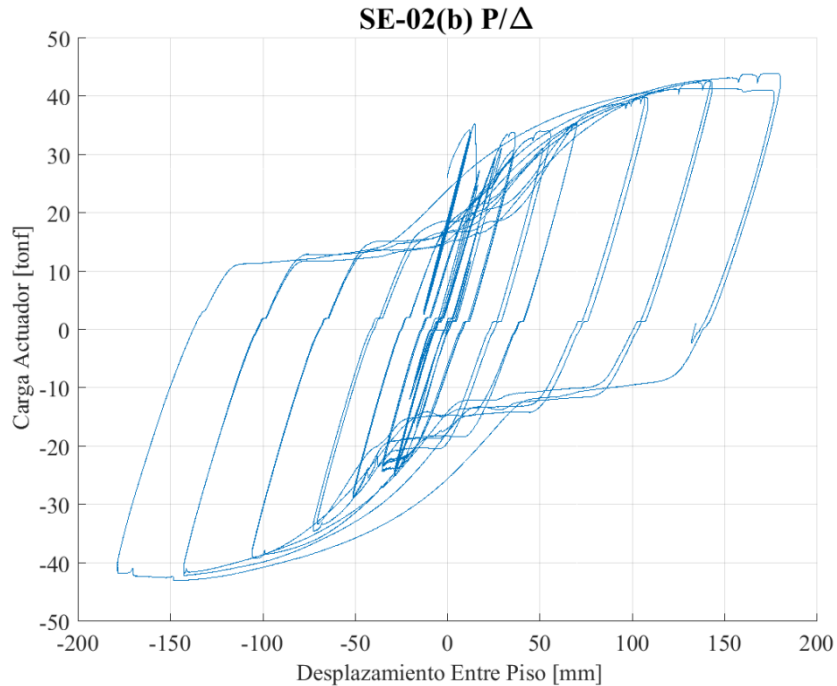
**Figura 6.25: Espécimen SE-02(b) listo para ser ensayado.**

El historial de desplazamiento registrado por el LVDT 1 se muestra en la Figura 6.26, donde se observa que también se alcanzan los desplazamientos entre piso hasta la etapa de carga de  $\theta=0,05$  [rad]. El segundo ciclo para dicha rotación entre piso no se completa, porque en su primer *peak* el espécimen experimenta una falla frágil. Al notarla, éste se lleva al equilibrio, donde queda con una deformación remanente de 135 [mm].



**Figura 6.26: Historial de desplazamiento para el espécimen SE-02(b).**

La respuesta global de la probeta SE-02(b) se presenta a través del ciclo de histéresis de la Figura 6.27, el cual es prácticamente idéntico al de la probeta SE-02(a). El estrechamiento o “pinching” se puede atribuir al deslizamiento que experimentan los pernos sometidos a corte, ubicados en el alma de los T-stubs (Figura 6.28). La fuerza máxima aplicada por el actuador hidráulico  $P_{max}$  es de 44 [tonf], para un desplazamiento entre piso de 174,3 [mm].



**Figura 6.27: Carga vs. Desplazamiento para el espécimen SE-02(b).**



**Figura 6.28: Deslizamiento observado en los pernos sometidos a corte para  $\theta=0,03$  [rad].**

La curva Momento vs. Rotación de la viga se expone en la Figura 6.29, donde también se incluye la curva envolvente caracteriza su comportamiento. Aquí se identifica la fluencia en  $M = M_{yf} = 109,4$  [tonf·m], para una distorsión entre piso de  $\theta=0,01$  [rad]. En la etapa de endurecimiento por deformación del acero, la viga sigue tomando carga hasta alcanzar una distorsión de piso de  $\theta=0,05$  [rad], en cuyo último ciclo pierde resistencia cuando se produce la falla frágil por: iniciación de fractura de su área neta. El momento máximo positivo que se alcanza es de 146,2



[tonf·m], muy cercano al momento plástico probable  $M_f = 150,3$  [tonf·m] (línea verde), mientras que el momento máximo negativo que se alcanza es de 132,6 [tonf·m], muy cercano al momento de falla considerado por diseño  $M_{fail} = 1,2M_{yf} = 131,2$  [tonf·m]. Estos valores indican que, al igual que para el espécimen SE-01(a), es más conservador considerar el valor del momento  $M_f$  como la resistencia esperada de la viga.

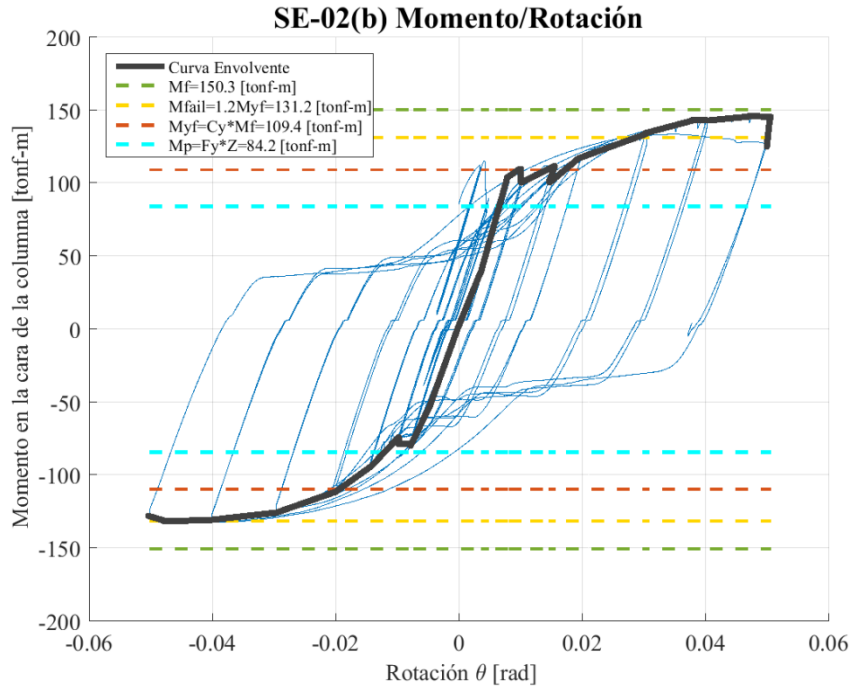


Figura 6.29: Momento vs. Rotación para el espécimen SE-02(b).

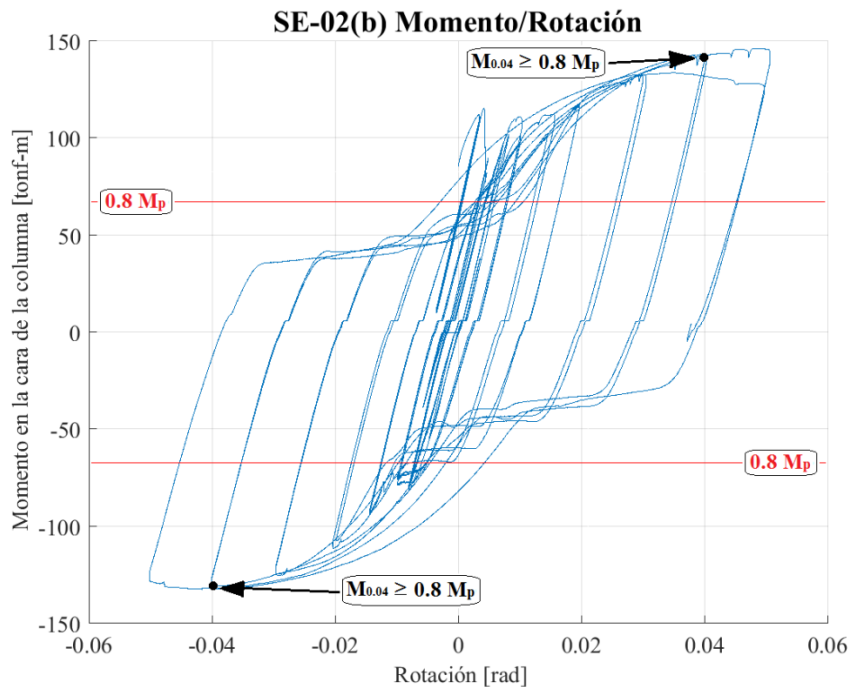
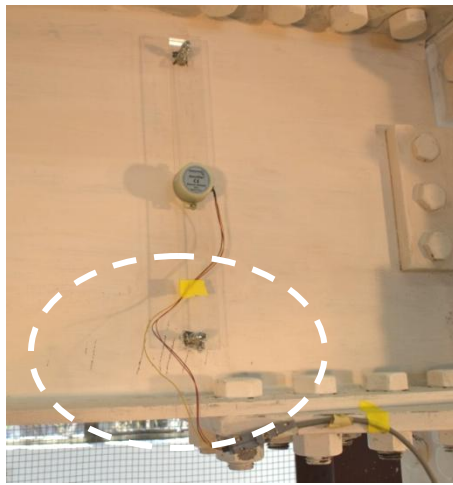


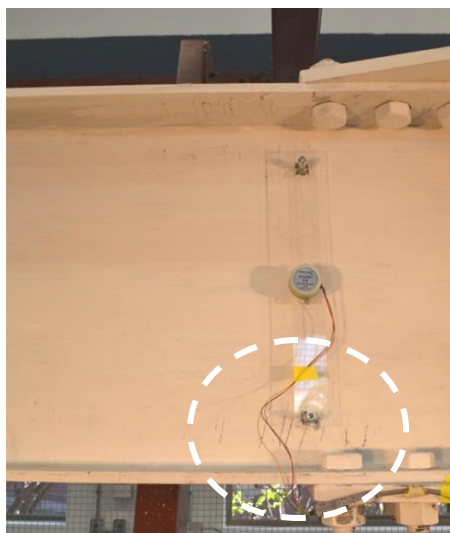
Figura 6.30: Momento vs. Rotación indicando que se cumplen los requerimientos de AISC 341 (2010b) para conexión viga-columna en SMF (“Special Moment Frame”).

Este segundo ensayo del espécimen SE-02 también arroja que se cumplen los requerimientos de la especificación AISC 341 (2010b) para conexiones viga-columna en marcos rígidos especiales SMF, ya que la conexión es capaz de sostener una rotación entre piso ( $\theta$ ) de al menos 0,04 [rad], para la cual además su capacidad a flexión medida en la cara de la columna es mayor que  $0,8M_p$ . Este cumplimiento se indica en la Figura 6.30.

Durante el ensayo, los primeros indicios de fluencia se presentan en el alma de la viga para una distorsión de piso de  $\theta=0,005$  [rad] (Figura 6.31). Estas manifestaciones prematuras de deformación se podrían atribuir a la poca libertad para desplazarse que le otorga el sistema de restricción lateral a la viga, sin embargo, no se ven acrecentadas conforme aumenta el desplazamiento entre piso, sino hasta que se alcanza  $\theta=0,02$  [rad]. En la Figura 6.32 se ve el estado de la viga para dicha distorsión entre piso.



**Figura 6.31: Manifestaciones prematuras de deformación en el alma de la viga del espécimen SE-02(b).**



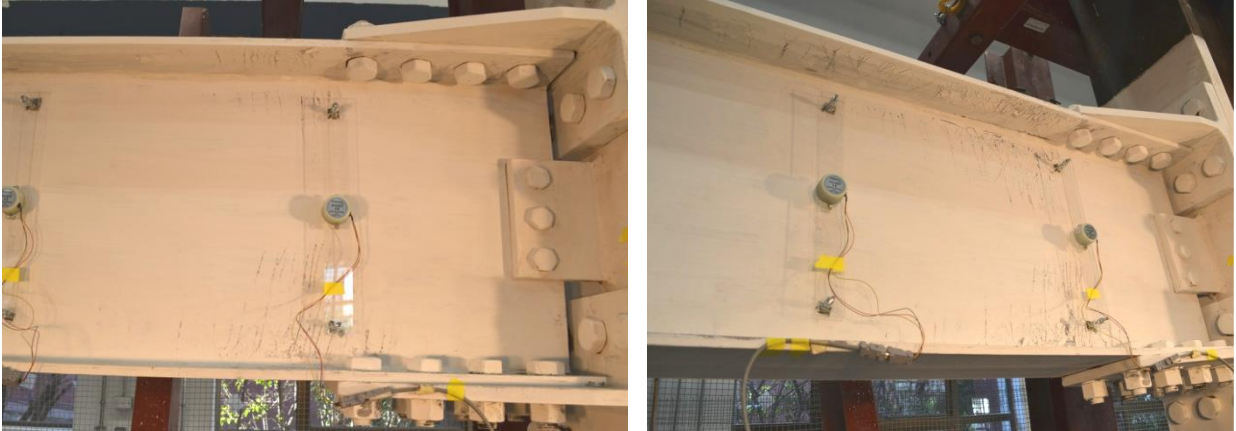
(a)  $\theta=0,02$  [rad] – ciclo 1



(b)  $\theta=0,02$  [rad] – ciclo 2

**Figura 6.32: Inicio de fluencia en alas y alma de la viga.**

Para una distorsión angular entre piso de  $\theta=0,03$  [rad], la fluencia se hace más notoria, al propagarse la deformación hacia el fibras interiores de la sección y abarcando una mayor área a lo largo de la zona de rótula plástica, pero de todas maneras concentrándose en donde terminan los T-stubs, como se observa en la Figura 6.33.

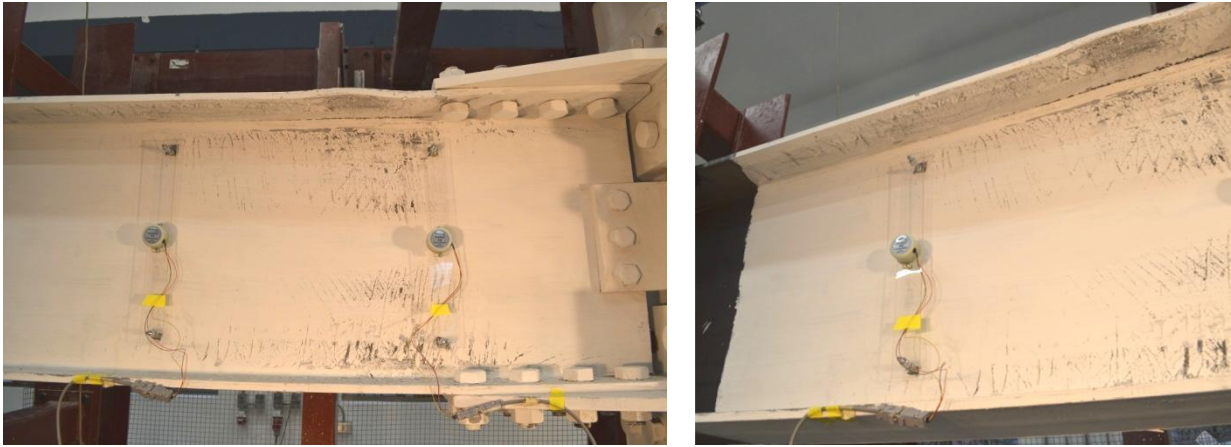


**Figura 6.33: Deformación en la viga para  $\theta=0,03$  [rad].**

El efecto de pandeo local en las alas de la viga, al igual que para SE-02(a), se manifiesta cuando se alcanza una distorsión de piso de  $\theta=0,04$  [rad], valor para el cual la zona de la última fila de pernos a corte del T-stub superior experimenta una deformación significativa, como se exhibe en la Figura 6.34.



**Figura 6.34: Estado de la viga y conexión para  $\theta=0,04$  [rad] (ciclo 2).**



**Figura 6.35: Inicio de pandeo local en las alas de la viga para  $\theta=0,04$  [rad].**

Hasta completar el primer ciclo para una rotación entre piso de  $\theta=0,05$  [rad], el espécimen sigue tomando carga, aún cuando el pandeo local en las alas y alma aumenta. En la Figura 6.36 se pueden ver las deformaciones existentes en los *peaks* del primer ciclo para esta rotación entre piso.



**Figura 6.36: Pandeo local alas y alma de la viga para el ciclo 1 de la distorsión de piso  $\theta=0,05$  [rad].**

En el segundo ciclo para  $\theta=0,05$  [rad], el pandeo local en el ala inferior de la viga se ve exacerbado como muestra la Figura 6.37. La curva Momento vs. Rotación indica que en este *peak* la viga disminuye su resistencia en un 8,5% con respecto al máximo momento positivo alcanzado en el ciclo anterior, pérdida atribuida a la falla frágil que experimenta el ala superior de la viga y que se observa en la Figura 6.38. Esta falla ocurre en una de las perforaciones de la última fila de pernos de la conexión, siendo sorpresiva porque no se presenta en el ensayo del espécimen SE-02(a), pero sí era predecible antes de alcanzar esta distorsión de piso, porque las imágenes muestran un adelgazamiento de esa zona y con menos Pintacal cada vez.

El espécimen se lleva a su posición de equilibrio, sin terminar el segundo ciclo para  $\theta=0,05$  [rad].



**Figura 6.37: Deformación en el espécimen SE-02(b) para una distorsión de piso  $\theta=0,05$  [rad] (ciclo 2).**



**Figura 6.38: Inicio de fractura del área neta de la viga en T-stub superior, para  $\theta=0,05$  [rad] (ciclo 2).**

Al observar los datos registrados por los LVDTs en la zona panel, apoyo de viga y base de la columna, se puede decir lo siguiente: los dos LVDTs ubicados en la zona panel presentan un corrimiento inferior a 0,2 [mm] y registran deformaciones inferiores al milímetro, concluyendo que esta zona no presenta deformación angular; el apoyo de la viga presenta un corrimiento de 2,5 [mm] aproximadamente, registrando un valor máximo de 12,6 [mm] y mínimo de -7 [mm]; y el apoyo rotulado de la columna presenta un asentamiento máximo vertical de 4 [mm] y horizontal de 0,7 [mm].

Las curvas de rotación total en la conexión y en la viga, al igual que en el ensayo anterior, se obtienen a partir de los inclinómetros dispuestos en la estructura. La Figura 6.39 indica el comportamiento de la conexión, donde se ve que entra en su rango plástico, experimentando una rotación no despreciable. Alcanza una rotación total  $\theta_c$  de 0,03 [rad] cuando la columna rota hacia el este, y de 0,02 [rad] cuando la columna rota hacia el oeste (muro de reacción).

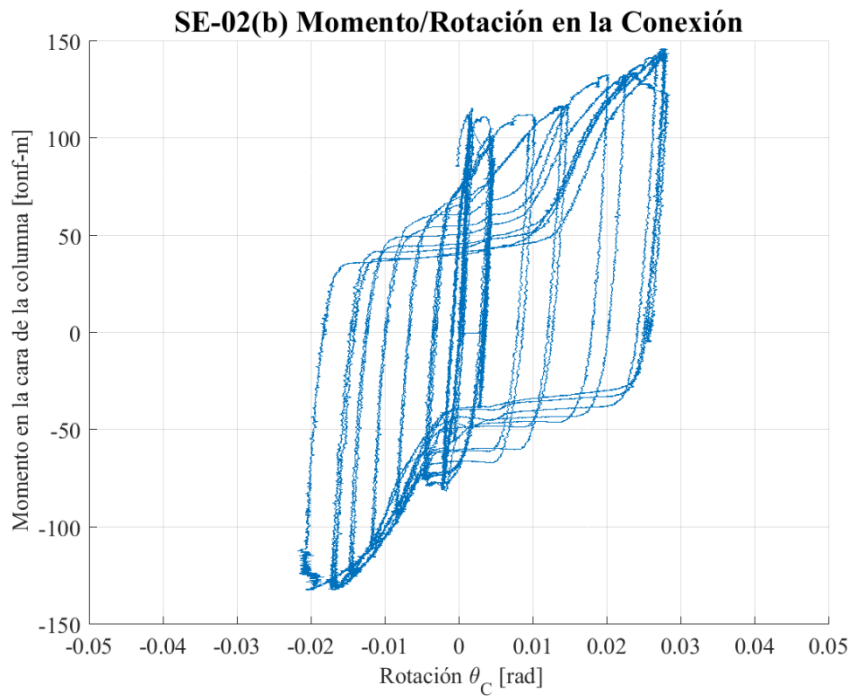


Figura 6.39: Momento vs. Rotación Total en la conexión del espécimen SE-02(b).

La Figura 6.40 muestra la respuesta de la viga durante el ensayo SE-02(b). El momento máximo positivo alcanzado en la zona de rótula plástica es de 128,1 [tonf·m] y el negativo es de 116,2 [tonf·m]. Ambos valores están cerca del momento plástico probable en la viga  $M_f=128,9$  [tonf·m].

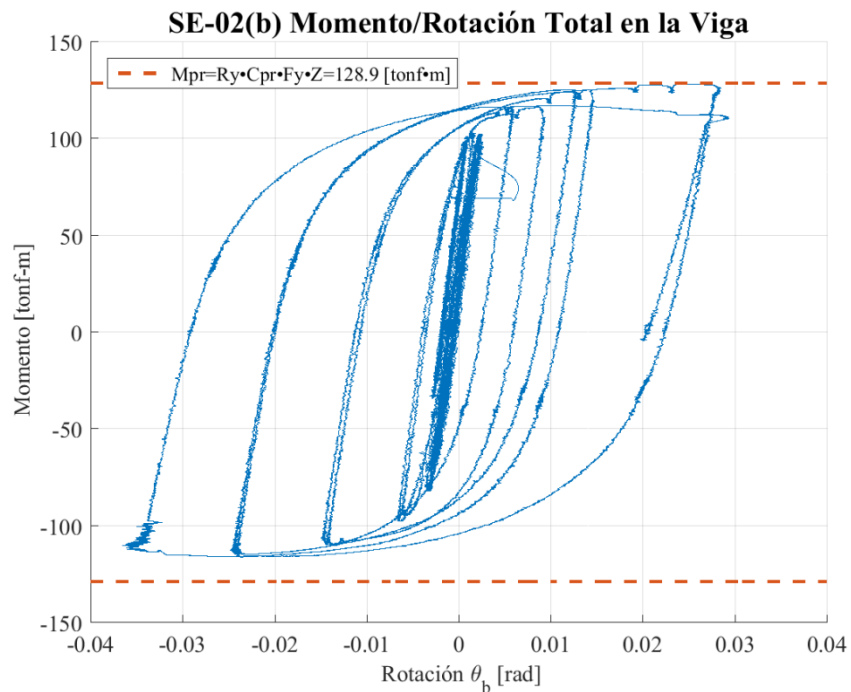


Figura 6.40: Momento vs. Rotación Total de la viga en la zona de rótula plástica para el espécimen SE-02(b).

En relación a la soldadura de filete en ambos T-stubs utilizados, ésta no presenta daño visible alguno.

## 6.6. Comparación entre especímenes

La comparación entre los tres especímenes ensayados se realiza en términos de la energía que disipan y de su rigidez secante. La Figura 6.41 muestra ambas vigas del espécimen SE-01 se comportan de igual forma, los especímenes SE-02 disipan la misma cantidad de energía con respecto al otro, pero una mayor cantidad que el espécimen SE-01. Se observa también que el inicio del efecto de pandeo local en los ensayos SE-02 para  $\theta=0,04$  [rad] (ciclo 29) incide de forma significativa en la disipación de energía de la conexión, y que el primer ciclo para  $\theta=0,05$  [rad] (ciclo 31) aporta con el 20% del total de energía disipada de dicha probeta.

Las curvas de cantidad de energía disipada acumulada validan las recomendaciones de diseño actuales para conexiones de momento, al establecer que el diseño debe garantizar que la disipación de energía sea mediante las vigas, puesto que son capaces de disipar más que los perfiles T soldados cuando presenta deformaciones plásticas. Si un elemento disipa una gran cantidad de energía, disminuye la incertidumbre en cuanto a cómo fallará una conexión.

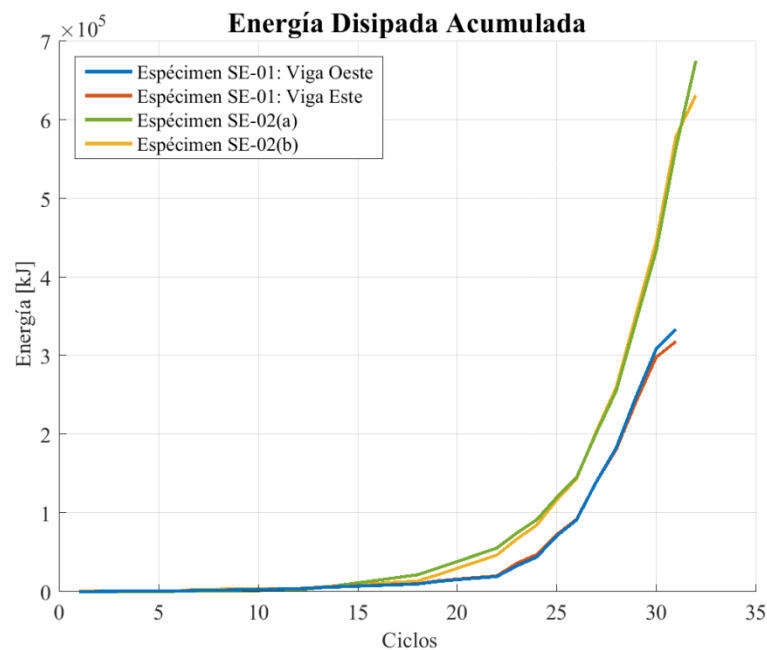


Figura 6.41: Energía disipada acumulada por las vigas de especímenes SE-01 y SE-02.

La Figura 6.42 muestra la rigidez secante obtenida a partir de la curva Momento vs. Rotación ente piso de las vigas de cada espécimen. Ésta va disminuyendo, tal como se espera, debido al daño que comienza a manifestarse luego de una distorsión de piso de 0,01 [rad] y que se ve

reflejado en la disminución de la energía libre almacenada, que se comienza a disipar a partir del ciclo 18 ( $\theta=0,01$  [rad]) en la curva de energía disipada acumulada.

La rigidez secante no muestra una gran diferencia entre los especímenes, ni tampoco manifiesta una degradación súbita, concordante con los ciclos de histéresis estables obtenidos.

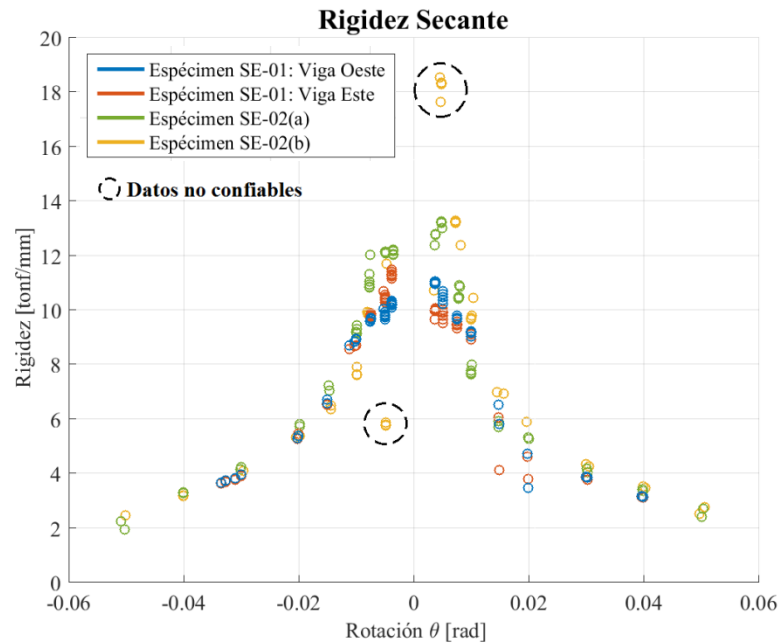


Figura 6.42: Rigidez secante de la curva M vs.  $\theta$  de las vigas de especímenes SE-01 y SE-02.



# Capítulo 7. Conclusiones

## 7.1. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones que surgen de la investigación experimental llevada a cabo sobre conexiones de momento viga-columna en acero a escala real.

El diseño de los especímenes se logró de manera satisfactoria, cubriendo los modos de falla más significativos de la T soldada, de la viga y de la columna. El procedimiento de diseño de las recomendaciones FEMA 350 (2000) para la conexión DST se consiguió aplicar tal como es establecido para el espécimen SE-02, pero se modificó para diseñar los especímenes donde el mecanismo de falla deseado no es la fluencia en las vigas, adaptándolo de tal forma que los elementos fusibles en la conexión tuvieran una menor capacidad.

Durante la etapa de diseño, se consiguieron diferencias de criterio entre la capacidad que especifica FEMA para la viga y lo que señala la normativa actual AISC 358 (2011) para el diseño de conexiones de momento precalificadas. FEMA la cuantifica como  $1,2M_{yf}$  y AISC como  $M_f$ , aunque ambas persiguen el mismo principio de diseño de garantizar que la deformación inelástica de la conexión se logre mediante fluencia en las vigas. Se prefirió prevalecer a FEMA 350 para ser consecuente con el diseño, y concluir acerca de la relevancia de esta diferencia una vez obtenidos los resultados experimentales.

La aplicación de carga axial en la columna planteada inicialmente en el diseño se prescindió, pues la magnitud de la fuerza que se debía aplicar según el diseño de Alarcón (2016) no era significativa, al no superar en más de un 3% a la carga máxima de fluencia  $P_y$  de la columna.

En relación a la elaboración de planos de fabricación, se concluye que esta etapa fue decisiva en el dimensionamiento final de los elementos estructurales, debido a que permitió esclarecer las limitaciones constructivas, en cuanto a cumplimiento de tamaños mínimos y máximos, para hacer factible el montaje de la estructura. Se consiguió una buena confección de ellos, pues cumplieron con su objetivo al construirse los especímenes de manera correcta por parte de la maestranza a cargo.

Es importante destacar que los planos de fabricación iniciales sufrieron modificaciones debido a unos espesores de plancha no disponibles. Esto permite concluir que la verificación de la disponibilidad en el mercado de componentes como espesores o diámetros de pernos es fundamental, pues ésta condiciona directamente el diseño. Un ingeniero civil no sólo debe cumplir con un buen diseño, sino que además debe ser capaz de lograr que la teoría y la realidad conversen.

Las propiedades reales del material base de los elementos de acero se determinaron con éxito. Los resultados de los ensayos de probetas de acero ASTM A36 arrojaron que éste posee una tensión de fluencia de 1,13 veces la tensión nominal mínima de fluencia  $F_y$  y una resistencia a la tracción de 1,12 veces la resistencia nominal mínima a la tracción  $F_u$ . Se concluye que el material con el que se fabricaron los especímenes posee una sobrerresistencia por debajo del valor teórico  $R_y.C_{pr} = 1,56$ , utilizado para determinar el momento plástico probable en la viga  $M_{pr}$ .

Con respecto al material base de los pernos de conexión, los resultados de los ensayos de probetas de acero ASTM A490 indicaron que éste posee una tensión de fluencia de 1,22 veces la tensión nominal mínima de fluencia  $F_y$  y una resistencia a la tracción de 1,20 veces la resistencia nominal mínima a la tracción  $F_u$ .

Se logró ensayar en el Laboratorio Experimental de Estructuras del Dpto. de Ingeniería Civil tres probetas diseñadas: SE-01, y en dos ocasiones SE-02. No fue posible ensayar las dos probetas restantes (SE-03 y SE-04) debido a la falla de una de las celdas de carga, sensores indispensables porque además de registrar la reacción en las vigas, son parte del sistema de apoyo de éstas. Como el diseño demanda dos vigas conectadas a la columna para que controle el estado límite de fluencia por corte en la zona panel, no se puede prescindir de dicho sensor.

La etapa experimental previa a los ensayos presentó inconvenientes imprevistos que fueron subsanados de forma satisfactoria. A partir de éstos se concluye que es importante revisar todos los elementos estructurales al momento de ser despachados, verificando que cumplan con sus dimensiones, ubicación de perforaciones y calce entre ellos, con el fin de evitar una demora considerable en la investigación que pudiese surgir como consecuencia de alguna rectificación de piezas y/o ajuste de perforaciones.

Durante los ensayos los especímenes respondieron según lo esperado, presentando una respuesta dúctil y estable con manifestaciones de fluencia y deformaciones plásticas en las zonas donde el diseño pronosticó. Por lo tanto, se concluye que el procedimiento de diseño actual especificado por las recomendaciones para marcos de momento FEMA 350 garantiza la respuesta de una conexión de momento con perfiles T soldados.

Se logró evaluar la resistencia, rigidez y capacidad sísmica de conexiones DST con perfiles T soldados, a partir de los datos registrados por la instrumentación. La conexión SE-01 fue capaz de sostener una deformación angular entre piso de 0,04 radianes, alcanzando una capacidad a flexión en la cara de la columna significativamente mayor que  $0,8M_p$  de la viga conectada, y sin experimentar degradación de resistencia alguna. Es importante destacar que la distorsión de piso de 0,04 radianes no fue alcanzada en la dirección oeste debido a los problemas con la instalación experimental, descritos en varias ocasiones en la presente memoria.

Las conexiones SE-02(a) y SE-02(b) alcanzaron y sostuvieron una deformación angular entre piso que excedió los 0,04 radianes en ambas direcciones, con una capacidad a flexión en la cara

de la columna también superior que  $0,8M_p$  de la viga conectada. Se observó degradación en la resistencia para una distorsión de piso de 0,05 radianes: de un 4,9% en el momento positivo y de un 17,5% en el momento negativo con respecto al máximo registrado en SE-02(a); y de un 8,5% en el momento positivo con respecto al máximo registrado en SE-02(b). Este comportamiento experimental permite concluir que la conexión SE-02 cumple con los requerimientos de las especificaciones sísmicas de la AISC para ser utilizada en estructuras de marco rígido especial (SMF).

Para modificar el mecanismo de falla en la conexión, y cambiarlo desde la flexión plástica en las alas de los T-stubs al desarrollo de rótulas plásticas, basta con aumentar el espesor de ala de los T-stubs. Sin embargo, se recomienda diseñar la conexión viga-columna de manera que el comportamiento inelástico sea controlado por fluencia por flexión en la viga, pues de esta forma se garantiza una mayor disipación de energía, evitando un posible mecanismo de falla frágil.

Volviendo a la diferencia entre la cuantificación de la capacidad de la viga según FEMA y AISC, se concluye que FEMA está en lo correcto al definir un valor que es prácticamente igual a la resistencia máxima alcanzada por la viga, según la curva Momento vs. Rotación del espécimen SE-02. Sin embargo, si la viga alcanzara una resistencia que supere a la capacidad que le da FEMA, podría también estar superando la capacidad de algún elemento de la unión, llegando a inducir una falla frágil. Por lo tanto, es más conservador definir la capacidad en la viga como lo hace AISC para efectos de diseño, pues  $M_f$  se encuentra por sobre su resistencia máxima alcanzada.

Las ventajas que se lograron identificar de esta conexión son que el uso de perfiles soldados brinda una libertad de dimensionamiento que resulta en un diseño más óptimo que cuando se utilizan perfiles laminados; su ensamblaje no requiere soldaduras en obra, las cuales poseen una mayor dificultad para realizarse, suelen ser más costosas y requieren de personal calificado para su materialización, factores que pueden llegar a afectar su calidad; y que efectivamente la rótula plástica en la viga se forma afuera de la zona de T-stubs, dentro del área pronosticada para experimentar esas deformaciones plásticas. Esto indica que esta conexión aleja las rótulas plásticas de la columna, y por ende, no compromete la estabilidad de piso.

Finalmente, se concluye que ninguno de los dos tipos de soldadura utilizados en la fabricación de los perfiles T presentó algún indicio de daño visible, favoreciendo futuras investigaciones sobre este tipo de conexión.

## **7.2. Recomendaciones**

Durante el primer ensayo se detuvo la aplicación de carga para subirle la presión a la bomba que alimenta al actuador hidráulico, se apagó el computador que se encontraba almacenando los datos registrados, y se desprendieron de la estructura dos inclinómetros y un LVDT producto de una

mala fijación. A partir de estos problemas se recomienda utilizar en la realización de ensayos experimentales equipos que estén en buen estado, con sus mantenciones al día y en óptimas condiciones iniciales, junto con mejorar la forma de fijación de los sensores de instrumentación a una que garantice inmovilidad de sus soportes. Esto último es primordial, pues que se desprenda un sensor conlleva a una pérdida de data experimental valiosa. Lo que se hizo para los siguientes ensayos fue utilizar doble o triple tuercas para disminuir la holgura en el movimiento de los soportes y aplicar una mayor cantidad de pegamento a las partes en contacto directo con el acero de los especímenes.

Finalmente, se recomienda incorporar en futuras investigaciones experimentales de uniones viga-columna la aplicación de carga axial representativa en la columna para evaluar el desempeño de la conexión bajo esa condición, junto con la implementación de otras fuentes de análisis como fotogrametría o el uso de *strain gages* para analizar en detalle la respuesta de los elementos.

# Bibliografía

- AISC. 2003. Design Guide 16: Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.
- AISC, 360-10. 2010a. Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.
- AISC, 341-10. 2010b. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.
- AISC, 358-10. 2011. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.
- Alarcón, C. “Estudio numérico de conexiones DBT (Double Built-Up Tee) para Marcos de Momento Sismo Resistentes” Tesis para optar al Título de Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2016 (en preparación).
- ASTM, A36/A36M-08. 2008. Standard Specification for Carbon Structural Steel. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM, A490M-10. 2010. Standard Specification for Carbon High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints (Metric). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM, E8/E8M-15a. 2015. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bravo, M. “Estudio analítico experimental de perfiles T soldados sometidos a carga cíclica” Tesis para optar al Título de Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2013.
- Desjouis, G. “Estudio analítico de conexiones de momento viga-columna usando perfiles T soldados” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2006.
- FEMA, 350. 2000. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA.
- Girão Coelho A., Biljaard F. Gresnigt N., and Simoes Da Silva L. 2004. Experimental assessment of the behavior of bolted T-stub connections made up of welded plates. Journal of Constructional Steel Research 60: 269-311.

- Gómez, G. “Ensayo de perfiles soldados de sección T sometidos a carga monotonica” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- Herrera, R.A., Gomez, G., and Sarrazin, M. 2009. Design and behavior of welded T-stubs for DST connections. Proceedings of the 6th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Philadelphia, Pennsylvania.
- Muñoz, F. “Ensayo y modelación de muros de hormigón armado tipo T bajo cargas cíclicas con y sin confinamiento e influencia de discontinuidades” Tesis para optar al Título de Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2016 (en preparación).
- Núñez, A. “Diseño, fabricación y montaje de una instalación experimental para el ensayo de conexiones” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2016.
- Piluso, V., Faella, C., & Rizzano, G. 2001a. Ultimate Behavior of Bolted T-stubs. I: Theoretical Model. *Journal of Structural Engineering* 127(6), 686-693.
- Piluso V., Faella C., and Rizzano G. 2001b. Ultimate Behaviour of Bolted T-Stubs. II: Model Validation. *Journal of Structural Engineering* 127(6): 694-704.
- RCSC. 2014. Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts. Research Council On Structural Connections, Chicago, IL, USA.
- Smallidge, J. “Behavior of Bolted Beam-to-Column T-Stub Connections Under Cyclic Loading” Thesis to obtain the Degree Master of Science in Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.
- Swanson, J.A., and Leon, R.T. 2000. Bolted Steel Connections: Tests On T-Stub Components. *Journal of Structural Engineering* 126(1): 50-56.
- Swanson, J.A., & Leon, R.T. 2001. Stiffness modeling of bolted T-stub connection components. *Journal of Structural Engineering* 127(5): 498-505.
- Tamboli, A.R. 2010. Handbook of Structural Steel Connection Design and Details. 2nd Edition. New York, NY: McGraw Hill.

# Apéndice A. Diseño de probetas

## A.1. Diseño de viga

Perfil IE 600x250x16x12

Material:

**Acero ASTM A-36**

$F_{yb} := 250\text{MPa}$  : Tensión nominal mínima de fluencia.

$F_{ub} := 400\text{MPa}$  : Tensión nominal mínima de rotura.

$E := 200000\text{MPa}$  : Módulo de Young.

$\gamma_{\text{acero}} := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$  : Densidad del acero.

$db := 600\text{mm}$

$bbf := 250\text{mm}$

$tbf := 16\text{mm}$

$tbw := 12\text{mm}$

$hb := db - 2 \cdot tbf = 56.8 \cdot \text{cm}$

$Agb := 2 \cdot bbf \cdot tbf + (db - 2 \cdot tbf) \cdot tbw = 148.2 \cdot \text{cm}^2$

$L_{\text{viga}} := 433\text{cm}$  : Largo de viga de ensayo.

$L_v := 900\text{cm}$  : Largo de viga de edificio.

$PPv_{\text{lineal}} := \gamma_{\text{acero}} \cdot Agb = 1.163 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$

$PP_{\text{viga}} := \gamma_{\text{acero}} \cdot Agb \cdot L_{\text{viga}} = 503.6 \cdot \text{kgf}$

$I_{xxb} := \frac{1}{12} \cdot [bbf \cdot db^3 - (bbf - tbw) \cdot (db - 2 \cdot tbf)^3] = 86553.3 \cdot \text{cm}^4$

$r_{xb} := \sqrt{\frac{I_{xxb}}{Agb}} = 24.2 \cdot \text{cm}$

$I_{yyb} := \left[ \frac{1}{12} (db - 2 \cdot tbf) \cdot tbw^3 + \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot tbf \cdot bbf^3 \right] = 4174.8 \cdot \text{cm}^4$

$$r_{yb} := \sqrt{\frac{I_{yyb}}{A_{gb}}} = 5.3 \text{ cm}$$

$$Z_{xxb} := bbf \cdot tbf \cdot (db - tbf) + \frac{1}{4} tbw \cdot (db - 2 \cdot tbf)^2 = 3303.9 \cdot \text{cm}^3 \quad : \text{ M\u00f3dulo pl\u00e1stico, eje x.}$$

$$S_{xxb} := \frac{2I_{xxb}}{db} = 2885.1 \cdot \text{cm}^3 \quad : \text{ M\u00f3dulo resistente, eje x (o } W_{xx}).$$

$$C_w := \frac{1}{24} tbf \cdot bbf^3 \cdot (db - tbf)^2 = 3552666.7 \cdot \text{cm}^6 \quad : \text{ Constante de alabeo.}$$

$$J_w := \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot bbf \cdot tbf^3 + (db - tbf) \cdot tbw^3] = 101.9 \cdot \text{cm}^4 \quad : \text{ Constante torsional.}$$

### ***Esbelteces:***

$$\lambda_{bf} := \frac{bbf}{2tbf} = 7.8 \quad : \text{ Esbeltez de alas.}$$

$$\lambda_{bw} := \frac{hb}{tbw} = 47.3 \quad : \text{ Esbeltez de alma.}$$

$$k_c := \text{if} \left( \frac{4}{\sqrt{\frac{hb}{tbw}}} \leq 0.35, 0.35, \text{if} \left( \frac{4}{\sqrt{\frac{hb}{tbw}}} \geq 0.763, 0.763, \frac{4}{\sqrt{\frac{hb}{tbw}}} \right) \right) = 0.581$$

### **1.1 Dise\u00f1o a corte (viga sin atiesadores de corte)**

$$k_v := \text{if} \left( \frac{hb}{tbw} < 260, 5, "h/tw > 260" \right) = 5$$

$$C_v := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{hb}{tbw} \leq 1.1 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{F_{yb}}} \\ \frac{\left( 1.1 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{F_{yb}}} \right) \cdot \frac{hb}{tbw}}{\frac{hb}{tbw}} & \text{if } 1.1 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{F_{yb}}} < \frac{hb}{tbw} \leq 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{F_{yb}}} \\ \frac{1.51 \cdot k_v \cdot E}{\left( \frac{hb}{tbw} \right)^2 \cdot F_{yb}} & \text{if } \frac{hb}{tbw} > 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{F_{yb}}} \end{cases} = 1$$

$$A_{wb} := db \cdot tbw = 72 \cdot \text{cm}^2$$

$$V_n := 0.6 \cdot F_{yb} \cdot A_{wb} \cdot C_v = 110.13 \cdot \text{tonf} \quad : \text{ Capacidad nominal a corte de la viga.}$$

$$\phi V_n := 0.9 \cdot V_n = 99.12 \cdot \text{tonf}$$



$$V_u := 39.56 \text{ tonf} \quad (\text{Para cap. máxima de actuador})$$

$$F_U := \frac{V_u}{\phi V_n} = 0.4$$

$$\text{if}(F_U < 1, "OK", "Check!") = "OK"$$

## 1.2 Diseño a flexión

*Verif. de Compacidad (AISC 360 - Tabla B4.1b):*

$$\lambda_{pf} := 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}} = 10.7$$

$$\lambda_{pw} := 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}} = 106.3$$

$$\text{if}(\lambda_{bf} \leq \lambda_{pf}, "OK: Alas COMPACTAS", "Check!") = "OK: Alas COMPACTAS"$$

$$\text{if}(\lambda_{bw} \leq \lambda_{pw}, "OK: Alma COMPACTA", "Check!") = "OK: Alma COMPACTA"$$

*F2: Doubly Symmetric Compact I-Shaped Members (...) Bent About Their Mayor Axis:*

$$L_b := \frac{L_v}{4} = 225 \cdot \text{cm}$$

$$L_p := 1.76 \cdot r_{yb} \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}} = 264.248 \cdot \text{cm}$$

$$\text{if}(L_b \leq L_p, "No aplica volcamiento", "Chequear volcamiento") = "No aplica volcamiento"$$

$$M_p := F_{yb} \cdot Z_{xxb} = 84.2 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

: Momento plástico de la viga.

$$M_n := M_p = 84.23 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

: Capacidad nominal a corte de la viga.

$$\phi M_n := 0.9 \cdot M_n = 75.8 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_u := 159.6 \text{ tonf} \cdot \text{m} \quad (\text{Para cap. máxima de actuador})$$

$$F_U := \frac{M_u}{\phi M_n} = 2.11$$

$$\text{if}(F_U < 1, "OK", "Check!") = "Check!"$$

Ensayos se diseñan para que la viga sea el elemento fusible en algunos, y en otros no.

*Momento plástico probable en las rótulas plásticas (FEMA 350 - 3.2.4):*

$$C_{pr} := \min\left(1.2, \frac{F_{yb} + F_{ub}}{2 \cdot F_{yb}}\right) = 1.2$$

: Coeficiente de resistencia peak de la conexión.

$$C_y := \frac{1}{C_{pr} \cdot \frac{Z_{xxb}}{S_{xxb}}} = 0.73$$

$$R_{yb} := 1.3$$

: Razón entre las tensiones de fluencia esperada y mínima especificada.

$$M_{pr} := C_{pr} \cdot R_{yb} \cdot Z_{xxb} \cdot F_{yb} = 131.39 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

: Momento plástico probable.

### 1.3 Diseño de soldadura del perfil (AISC 360 - Cap. J2)

$$e_{\text{thinner}} := \min(\text{tbw}, \text{tbf}) = 12 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{min}} := \text{if}(e_{\text{thinner}} > 6\text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 13\text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 19\text{mm}, 8\text{mm}, 6\text{mm}), 5\text{mm}), 3\text{mm}) = 5 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{beam}} := 5\text{mm}$$

$$L_{\text{eff}} := L_{\text{viga}} = 433 \cdot \text{cm}$$

$$A_{\text{eff}} := L_{\text{eff}} \cdot \frac{s_{\text{beam}}}{\sqrt{2}} = 153.1 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_{\text{Exx}} := 70\text{ksi}$$

$$F_n := 2 \cdot 0.6 \cdot F_{\text{Exx}} \cdot A_{\text{eff}} = 904.11 \cdot \text{tonf}$$

: Capacidad nominal de ambas soldaduras.

$$\phi F_n := 0.75 \cdot F_n = 678.08 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{M_u}{d_b - 2 \cdot \text{tbf}} = 280.99 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{F_u}{\phi F_n} = 0.41$$

$$\text{if}(F_u < 1, \text{"OK"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$$

### 1.4 Perforaciones en apoyos de vigas (AISC 360 - Cap. J3)

$$d_p := 1 \text{ in} = 25.4 \cdot \text{mm}$$

$$\text{ancho\_perf} := \left(1 + \frac{1}{16}\right) \text{in} = 27 \cdot \text{mm} \quad \text{-->} \quad \text{ancho\_perf} := 29\text{mm}$$

$$\text{largo\_perf} := \left(2 + \frac{1}{2}\right) \text{in} = 63.5 \cdot \text{mm} \quad \text{-->} \quad \text{largo\_perf} := 65\text{mm} \quad \text{: Perforación "Long-Slotted".}$$

$$\text{espac\_min} := 3 \cdot d_p = 76.2 \cdot \text{mm}$$

: Espaciamento mínimo entre perf.

$$\text{borde\_min} := \left(1 + \frac{1}{4}\right) \text{in} = 31.75 \cdot \text{mm}$$

: Distancia mínima al borde desde el centro del perno.

## 1.5 Atiesadores para carga concentrada en apoyos de vigas (AISC 360 - Cap. J10)

$$R_u := V_u = 39.56 \cdot \text{tonf}$$

: Fuerza concentrada en cada placa.

### 1. Flexión local de las alas de la viga:

$$h_P := 30 \text{ cm}$$

: Distancia entre pto. de aplicación y extremo de la viga.

$$R_n := \text{if} \left[ h_P < 10 \cdot t_{bf}, 0.5 \cdot (6.25 \cdot F_{yb} \cdot t_{bf}^2), 6.25 \cdot F_{yb} \cdot t_{bf}^2 \right] = 40.79 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.9 \cdot R_n = 36.7 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{R}{\phi R_n} = 1.08$$

$$F_{dif} := R - \phi R_n = 2.85 \cdot \text{tonf}$$

### 2. Fluencia local en el alma de la viga:

$$l_b := 44.5 \text{ cm}$$

: Largo de aplastamiento (largo de apoyo).

$$k_b := s_{\text{beam}} + t_{bf} = 2.1 \cdot \text{cm}$$

$$R_n := \text{if} \left[ h_P < d_b, F_{yb} \cdot t_{bw} \cdot (2.5 \cdot k_b + l_b), F_{yb} \cdot t_{bw} \cdot (5 \cdot k_b + l_b) \right] = 152.19 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 1 \cdot R_n = 152.2 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{R}{\phi R_n} = 0.26$$

### 3. Aplastamiento en el alma de la viga:

$$R_n := \begin{cases} 0.8 \cdot t_{bw}^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{l_b}{d_b} \right) \cdot \left( \frac{t_{bw}}{t_{bf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yb} \cdot t_{bf}}{t_{bw}}} & \text{if } h_P \geq \frac{d_b}{2} \\ \text{if } h_P < \frac{d_b}{2} \\ \left\{ \begin{array}{l} 0.4 \cdot t_{bw}^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{l_b}{d_b} \right) \cdot \left( \frac{t_{bw}}{t_{bf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yb} \cdot t_{bf}}{t_{bw}}} & \text{if } \frac{l_b}{d_b} \leq 0.2 \\ 0.4 \cdot t_{bw}^2 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{4 \cdot l_b}{d_b} - 0.2 \right) \cdot \left( \frac{t_{bw}}{t_{bf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yb} \cdot t_{bf}}{t_{bw}}} & \text{if } \frac{l_b}{d_b} > 0.2 \end{array} \right. & = 234.53 \cdot \text{tonf} \end{cases}$$

$$\phi R_n := 0.75 \cdot R_n = 175.9 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{R}{\phi R_n} = 0.22$$

Como el  $F_u$  es mayor a 1 en uno de los últimos tres estados límites, es necesario disponer de un atiesador en el punto de apoyo de la viga.

$$b_{\text{min}} := \frac{20 \text{ cm}}{3} - \frac{t_{bw}}{2} = 60.7 \cdot \text{mm}$$

: Ancho mínimo de PC.

$$t_{\min} := \max\left(\frac{tbw}{2}, \frac{b_{\min}}{16}\right) = 8 \cdot \text{mm}$$

: Espesor mínimo de PC.

$$b_{\text{at}} := \frac{(bbf - tbw)}{2} = 119 \cdot \text{mm}$$

if( $b_{\text{at}} \geq b_{\min}$ , "OK", "No cumple") = "OK"

$$t_{\text{at}} := 18 \text{mm}$$

if( $t_{\text{at}} \geq \max(t_{\min})$ , "OK", "No cumple") = "OK"

$$\phi FyAg := (2) \cdot 0.9 \cdot Fyb \cdot b_{\text{at}} \cdot t_{\text{at}} = 98.3 \cdot \text{tonf}$$

: Resistencia de diseño a la fluencia del área gruesa.

$$\phi FuAe := (2) \cdot 0.75 \cdot Fub \cdot b_{\text{at}} \cdot t_{\text{at}} = 131.05 \cdot \text{tonf}$$

: Resistencia de diseño a la ruptura del área neta.

$$\phi F_n := \min(\phi FyAg, \phi FuAe) = 98.3 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{F_{dif}}{\phi F_n} = 0.03$$

### 1.6 Soldadura de FILETE entre atiesadores y alma de viga (AISC 360 - Cap. J2)

$$e_{\text{thinner}} := \min(t_{\text{at}}, tbw) = 12 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\min} := \text{if}(e_{\text{thinner}} > 6 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 13 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 19 \text{mm}, 8 \text{mm}, 6 \text{mm}), 5 \text{mm}), 3 \text{mm}) = 5 \cdot \text{mm}$$

$$s := 8 \text{mm}$$

if( $s \geq s_{\min}$ , "OK", "Check!") = "OK"

$$c := 38 \text{mm}$$

("Área-k")

$$L_{\text{eff}} := db - 2 \cdot \left(k_b + c + \frac{1 \text{in}}{4}\right) = 46.93 \cdot \text{cm}$$

$$\beta := \text{if}\left(\frac{L_{\text{eff}}}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{L_{\text{eff}}}{s}, 1\right) = 1$$

$$A_{\text{eff}} := \beta \cdot L_{\text{eff}} \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 26.5 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_{\text{Exx}} := 70 \text{ksi}$$

$$V_n := (4) \cdot 0.6 \cdot F_{\text{Exx}} \cdot A_{\text{eff}} = 313.57 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi V_n := 0.75 \cdot V_n = 235.18 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{F_{dif}}{\phi V_n} = 0.01$$

### 1.7 Soldadura CJP entre atiesadores y alas de viga (AISC 360 - Cap. J2)

$$a_{\text{cjp}} := t_{\text{at}} = 18 \cdot \text{mm}$$

$$k1_b := \frac{tbw}{2} + s_{\text{beam}} = 11 \cdot \text{mm}$$

$$L_{eff} := \min \left[ \frac{(bbf - 2 \cdot k1\_b)}{2}, \frac{bbf}{2} - \frac{tbw}{2} - 14\text{mm} \right] = 10.5 \cdot \text{cm}$$

$$R_n := (4) \cdot F_yb \cdot L_{eff} \cdot a\_cjp = 192.73 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.9 \cdot R_n = 173.45 \cdot \text{tonf}$$

$$F_U := \frac{F_{dif}}{\phi R_n} = 0.02$$

## A.2. Diseño de columna

Perfil IE 800x450x63x(t<sub>cw</sub>)

Material:

**Acero ASTM A-36**

F<sub>yc</sub> := 250MPa : Tensión nominal mínima de fluencia.

F<sub>uc</sub> := 400MPa : Tensión nominal mínima de rotura.

E := 200000MPa : Módulo de Young.

γ<sub>acero</sub> := 7.85  $\frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$  : Densidad del acero.

$$dc := 800\text{mm}$$

$$bcf := 450\text{mm}$$

$$tcf := 63\text{mm}$$

$$tcw := \begin{pmatrix} 35 \\ 35 \\ 18 \\ 25 \end{pmatrix} \text{mm}$$

$$hc := db - 2 \cdot tbf = 56.8 \cdot \text{cm}$$

$$A_{gc} := 2 \cdot bcf \cdot tcf + (dc - 2 \cdot tcf) \cdot tcw$$

$$A_{gc} = \begin{pmatrix} 802.9 \\ 802.9 \\ 688.32 \\ 735.5 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^2$$

$$L_{col} := 359.5\text{cm}$$

: Largo de columna.

$$h_{entrepiso} := 356\text{cm}$$

$$L_c := h_{entrepiso}$$

: Altura entre piso de edificio.

$$PPc\_lineal := \gamma_{acero} \cdot A_{gc}$$

$$PPc\_lineal = \begin{pmatrix} 6.3 \\ 6.3 \\ 5.4 \\ 5.77 \end{pmatrix} \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$PP\_col := \gamma_{acero} \cdot Agc \cdot L\_col$$

$$PP\_col = \begin{pmatrix} 2.27 \\ 2.27 \\ 1.94 \\ 2.08 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$I_{xxc} := \frac{1}{12} \cdot [bcf \cdot dc^3 - (bcf - tcw) \cdot (dc - 2 \cdot tcf)^3]$$

$$I_{xxc} = \begin{pmatrix} 861120.5 \\ 861120.5 \\ 817744.71 \\ 835605.33 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^4$$

$$r_{xc} := \sqrt{\frac{I_{xxc}}{Agc}}$$

$$r_{xc} = \begin{pmatrix} 32.749 \\ 32.749 \\ 34.468 \\ 33.706 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$I_{yyc} := \left[ \frac{1}{12} (dc - 2 \cdot tcf) \cdot tcw^3 + \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot tcf \cdot bcf^3 \right]$$

$$I_{yyc} = \begin{pmatrix} 95922.06 \\ 95922.06 \\ 95714.01 \\ 95769.01 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^4$$

$$r_{yc} := \sqrt{\frac{I_{yyc}}{Agc}}$$

$$r_{yc} = \begin{pmatrix} 10.93 \\ 10.93 \\ 11.79 \\ 11.41 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$$Z_{xxc} := bcf \cdot tcf \cdot (dc - tcf) + \frac{1}{4} tcw \cdot (dc - 2 \cdot tcf)^2$$

$$Z_{xxc} = \begin{pmatrix} 24868.86 \\ 24868.86 \\ 22938.19 \\ 23733.17 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^3$$

$$S_{xxc} := \frac{2I_{xxc}}{dc}$$

$$S_{xxc} = \begin{pmatrix} 21528.01 \\ 21528.01 \\ 20443.62 \\ 20890.13 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^3$$

$$C_{ww} := \frac{1}{24} tcf \cdot bcf^3 \cdot (dc - tcf)^2 = 129927722.2 \cdot \text{cm}^6$$

$$J_{ww} := \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot bcf \cdot tcf^3 + (dc - tcf) \cdot tcw^3]$$

$$J = \begin{pmatrix} 8554.71 \\ 8554.71 \\ 7644.68 \\ 7885.26 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^4$$

$$R_{yc} := 1.3$$

: Razón entre las tensiones de fluencia esperada y mínima especificada.

**Esbeltices:**

$$\lambda_{cf} := \frac{bcf}{\gamma_{tr-f}} = 3.6 \quad : \text{Esbeltex de alas.}$$

$$\lambda_{cw} := \frac{hc}{tcw} = \begin{pmatrix} 16.2 \\ 16.2 \\ 31.6 \\ 22.7 \end{pmatrix} \quad : \text{Esbeltex de alma.}$$

$$\lambda_{kc} := \text{for } i \in 1..3 \quad = \begin{pmatrix} 0.763 \\ 0.763 \\ 0.712 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{kc_i} \leftarrow \text{if} \left( \frac{4}{\sqrt{\frac{hc}{tcw_i}}} \leq 0.35, 0.35, \text{if} \left( \frac{4}{\sqrt{\frac{hc}{tcw_i}}} \geq 0.763, 0.763, \frac{4}{\sqrt{\frac{hc}{tcw_i}}} \right) \right)$$

## 2.1 Diseño a compresión

**Verif. de Compacidad Sísmica (AISC 341 - Tabla D1.1):**

$$\lambda_{hd\_f} := 0.3 \sqrt{\frac{E}{Fyc}} = 8.5$$

$\text{if}(\lambda_{cf} \leq \lambda_{hd\_f}, \text{"Alas Sísmicamente COMPACTAS"}, \text{"Check!"}) = \text{"Alas Sísmicamente COMPACTAS"}$

$$Pu := 47.98 \text{tonf} \quad \phi_c := 0.9$$

$$Ca := \frac{Pu}{\phi_c \cdot Fyc \cdot Agc} = \begin{pmatrix} 0.026 \\ 0.026 \\ 0.03 \\ 0.028 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{hd\_w} := \text{for } i \in 1..4$$

$$\left| \begin{array}{l} \lambda_{hd\_w_i} \leftarrow 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fyc}} \cdot (1 - 0.93 \cdot Ca_i) \quad \text{if } Ca_i \leq 0.125 \\ \lambda_{hd\_w_i} \leftarrow \max \left[ 0.77 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fyc}} \cdot (2.93 - Ca_i), 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fyc}} \right] \quad \text{if } Ca_i > 0.125 \end{array} \right.$$

$$\lambda_{hd\_w} = \begin{pmatrix} 67.6 \\ 67.6 \\ 67.3 \\ 67.5 \end{pmatrix}$$

$\text{if}(\lambda_{cw_1} \leq \lambda_{hd\_w_1}, \text{"OK: Alma 1 Sísm. COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 1 Sísm. COMPACTA"}$

$\text{if}(\lambda_{cw_2} \leq \lambda_{hd\_w_2}, \text{"OK: Alma 2 Sísm. COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 2 Sísm. COMPACTA"}$

$\text{if}(\lambda_{cw_3} \leq \lambda_{hd\_w_3}, \text{"OK: Alma 3 Sísm. COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 3 Sísm. COMPACTA"}$

$\text{if}(\lambda_{cw_4} \leq \lambda_{hd\_w_4}, \text{"OK: Alma 4 Sism. COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 4 Sism. COMPACTA"}$

Al ser sísmicamente compactas, las alas y almas también son **no esbeltas** (AISC 360 - Tabla B4.1a).

### *E3 y E4: Members without Slender Elements*

#### *Longitud Efectiva:*

$$G_A := \frac{I_{xxc}}{L_c} \cdot \frac{L_v}{I_{xxb}} = \begin{pmatrix} 25.2 \\ 25.2 \\ 23.9 \\ 24.4 \end{pmatrix} \quad G_B := G_A = \begin{pmatrix} 25.2 \\ 25.2 \\ 23.9 \\ 24.4 \end{pmatrix}$$

Obtengo K a partir de la Fig. C-C2.4 de la AISC 360-10.

$$K_{\overline{w}} := 4.4$$

: Coeficiente de longitud efectiva para las 3 columnas.

$$K \cdot L_c = 1566.4 \text{ cm}$$

: Longitud efectiva.

$$\lambda := \frac{K \cdot L_c}{r_{xc}} = \begin{pmatrix} 47.8 \\ 47.8 \\ 45.4 \\ 46.5 \end{pmatrix}$$

: Esbeltez global.

$\text{if}(\max(\lambda) < 200, \text{"OK"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad F_e = \begin{pmatrix} 8798.5 \\ 8798.5 \\ 9746.1 \\ 9320.1 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

: Tensión de pandeo elástico.

$$F_{cr} := \text{for } i \in 1..4$$

$$F_{cr_i} \leftarrow \begin{cases} 0.658 \frac{F_{yc}}{F_{e_i}} \cdot F_{yc} & \text{if } \frac{F_{yc}}{F_{e_i}} \leq 2.25 \\ 0.877 \cdot F_{e_i} & \text{if } \frac{F_{yc}}{F_{e_i}} > 2.25 \end{cases}$$

$$F_{cr} = \begin{pmatrix} 2258.1 \\ 2258.1 \\ 2284.9 \\ 2273.5 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

: Tensión crítica.

$$P_n := \overrightarrow{(F_{cr} \cdot A_{gc})}$$

$$P_n = \begin{pmatrix} 1813.1 \\ 1813.1 \\ 1572.8 \\ 1672.2 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

: Capacidad nominal a compresión de cada columna.



$$\phi_c \cdot P_n = \begin{pmatrix} 1631.76 \\ 1631.76 \\ 1415.49 \\ 1504.96 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$P_u := 47.98 \text{ tonf} \quad (\text{del diseño de C. Alarcón})$$

$$FU := \frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} = \begin{pmatrix} 0.03 \\ 0.03 \\ 0.03 \\ 0.03 \end{pmatrix}$$

Debido al bajo factor de utilización, se decidió no aplicar compresión axial a las columnas durante los ensayos.

## 2.2 Diseño a corte (columna sin atiesadores de corte)

$$k_{v_i} := \text{for } i \in 1..4 \quad = \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$k_{v_i} \leftarrow \text{if} \left( \frac{hc}{tcw_i} < 260, 5, "h/tw > 260" \right)$$

$$\text{for } i \in 1..4 \quad = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$C_{v_i} \leftarrow \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{hc}{tcw_i} \leq 1.1 \sqrt{k_{v_i} \frac{E}{F_{yc}}} \\ \frac{\left( 1.1 \sqrt{k_{v_i} \frac{E}{F_{yc}}} \right)}{\frac{hc}{tcw_i}} & \text{if } 1.1 \sqrt{k_{v_i} \frac{E}{F_{yb}}} < \frac{hc}{tcw_i} \leq 1.37 \sqrt{k_{v_i} \frac{E}{F_{yc}}} \\ \frac{1.51 \cdot k_{v_i} \cdot E}{\left( \frac{hc}{tcw_i} \right)^2 \cdot F_{yc}} & \text{if } \frac{hc}{tcw_i} > 1.37 \sqrt{k_{v_i} \frac{E}{F_{yc}}} \end{cases}$$

$$A_{wc} := dc \cdot tcw$$

$$A_{wc} = \begin{pmatrix} 280 \\ 280 \\ 144 \\ 200 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^2$$

$$V_n := 0.6 \cdot F_{yc} \cdot A_{wc} \cdot C_v \quad V_n = \begin{pmatrix} 428.3 \\ 428.3 \\ 220.3 \\ 305.9 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

: Capacidad nominal a corte de cada columna.

$$\phi V_n := 0.9 \cdot V_n$$

$$\phi V_n = \begin{pmatrix} 385.5 \\ 385.5 \\ 198.2 \\ 275.3 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$V_u := 100 \text{ tonf} \quad (\text{Para cap. máxima de actuador})$$

$$F_U := \frac{V_u}{\phi V_n} = \begin{pmatrix} 0.26 \\ 0.26 \\ 0.5 \\ 0.36 \end{pmatrix}$$

### 2.3 Diseño a flexión

*Verif. de Compacidad (AISC 360 - Tabla B4.1b):*

$$\lambda_{pf} := 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} = 10.7$$

$$\lambda_{pw} := 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} = 106.3$$

$\text{if}(\lambda_{cf} \leq \lambda_{pf}, \text{"OK: Alas COMPACTAS"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alas COMPACTAS"}$

$\text{if}(\lambda_{cw_1} \leq \lambda_{pw}, \text{"OK: Alma 1 COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 1 COMPACTA"}$

$\text{if}(\lambda_{cw_2} \leq \lambda_{pw}, \text{"OK: Alma 2 COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 2 COMPACTA"}$

$\text{if}(\lambda_{cw_3} \leq \lambda_{pw}, \text{"OK: Alma 3 COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 3 COMPACTA"}$

$\text{if}(\lambda_{cw_4} \leq \lambda_{pw}, \text{"OK: Alma 4 COMPACTA"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK: Alma 4 COMPACTA"}$

*F2: Doubly Symmetric Compact I-Shaped Members (...) Bent About Their Mayor Axis:*

$$L_b := \frac{L_c}{2} = 178 \cdot \text{cm}$$

$$L_p := 1.76 \cdot r_{yc} \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}}$$

$$L_p = \begin{pmatrix} 544.109 \\ 544.109 \\ 587.016 \\ 568.04 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}$$

$\text{if}(L_b \leq L_{p_1}, \text{"No aplica volcamiento en COL. 1"}, \text{"Chequear volcamiento"}) = \text{"No aplica volcamiento en COL. 1"}$

$\text{if}(L_b \leq L_{p_2}, \text{"No aplica volcamiento en COL. 3"}, \text{"Chequear volcamiento"}) = \text{"No aplica volcamiento en COL. 3"}$

$\text{if}(L_b \leq L_{p_3}, \text{"No aplica volcamiento en COL. 3"}, \text{"Chequear volcamiento"}) = \text{"No aplica volcamiento en COL. 3"}$

$\text{if}(L_b \leq L_{p_4}, \text{"No aplica volcamiento en COL. 4"}, \text{"Chequear volcamiento"}) = \text{"No aplica volcamiento en COL. 4"}$

$$\phi M_n := F_{yc} \cdot Z_{xxc} \quad M_n = \begin{pmatrix} 634 \\ 634 \\ 584.8 \\ 605 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \quad : \text{Capacidad nominal a flexión.}$$

$$\phi M_n := 0.9 \cdot M_n \quad \phi M_n = \begin{pmatrix} 570.582 \\ 570.582 \\ 526.285 \\ 544.525 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_u := 100 \text{tonf} \cdot 1.75 \text{m} = 175 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$F_U := \frac{M_u}{\phi M_n} = \begin{pmatrix} 0.31 \\ 0.31 \\ 0.33 \\ 0.32 \end{pmatrix}$$

## 2.4 Diseño de soldadura del perfil (AISC 360 - Cap. J2)

$$e_{\text{thinner}} := \min(\max(\text{tcw}), \text{tcf}) = 35 \cdot \text{mm} \quad \text{Escojo el mayor valor de soldadura mínimo entre las 3.}$$

$$s_{\text{min}} := \text{if}(e_{\text{thinner}} > 6 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 13 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 19 \text{mm}, 8 \text{mm}, 6 \text{mm}), 5 \text{mm}), 3 \text{mm}) = 8 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{col}} := 8 \text{mm}$$

$$L_{\text{eff}} := L_{\text{col}} = 359.5 \cdot \text{cm}$$

$$A_{\text{eff}} := L_{\text{eff}} \cdot \frac{s_{\text{col}}}{\sqrt{2}} = 203.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_{\text{Exx}} := 70 \text{ksi}$$

$$F_n := 2 \cdot 0.6 \cdot F_{\text{Exx}} \cdot A_{\text{eff}} = 1201 \cdot \text{tonf}$$

: Capacidad nominal de ambas soldaduras.

$$\phi F_n := 0.75 \cdot F_n = 900.8 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{M_u}{d_c - 2 \cdot \text{tcf}} = 259.6 \cdot \text{tonf}$$

$$F_U := \frac{F_u}{\phi F_n} = 0.29$$

## 2.5 Atiesadores para carga concentrada en punto de aplicación de la carga (AISC 360 - Cap. J10)

$$F := 100 \text{tonf}$$

: Fuerza concentrada (máxima de actuador).

### 1. Flexión local de las alas de la columna:

$$h_P := 14.4 \text{cm}$$

: Distancia entre pto. de aplicación y extremo de la columna.

$$R_n := \text{if}[h_P < 10 \cdot \text{tcf}, 0.5 \cdot (6.25 \cdot F_{yc} \cdot \text{tcf}^2), 6.25 \cdot F_{yc} \cdot \text{tcf}^2] = 316.19 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.9 \cdot R_n = 284.6 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{F}{\phi R_n} = 0.35$$

## 2. Fluencia local en el alma de la columna:

$$l_b := 40 \text{ cm}$$

: Largo de aplastamiento.

$$k_{col} := s_{col} + t_{cf} = 7.1 \cdot \text{cm}$$

$$R_n := \text{if}[h_P < d_c, F_{yc} \cdot \min(t_{cw}) \cdot (2.5 \cdot k_{col} + l_b), F_{yc} \cdot \min(t_{cw}) \cdot (5 \cdot k_{col} + l_b)] = 265 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 1 \cdot R_n = 265 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{F}{\phi R_n} = 0.38$$

## 3. Aplastamiento en el alma de la columna:

$$R_n := \begin{cases} 0.8 \cdot \min(t_{cw})^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{l_b}{d_c} \right) \cdot \left( \frac{\min(t_{cw})}{t_{cf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yc} \cdot t_{cf}}{\min(t_{cw})}} & \text{if } h_P \geq \frac{d_c}{2} \\ \text{if } h_P < \frac{d_b}{2} \\ \begin{cases} 0.4 \cdot \min(t_{cw})^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{l_b}{d_c} \right) \cdot \left( \frac{\min(t_{cw})}{t_{cf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yc} \cdot t_{cf}}{\min(t_{cw})}} & \text{if } \frac{l_b}{d_c} \leq 0.2 \\ 0.4 \cdot \min(t_{cw})^2 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{4 \cdot l_b}{d_c} - 0.2 \right) \cdot \left( \frac{\min(t_{cw})}{t_{cf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yc} \cdot t_{cf}}{\min(t_{cw})}} & \text{if } \frac{l_b}{d_c} > 0.2 \end{cases} \end{cases} = 222.88 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.75 \cdot R_n = 167.2 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{F}{\phi R_n} = 0.6$$

Como el FU es menor a 1 en uno de los últimos tres estados límites, no es necesario disponer de atiesadores en el punto de aplicación de la carga en la columna, pero de todas maneras se contará con dos, a la altura de las alas de la pieza que se conecta a la columna en ese punto.

$$b_{min} := \frac{40 \text{ cm}}{3} - \frac{t_{cw}}{2} \quad b_{min} = \begin{pmatrix} 116 \\ 116 \\ 124 \\ 121 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad \text{: Ancho mínimo de PC.}$$

$$t_{min} := \max\left(\frac{40 \text{ mm}}{2}, \frac{b_{min_1}}{16}\right) = 20 \cdot \text{mm} \quad \text{: Espesor mínimo de PC.}$$

$$b_{at} := \frac{(b_{cf} - t_{cw})}{2} \quad b_{at} = \begin{pmatrix} 208 \\ 208 \\ 216 \\ 213 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$t_{at} := 22\text{mm}$$

$$\phi F_y A_g := (2) \cdot 0.9 \cdot F_{yc} \cdot b_{at} \cdot t_{at} \quad \phi F_y A_g = \begin{pmatrix} 209.5 \\ 209.5 \\ 218.1 \\ 214.5 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \quad : \text{ Resistencia a la fluencia}$$

$$\phi F_u A_e := (2) \cdot 0.75 \cdot F_{uc} \cdot b_{at} \cdot t_{at} \quad \phi F_u A_e = \begin{pmatrix} 279.3 \\ 279.3 \\ 290.7 \\ 286 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \quad : \text{ Resistencia a la ruptura.}$$

$$\phi F_n := \min(\phi F_y A_g, \phi F_u A_e) = 209.5 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{50\text{tonf}}{\phi F_n} = 0.24$$

(En realidad estos atiesadores no necesitan suplir fuerza)

## 2.6 Soldadura de FILETE entre atiesadores y alma de columna (AISC 360 - Cap. J2)

$$e_{thinner} := \min(t_{at}, \max(tcw)) = 22 \cdot \text{mm}$$

$$s_{min} := \text{if}(e_{thinner} > 6\text{mm}, \text{if}(e_{thinner} > 13\text{mm}, \text{if}(e_{thinner} > 19\text{mm}, 8\text{mm}, 6\text{mm}), 5\text{mm}), 3\text{mm}) = 8 \cdot \text{mm}$$

$$s := 16\text{mm} \quad \text{if}(s \geq s_{min}, \text{"OK"} , \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$$

$$c := 38\text{mm} \quad (\text{"Área-k"})$$

$$L_{eff} := dc - 2 \cdot \left( k_{col} + c + \frac{1\text{in}}{4} \right) = 56.93 \cdot \text{cm}$$

$$\beta := \text{if}\left(\frac{L_{eff}}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{L_{eff}}{s}, 1\right) = 1$$

$$A_{eff} := \beta \cdot L_{eff} \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 64.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_{Exx} := 70\text{ksi}$$

$$V_n := (4) \cdot 0.6 \cdot F_{Exx} \cdot A_{eff} = 760.77 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi V_n := 0.75 \cdot V_n = 570.58 \cdot \text{tonf}$$

$$F_u := \frac{50\text{tonf}}{\phi V_n} = 0.09$$

## 2.7 Soldadura CJP entre atiesadores y alas de columna (AISC 360 - Cap. J2)

$$a_{cjp} := t_{at} = 22 \cdot \text{mm}$$

$$k1_c := \frac{\max(tcw)}{2} + s_{col} = 25.5 \cdot \text{mm}$$

$$L_{eff} := \min \left[ \frac{(bcf - 2 \cdot k1\_c)}{2}, \frac{bcf}{2} - \frac{\max(tcw)}{2} - 14\text{mm} \right] = 19.35 \cdot \text{cm}$$

$$R_n := (4) \cdot F_{yc} \cdot L_{eff} \cdot a_{cjp} = 434.09 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.9 \cdot R_n = 390.68 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{F_U}{\phi R_n} = \frac{50 \text{tonf}}{390.68} = 0.13$$

### A.3. Diseño de conexiones con perfiles T soldados

Material de T-Stub:

*Acero ASTMA-36*

$$F_{yT} := 250 \text{MPa}$$

$$F_{uT} := 400 \text{MPa}$$

$$R_{yT} := 1.3$$

$$E := 200000 \text{MPa}$$

$$\gamma_{acero} := 7.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

$$C_{prT} := \min \left( 1.2, \frac{F_{yT} + F_{uT}}{2 \cdot F_{yT}} \right) = 1.2$$

#### 3.1 Propiedades de la conexión

$$t_{stem} := 22 \text{mm}$$

: Espesor de alma de la T.

$$t_{fT} := \begin{pmatrix} 25 \\ 50 \\ 50 \\ 50 \end{pmatrix} \text{mm}$$

: Espesor de alas de la T.

$$W := 450 \text{mm}$$

: Ancho de alas de la T.

$$H := 340 \text{mm}$$

: Altura de alas de la T.

$$N_v := 4$$

$$S_1 := 100 \text{mm} + t_{fT}$$

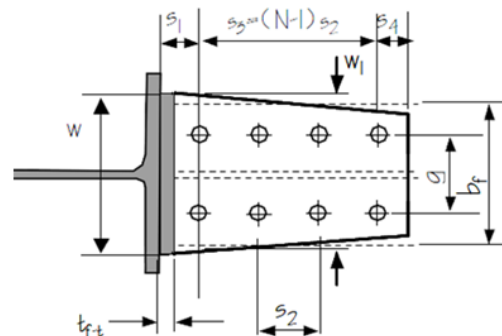
$$S_1 = \begin{pmatrix} 125 \\ 150 \\ 150 \\ 150 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$S_2 := 105 \text{mm}$$

$$S_3 := (N_v - 1) \cdot S_2 = 315 \cdot \text{mm}$$

$$S_4 := 45 \text{mm}$$

$$g := bbf - \frac{2}{4} \cdot (bbf - tbw) = 131 \cdot \text{mm}$$



$$L_{tstub} := S1 + S3 + S4 \quad L_{tstub} = \begin{pmatrix} 485 \\ 510 \\ 510 \\ 510 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$Sh := L_{tstub} + \frac{dc}{2} \quad Sh = \begin{pmatrix} 885 \\ 910 \\ 910 \\ 910 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad : \text{Distancia entre centro de colum. y r\u00f3t. pl\u00e1stica}$$

$$L_{rot} := L_v - 2 \cdot Sh \quad L_{rot} = \begin{pmatrix} 7.23 \\ 7.18 \\ 7.18 \\ 7.18 \end{pmatrix} \cdot \text{m} \quad : \text{Distancia entre r\u00f3tulas pl\u00e1sticas.}$$

$$q_{pp} := PPV_{\text{lineal}} = 1.16 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}} \quad : \text{Peso lineal de la viga.}$$

### 3.2 Pernos en alas y alma de cada T-stub: *ASTMA490 - 1 3/8"*

$$F_{nv} := 457 \text{MPa} \quad d_{\text{bolt}} := \left(1 + \frac{3}{8}\right) \text{in} = 35 \cdot \text{mm} \quad d_{\text{hole}} := d_{\text{bolt}} + 3 \text{mm} = 38 \cdot \text{mm}$$

$$F_{nt} := 780 \text{MPa} \quad A_b := \frac{\pi \cdot d_{\text{bolt}}^2}{4} = 9.58 \cdot \text{cm}^2 \quad N_t := 4 \quad N_v := 4$$

### 3.3 Solicitauci\u00f3n (elemento fusible) en cada ensayo

#### 3.3.1 SE-01: *Fluencia de las alas de cada T-stub (Apalancamiento)*

FEMA 350-00 (STEP 7):

$$a := 71 \text{mm}$$

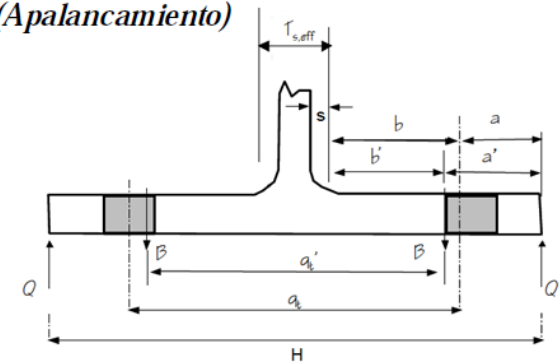
$$aa := a + \frac{d_{\text{hole}}}{2} = 90 \cdot \text{mm}$$

$$q_{tt} := H - 2 \cdot a = 198 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{DWT2}} := 18 \text{mm} \quad : \text{Tama\u00f1o de filete de soldadura.}$$

$$bb := \frac{1}{2} \cdot (H - t_{\text{stem}} - 2 \cdot aa - s_{\text{DWT2}}) = 60 \cdot \text{mm} \quad \theta_{\text{eff}} := 30^\circ$$

$$w_0 := W = 450 \cdot \text{mm}$$



$$w_1 := g + 2 \cdot S_3 \cdot \tan(\theta_{\text{eff}}) = 494.7 \cdot \text{mm}$$

$$w_{\text{eff}} := \min(w_0, w_1) = 450 \cdot \text{mm}$$

$$M3_1 := \frac{\left(2 \cdot aa - \frac{d\_bolt}{4}\right) \cdot weff \cdot FyT \cdot (tfT_1)^2 \cdot (db - tstem)}{4 \cdot aa \cdot bb - d\_bolt \cdot (bb + aa)} = 43.4 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$Mfail_1 := CprT \cdot RyT \cdot M3_1 = 67.6 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{FuerzaApoyoViga}_1 := \frac{2 \cdot Mfail_1}{(Lv - dc)} = 16.5 \cdot \text{tonf}$$

-->

$$\text{FuerzaActuador}_1 := \text{FuerzaApoyoViga}_1 \cdot \frac{Lv}{Lc} = 41.7 \cdot \text{tonf}$$

### 3.3.2 SE-02: Fluencia en las vigas (Rótulas plásticas en las vigas)

Recordando que el momento plástico probable de la viga, en la zona de rótula plástica, es:

$$Mpr := Cpr \cdot Ryb \cdot Zxxb \cdot Fyb = 131.39 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$Vp := \frac{2 \cdot Mpr + qpp \cdot \frac{Lrot^2}{2}}{Lrot} \quad Vp = \begin{pmatrix} 36.767 \\ 37.017 \\ 37.017 \\ 37.017 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \quad : \text{Corte en las rótulas plásticas (al final de la T)}$$

$$Mf := Mpr + \overrightarrow{(Vp \cdot Ltstub)} \quad Mf = \begin{pmatrix} 149.223 \\ 150.27 \\ 150.27 \\ 150.27 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \quad : Mpr \text{ transferido a la cara de la columna.}$$

$$Mc := Mpr + \overrightarrow{\left[Vp \cdot \left(Ltstub + \frac{dc}{2}\right)\right]} \quad : Mpr \text{ transferido al centro de la columna.}$$

$$Mc = \begin{pmatrix} 163.93 \\ 165.077 \\ 165.077 \\ 165.077 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$Cy := \frac{1}{Cpr \cdot \frac{Zxxb}{Sxxb}} = 0.73$$

$$Myf := Cy \cdot Mf \quad Myf = \begin{pmatrix} 108.591 \\ 109.353 \\ 109.353 \\ 109.353 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \quad : \text{Momento de fluencia de la viga, calculado en la } \mathbf{cara \ de \ la \ columna.}$$

$$Mfail_2 := 1.2 \cdot Myf_2 = 131.2 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

-->

$$\text{FuerzaApoyoViga}_2 := \frac{2 \cdot Mfail_2}{(Lv - dc)} = 32 \cdot \text{tonf}$$



(Ensayo realizado con una viga)

-->

$$\text{FuerzaActuador}_2 := \frac{1}{2} \text{FuerzaApoyoViga}_2 \cdot \frac{L_v}{L_c} = 40.5 \cdot \text{tonf}$$

### 3.3.3 SE-03: Fluencia por corte en la zona panel

Esfuerzo de corte en zona panel: (Considerando plastificación de las vigas)

$$V_{ct\_rot} := \frac{2 \cdot M_{fail_2}}{L_c} = 73.7 \cdot \text{tonf}$$

$$V_{zp\_rot} := \frac{2 \cdot M_{fail_2}}{db} - V_{ct\_rot} = 363.7 \cdot \text{tonf}$$

Resistencia a la fluencia por corte (AISC 341-10 y AISC 360-10, Cap. J10.6):

$$P_r := 0 \text{ tonf}$$

$$P_c := F_{yc} \cdot A_{gc}$$

$$P_c = \begin{pmatrix} 2046.8 \\ 2046.8 \\ 1754.7 \\ 1875 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$R_n := \begin{cases} 0.6 \cdot F_{yc} \cdot d_c \cdot t_{cw_3} & \text{if } P_r \leq 0.4 \cdot P_{c_3} \\ 0.6 \cdot F_{yc} \cdot d_c \cdot t_{cw_3} \cdot \left(1.4 - \frac{P_r}{P_c}\right) & \text{if } P_r > 0.4 \cdot (F_{yc} \cdot A_{gc_3}) \end{cases} = 220.3 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{Uzp} := \frac{V_{zp\_rot}}{R_{yc} \cdot R_n} = 1.27$$

$$M_{fail_3} := \frac{M_{fail_2}}{F_{Uzp}} = 103.3 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

-->

$$\text{FuerzaApoyoViga}_3 := \frac{2 \cdot M_{fail_3}}{(L_v - d_c)} = 25.2 \cdot \text{tonf}$$

-->

$$\text{FuerzaActuador}_3 := \text{FuerzaApoyoViga}_3 \cdot \frac{L_v}{L_c} = 63.7 \cdot \text{tonf}$$

$$V_{zp} := \frac{2 \cdot M_{fail_3}}{db} - \frac{2 \cdot M_{fail_3}}{L_c} = 286.3 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{Uz} := \frac{V_{zp}}{R_{yc} \cdot R_n} = 1 \quad \text{-->}$$

La conexión está controlada por la fluencia por corte en la zona panel

Pandeo local por corte en zona panel:

$$d_z := d_c - 2 \cdot t_{cf} = 674 \cdot \text{mm}$$

$$wz := db - 2 \cdot tbf = 568 \cdot \text{mm}$$

$$\text{verif} := \text{if} \left( tcw_3 \geq \frac{dz + wz}{90}, \text{"OK, no hay pandeo local"}, \text{"Check!"} \right) = \text{"OK, no hay pandeo local"}$$

### 3.3.4 SE-04: Fluencia por corte en la zona panel y plastificación en las vigas.

FEMA 350-00 (Ec. 3-7): Espesor para que ocurra una falla balanceada.

$$t_{\text{req}} := \frac{(2) \cdot Cy \cdot Mc_4 \cdot \frac{Lc - db}{Lc}}{(0.9) \cdot 0.6 \cdot Fyc \cdot Ryc \cdot dc \cdot (db - tbf)} = 23.9 \cdot \text{mm}$$

Resistencia a la fluencia por corte (AISC 341-10 y AISC 360-10, Cap. J10.6):

$$R_n := \begin{cases} 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_4 & \text{if } Pr \leq 0.4 \cdot Pc_3 \\ 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_4 \cdot \left( 1.4 - \frac{Pr}{Pc} \right) & \text{if } Pr > 0.4 \cdot (Fyc \cdot Agc_3) \end{cases} = 305.9 \cdot \text{tonf}$$

$$FU_{zp} := \frac{V_{zp\_rot}}{Ryc \cdot Rn} = 0.91$$

$$M_{fail_4} := \min \left( M_{fail_2}, \frac{M_{fail_2}}{FU_{zp}} \right) = 131.2 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\rightarrow \boxed{\text{FuerzaApoyoViga}_4 := \frac{2 \cdot M_{fail_4}}{(Lv - dc)} = 32 \cdot \text{tonf}}$$

$$\rightarrow \boxed{\text{FuerzaActuador}_4 := \text{FuerzaApoyoViga}_4 \cdot \frac{Lv}{Lc} = 80.9 \cdot \text{tonf}}$$

$$V_{zp} := \frac{2 \cdot M_{fail_4}}{db} - \frac{2 \cdot M_{fail_4}}{Lc} = 363.7 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{V_{zp}}{Ryc \cdot Rn} = 0.91 \quad \rightarrow$$

El FU es cercano a 1, por lo tanto se puede decir que ocurrirá una "falla balanceada".

Pandeo local por corte en zona panel:

$$\text{verif} := \text{if} \left( tcw_4 \geq \frac{dz + wz}{90}, \text{"OK, no hay pandeo local"}, \text{"Check!"} \right) = \text{"OK, no hay pandeo local"}$$

Como ya se conocen los cuatro momentos de falla, se verifica que el momento de fluencia de las vigas esté por encima del momento de falla de las probetas donde éstas no plastifican:

$$M_{rot_1} := 1.2 \cdot Myf_1 \quad M_{rot_2} := M_{fail_2} \quad M_{rot_3} := 1.2 \cdot Myf_3 \quad M_{rot_4} := M_{fail_4}$$

$$FU_{rot} := \left( \frac{M_{fail}}{M_{rot}} \right) = \begin{pmatrix} 0.52 \\ 1 \\ 0.79 \\ 1 \end{pmatrix}$$

*Par de fuerzas tracción/compresión en los T-stubs debido a Mfail:*

$$F_{fail} := \frac{M_{fail}}{(db + t_{stem})} \quad F_{fail} = \begin{pmatrix} 108.7 \\ 211 \\ 166.1 \\ 211 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

### 3.4 Estados límites presentes en cada conexión

#### *3.4.1 Soldadura de FILETE entre alas y alma de cada T-stub:*

$$e_{thinner1} := t_{stem} = 22 \cdot \text{mm}$$

$$s_{min} := \text{if}(e_{thinner} > 6\text{mm}, \text{if}(e_{thinner} > 13\text{mm}, \text{if}(e_{thinner} > 19\text{mm}, 8\text{mm}, 6\text{mm}), 5\text{mm}), 3\text{mm}) = 8 \cdot \text{mm}$$

$$s_{DWT1} := 18\text{mm} \quad \text{if}(s_{DWT1} \geq s_{min}, \text{"OK"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$$

$$s_{DWT2} := 8\text{mm} \quad \text{if}(s_{DWT2} \geq s_{min}, \text{"OK"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$$

$$s_{tstub_1} := s_{DWT2} \quad s_{tstub_2} := s_{DWT1} \quad s_{tstub_3} := s_{DWT1} \quad s_{tstub_4} := s_{DWT1}$$

$$L_{eff} := W = 45 \cdot \text{cm}$$

$$A_{eff} := L_{eff} \cdot \frac{s_{tstub}}{\sqrt{2}} \quad A_{eff} = \begin{pmatrix} 25.5 \\ 57.3 \\ 57.3 \\ 57.3 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^2$$

$$F_{Exx} := 70\text{ksi}$$

$$V_n := (2) \cdot 0.6 \cdot F_{Exx} \cdot A_{eff} \quad V_n = \begin{pmatrix} 150.3 \\ 338.3 \\ 338.3 \\ 338.3 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\phi V_n := 0.75 \cdot V_n$$

$$\phi V_n = \begin{pmatrix} 112.8 \\ 253.7 \\ 253.7 \\ 253.7 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{F_{fail}}{\phi V_n} = \begin{pmatrix} 0.96 \\ 0.83 \\ 0.65 \\ 0.83 \end{pmatrix}$$

### 3.4.2 Soldadura CJP entre alas y alma de cada T-stub:

$$a_{cjp} := 22 \text{ mm} \quad L_{eff} := W = 45 \cdot \text{cm}$$

$$R_n := F_y T \cdot L_{eff} \cdot a_{cjp} = 252.4 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.9 \cdot R_n = 227.1 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{F_{fail}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.48 \\ 0.93 \\ 0.73 \\ 0.93 \end{pmatrix}$$

### 3.4.3 Corte en pernos del alma de cada T-stub:

#### FEMA 350-00 (STEP 5):

$$LTF1 := \frac{L_v - d_c}{L_v - d_c - (2 \cdot S1 + S3)} = \begin{pmatrix} 1.07 \\ 1.08 \\ 1.08 \\ 1.08 \end{pmatrix}$$

$$M1 := 2 \cdot N_v \cdot A_b \cdot F_{nv} \cdot d_b \cdot LTF1$$

$$M1 = \begin{pmatrix} 230.1 \\ 231.7 \\ 231.7 \\ 231.7 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$FU := \frac{M_{fail}}{M1} = \begin{pmatrix} 0.29 \\ 0.57 \\ 0.45 \\ 0.57 \end{pmatrix}$$

#### AISC 360-10:

$$R_n := 2 \cdot N_v \cdot A_b \cdot F_{nv} = 357.1 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.75 \cdot R_n = 267.9 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{F_{fail}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.41 \\ 0.79 \\ 0.62 \\ 0.79 \end{pmatrix}$$

### 3.4.4 Aplastamiento en pernos a corte:

$$t := \min(t_{stem}, t_{bf}) = 16 \cdot \text{mm}$$

--> Ala de viga es más delgada.

$$l_c := [(100 \text{ mm} - 26 \text{ mm}) + (N_v - 1) \cdot S2 - (N_v - 0.5) \cdot d_{hole}] \cdot 2$$

$$l_c = 513 \cdot \text{mm}$$

$$\underline{R_n} := \min(1.2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_{ub}, 2.4 \cdot d_{\text{bolt}} \cdot t \cdot F_{ub} \cdot 2 \cdot N_v) = 401.4 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\phi R_n} := 0.75 \cdot R_n = 301 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{M_{\text{fail}}}{(d_b - t_{bf}) \cdot \phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.38 \\ 0.75 \\ 0.59 \\ 0.75 \end{pmatrix}$$

### 3.4.5 Fractura del área neta del alma de cada T-stub:

$$LTF2 := \frac{L_v - d_c}{L_v - d_c - 2S1} = \begin{pmatrix} 1.03 \\ 1.04 \\ 1.04 \\ 1.04 \end{pmatrix}$$

$$M2 := F_u T \cdot [w_{\text{eff}} - 2 \cdot (d_{\text{bolt}} + 0.125 \text{in})] \cdot t_{\text{stem}} \cdot (d_b + t_{\text{stem}}) \cdot LTF2$$

$$M2 = \begin{pmatrix} 215.2 \\ 216.6 \\ 216.6 \\ 216.6 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$FU := \frac{M_{\text{fail}}}{M2} = \begin{pmatrix} 0.31 \\ 0.61 \\ 0.48 \\ 0.61 \end{pmatrix}$$

### AISC 360-10:

$$A_g := w_{\text{eff}} \cdot t_{\text{stem}} = 99 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_n := A_g - 2 \cdot (d_{\text{hole}} + 2 \text{mm}) \cdot t_{\text{stem}} = 81.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$R_{n\_yield} := F_y T \cdot A_g = 252.4 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n\_rupt} := F_u T \cdot A_n = 332.2 \cdot \text{tonf} \quad \underline{R_n} := \min(R_{n\_yield}, R_{n\_rupt})$$

$$\underline{\phi R_n} := \text{if}(R_n = R_{n\_yield}, 0.9, 0.75) \cdot R_n = 227.1 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{F_{\text{fail}}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.48 \\ 0.93 \\ 0.73 \\ 0.93 \end{pmatrix}$$

### 3.4.6 Compresión del alma de cada T-stub:

$$\underline{K} := 0.65 \quad (\text{Caso doble empotrado})$$

$$r_x := \frac{t_{\text{stem}}}{\sqrt{12}} = 0.64 \cdot \text{cm}$$

$$\underline{L} := 100 \text{mm}$$

$$\lambda_{\text{stem}} := \frac{K \cdot L}{r_x}$$

$$\underline{R_n} := \text{if}(\lambda_{\text{stem}} \leq 25, F_y T \cdot w_{\text{eff}} \cdot t_{\text{stem}}, "ver Ch. E") = 252.4 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\phi R_n} := 0.9 \cdot R_n = 227.1 \cdot \text{tonf}$$

$FU := \frac{F_{\text{fail}}}{\phi R_n} =$	0.48
	0.93
	0.73
	0.93

### 3.4.7 Fluencia de las alas de cada T-stub (Apalancamiento)

FEMA 350-00 (STEP 7):

$$\underline{a} := 71 \text{mm}$$

$$\underline{aa} := a + \frac{d_{\text{hole}}}{2} = 90 \cdot \text{mm}$$

$$\underline{gt} := H - 2 \cdot a = 198 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{tstub}} = \begin{pmatrix} 8 \\ 18 \\ 18 \\ 18 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad : \text{Tamaño de filete de soldadura.}$$

$$\underline{bb} := \left[ \frac{1}{2} \cdot (H - t_{\text{stem}} - 2 \cdot aa - s_{\text{tstub}}) \right] \quad bb = \begin{pmatrix} 65 \\ 60 \\ 60 \\ 60 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$\underline{w_0} := W = 450 \cdot \text{mm}$$

$$\underline{\theta_{\text{eff}}} := 30^\circ$$

$$\underline{w_{\text{eff}}} := \min(w_0, w_1) = 450 \cdot \text{mm}$$

$$\underline{w_1} := g + 2 \cdot S_3 \cdot \tan(\theta_{\text{eff}}) = 494.7 \cdot \text{mm}$$

$$M_3 := \frac{\left( 2 \cdot aa - \frac{d_{\text{bolt}}}{4} \right) \cdot w_{\text{eff}} \cdot F_y T \cdot (t_f T)^2 \cdot (db - t_{\text{stem}})}{4 \cdot aa \cdot bb - d_{\text{bolt}} \cdot (bb + aa)}$$

$$\underline{M_3} := M_{\text{fail}_1}$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} 67.6 \\ 173.4 \\ 173.4 \\ 173.4 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$FU := \frac{M_{\text{fail}}}{M_3} =$	1
	0.76
	0.6
	0.76

### 3.4.8 Tracción en pernos de las alas de cada T-stub:

FEMA 350-00 (STEP 8):

$$M4 := \overrightarrow{\left[ 2 \cdot Nt \cdot (db + tstem) \cdot \left( Fnt \cdot Ab + \frac{weff \cdot FyT \cdot tfT^2}{16 \cdot aa} \right) \cdot \frac{aa}{aa + bb} \right]}$$

$$M4 = \begin{pmatrix} 234.4 \\ 286.9 \\ 286.9 \\ 286.9 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$FU := \frac{Mfail}{M4} = \begin{pmatrix} 0.29 \\ 0.46 \\ 0.36 \\ 0.46 \end{pmatrix}$$

### AISC 360-10:

$$\underline{Rn} := 2 \cdot Nt \cdot Fnt \cdot Ab = 609.6 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\phi Rn} := 0.75 \cdot Rn = 457.2 \cdot \text{tonf}$$

### *Mecanismo de Piluso et. al (2001b):*

$$n := a = 71 \cdot \text{mm}$$

$$mp := bb - \frac{s_{tstub} - d_{hole}}{2}$$

$$mp = \begin{pmatrix} 80 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$\lambda := \frac{n}{mp} = \begin{pmatrix} 0.888 \\ 1.014 \\ 1.014 \\ 1.014 \end{pmatrix}$$

$$Te := \frac{Ffail}{2}$$

$$Te = \begin{pmatrix} 54.4 \\ 105.5 \\ 83 \\ 105.5 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

dw := 56mm : Diámetro de tuerca.

dh := 56mm : Cabeza de tuerca.

$$\beta_{lim} := \overrightarrow{\left[ \frac{2\lambda}{1 + 2 \cdot \lambda} \cdot \left[ 1 - (1 + \lambda) \cdot \frac{dw}{8n} \right] \right]} = \begin{pmatrix} 0.521 \\ 0.537 \\ 0.537 \\ 0.537 \end{pmatrix}$$

$$beff_1 := \min(dh + 2 \cdot mp_1, bcf) = 216 \cdot \text{mm}$$

$$beff_2 := \min(dh + 2 \cdot mp_2, bcf) = 196 \cdot \text{mm}$$

$$beff_3 := \min(dh + 2 \cdot mp_3, bcf) = 196 \cdot \text{mm}$$

$$beff_4 := \min(dh + 2 \cdot mp_4, bcf) = 196 \cdot \text{mm}$$

Los valores de  $f_y$ ,  $f_u$ ,  $E$ ,  $\epsilon_u$ ,  $\epsilon_h$ ,  $E_h$  y  $E_u$  fueron obtenidos a partir del promedio de los ensayos realizados sobre 3 cupones de acero de espesor 12 mm.

$$f_y := \frac{287 + 291 + 301}{3} \cdot \text{MPa} = 293 \cdot \text{MPa}$$

$$f_u := \frac{437 + 444 + 452}{3} \cdot \text{MPa} = 444.3 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{cup} := \frac{189860 + 200373 + 213526}{3} \cdot \text{MPa} = 201253 \cdot \text{MPa}$$

$$M_y := \overrightarrow{\left( \frac{1}{6} \text{beff} \cdot t \Gamma^2 \cdot f_y \right)} \quad M_y = \begin{pmatrix} 0.67 \\ 2.44 \\ 2.44 \\ 2.44 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\epsilon_y := \frac{f_y}{E_{cup}} = 0.0015$$

$$\epsilon_m := \frac{(0.1857 + 0.1789 + 0.1811)}{3} = 0.182$$

$$\epsilon_h := \frac{0.0135858 + 0.0150004 + 0.0146762}{3} = 0.014$$

$$E_h := \frac{f_u - f_y}{\epsilon_m - \epsilon_h} = 903.6 \cdot \text{MPa}$$

$$\epsilon_u := \frac{0.2490 + 0.2606 + 0.2603}{3} = 0.257$$

$$E_u := \left| \frac{\frac{1}{3} \cdot (341 + 371 + 375) \text{MPa} - f_u}{\epsilon_u - \epsilon_m} \right| = 1097.2 \cdot \text{MPa}$$

$$M_{u1} := \overrightarrow{\left[ \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 - \left( \frac{\epsilon_y}{\epsilon_u} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \cdot \frac{E_h}{E} \cdot \left( \frac{\epsilon_u - \epsilon_h}{\epsilon_y} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\epsilon_h}{\epsilon_u} \right) \cdot \left( 2 + \frac{\epsilon_h}{\epsilon_u} \right) \right] \cdot \left( \frac{\text{beff} \cdot t \Gamma^2}{6} \cdot F_{yT} \right)}$$

$$M_{u2} := \overrightarrow{\left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{E_h - E_u}{E} \cdot \frac{\epsilon_u - \epsilon_m}{\epsilon_y} \cdot \left( 1 - \frac{\epsilon_m}{\epsilon_u} \right) \cdot \left( 2 + \frac{\epsilon_m}{\epsilon_u} \right) \right] \cdot \left( \frac{\text{beff} \cdot t \Gamma^2}{6} \cdot F_{yT} \right)}$$

$$\underline{\underline{M_u}} := \overrightarrow{(M_{u1} - M_{u2})}$$

$$B_u := F_{nt} \cdot A_b \cdot 2 \cdot N_t = 609.57 \cdot \text{tonf}$$

$$M_u = \begin{pmatrix} 1.3 \\ 4.7 \\ 4.7 \\ 4.7 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\beta_u := \frac{2M_u}{B_u \cdot m_p} = \begin{pmatrix} 0.05 \\ 0.22 \\ 0.22 \\ 0.22 \end{pmatrix}$$



$$\text{MecFalla}_1 := \text{if}(\beta u_1 > 2, \text{"III"}, \text{if}(\beta u_1 > \beta \text{lim}_1, \text{"II"}, \text{"I"})) = \text{"I"}$$

$$\text{MecFalla}_2 := \text{if}(\beta u_2 > 2, \text{"III"}, \text{if}(\beta u_2 > \beta \text{lim}_2, \text{"II"}, \text{"I"})) = \text{"I"}$$

$$\text{MecFalla}_3 := \text{if}(\beta u_3 > 2, \text{"III"}, \text{if}(\beta u_3 > \beta \text{lim}_3, \text{"II"}, \text{"I"})) = \text{"I"}$$

$$\text{MecFalla}_4 := \text{if}(\beta u_4 > 2, \text{"III"}, \text{if}(\beta u_4 > \beta \text{lim}_4, \text{"II"}, \text{"I"})) = \text{"I"}$$

$$Q_1 := \text{if} \left[ \text{MecFalla}_1 = \text{"I"}, \text{Mu}_1 \cdot \frac{(8 \cdot \text{mp}_1 + \text{dw})}{[8 \cdot \text{mp}_1 \cdot \text{n} - (\text{mp}_1 + \text{n}) \cdot \text{dw}]} , \text{if} \left( \text{MecFalla} = \text{"II"}, \frac{\text{Bu} \cdot \text{mp}_1 - \text{Mu}_1}{\text{mp}_1 + \text{n}}, 0 \right) \right]$$

$$Q_2 := \text{if} \left[ \text{MecFalla}_2 = \text{"I"}, \text{Mu}_2 \cdot \frac{(8 \cdot \text{mp}_2 + \text{dw})}{[8 \cdot \text{mp}_2 \cdot \text{n} - (\text{mp}_2 + \text{n}) \cdot \text{dw}]} , \text{if} \left( \text{MecFalla} = \text{"II"}, \frac{\text{Bu} \cdot \text{mp}_2 - \text{Mu}_2}{\text{mp}_2 + \text{n}}, 0 \right) \right]$$

$$Q_3 := \text{if} \left[ \text{MecFalla}_3 = \text{"I"}, \text{Mu}_3 \cdot \frac{(8 \cdot \text{mp}_3 + \text{dw})}{[8 \cdot \text{mp}_3 \cdot \text{n} - (\text{mp}_3 + \text{n}) \cdot \text{dw}]} , \text{if} \left( \text{MecFalla} = \text{"II"}, \frac{\text{Bu} \cdot \text{mp}_3 - \text{Mu}_3}{\text{mp}_3 + \text{n}}, 0 \right) \right]$$

$$Q_4 := \text{if} \left[ \text{MecFalla}_4 = \text{"I"}, \text{Mu}_4 \cdot \frac{(8 \cdot \text{mp}_4 + \text{dw})}{[8 \cdot \text{mp}_4 \cdot \text{n} - (\text{mp}_4 + \text{n}) \cdot \text{dw}]} , \text{if} \left( \text{MecFalla} = \text{"II"}, \frac{\text{Bu} \cdot \text{mp}_4 - \text{Mu}_4}{\text{mp}_4 + \text{n}}, 0 \right) \right]$$

$$Q = \begin{pmatrix} 24.3 \\ 90.5 \\ 90.5 \\ 90.5 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\text{FU} := \frac{\text{Ffail} + 2 \cdot Q}{\phi \text{Rn}} = \begin{pmatrix} 0.34 \\ 0.86 \\ 0.76 \\ 0.86 \end{pmatrix}$$

### 3.4.9 Falla por fractura del área neta de las alas de las vigas:

#### FEMA 350-00 (STEP 9):

$$\text{LTF3} := \frac{\text{Lv} - \text{dc}}{\text{Lv} - \text{dc} - 2(\text{S1} + \text{S3})} = \begin{pmatrix} 1.12 \\ 1.13 \\ 1.13 \\ 1.13 \end{pmatrix}$$

$$\text{M}_{\text{netbf}} := \text{Fub} \cdot [\text{Z}_{\text{xxb}} - 2 \cdot (\text{d}_{\text{hole}} + 0.062 \text{in}) \cdot \text{tbf} \cdot (\text{db} - \text{tbf})] \cdot \text{LTF3}$$

$$\text{M}_{\text{netbf}} = \begin{pmatrix} 117.2 \\ 118 \\ 118 \\ 118 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{FU} := \frac{\text{Mfail}}{\text{M}_{\text{netbf}}} = \begin{pmatrix} 0.58 \\ 1.11 \\ 0.88 \\ 1.11 \end{pmatrix}$$

Está bien que el FU sea mayor que 1 para las probetas donde plastifican las vigas.

**AISC 360-10:**

$$A_{gf} := b_{bf} \cdot t_{bf} = 40 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{fn} := A_{gf} - 2 \cdot (d_{\text{hole}} + 2\text{mm}) \cdot t_{bf} = 27.2 \cdot \text{cm}^2$$

$$Y_t := \text{if} \left( \frac{F_{yb}}{F_{ub}} > 0.8, 1.1, 1 \right) = 1$$

$$R_{n\_rupt} := F_{ub} \cdot A_{fn} = 111 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n\_yield} := Y_t F_{yb} \cdot A_{gf} = 102 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{if}(R_{n\_yield} \leq R_{n\_rupt}, \text{"Este estado NOAPLICA"}, \text{"Check!"}) = \text{"Este estado NOAPLICA"}$$

**3.4.10 Bloque de corte:**

**AISC 360-10 (FEMA 350 - STEP 10):**

***Bloque de corte en el centro del alma del T-stub:***

$$A_{gv} := 2 \cdot t_{stem} \cdot (S_3 + S_4) = 158.4 \cdot \text{cm}^2$$

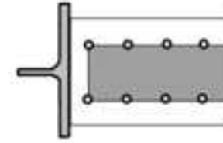
$$A_{nt} := [g - (d_{\text{hole}} + 2\text{mm})] \cdot t_{stem} = 20 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{nv} := 2 \cdot t_{stem} \cdot [S_3 + S_4 - (N_v - 0.5) \cdot (d_{\text{hole}} + 2\text{mm})] = 96.9 \cdot \text{cm}^2$$

$$R_n := \min[(0.6 \cdot F_y T \cdot A_{gv} + F_u T \cdot A_{nt}), (0.6 \cdot F_u T \cdot A_{nv} + F_u T \cdot A_{nt})]$$

$$R_n = 318.9 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.75 \cdot R_n = 239.2 \cdot \text{tonf}$$



$$F_U := \frac{F_{fail}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.45 \\ 0.88 \\ 0.69 \\ 0.88 \end{pmatrix}$$

***Bloque de corte en los bordes del alma del T-stub:***

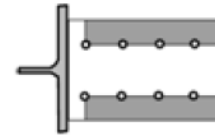
$$A_{gv} := 2 \cdot t_{stem} \cdot (S_3 + S_4) = 158.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{nt} := [w_{eff} - g - (d_{\text{hole}} + 2\text{mm})] \cdot t_{stem} = 61.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{nv} := 2 \cdot t_{stem} \cdot [S_3 + S_4 - (N_v - 0.5) \cdot (d_{\text{hole}} + 2\text{mm})] = 96.9 \cdot \text{cm}^2$$

$$R_n := \min[(0.6 \cdot F_y T \cdot A_{gv} + F_u T \cdot A_{nt}), (0.6 \cdot F_u T \cdot A_{nv} + F_u T \cdot A_{nt})] = 487.6 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.75 \cdot R_n = 365.7 \cdot \text{tonf}$$



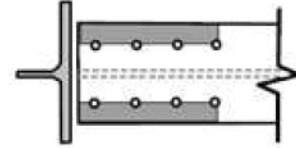
$$F_U := \frac{F_{fail}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.58 \\ 0.45 \\ 0.58 \end{pmatrix}$$

***Bloque de corte en las alas de la viga:***

$$\underline{A_{gv}} := 2 \cdot t_{stem} \cdot (100\text{mm} + S3)$$

$$\underline{A_{nt}} := [bbf - g - (d_{hole} + 2\text{mm})] \cdot t_{stem} = 17.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$\underline{A_{nv}} := 2 \cdot t_{stem} \cdot [100\text{mm} + S3 - (N_v - 0.5) \cdot (d_{hole} + 2\text{mm})]$$



$$\underline{R_n} := \min[(0.6 \cdot F_y T \cdot A_{gv} + F_u T \cdot A_{nt}), (0.6 \cdot F_u T \cdot A_{nv} + F_u T \cdot A_{nt})] = 350.3 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\phi R_n} := 0.75 \cdot R_n = 262.7 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{M_{fail}}{(db - t_{bf}) \cdot \phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.44 \\ 0.86 \\ 0.67 \\ 0.86 \end{pmatrix}$$

$$M5 := \frac{M_{fail}}{FU} = \begin{pmatrix} 153.4 \\ 153.4 \\ 153.4 \\ 153.4 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

### 3.5 Placas de Continuidad

**FEMA 350-00 (STEP 11):** Ver si el espesor de ala de la columna es adecuado para la tracción en las alas de la viga.

$t_{cf} = 63 \cdot \text{mm}$  : Espesor de ala de la columna.

$$t_{fT} = \begin{pmatrix} 25 \\ 50 \\ 50 \\ 50 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad : \text{Espesor de ala de T-stubs.}$$

$$\text{if}(t_{cf} < 1.5 \cdot t_{fT}_1, \text{"Se requieren PC"}, \text{"NO se requieren PC"}) = \text{"NO se requieren PC"}$$

$$\text{if}(t_{cf} < 1.5 \cdot t_{fT}_2, \text{"Se requieren PC"}, \text{"NO se requieren PC"}) = \text{"Se requieren PC"}$$

$$\text{if}(t_{cf} < 1.5 \cdot t_{fT}_3, \text{"Se requieren PC"}, \text{"NO se requieren PC"}) = \text{"Se requieren PC"}$$

$$\text{if}(t_{cf} < 1.5 \cdot t_{fT}_4, \text{"Se requieren PC"}, \text{"NO se requieren PC"}) = \text{"Se requieren PC"}$$

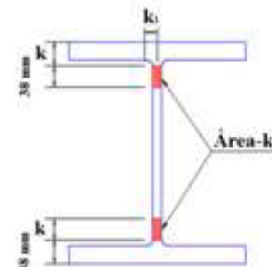
**FEMA 350-00 (STEP 12):** Ver si el espesor de alma de la columna es adecuado para la compresión en las alas de la viga

$$k := t_{cf} + s_{col} = 71 \cdot \text{mm}$$

$$k_1 := \frac{t_{cw}}{2} + s_{col}$$

$$\underline{c} := 1.5 \text{in} = 38.1 \cdot \text{mm} \quad (\text{"Área-k"})$$

$$k_1 = \begin{pmatrix} 26 \\ 26 \\ 17 \\ 21 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$



$$\text{verif}_1 := \text{if} \left[ \text{tcw}_1 < \frac{2 \text{Mf}_1}{(\text{db} - \text{tstem}) \cdot (6\text{k} + \text{c}) \cdot \text{Fyc}}, \text{"Se requieren PC en COL. 1"}, \text{"NO se requieren PC en COL. 1"} \right]$$

$$\text{verif}_2 := \text{if} \left[ \text{tcw}_2 < \frac{2 \text{Mf}_2}{(\text{db} - \text{tstem}) \cdot (6\text{k} + \text{c}) \cdot \text{Fyc}}, \text{"Se requieren PC en COL. 2"}, \text{"NO se requieren PC en COL. 1"} \right]$$

$$\text{verif}_3 := \text{if} \left[ \text{tcw}_3 < \frac{2 \text{Mf}_3}{(\text{db} - \text{tstem}) \cdot (6\text{k} + \text{c}) \cdot \text{Fyc}}, \text{"Se requieren PC en COL. 3"}, \text{"NO se requieren PC en COL. 1"} \right]$$

$$\text{verif}_4 := \text{if} \left[ \text{tcw}_4 < \frac{2 \text{Mf}_4}{(\text{db} - \text{tstem}) \cdot (6\text{k} + \text{c}) \cdot \text{Fyc}}, \text{"Se requieren PC en COL. 4"}, \text{"NO se requieren PC en COL. 1"} \right]$$

$$\text{verif} = \begin{pmatrix} \text{"Se requieren PC en COL. 1"} \\ \text{"Se requieren PC en COL. 2"} \\ \text{"Se requieren PC en COL. 3"} \\ \text{"Se requieren PC en COL. 4"} \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, todas las columnas poseen placas de continuidad.

$$\text{STEP13}_1 := \text{if}(\text{tcf} \geq \text{tfT}_1, \text{"OK"}, \text{"Aumentar tcf"}) = \text{"OK"}$$

$$\text{STEP13}_2 := \text{if}(\text{tcf} \geq \text{tfT}_2, \text{"OK"}, \text{"Aumentar tcf"}) = \text{"OK"}$$

$$\text{STEP13}_3 := \text{if}(\text{tcf} \geq \text{tfT}_3, \text{"OK"}, \text{"Aumentar tcf"}) = \text{"OK"}$$

$$\text{STEP13}_4 := \text{if}(\text{tcf} \geq \text{tfT}_4, \text{"OK"}, \text{"Aumentar tcf"}) = \text{"OK"}$$

### 3.5.1 Diseño según AISC 341-10 y AISC 360-10, secciones J10.1, J10.2 y J10.3:

$$\text{tpc} := \max(\text{tstem}, \text{tbf}) = 22 \cdot \text{mm}$$

: Espesor de cada placa de continuidad.

$$\text{P} := \text{Ffail} \quad \text{P} = \begin{pmatrix} 108.7 \\ 211 \\ 166.1 \\ 211 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

: Fuerza concentrada en cada placa.

#### 1. Flexión local de las alas de la columna:

$$\text{hP} := 116.8 \text{cm}$$

: Distancia entre pto. de aplicación y extremo de la columna.

$$\text{Rn} := \text{if} \left[ \text{hP} < 10 \cdot \text{tcf}, 0.5 \cdot \left( 6.25 \cdot \text{Fyc} \cdot \text{tcf}^2 \right), 6.25 \cdot \text{Fyc} \cdot \text{tcf}^2 \right] = 632.38 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.9 \cdot R_n = 569.1 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{P}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.19 \\ 0.37 \\ 0.29 \\ 0.37 \end{pmatrix}$$

## 2. Fluencia local en el alma de la columna:

$$l_b := t_{stem} = 22 \cdot \text{mm}$$

: Largo de aplastamiento.

$$R_{n1} := \text{if} \left[ hP < dc, F_{yc} \cdot t_{cw1} \cdot (2.5 \cdot k + l_b), F_{yc} \cdot t_{cw1} \cdot (5 \cdot k + l_b) \right] = 336.4 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n2} := \text{if} \left[ hP < dc, F_{yc} \cdot t_{cw2} \cdot (2.5 \cdot k + l_b), F_{yc} \cdot t_{cw2} \cdot (5 \cdot k + l_b) \right] = 336.4 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n3} := \text{if} \left[ hP < dc, F_{yc} \cdot t_{cw3} \cdot (2.5 \cdot k + l_b), F_{yc} \cdot t_{cw3} \cdot (5 \cdot k + l_b) \right] = 173 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n4} := \text{if} \left[ hP < dc, F_{yc} \cdot t_{cw4} \cdot (2.5 \cdot k + l_b), F_{yc} \cdot t_{cw4} \cdot (5 \cdot k + l_b) \right] = 240.3 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 1 \cdot R_n \quad \phi R_n = \begin{pmatrix} 336.4 \\ 336.4 \\ 173 \\ 240.3 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{P}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.32 \\ 0.63 \\ 0.96 \\ 0.88 \end{pmatrix}$$

## 3. Aplastamiento en el alma de la columna:

$$R_n := \begin{cases} \left[ 0.8 \cdot (t_{cw})^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{l_b}{dc} \right) \cdot \left( \frac{t_{cw}}{t_{cf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yc} \cdot t_{cf}}{t_{cw}}} \right] & \text{if } hP \geq \frac{dc}{2} \\ \text{if } hP < \frac{dc}{2} \\ \left[ 0.4 \cdot (t_{cw})^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{l_b}{dc} \right) \cdot \left( \frac{t_{cw}}{t_{cf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yc} \cdot t_{cf}}{t_{cw}}} \right] & \text{if } \frac{l_b}{dc} \leq 0.2 \\ \left[ 0.4 \cdot (t_{cw})^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{4 \cdot l_b}{dc} - 0.2 \right) \cdot \left( \frac{t_{cw}}{t_{cf}} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{yc} \cdot t_{cf}}{t_{cw}}} \right] & \text{if } \frac{l_b}{dc} > 0.2 \end{cases}$$

$$R_n = \begin{pmatrix} 980.4 \\ 980.4 \\ 354.1 \\ 584.1 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \quad \phi R_n := 0.75 \cdot R_n$$

$$\phi R_n = \begin{pmatrix} 735.3 \\ 735.3 \\ 265.5 \\ 438.1 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{P}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.15 \\ 0.29 \\ 0.63 \\ 0.48 \end{pmatrix}$$

Como en ninguno de los últimos tres estados límites el FU es mayor a 1, la placa de continuidad no requiere ser de un espesor más grande que el definido anteriormente de 22 mm.

$$b_{\min} := \frac{w_0}{3} - \frac{tcw}{2} \quad b_{\min} = \begin{pmatrix} 132.5 \\ 132.5 \\ 141 \\ 137.5 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad : \text{Ancho mínimo de PC.}$$

$$t_{\min_1} := \max\left(\frac{t_{\text{stem}}}{2}, \frac{t_{\text{bf}}}{2}, \frac{b_{\min_1}}{16}\right) \quad : \text{Espesor mínimo de PC.}$$

$$t_{\min_2} := \max\left(\frac{t_{\text{stem}}}{2}, \frac{t_{\text{bf}}}{2}, \frac{b_{\min_2}}{16}\right)$$

$$t_{\min_3} := \max\left(\frac{t_{\text{stem}}}{2}, \frac{t_{\text{bf}}}{2}, \frac{b_{\min_3}}{16}\right)$$

$$t_{\min_4} := \max\left(\frac{t_{\text{stem}}}{2}, \frac{t_{\text{bf}}}{2}, \frac{b_{\min_4}}{16}\right)$$

$$t_{\min} = \begin{pmatrix} 11 \\ 11 \\ 11 \\ 11 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad t_{\min} := 11\text{mm}$$

$$b_{p1} := \frac{(bcf - tcw)}{2}$$

$$b_{p1} = \begin{pmatrix} 208 \\ 208 \\ 216 \\ 213 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$\text{if}(b_{p1} \geq b_{\min_1}, \text{"OK"}, \text{"No cumple"}) = \text{"OK"}$$

$$\text{if}(b_{p2} \geq b_{\min_2}, \text{"OK"}, \text{"No cumple"}) = \text{"OK"}$$

$$\text{if}(b_{p3} \geq b_{\min_3}, \text{"OK"}, \text{"No cumple"}) = \text{"OK"}$$

$$\text{if}(b_{p4} \geq b_{\min_4}, \text{"OK"}, \text{"No cumple"}) = \text{"OK"}$$

$$t_{pc} = 22 \cdot \text{mm}$$

$$\text{if}(t_{pc} \geq t_{\min}, \text{"OK"}, \text{"No cumple"}) = \text{"OK"}$$

$$\phi_{FyAg} := (2) \cdot 0.9 \cdot F_{yc} \cdot b_{p1} \cdot t_{pc}$$

: Resistencia de diseño a la fluencia del área gruesa.

$$\phi_{FuAe} := (2) \cdot F_{uc} \cdot b_{p1} \cdot t_{pc}$$

: Resistencia de diseño a la ruptura del área neta.

$$\phi_{FyAg} = \begin{pmatrix} 209.5 \\ 209.5 \\ 218.1 \\ 214.5 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\phi_{FuAe} = \begin{pmatrix} 372.4 \\ 372.4 \\ 387.7 \\ 381.4 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\phi_{Fn_{pc_1}} := \min(\phi_{FyAg_1}, \phi_{FuAe_1}) = 209.5 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi_{Fn_{pc_2}} := \min(\phi_{FyAg_2}, \phi_{FuAe_2}) = 209.5 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi_{Fn_{pc_3}} := \min(\phi_{FyAg_3}, \phi_{FuAe_3}) = 218.1 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi F_n_{pc_4} := \min(\phi F_y A_{g_4}, \phi F_u A_{e_4}) = 214.5 \text{ tonf}$$

$$FU := \frac{0 \text{ tonf}}{\phi F_n_{pc}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Las placas de continuidad sólo deben suplir lo que le falta de resistencia a la columna, diferencia que no existe en estos casos.

### 3.5.2 Soldadura de FILETE entre Placa de continuidad y alma de columna:

$$e_{\text{thinner}} := \min(\text{tpc}, \max(\text{tcw})) = 22 \text{ mm}$$

$$s_{\text{min}} := \text{if}(e_{\text{thinner}} > 6 \text{ mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 13 \text{ mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 19 \text{ mm}, 8 \text{ mm}, 6 \text{ mm}), 5 \text{ mm}), 3 \text{ mm}) = 8 \text{ mm}$$

$$s := 12 \text{ mm} \quad \text{if}(s \geq s_{\text{min}}, \text{"OK"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$$

$$L_{\text{eff}} := dc - 2 \cdot (k + c + 0.25 \text{ in}) = 56.91 \text{ cm}$$

$$L_{\text{net}} := dc - 2 \cdot (k + c) = 58.18 \text{ cm}$$

$$\beta := \text{if}\left(\frac{L_{\text{eff}}}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{L_{\text{eff}}}{s}, 1\right) = 1$$

$$A_{\text{eff}} := \beta \cdot L_{\text{eff}} \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 48.3 \text{ cm}^2$$

$$F_{\text{Exx}} := 70 \text{ ksi}$$

$$V_n := (2) \cdot 0.6 \cdot F_{\text{Exx}} \cdot A_{\text{eff}} = 285.2 \text{ tonf}$$

$$\phi V_n := 0.75 \cdot V_n = 213.9 \text{ tonf}$$

$$FU := \frac{0.6 \cdot F_{yc} \cdot L_{\text{net}} \cdot \text{tpc}}{\phi V_n} = 0.92$$

### 3.5.3 Soldadura CJP entre Placa de continuidad y alas de columna:

$$a_{\text{cjp}} := \text{tpc} = 22 \text{ mm}$$

$$L_{\text{eff}_1} := \min\left[\frac{(bcf - 2 \cdot k1_1)}{2}, \frac{bcf}{2} - \frac{tcw_1}{2} - 14 \text{ mm}\right] = 19.35 \text{ cm}$$

$$L_{\text{eff}_2} := \min\left[\frac{(bcf - 2 \cdot k1_2)}{2}, \frac{bcf}{2} - \frac{tcw_2}{2} - 14 \text{ mm}\right] = 19.35 \text{ cm}$$

$$L_{\text{eff}_3} := \min\left[\frac{(bcf - 2 \cdot k1_3)}{2}, \frac{bcf}{2} - \frac{tcw_3}{2} - 14 \text{ mm}\right] = 20.2 \text{ cm}$$

$$L_{\text{eff}_4} := \min\left[\frac{(bcf - 2 \cdot k1_4)}{2}, \frac{bcf}{2} - \frac{tcw_4}{2} - 14 \text{ mm}\right] = 19.85 \text{ cm}$$

$$\underline{Rn} := Fyc \cdot Leff \cdot a_{cjp} \quad Rn = \begin{pmatrix} 108.5 \\ 108.5 \\ 113.3 \\ 111.3 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\phi Rn} := 0.9 \cdot Rn \quad \phi Rn = \begin{pmatrix} 97.7 \\ 97.7 \\ 102 \\ 100.2 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{FU} := \left( \frac{Ffail}{4} \cdot \frac{1}{\phi Rn} \right) = \begin{pmatrix} 0.28 \\ 0.54 \\ 0.41 \\ 0.53 \end{pmatrix}$$

### 3.6 Zona Panel

*Esfuerzo de corte en zona panel:*

$$Vct := \frac{2 \cdot Mfail}{Lc} \quad Vct = \begin{pmatrix} 38 \\ 73.7 \\ 58 \\ 73.7 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{Vzp} := \frac{2 \cdot Mfail}{db} - Vct \quad \underline{Vzp} := \frac{Mfail_2}{db} - Vct_2 \quad Vzp = \begin{pmatrix} 187.4 \\ 145 \\ 286.3 \\ 363.7 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

(Sólo con una viga)

*Resistencia a la fluencia por corte (AISC 341-10 y AISC 360-10, Cap. J10.6):*

$$\underline{Pr} := 0 \text{tonf}$$

$$\underline{Pc} := Fyc \cdot Agc \quad Pc = \begin{pmatrix} 2046.8 \\ 2046.8 \\ 1754.7 \\ 1875 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{Rn}_1 := \begin{cases} 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_1 & \text{if } Pr \leq 0.4 \cdot Pc_1 \\ 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_1 \cdot \left( 1.4 - \frac{Pr}{Pc_1} \right) & \text{if } Pr > 0.4 \cdot (Fyc \cdot Agc_1) \end{cases} = 428.3 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{Rn}_2 := \begin{cases} 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_2 & \text{if } Pr \leq 0.4 \cdot Pc_2 \\ 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_2 \cdot \left( 1.4 - \frac{Pr}{Pc_2} \right) & \text{if } Pr > 0.4 \cdot (Fyc \cdot Agc_2) \end{cases} = 428.3 \cdot \text{tonf}$$



$$Rn_3 := \begin{cases} (Ryc) \cdot 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_3 & \text{if } Pr \leq 0.4 \cdot Pc_3 \\ (Ryc) \cdot 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_3 \cdot \left(1.4 - \frac{Pr}{Pc_3}\right) & \text{if } Pr > 0.4 \cdot (Fyc \cdot Agc_3) \end{cases} = 286.3 \cdot \text{tonf}$$

$$Rn_4 := \begin{cases} (Ryc) \cdot 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_4 & \text{if } Pr \leq 0.4 \cdot Pc_4 \\ (Ryc) \cdot 0.6 \cdot Fyc \cdot dc \cdot tcw_4 \cdot \left(1.4 - \frac{Pr}{Pc_4}\right) & \text{if } Pr > 0.4 \cdot (Fyc \cdot Agc_4) \end{cases} = 397.7 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi Rn := 1 \cdot Rn \quad \phi Rn = \begin{pmatrix} 428.3 \\ 428.3 \\ 286.3 \\ 397.7 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \quad \boxed{FU := \frac{Vzp}{\phi Rn} = \begin{pmatrix} 0.44 \\ 0.34 \\ 1 \\ 0.91 \end{pmatrix}}$$

$$Mzp := \frac{Mfail}{FU} = \begin{pmatrix} 154.5 \\ 387.6 \\ 103.3 \\ 143.5 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

**FEMA 350-00 (Ec. 3-7):** Espesor para que ocurra una falla balanceada.

$$t_{req} := \frac{(2) \cdot Cy \cdot Mc \cdot \frac{Lc - db}{Lc}}{(0.9) \cdot 0.6 \cdot Fyc \cdot Ryc \cdot dc \cdot (db - tbf)} \quad t_{req_2} := \frac{t_{req_2}}{2} \quad t_{req} = \begin{pmatrix} 23.7 \\ 11.9 \\ 23.9 \\ 23.9 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$verif_1 := \text{if}(tcw_1 < t_{req_1}, \text{"Se requiere doble placa en COL.1"}, \text{"OK, zona panel no fluye"})$$

$$verif_2 := \text{if}(tcw_2 < t_{req_2}, \text{"Se requiere doble placa en COL.1"}, \text{"OK, zona panel no fluye"})$$

$$verif_3 := \text{if}(tcw_3 < t_{req_3}, \text{"OK, zona panel fluye"}, \text{"Check! Zona panel debe fluir"})$$

$$verif_4 := \text{if}(t_{req_4} - 1.2\text{mm} < tcw_4 < t_{req_4} + 1.2\text{mm}, \text{"OK, zona panel fluye"}, \text{"Check! Zona panel debe fluir"})$$

$$verif = \begin{pmatrix} \text{"OK, zona panel no fluye"} \\ \text{"OK, zona panel no fluye"} \\ \text{"OK, zona panel fluye"} \\ \text{"OK, zona panel fluye"} \end{pmatrix}$$

### 3.6.1 Pandeo local por corte en zona panel:

$$dz := dc - 2 \cdot tcf = 674 \cdot \text{mm}$$

$$wz := db - 2 \cdot tbf = 568 \cdot \text{mm}$$

$$\text{verif} := \text{if} \left( \text{tcw}_1 \geq \frac{dz + wz}{90}, \text{"OK, no hay pandeo local"}, \text{"Check!"} \right) = \text{"OK, no hay pandeo local"}$$

$$\text{verif} := \text{if} \left( \text{tcw}_2 \geq \frac{dz + wz}{90}, \text{"OK, no hay pandeo local"}, \text{"Check!"} \right) = \text{"OK, no hay pandeo local"}$$

$$\text{verif} := \text{if} \left( \text{tcw}_3 \geq \frac{dz + wz}{90}, \text{"OK, no hay pandeo local"}, \text{"Check!"} \right) = \text{"OK, no hay pandeo local"}$$

$$\text{verif} := \text{if} \left( \text{tcw}_1 \geq \frac{dz + wz}{90}, \text{"OK, no hay pandeo local"}, \text{"Check!"} \right) = \text{"OK, no hay pandeo local"}$$

### 3.7 Llave de Corte

#### FEMA 350-00 (STEP 14):

$$V_g := PP_{\text{viga}} = 0.5 \cdot \text{tonf}$$

$$V_{st} := 2 \cdot \frac{M_f}{L_v - d_c} + V_g \quad V_{st} = \begin{pmatrix} 36.9 \\ 37.2 \\ 37.2 \\ 37.2 \end{pmatrix} \cdot \text{tonf} \quad : \text{ Esfuerzo de corte de diseño}$$

#### 3.7.1 Pernos entre llave de corte y alma de viga: ASTM A-490 1 3/8"

$$F_{nv} := 579 \text{MPa} \quad d_{\text{bolt}} := 1 \text{in} = 25.4 \text{mm} \quad d_{\text{hole}} := 29 \text{mm} \quad (d_{\text{bolt}} + 3 \text{mm})$$

$$F_{nt} := 780 \text{MPa} \quad A_b := \frac{\pi \cdot d_{\text{bolt}}^2}{4} = 5.07 \cdot \text{cm}^2 \quad N := 3 \quad : \text{ Num. de pernos.}$$

$$R_n := N \cdot F_{nv} \cdot A_b = 89.75 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.75 \cdot R_n = 67.31 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{V_{st}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.55 \\ 0.55 \\ 0.55 \\ 0.55 \end{pmatrix}$$

$$S_2 := 78 \text{mm} \quad : \text{ Espaciamiento entre pernos.}$$

$$S_{4\text{vert}} := 37 \text{mm} \quad : \text{ Distancia entre centro del perno y borde de llave.}$$

$$S_{4\text{hor}} := 50 \text{mm} \quad : \text{ Distancia entre centro del perno y borde de llave.}$$

$$t_{\text{st}} := 25 \text{mm} \quad : \text{ Espesor de llave de corte.}$$

$$l_{\text{st}} := (N - 1) \cdot S_2 + 2 \cdot S_{4\text{vert}} = 230 \text{mm} \quad : \text{ Largo de llave de corte.}$$

$$b_{st} := t_f T + 26\text{mm} + 2 \cdot S4\text{hor}$$

$$b_{st} = \begin{pmatrix} 151 \\ 176 \\ 176 \\ 176 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

: Ancho de llave de corte.

### 3.7.2 Aplastamiento en alma de viga:

(Deformación de la perf. no es una consideración del diseño)

$$l_c := S2 - d_{\text{hole}} = 49 \cdot \text{mm}$$

$$R_n := \min(1.5 \cdot l_c \cdot t_{bw} \cdot F_{ub}, 3 \cdot d_{\text{bolt}} \cdot t_{bw} \cdot F_{ub} \cdot N) = 36 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 1 \cdot R_n = 36 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{V_{st}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 1.03 \\ 1.03 \\ 1.03 \\ 1.03 \end{pmatrix}$$

Acceptable

### 3.7.3 Aplastamiento en llave de corte:

(Deformación de la perf. no es una consideración del diseño)

$$l_c := S4\text{vert} + (N - 1) \cdot S2 - (N - 0.5) \cdot d_{\text{hole}} = 120.5 \cdot \text{mm}$$

$$R_n := \min(1.5 \cdot l_c \cdot t_{st} \cdot F_{uc}, 3 \cdot d_{\text{bolt}} \cdot t_{st} \cdot F_{uc} \cdot N) = 184.3 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 1 \cdot R_n = 184.3 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{V_{st}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \end{pmatrix}$$

### 3.7.4 Fluencia al corte de la placa:

$$R_n := 0.6 \cdot F_{yc} \cdot l_{st} \cdot t_{st} = 88 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 1 \cdot R_n = 88 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{V_{st}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.42 \\ 0.42 \\ 0.42 \\ 0.42 \end{pmatrix}$$

### 3.7.5 Ruptura por corte de la placa:

$$R_n := 0.6 \cdot F_{uc} \cdot [l_{st} - N \cdot (d_{\text{hole}} + 2\text{mm})] \cdot t_{st} = 83.8 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_n := 0.75 \cdot R_n = 62.9 \cdot \text{tonf}$$

$$FU := \frac{V_{st}}{\phi R_n} = \begin{pmatrix} 0.59 \\ 0.59 \\ 0.59 \\ 0.59 \end{pmatrix}$$

### 3.7.6 Falla por bloque de corte de la placa:

$$A_{nv} := [(N - 1) \cdot S2 + S4\text{vert} - (N - 0.5) \cdot (d_{\text{hole}} + 2\text{mm})] \cdot t_{st} = 28.9 \cdot \text{cm}^2$$

$$\underline{Ant} := \left[ S4hor - \frac{(d\_hole + 2mm)}{2} \right] \cdot t\_st = 8.6 \cdot cm^2$$

$$\underline{Rn} := \min[0.6 \cdot Fuc \cdot Anv + Fuc \cdot Ant, 0.6 \cdot Fyc \cdot (1\_st \cdot t\_st) + Fuc \cdot Ant] = 105.8 \cdot tonf$$

$$\underline{\phi Rn} := 0.75 \cdot Rn = 79.4 \cdot tonf$$

$$FU := \frac{Vst}{\phi Rn} = \begin{pmatrix} 0.46 \\ 0.47 \\ 0.47 \\ 0.47 \end{pmatrix}$$

### 3.7.7 Perforaciones en llave de corte:

$$d\_bolt = 25.4 \cdot mm$$

$$\underline{ancho\_perf} := \left( 1 + \frac{1}{16} \right) in = 27 \cdot mm \quad \rightarrow \quad \underline{ancho\_perf} := 29mm$$

$$\underline{largo\_perf} := \left( 1 + \frac{5}{16} \right) in = 33.3 \cdot mm \quad \rightarrow \quad \underline{largo\_perf} := 34mm \quad : \text{Perforación "Short-Slotted".}$$

$$\underline{espac\_min} := 3 \cdot dp = 76.2 \cdot mm$$

: Espaciamiento mínimo entre perf.

$$\underline{borde\_min\_parall} := \left( 1 + \frac{1}{4} \right) in = 31.8 \cdot mm$$

: Distancia mínima al borde desde el centro del perno.

$$\underline{borde\_min\_perp} := \left( 1 + \frac{1}{4} \right) in + \frac{1}{8} in = 34.9 \cdot mm$$

: Distancia mínima al borde desde el centro del perno (eje largo perpendicular al eje).

### 3.7.8 Soldadura de FILETE entre ala de columna y llave de corte:

$$\underline{e\_thinner} := \min(tcf, t\_st) = 25 \cdot mm$$

$$\underline{s\_min} := \text{if}(e\_thinner > 6mm, \text{if}(e\_thinner > 13mm, \text{if}(e\_thinner > 19mm, 8mm, 6mm), 5mm), 3mm) = 8 \cdot mm$$

$$\underline{s} := 16mm \quad \text{if}(s \geq s\_min, "OK", "Check!") = "OK"$$

$$Leff := 1\_st = 23 \cdot cm$$

$$\underline{\beta} := \text{if}\left(\frac{Leff}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{Leff}{s}, 1\right) = 1$$

$$\underline{Aeff} := \beta \cdot Leff \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 26 \cdot cm^2$$

$$\underline{FExx} := 70ksi$$

$$\underline{Vn} := 2 \cdot 0.6 \cdot FExx \cdot Aeff = 153.7 \cdot tonf$$

$$\phi V_n := 0.75 \cdot V_n = 115.3 \cdot \text{tonf}$$

$$f_v := \frac{V_{st}}{L_{eff}} \quad f_v = \begin{pmatrix} 1.6 \\ 1.62 \\ 1.62 \\ 1.62 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf}}{\text{cm}} \quad : \text{Corte lineal.}$$

$$f_m := \left[ \frac{3 \cdot V_{st} \cdot (t_f \Gamma + 26\text{mm} + S4\text{hor})}{L_{eff}^2} \right] \quad f_m = \begin{pmatrix} 2.11 \\ 2.65 \\ 2.65 \\ 2.65 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf}}{\text{cm}} \quad : \text{Momento lineal.}$$

$$V_{u\_sold} := \sqrt{f_v^2 + f_m^2} \cdot L_{eff} \quad V_{u\_sold} = \begin{pmatrix} 61 \\ 71.5 \\ 71.5 \\ 71.5 \end{pmatrix} \text{tonf}$$

$$FU := \frac{V_{u\_sold}}{\phi V_n} = \begin{pmatrix} 0.53 \\ 0.62 \\ 0.62 \\ 0.62 \end{pmatrix}$$

#### A.4. Diseño de *End-Plate* en base de columna

*AISC Design Guide 16*

$$P_u := 0 \text{tonf}$$

$$V_u := 100 \text{tonf} \quad : \text{Corte en la columna.}$$

$$\text{Brazo} := 30.2 \text{cm} \quad : \text{Distancia entre rótula y base de la columna.}$$

$$M_{u\_ep} := V_u \cdot \text{Brazo} = 30.2 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \quad : \text{Momento en la base de la columna.}$$

$$d_{\text{bolt}} := \left( 1 + \frac{1}{2} \right) \text{in} = 38 \cdot \text{mm}$$

$$d_{\text{hole}} := d_{\text{bolt}} + 3 \text{mm} = 41 \cdot \text{mm}$$

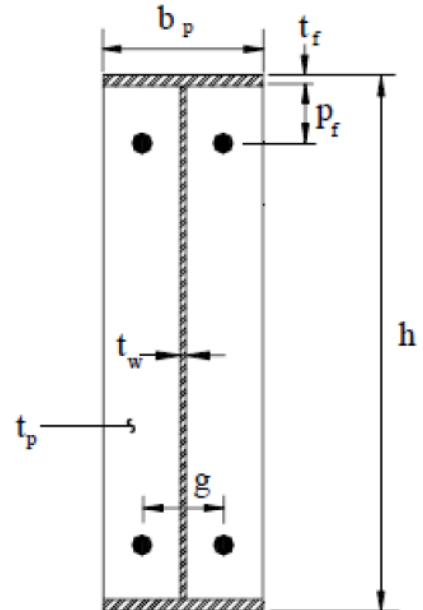
$$g := 250 \text{mm}$$

$$\text{Bolt}_{\text{pret}} := 46.7 \text{tonf}$$

$$P_f := 137 \text{mm}$$

$$P_t := P_f + t_{cf} = 200 \cdot \text{mm}$$

$$h_1 := d_c - P_t = 600 \cdot \text{mm}$$



$$\frac{F_u}{\gamma_{M2}} := \frac{M_{u\_ep}}{d_c - t_{cf}} = 41 \cdot \text{tonf}$$

$t_{pl} := 32 \text{ mm}$  : Espesor de placa.

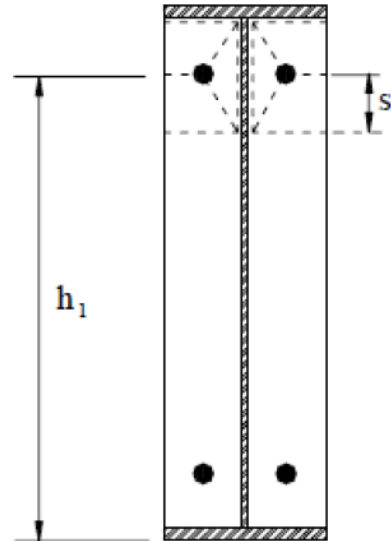
$L := d_c = 800 \cdot \text{mm}$  : Largo de placa.

$b_{pl} := b_{cf} = 450 \cdot \text{mm}$  : Ancho de placa.

#### 4.1 Tracción en pernos (ASTMA-325)

$$M_{np} := (2) \cdot 620 \text{ MPa} \cdot \pi \cdot \frac{d_{bolt}^2}{4} \cdot \left( h_1 - \frac{t_{cf}}{2} \right) = 82 \text{ m} \cdot \text{tonf}$$

$$\phi M_{np} := 0.75 \cdot M_{np} = 61.5 \text{ m} \cdot \text{tonf}$$



: Sin efecto de apalancamiento.

$$\frac{F_u}{\gamma_{M2}} := \frac{M_{u\_ep}}{\phi M_{np}} = 0.49$$

#### 4.2 Espesor de placa

$$s_w := \frac{1}{2} \cdot \sqrt{b_{pl} \cdot g} = 168 \cdot \text{mm}$$

: Distancia entre pernos y línea de fluencia

$$Y := \frac{b_{pl}}{2} \cdot \left[ h_1 \cdot \left( \frac{1}{P_f} + \frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} \cdot [h_1 \cdot (P_f + s)] = 3253 \cdot \text{mm}$$

: Parámetro del mecanismo de líneas de fluencia.

$$M_{pl} := F_{yc} \cdot t_{pl}^2 \cdot Y = 84.9 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\phi M_{pl} := 0.9 \cdot M_{pl} = 76.4 \text{ m} \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{F_u}{\gamma_{M2}} := \frac{1.11 \cdot \phi M_{np}}{\phi M_{pl}} = 0.89$$

#### 4.3 Fluencia al corte de la placa

$$\frac{A_g}{\gamma_{M2}} := b_{pl} \cdot t_{pl} = 144 \cdot \text{cm}^2$$

$$\frac{R_n}{\gamma_{M2}} := 0.6 \cdot F_{yc} \cdot A_g = 220.3 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{\phi R_n}{\gamma_{M2}} := 0.9 \cdot R_n = 198.2 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{F_u}{\gamma_{M2}} := \frac{F_u}{\phi R_n} = 0.21$$

#### 4.4 Ruptura al corte de la placa

$$\frac{A_n}{\gamma_{M2}} := A_g - 2 \cdot t_{pl} \cdot (d_{hole} + 2 \text{ mm}) = 116.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$\frac{R_n}{\gamma_{M2}} := 0.6 \cdot F_{uc} \cdot A_n = 284.9 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{\phi R_n}{\gamma_{M2}} := 0.75 \cdot R_n = 213.7 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{F_u}{\gamma_{M2}} := \frac{F_u}{\phi R_n} = 0.19$$

#### 4.5 Corte en pernos a compresión

(2)·Bolt\_pret = 93.4·tonf > Fu = 41·tonf : Pretensión es mayor que tracción.

$$R_{n_{\text{corte}}} := (4) \cdot 457 \text{MPa} \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{bolt}}^2}{4} = 212.5 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_{n_{\text{corte}}} := 0.75 \cdot R_{n_{\text{corte}}} = 159.4 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{V_u}{\phi R_{n_{\text{corte}}}} = 0.63$$

#### 4.6 Aplastamiento/tearout en pernos a compresión

$$l_c := 2 \cdot \left( h_1 + \frac{t_{cf}}{2} - 1.5 \cdot d_{\text{hole}} \right) = 1140 \cdot \text{mm}$$

$$R_{n_{\text{apl}}} := \min(1.2 \cdot l_c \cdot t_{pl} \cdot F_{uc}, 2.4 \cdot d_{\text{bolt}} \cdot t_{pl} \cdot F_{uc} \cdot 4) = 477.4 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi R_{n_{\text{apl}}} := 0.75 \cdot R_{n_{\text{apl}}} = 358.1 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{V_u}{\phi R_{n_{\text{apl}}}} = 0.28$$

#### 4.7 Soldadura End Plate

##### 4.7.1 Soldadura de FILETE entre End Plate y alma de columna:

$$e_{\text{thinner}} := \min(t_{pl}, \max(t_{cw})) = 32 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{min}} := \text{if}(e_{\text{thinner}} > 6 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 13 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 19 \text{mm}, 8 \text{mm}, 6 \text{mm}), 5 \text{mm}), 3 \text{mm}) = 8 \cdot \text{mm}$$

$$s := 8 \text{mm} \quad \text{if}(s \geq s_{\text{min}}, \text{"OK"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$$

$$L_{\text{eff}} := d_c - 2 \cdot (k_{\text{col}} + c + 0.25 \text{in}) = 56.9 \cdot \text{cm}$$

$$\beta := \text{if}\left(\frac{L_{\text{eff}}}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{L_{\text{eff}}}{s}, 1\right) = 1$$

$$A_{\text{eff}} := \beta \cdot L_{\text{eff}} \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 32.2 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_{\text{Exx}} := 70 \text{ksi}$$

$$V_n := (2) \cdot 0.6 \cdot F_{\text{Exx}} \cdot A_{\text{eff}} = 190.1 \cdot \text{tonf}$$

$$\phi V_n := 0.75 \cdot V_n = 142.6 \cdot \text{tonf}$$

$$\frac{V_u}{\phi V_n} = 0.7$$

(Se lleva todo el corte)

##### 4.7.2 Soldadura de FILETE entre End Plate y alas de columna:

$$e_{\text{thinner}} := \min(t_{pl}, t_{cf}) = 32 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{min}} := \text{if}(e_{\text{thinner}} > 6 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 13 \text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 19 \text{mm}, 8 \text{mm}, 6 \text{mm}), 5 \text{mm}), 3 \text{mm}) = 8 \cdot \text{mm}$$

$$s := 8 \text{mm} \quad \text{if}(s \geq s_{\text{min}}, \text{"OK"}, \text{"Check!"}) = \text{"OK"}$$

$$\underline{L_{eff}} := \frac{(bcf - 2 \cdot \max(k1))}{2} - 3.5\text{mm} = 19.6 \cdot \text{cm}$$

$$\underline{\beta} := \text{if}\left(\frac{L_{eff}}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{L_{eff}}{s}, 1\right) = 1$$

$$\underline{A_{eff}} := \beta \cdot L_{eff} \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 11.1 \cdot \text{cm}^2$$

$$\underline{F_{Exx}} := 70\text{ksi}$$

$$\underline{V_n} := (4) \cdot 0.6 \cdot F_{Exx} \cdot A_{eff} = 131 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\phi V_n} := 0.75 \cdot V_n = 98.2 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{F_U} := \frac{F_u}{\phi V_n} = 0.42$$

(Se lleva todo el momento)

El diseño de la placa base posteriormente cambió a 6 pernos en la base ASTM A325 de diámetro 1 1/2". Debido a que es un caso más favorable aún, no es necesario editar los cálculos.

## A.5. Diseño de *End-Plate* en zona superior de columna

$$\underline{t_{pl}} := 32\text{mm}$$

: Espesor de placa.

$$\underline{L} := dc = 800\text{mm}$$

: Largo de placa.

$$\underline{b_{pl}} := bcf = 450\text{mm}$$

: Ancho de placa.

$$\text{PesoPlaca} := \gamma_{\text{acero}} \cdot t_{pl} \cdot L \cdot b_{pl} = 90.4 \cdot \text{kgf}$$

### 5.1 Carga concentrada

No aplica, dado que no hay presencia de carga axial.

### 5.2 Fluencia al corte de la placa

No aplica, dado que no hay presencia de carga axial.

### 5.3 Ruptura al corte de la placa

No aplica, dado que no hay presencia de carga axial.

### 5.4 Soldadura Placa Superior

#### 5.4.1 Soldadura de FILETE entre End Plate y alma de columna:

$$\underline{e_{thinner}} := \min(t_{pl}, \max(tcw)) = 32\text{mm}$$

$$\underline{s_{min}} := \text{if}(e_{thinner} > 6\text{mm}, \text{if}(e_{thinner} > 13\text{mm}, \text{if}(e_{thinner} > 19\text{mm}, 8\text{mm}, 6\text{mm}), 5\text{mm}), 3\text{mm}) = 8\text{mm}$$



$$\boxed{s := 8\text{mm}} \quad \text{if}(s \geq s_{\text{min}}, "OK", "Check!") = "OK"$$

$$\underline{\text{Leff}} := dc - 2 \cdot (k_{\text{col}} + c + 0.25\text{in}) = 56.9\text{-cm}$$

$$\underline{\beta} := \text{if}\left(\frac{\text{Leff}}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{\text{Leff}}{s}, 1\right) = 1$$

$$\underline{\text{Aeff}} := \beta \cdot \text{Leff} \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 32.2 \cdot \text{cm}^2$$

$$\underline{\text{FExx}} := 70\text{ksi}$$

$$\underline{\text{Vn}} := (2) \cdot 0.6 \cdot \text{FExx} \cdot \text{Aeff} = 190.1 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\phi \text{Vn}} := 0.75 \cdot \text{Vn} = 142.6 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\text{FU}} := \frac{\text{PesoPlaca} \cdot \sin(0.05\text{rad})}{\phi \text{Vn}} = 0$$

#### 5.4.2 Soldadura de FILETE entre End Plate y alas de columna:

$$\underline{e_{\text{thinner}}} := \min(\text{tpl}, \text{tcf}) = 32\text{-mm}$$

$$\underline{s_{\text{min}}} := \text{if}(e_{\text{thinner}} > 6\text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 13\text{mm}, \text{if}(e_{\text{thinner}} > 19\text{mm}, 8\text{mm}, 6\text{mm}), 5\text{mm}), 3\text{mm}) = 8\text{-mm}$$

$$\boxed{s := 8\text{mm}} \quad \text{if}(s \geq s_{\text{min}}, "OK", "Check!") = "OK"$$

$$\underline{\text{Leff}} := \frac{(\text{bcf} - 2 \cdot \max(k1))}{2} - 3.5\text{mm} = 19.6\text{-cm}$$

$$\underline{\beta} := \text{if}\left(\frac{\text{Leff}}{s} > 100, 1.2 - 0.002 \cdot \frac{\text{Leff}}{s}, 1\right) = 1$$

$$\underline{\text{Aeff}} := \beta \cdot \text{Leff} \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = 11.1 \cdot \text{cm}^2$$

$$\underline{\text{FExx}} := 70\text{ksi}$$

$$\underline{\text{Vn}} := (4) \cdot 0.6 \cdot \text{FExx} \cdot \text{Aeff} = 131 \cdot \text{tonf}$$

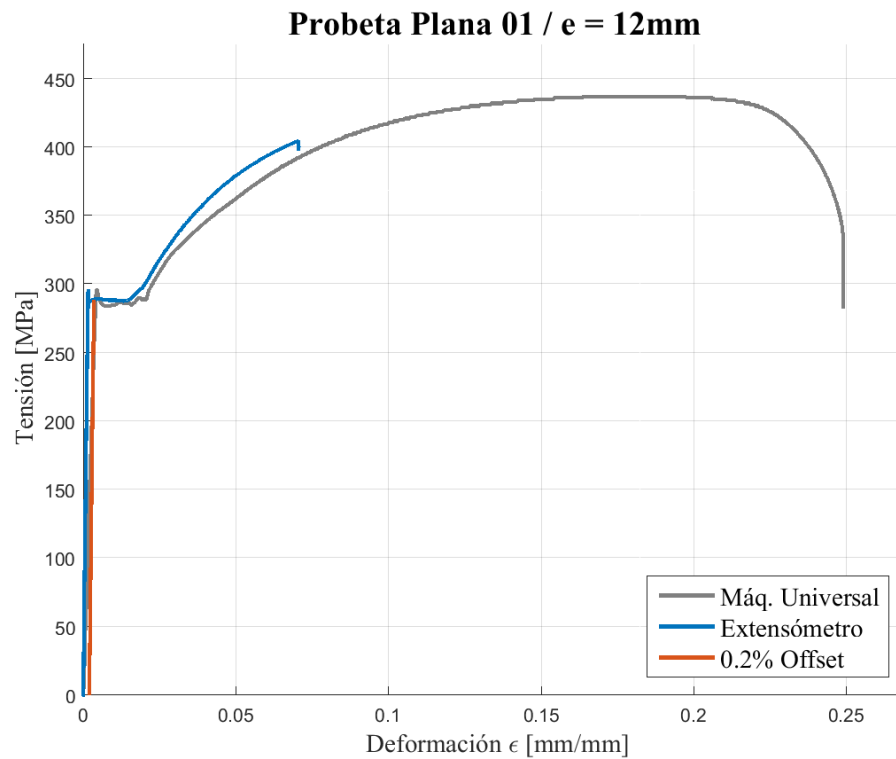
$$\underline{\phi \text{Vn}} := 0.75 \cdot \text{Vn} = 98.2 \cdot \text{tonf}$$

$$\underline{\text{FU}} := \frac{\text{PesoPlaca} \cdot \sin(0.05\text{rad})}{\phi \text{Vn}} = 0$$

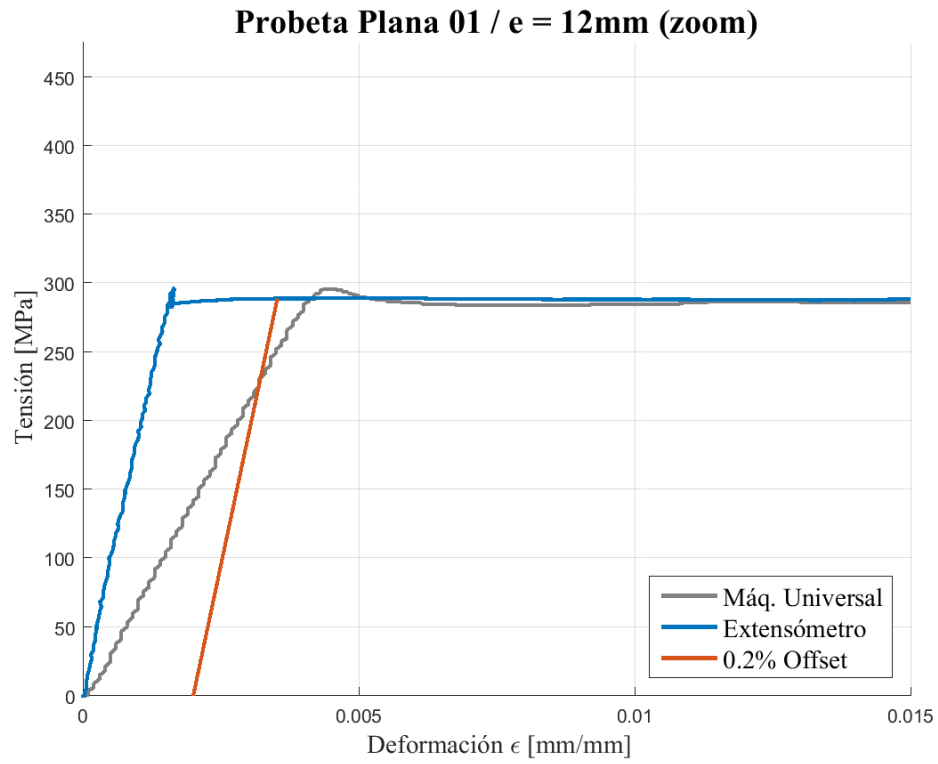
# Apéndice B. Resultados de ensayos de materiales

## B.1. Probetas planas de acero ASTM A36

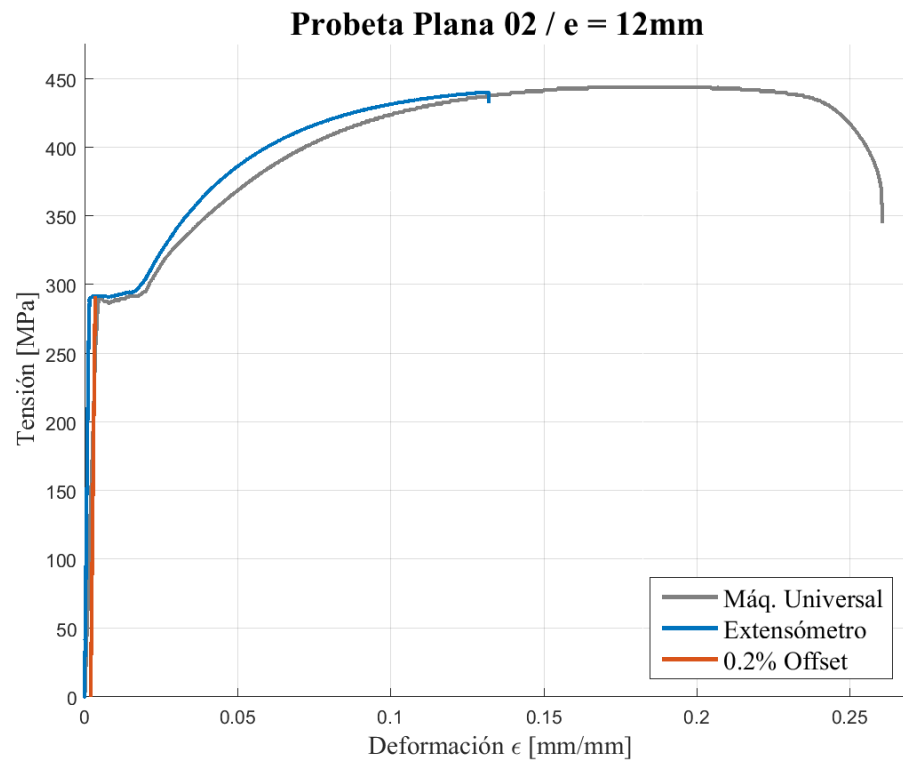
En las siguientes figuras se presentan las curvas Tensión vs. Deformación obtenidas en los ensayos a tracción de tres probetas planas de acero ASTM A36 y de espesor 12 [mm], realizados en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.



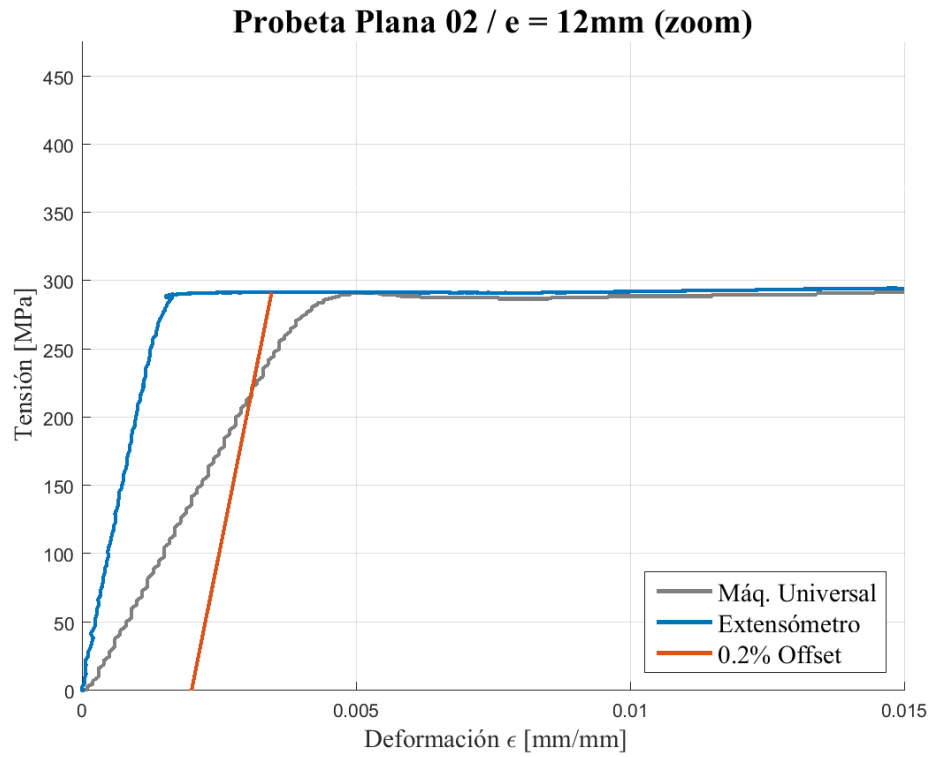
**Figura B.1: Curva Tensión/Deformación de la Probeta Plana A36/12-01.**



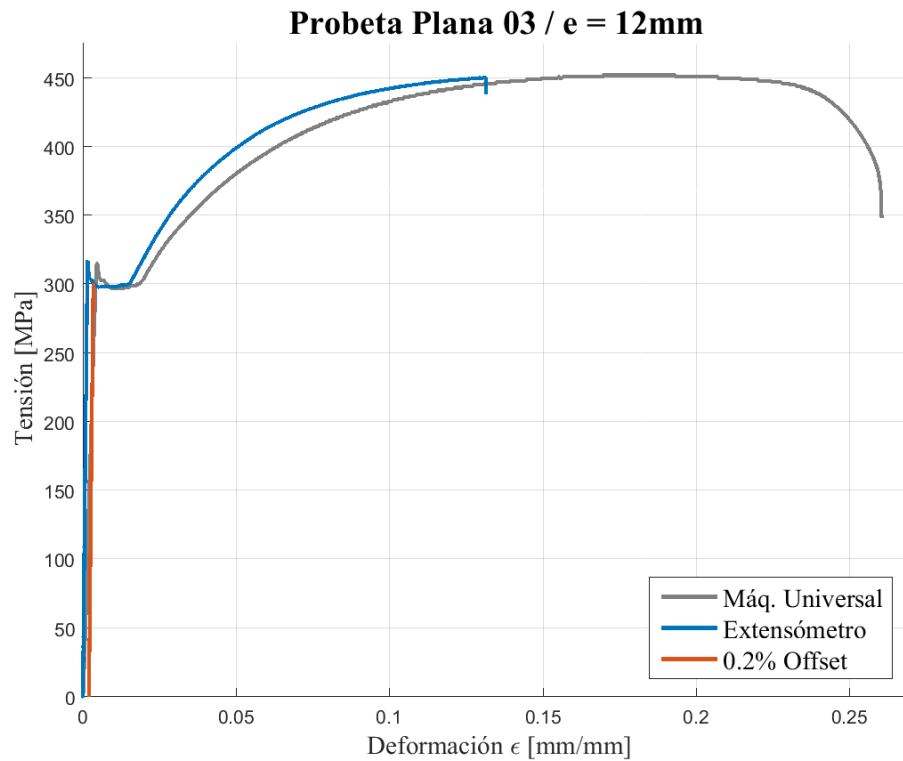
**Figura B.2: Curva Tensión/Deformación de la Probeta Plana A36/12-01 (zoom).**



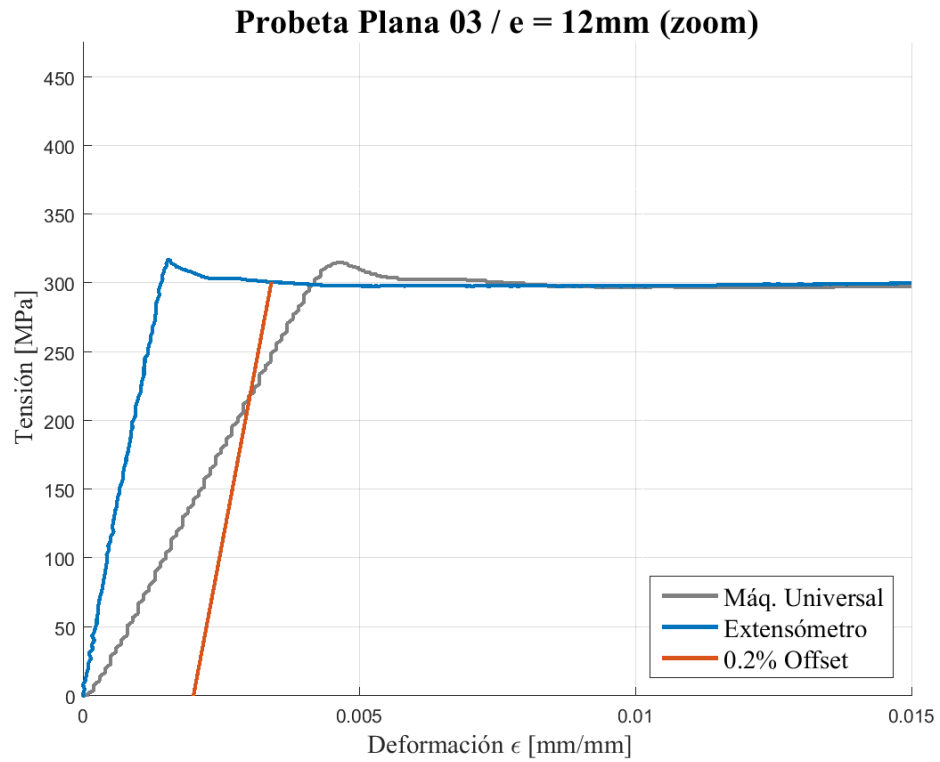
**Figura B.3: Curva Tensión/Deformación de la Probeta Plana A36/12-02.**



**Figura B.4: Curva Tensión/Deformación de la Probeta Plana A36/12-02 (zoom).**



**Figura B.5: Curva Tensión/Deformación de la Probeta Plana A36/12-03.**



**Figura B.6: Curva Tensión/Deformación de la Probeta Plana A36/12-03 (zoom).**

Los resultados obtenidos de ensayos a tracción de las seis probetas planas de acero de espesores 22 y 25 [mm] se presentan en el siguiente informe generado por la empresa encargada de realizarlos: SCI CHILE S.A.

**TÍTULO** : ENSAYO DE TRACCIÓN A 6 MUESTRAS DE PLANCHAS DE ACERO ASTM A36 SEGÚN LA NORMA ASTM E8.

**INFORME** : E-160035LMESAN-OT0001-IF01 Rev.0.

**CLIENTE** : RICARDO HERRERA MARDONES.

**DIRECCIÓN CLIENTE** : BLANCO ENCALADA 2002, OFC. 435, SANTIAGO.

**PETICIONARIO** : SRTA. CONSTANZA SALAS Q.

**S/REF. O PEDIDO** : ENSAYOS MECÁNICOS

## 1. MUESTRA RECEPCIONADA.

- Se recibieron el día 22/08/2016 seis (06) muestras de planchas de acero calidad ASTM A36 de espesores 22,0 y 25,0 mm y 450 mm de largo (Ver Figura 1)
- Dichas muestras serán utilizadas para la confección y ensayo de tracción de acuerdo con la norma ASTM E8.



Figura 1. Muestras recibidas.

- Al ingresar las muestras al laboratorio se identificaron con un número interno (Ver Tabla 1).

**Tabla 1. Resumen de las muestras**

Número de Muestra	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Ancho	Norma del Material	Norma de Ensayo
E-160035-1	25,35	450	38,30	ASTM A36	ASTM E8
E-160035-2	25,50	450	38,20		
E-160035-3	25,20	450	39,15		
E-160035-4	22,30	450	39,45		
E-160035-5	22,35	450	39,60		
E-160035-6	22,40	450	39,50		

## 2. ENSAYO DE TRACCIÓN.

➤ Las condiciones de ensayo fueron:

Temperatura de ensayo : 20°C.  
 N° Pie de Metro : MTE 02161.  
 N° Equipo : EME 04007.  
 N° del extensómetro : EME 06007.  
 Norma de evaluación : ASTM E8  
 Tipo de Probeta : Cilíndrica.  
 Fecha de ensayo : 25/08/2016.

➤ En la Tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos de tracción.



**Tabla 2.** Resultados del ensayo

Probeta	E-160035-1	E-160035-2	E-160035-3	E-160035-4	E-160035-5	E-160035-6
<b>Diámetro (mm)</b>	12,54	12,51	12,51	12,45	12,51	12,51
<b>Sección Inicial (mm<sup>2</sup>)</b>	123,51	122,91	122,91	121,74	122,72	122,91
<b>Carga Máxima (kN)</b>	55,82	55,05	55,45	54,60	55,19	55,38
<b>Carga límite de fluencia (kN)</b>	33,12	32,20	32,96	33,14	34,67	33,49
<b>Resistencia a la Tracción (MPa)</b>	452	448	451	449	450	451
<b>Límite de Fluencia (MPa)</b>	268	262	268	272	283	272
<b>Longitud Inicial (mm)</b>	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
<b>Longitud Final (mm)</b>	68,40	66,63	65,76	65,94	67,97	67,38
<b>Sección Final (mm<sup>2</sup>)</b>	47,05	42,55	45,0	40,15	37,72	38,26
<b>Alargamiento (%)</b>	36,80	33,26	31,52	31,88	35,94	34,76
<b>Estricción (%)</b>	61,90	65,39	63,38	67,02	69,26	68,86
<b>Zona de Rotura</b>	D.T.C	D.T.C	D.T.C	D.T.C	D.T.C	D.T.C

*F.T.C = Fuera tercio central, D.T.C = Dentro tercio central, M.B. = Material base, M.A. = Material aporte*

### Observaciones:

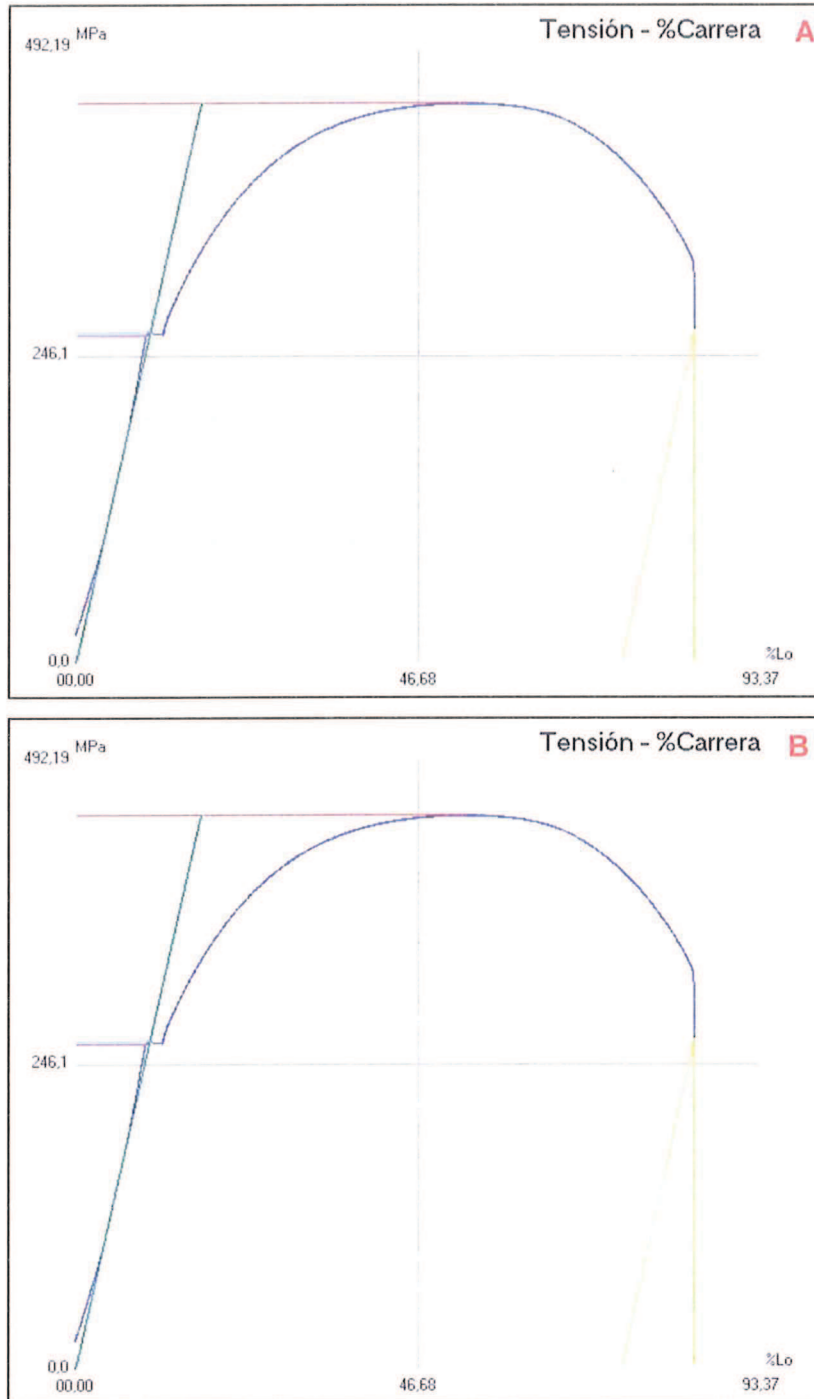
Propiedades mecánicas de acuerdo con ASTM A36 / A 36M

- Resistencia a la Tracción MPa: 400 - 500
- Límite elástico MPa: Min 450
- Elongación %: Min 23

### 3. ANEXOS



Figura 2. Probetas ensayadas



**Grafico 1.** Tensión - %Carrera A) Probeta N°1 B) Probeta N°2

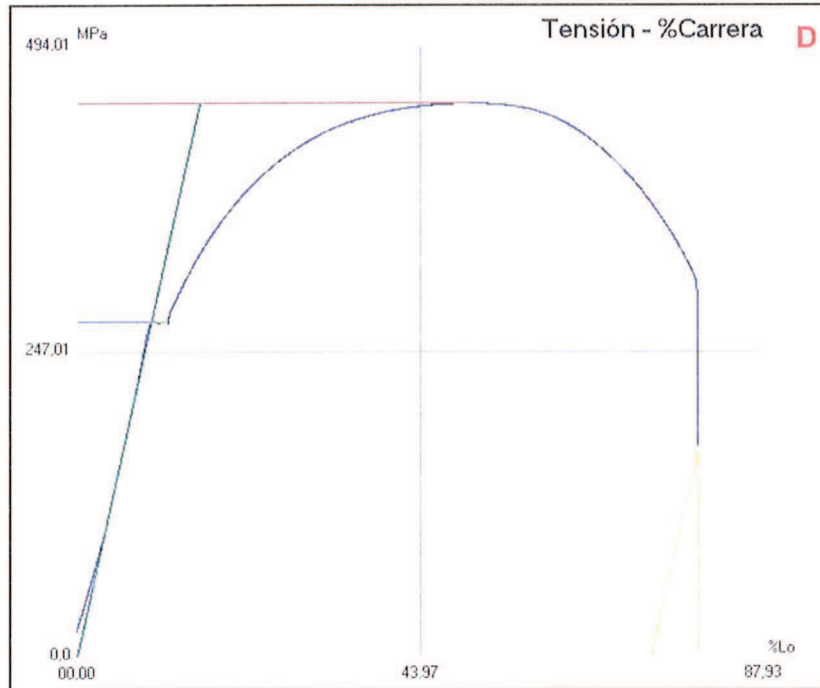
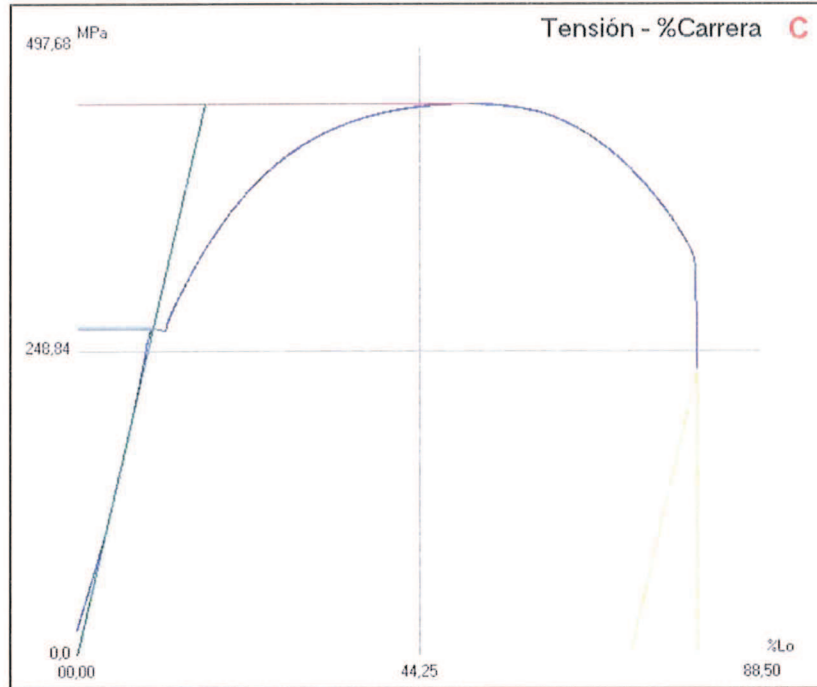
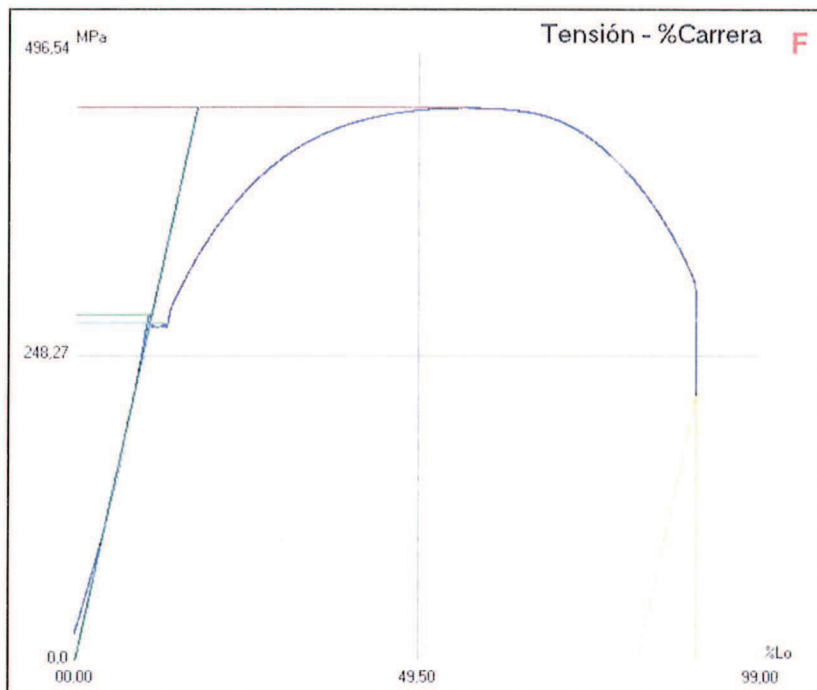
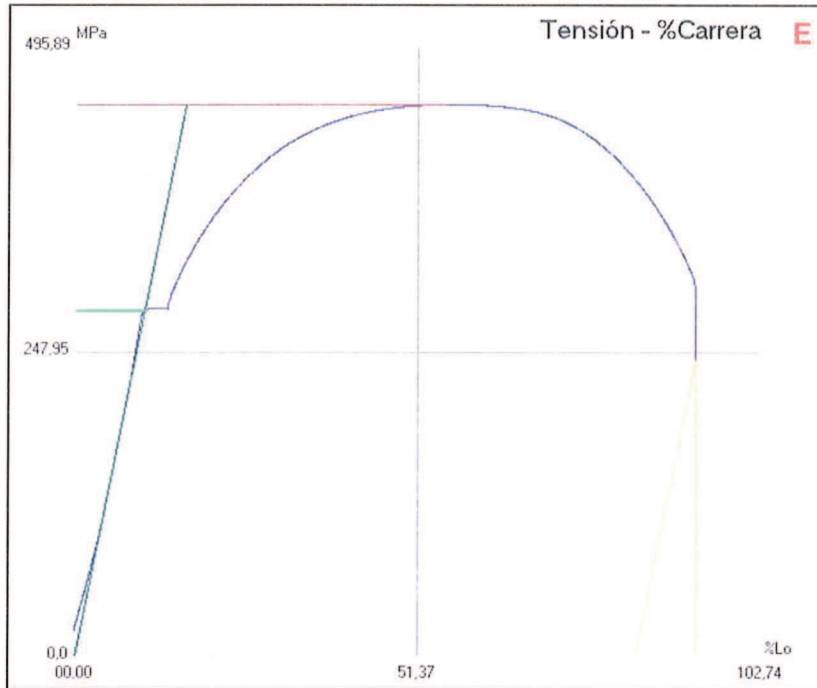


Grafico 2. Tensión - %Carrera C) Probeta N°3 D) Probeta N°4



**Grafico 3.** Tensión - %Carrera E) Probeta N°5 F) Probeta N°6

Este informe consta de 9 hojas numeradas del 1 al 9, correlativamente y selladas.

**Notas:**

- *Los resultados de este informe, solo afectan a las muestras recepcionadas.*
- *Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita de SCI CHILE S.A.*
- *El laboratorio SCI CHILE S.A. no se responsabiliza por las muestras ensayadas a contar de 90 días de la fecha de emisión de informe.*
- *La incertidumbre asociada a los ensayos mecánicos son las siguientes:*

- Tensión de Rotura: $\pm 3,5\%$	- Charpy (T <sup>o</sup> amb): $\pm 4,9\%$	- Durezas HV-10: $\pm 4,4\%$
- Alargamiento: $\pm 5\%$	- Charpy (<-20 <sup>o</sup> ): $\pm 6\%$	- Durezas HB-187,5: $\pm 2,2\%$
- Límite Elástico: $\pm 8,0\%$	- Durezas HRc: $\pm 1,1\%$	- Durezas HRB: $\pm 0,9\%$



Jared Bravo Pérez  
**Responsable de Ensayos Mecánicos**  
**SCI Chile S.A.**



Marta B. Nieves Rojas  
**Encargada de Laboratorio**  
**SCI Chile S.A.**

## **B.2. Pernos de acero ASTM A490**

Los resultados obtenidos a partir de ensayos a tracción de tres pernos de acero ASTM A490 se presentan en el siguiente informe generado por la empresa encargada de realizarlos: CESMEC S.A.

# INFORME DE ENSAYO

SGA – 32398



Solicitante : Ricardo Antonio Herrera Mardones.  
Atención Sr. : Ricardo Herrera.  
Dirección : Pontevedra 7087, La Reina – Santiago.

Orden de Trabajo : 438160  
Fecha de Emisión : 12.02.2016

## DIVISIÓN INGENIERÍA MECÁNICA

### 1.- IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Se recibieron en nuestro laboratorio tres (03) muestra de acero, identificadas por el cliente como:

Identificación cliente	Identificación interna
Perno ASTM A490 1 3/8" x 3 1/4"	I- 19332
Perno ASTM A490 1 3/8" x 5"	I- 19333
Perno ASTM A490 1 3/8" x 6"	I- 19334

### 2.- ENSAYO REALIZADO

Ensayo de tracción, según ASTM E8M – 04

### 3.- PARÁMETROS DEL ENSAYO

- Temperatura: 20,7 °C Humedad: 48,3 % HR
- Tipo de probeta: Probeta cilíndrica, "Standard Specimen 2", con sección reducida de cuatro veces el diámetro.
- Velocidad durante el ensayo: 0,5 mm/min.
- Alargamiento calculado después de la fractura.
- El valor de esfuerzo de fluencia se determino a través del método "Offset method 0,2%", descrito en norma ASTM E08 - 04.

### 4.- RESULTADOS

Muestra	Diámetro	Resistencia a la tracción	Esfuerzo De fluencia Offset=0,2%	Alargamiento $L_0=36mm$	Estricción	Modulo de Young
	[ mm ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ % ]	[ % ]	[ MPa ]
I-19332	9,07	1281	1209	16,2	42,0	198347
I-19333	9,04	1226	1142	14,2	47,0	196551
I-19334	8,98	1232	1096	14,5	49,8	192546

#### Notas:

- Fecha recepción de muestra : 26.01.2016
- Fecha término ensayo : 11.02.2016
- Se adjunta anexo fotográfico.
- Los resultados obtenidos son válidos sólo para las muestras ensayadas, las cuales fue proporcionada por el solicitante.

Rafael Urzúa R.  
Ingeniero de Estudios  
División Ingeniería Mecánica

Rev.00

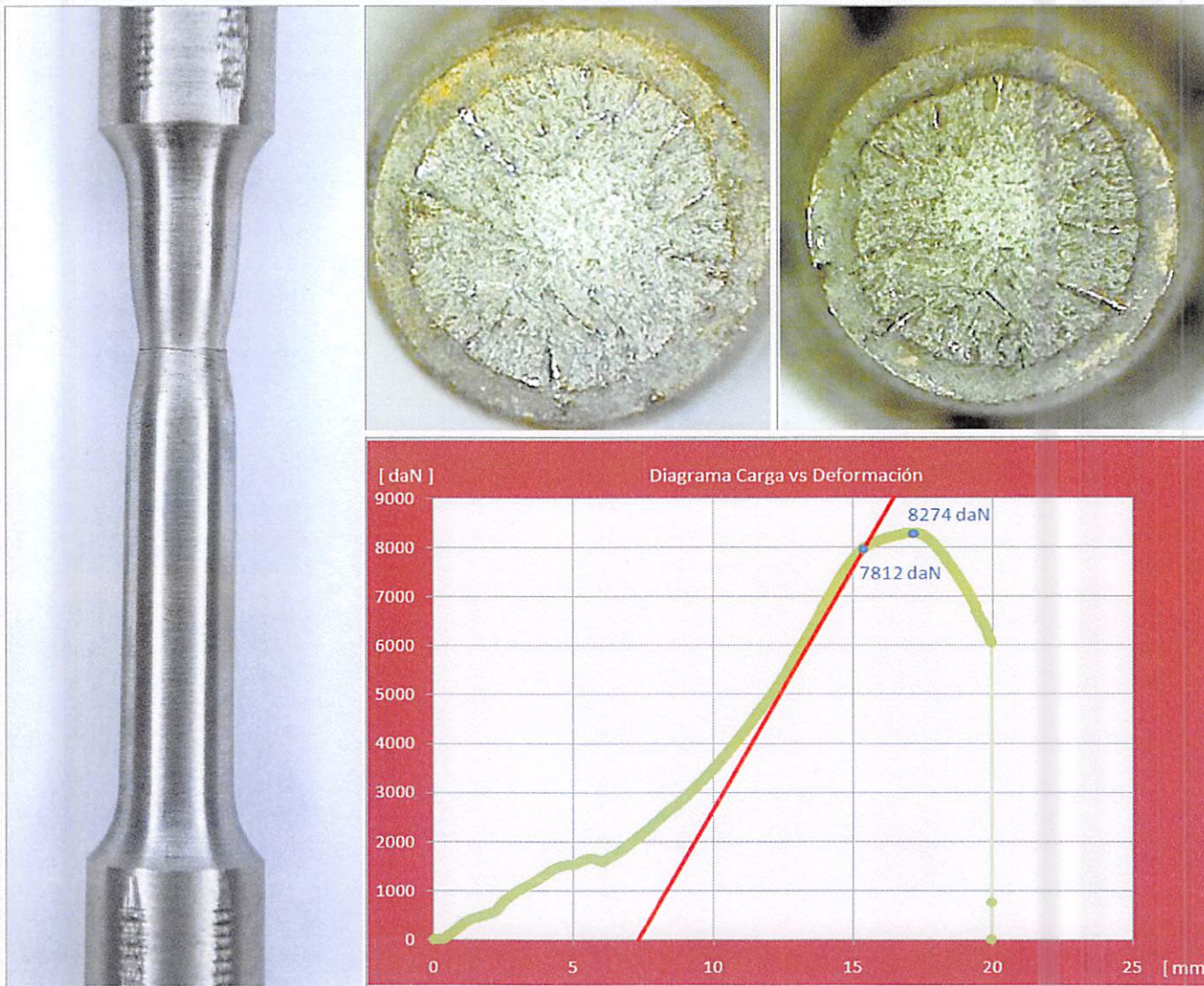
Nota Importante al reverso

Pág. 1 de 4

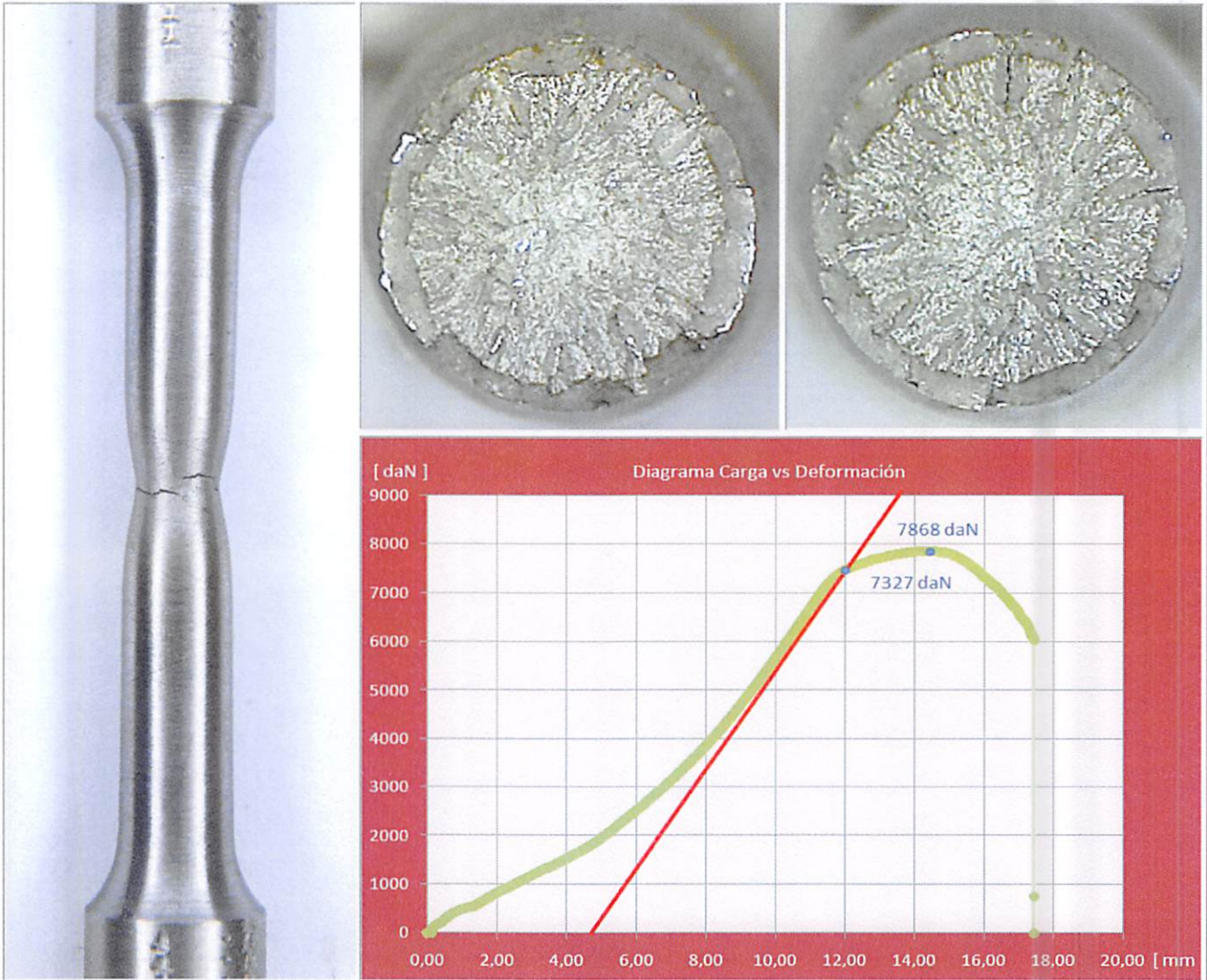


## ANEXO FOTOGRAFICO

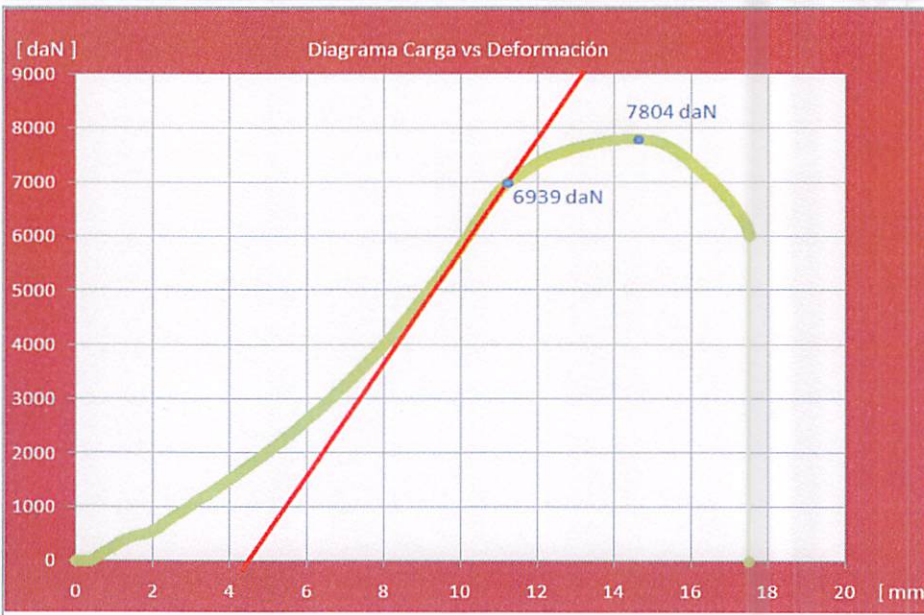
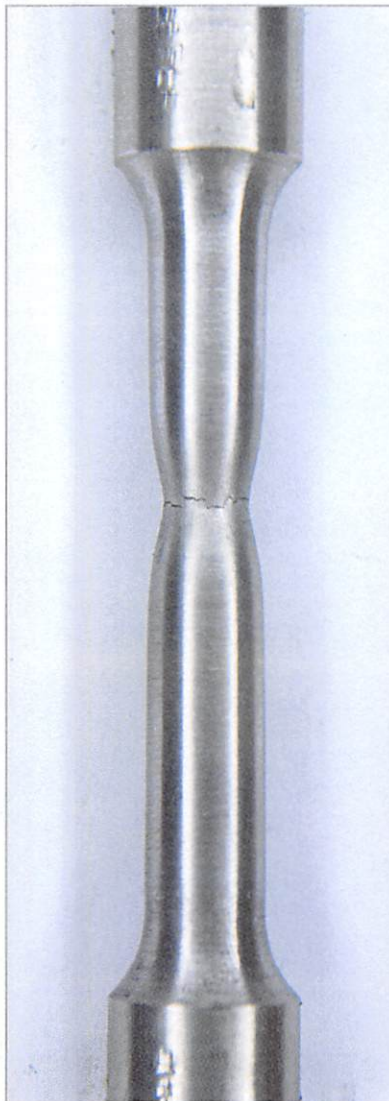
I-19332



I-19333



I-19334





# Apéndice C. Resultados experimentales de conexiones de momento

## C.1. Espécimen SE-01

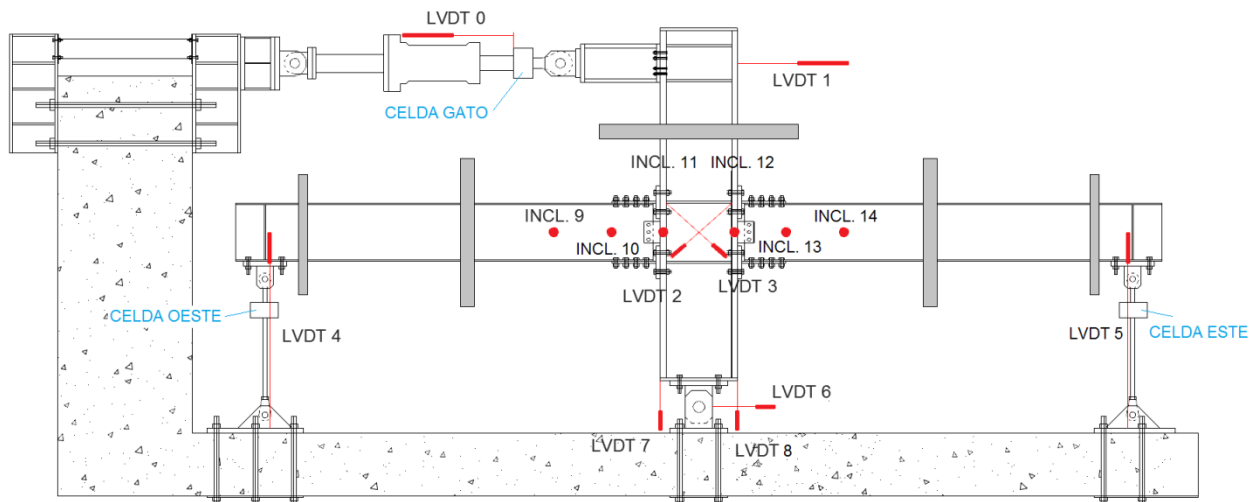


Figura C.1: Instrumentación para el espécimen SE-01; valores positivos cuando el *core* entra a cada LVDT, inclinómetros rotan en sentido anti-horario y celdas de carga se encuentran a tracción.

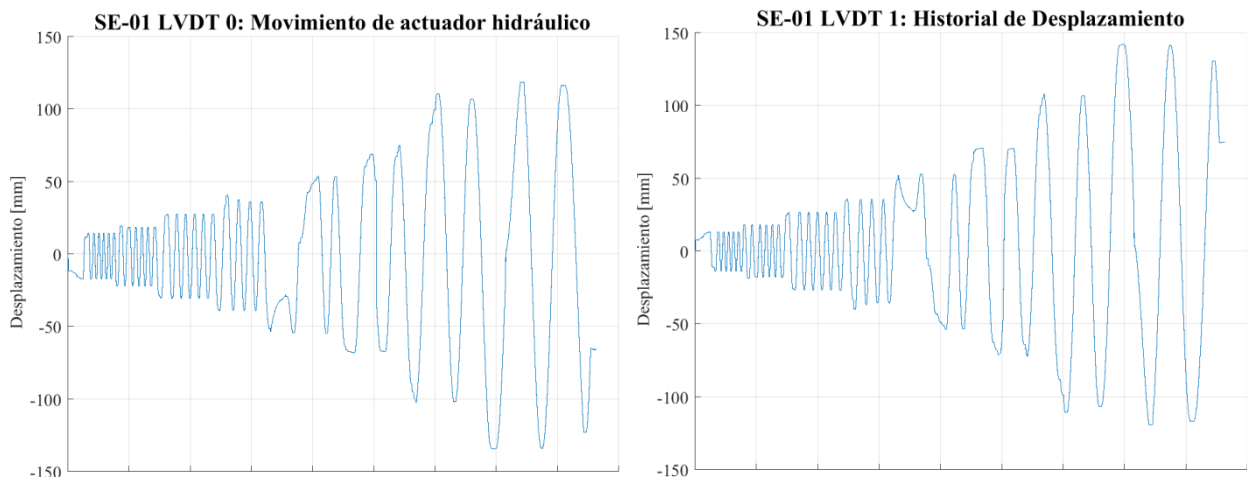
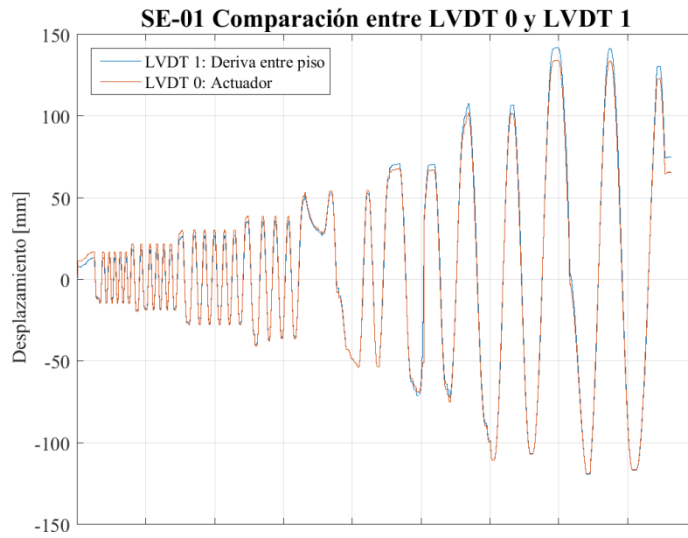
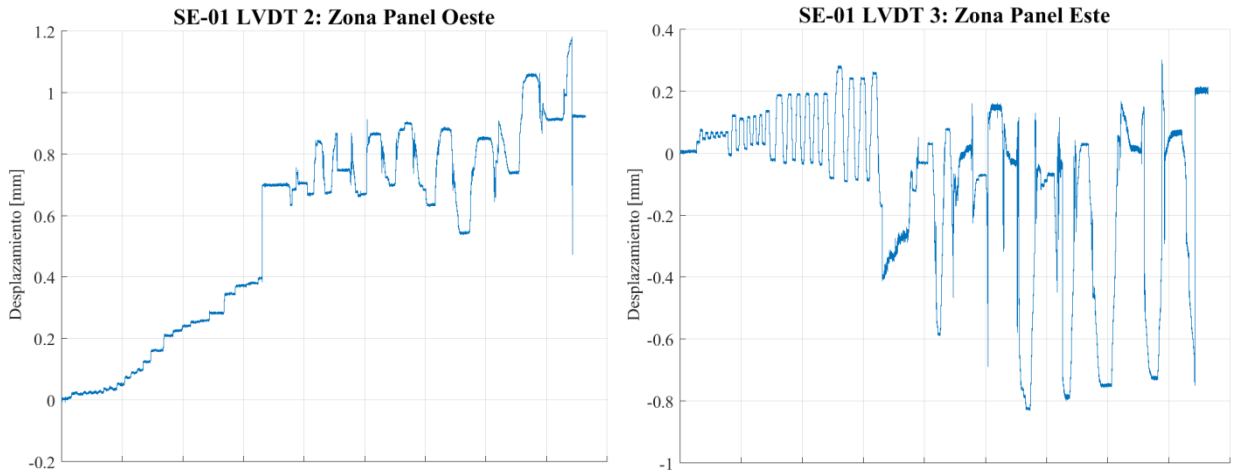


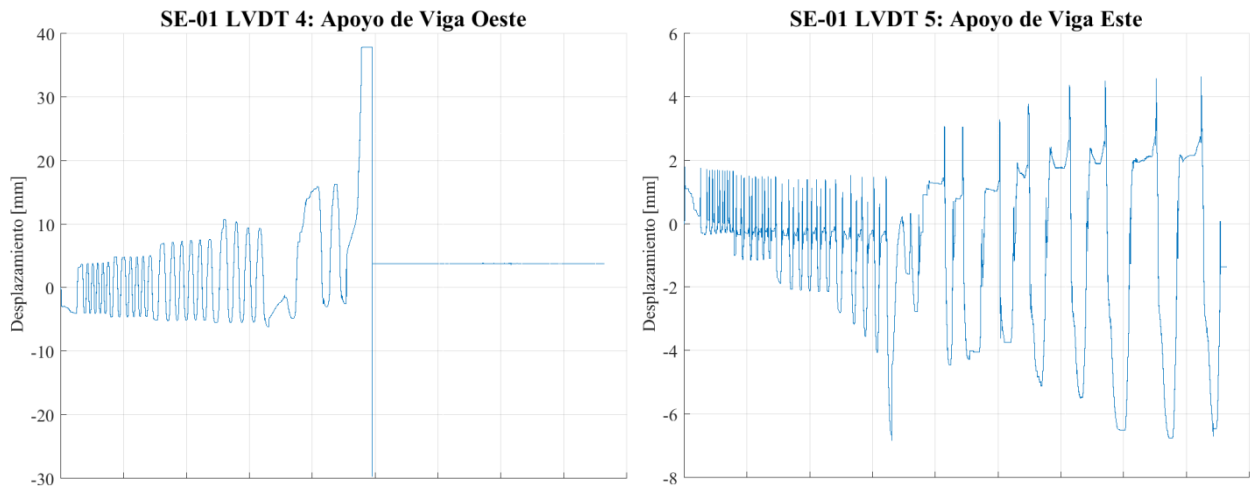
Figura C.2: Historial de desplazamiento del actuador hidráulico y entre piso para espécimen SE-01.



**Figura C.3: Comparación entre los LVDT 0 y LVDT 1 para espécimen SE-01.**



**Figura C.4: Historial de desplazamiento de LVDTs de la zona panel para espécimen SE-01.**



**Figura C.5: Historial de desplazamiento de LVDTs en apoyo de vigas para espécimen SE-01.**

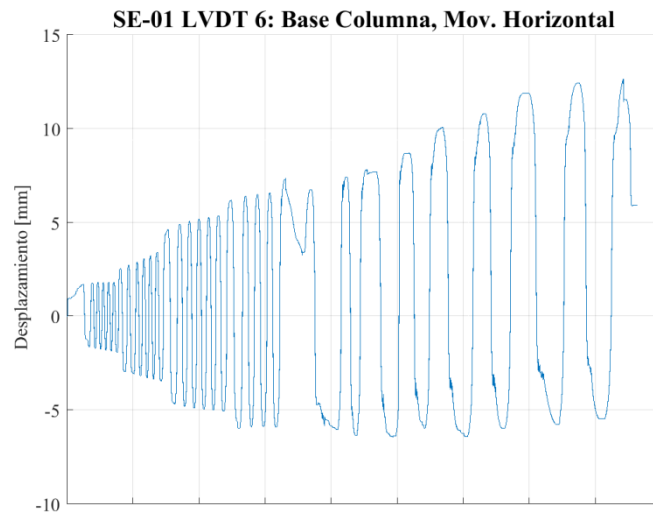


Figura C.6: Historial de desplazamiento del LVDT 6 para espécimen SE-01.

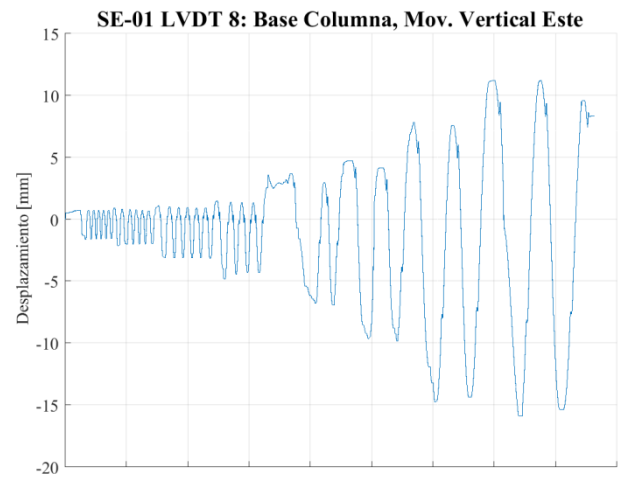
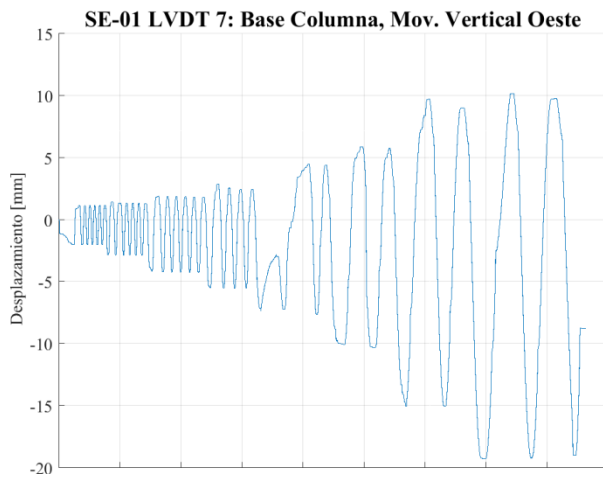


Figura C.7: Historial de desplazamiento de LVDT 7 y 8 para espécimen SE-01.

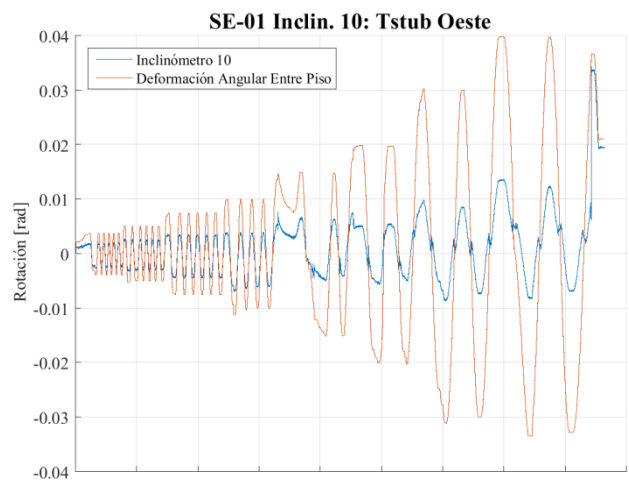
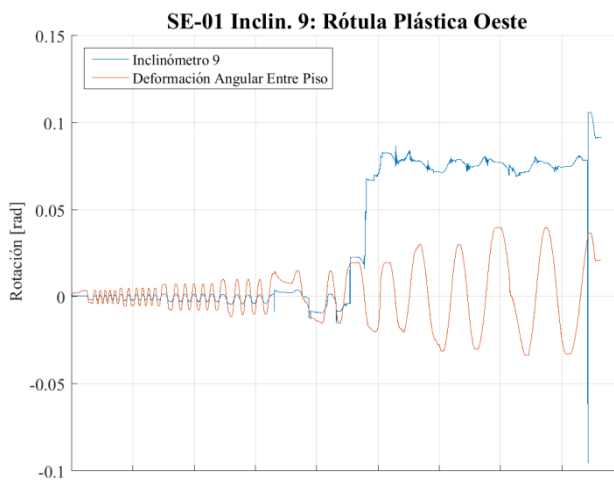
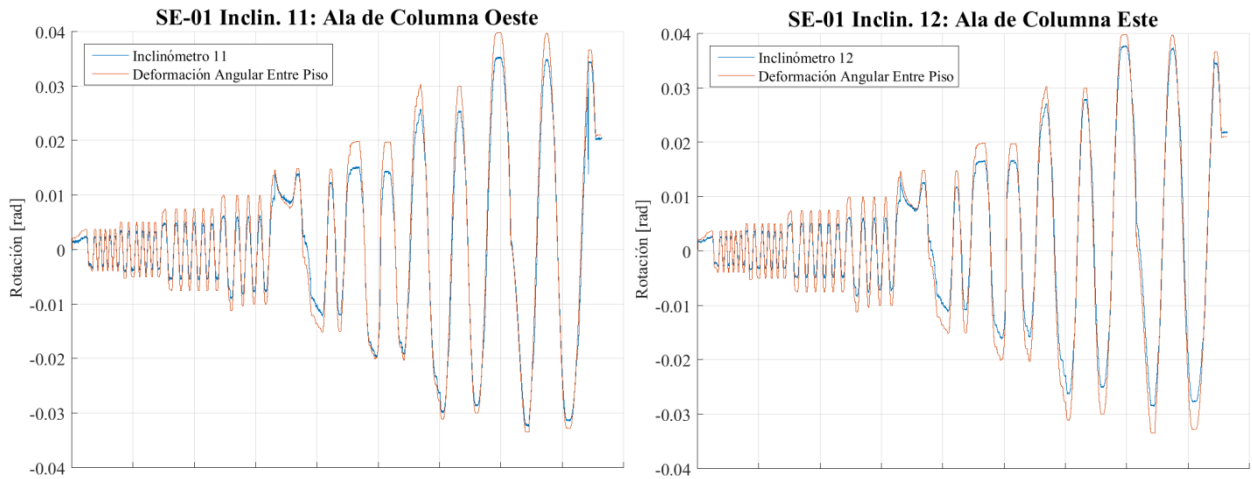
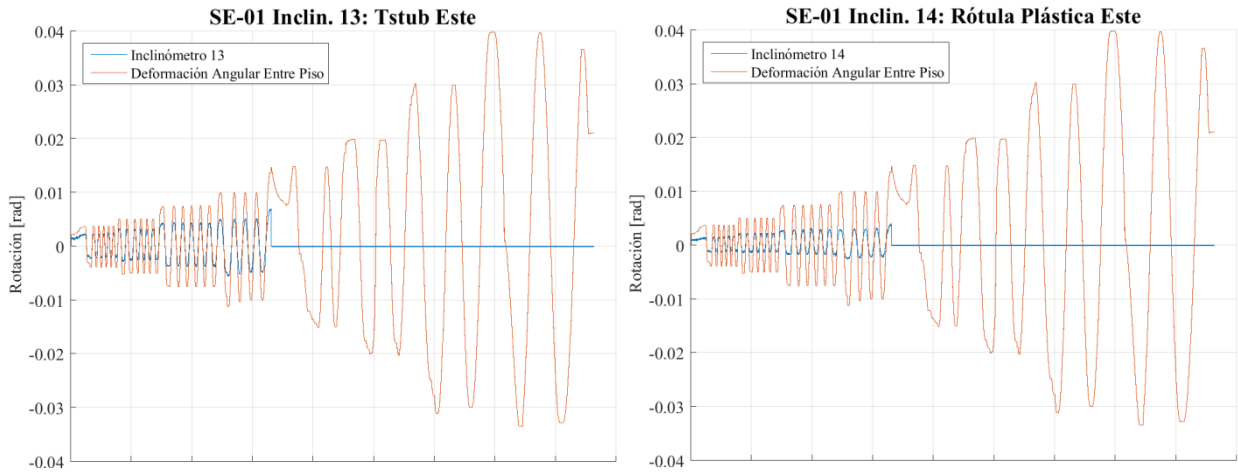


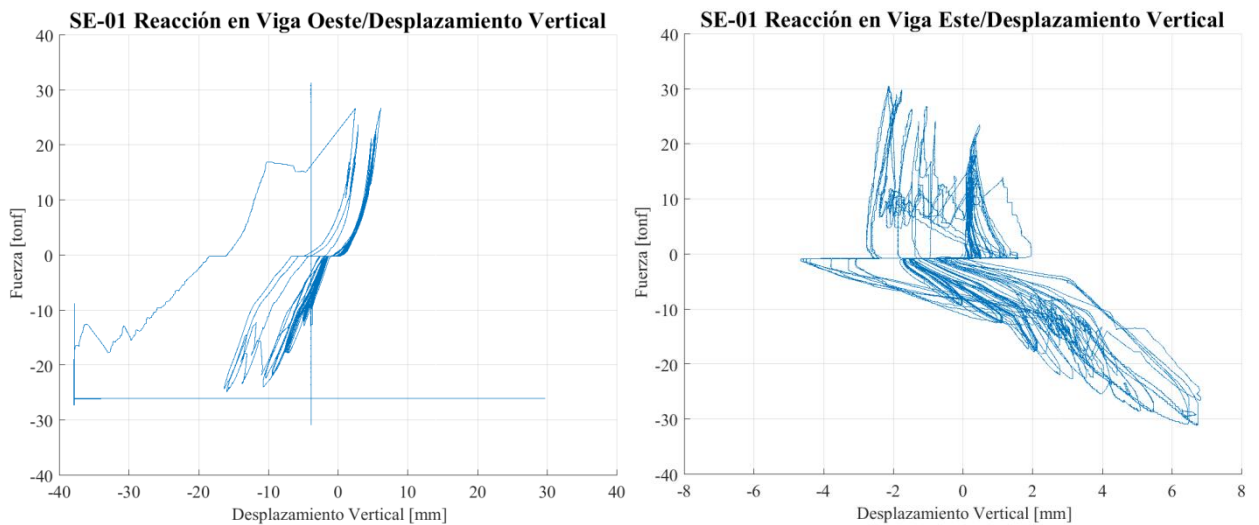
Figura C.8: Historial de rotación de inclinómetros en viga oeste para espécimen SE-01.



**Figura C.9: Historial de rotación de inclinómetros en alas de columna para espécimen SE-01.**

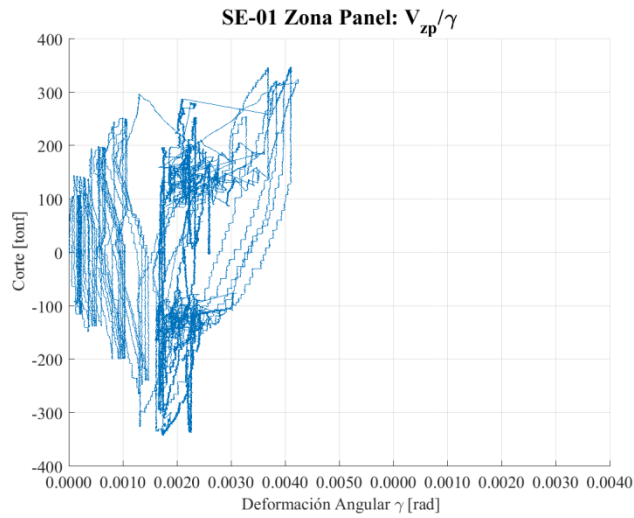


**Figura C.10: Historial de rotación de inclinómetros en viga este para espécimen SE-01.**



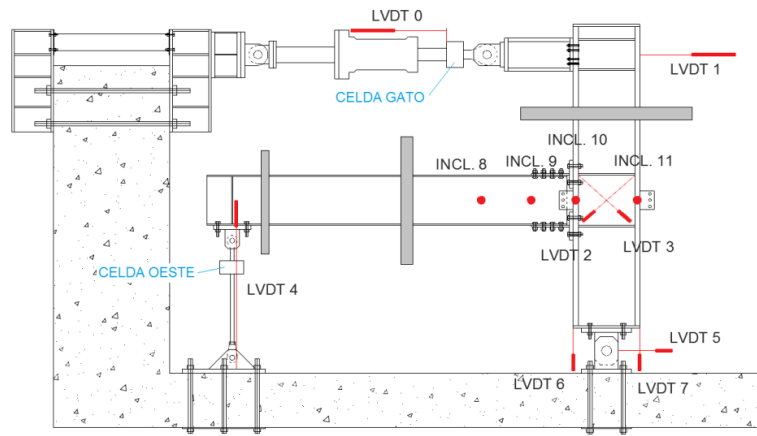
**Figura C.11: Reacción vs. Desplazamiento Vertical en apoyo de vigas para espécimen SE-01.**



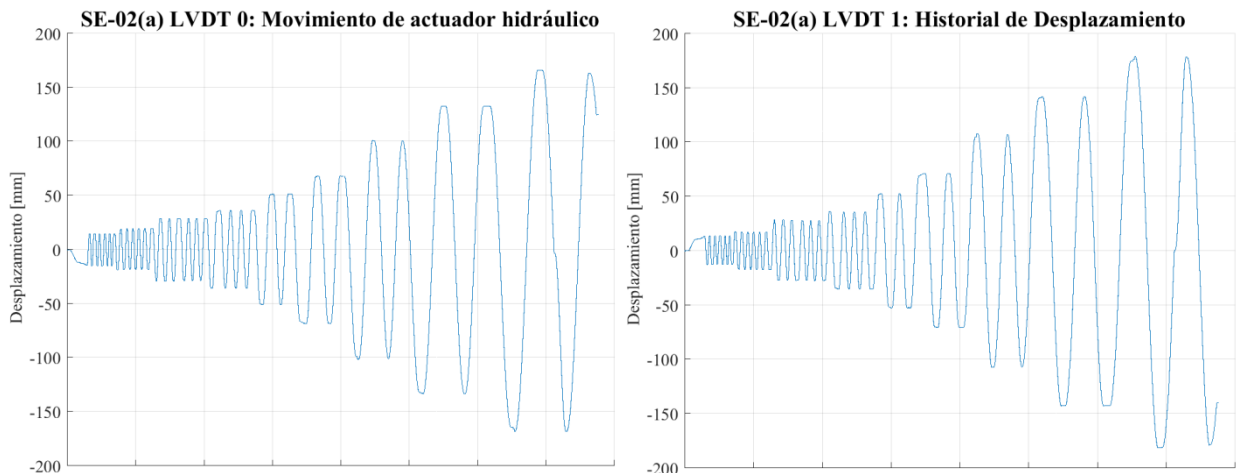


**Figura C.12: Corte vs. Deformación Angular en la zona panel para el espécimen SE-01.**

## C.2. Especimen SE-02(a)



**Figura C.13: Instrumentación para espécimen SE-02(a); valores positivos cuando el core entra a cada LVDT, inclinómetros rotan en sentido anti-horario y celdas de carga se encuentran a tracción.**



**Figura C.14: Historial de desplazamiento del actuador hidráulico y entre piso para espécimen SE-02(a).**

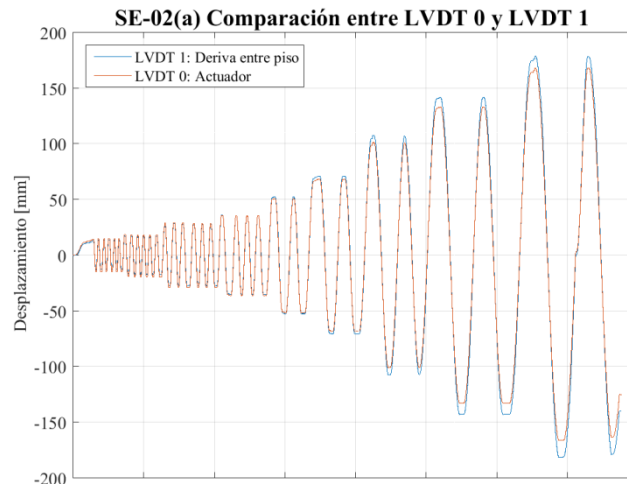


Figura C.15: Comparación entre los LVDT 0 y LVDT 1 para espécimen SE-02(a).

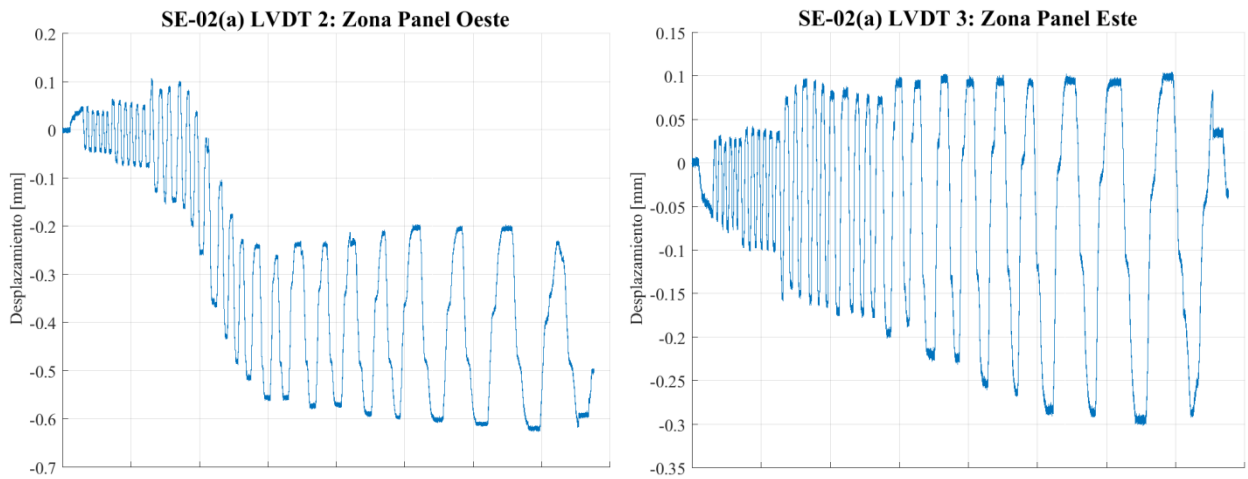


Figura C.16: Historial de desplazamiento de LVDTs de la zona panel para espécimen SE-02(a).

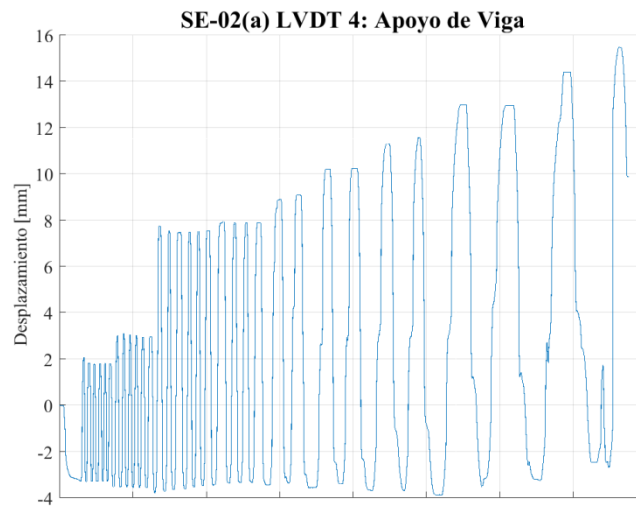
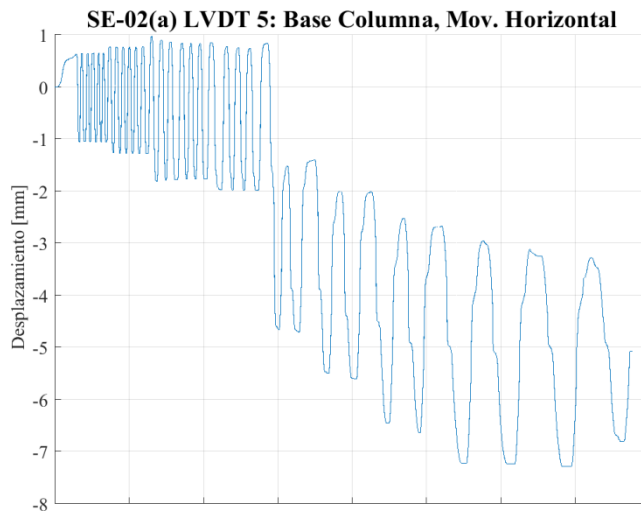
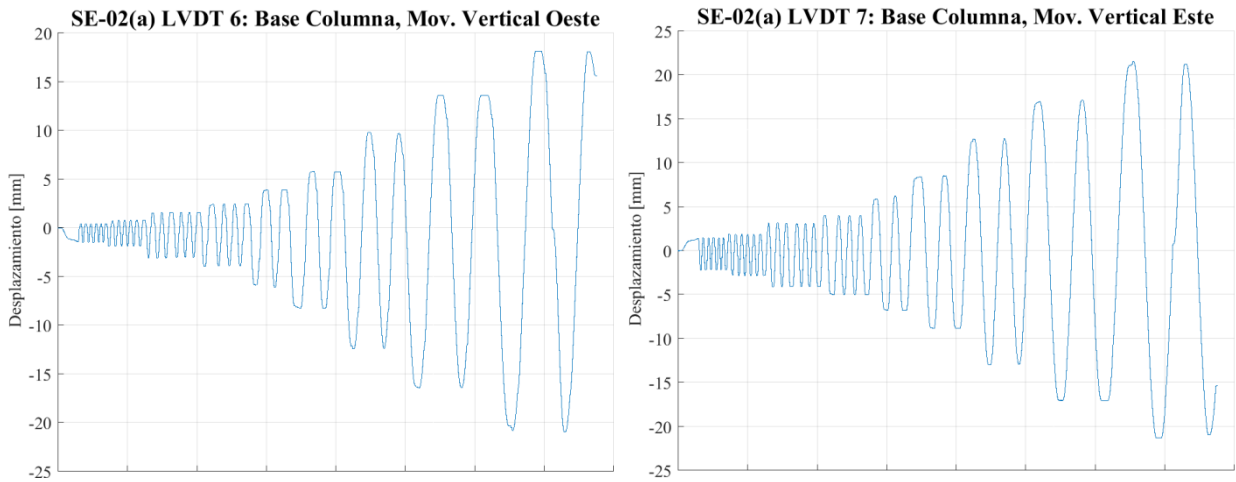


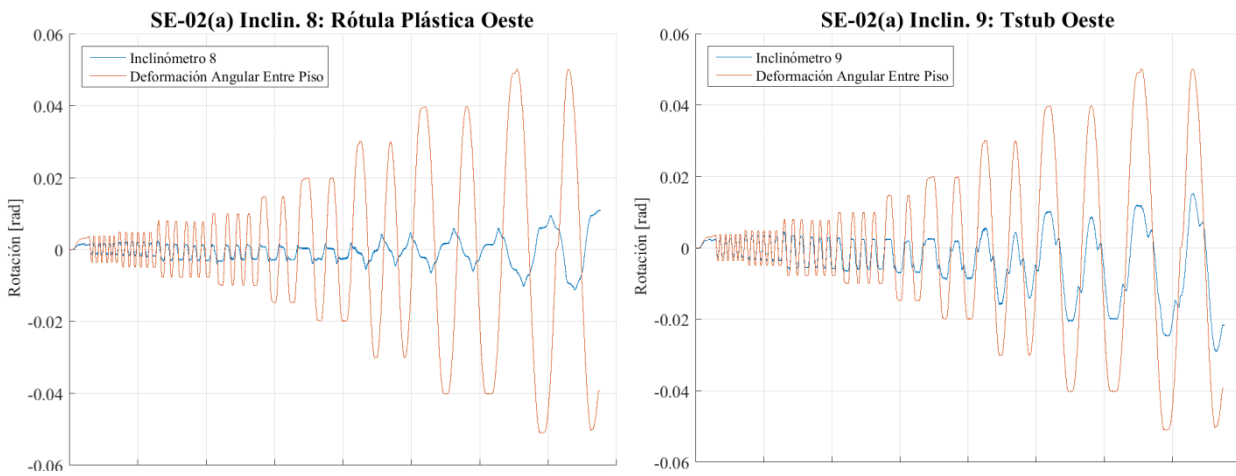
Figura C.17: Historial de desplazamiento de LVDT en apoyo de viga para espécimen SE-02(a).



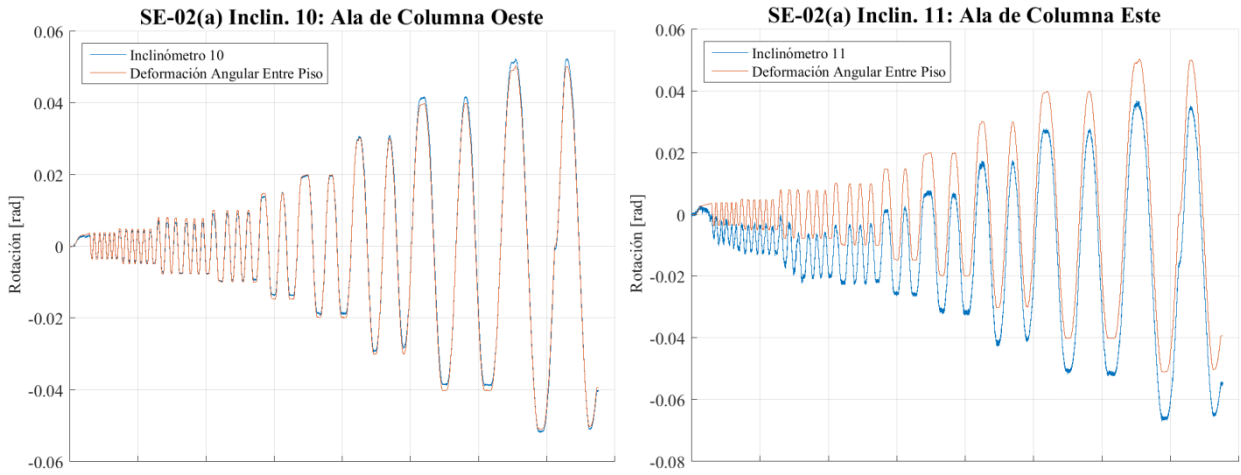
**Figura C.18: Historial de desplazamiento del LVDT 5 para espécimen SE-02(a).**



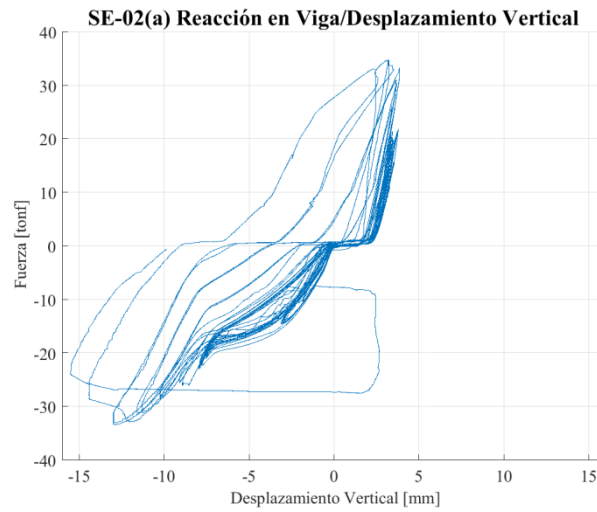
**Figura C.19: Historial de desplazamiento de LVDT 6 y 7 para espécimen SE-02(a).**



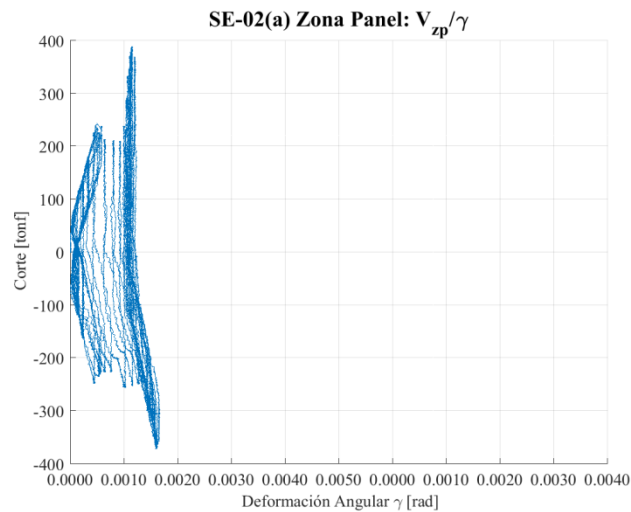
**Figura C.20: Historial de rotación de inclinómetros en la viga para espécimen SE-02(a).**



**Figura C.21: Historial de rotación de inclinómetros en alas de columna para espécimen SE-02(a).**



**Figura C.22: Reacción vs. Desplazamiento Vertical en apoyo de viga para espécimen SE-02(a).**



**Figura C.23: Corte vs. Deformación Angular en la zona panel para el espécimen SE-02(a).**

### C.3. Espécimen SE-02(b)

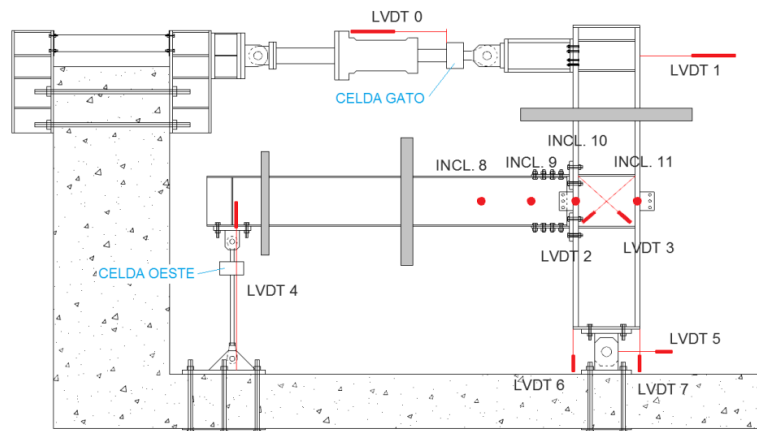


Figura C.24: Instrumentación para espécimen SE-02(b); valores positivos cuando el *core* entra a cada LVDT, inclinómetros rotan en sentido anti-horario y celdas de carga se encuentran a tracción.

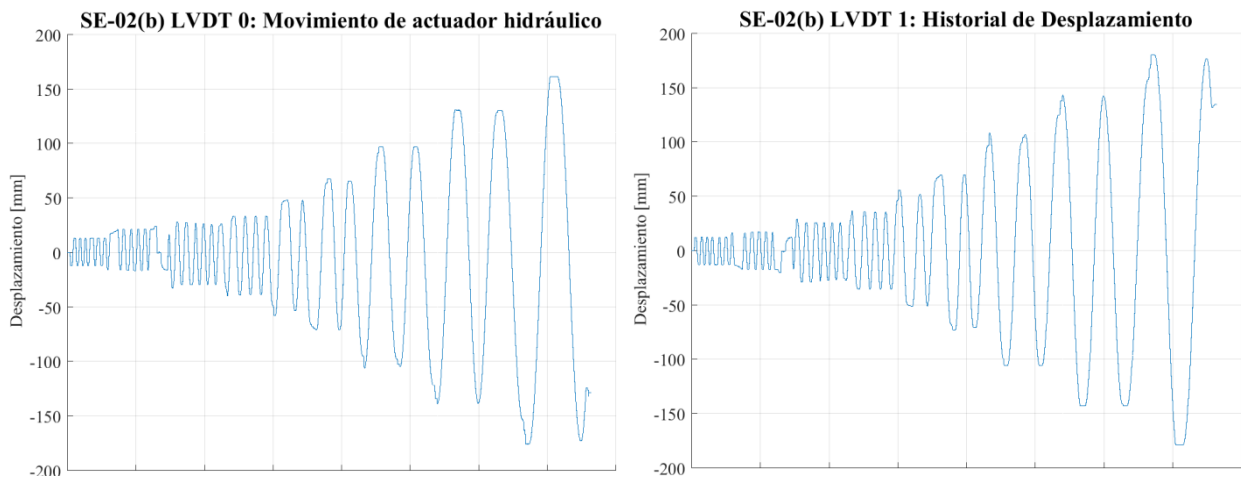


Figura C.25: Historial de desplazamiento del actuador hidráulico y entre piso para espécimen SE-02(b).

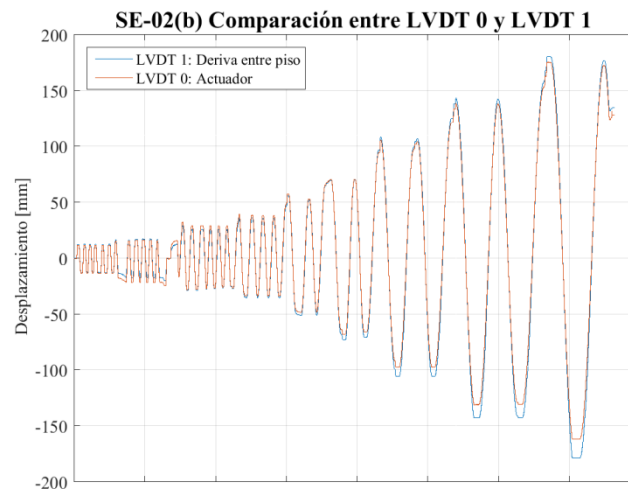
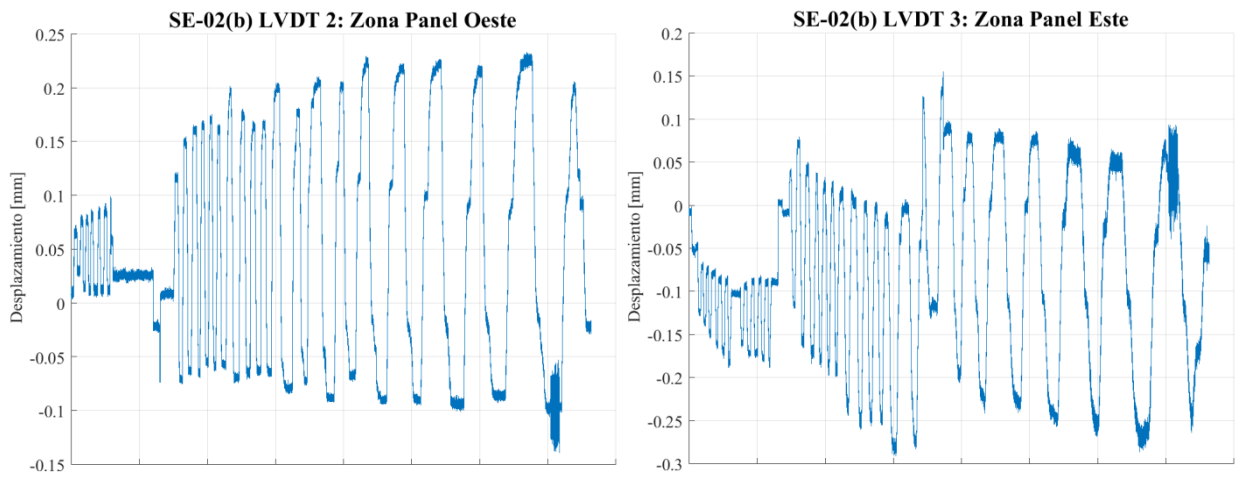
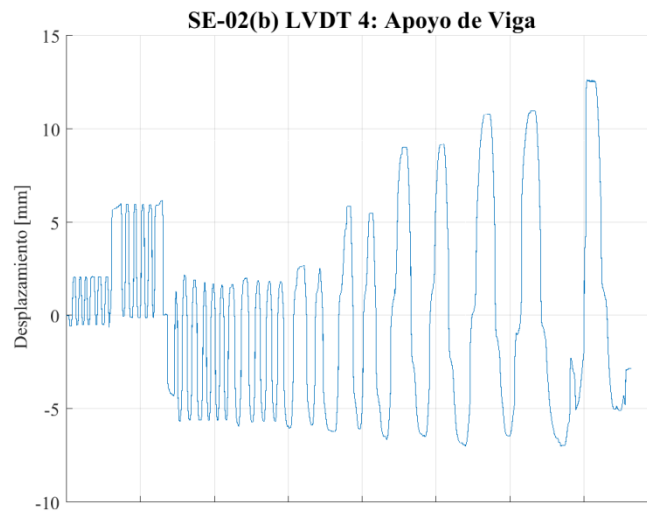


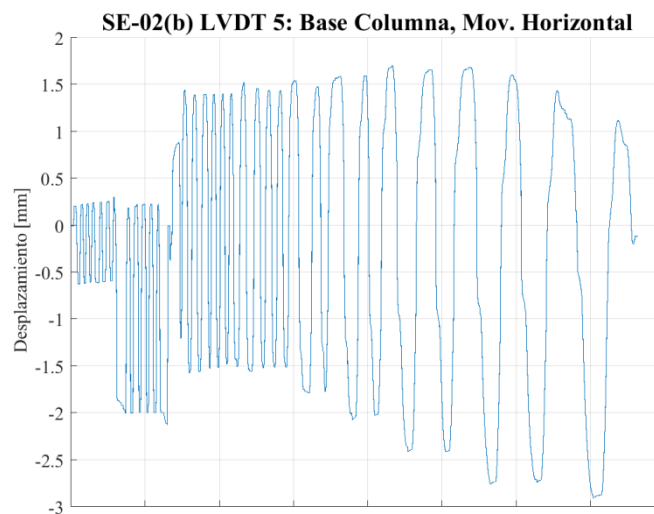
Figura C.26: Comparación entre los LVDT 0 y LVDT 1 para espécimen SE-02(b).



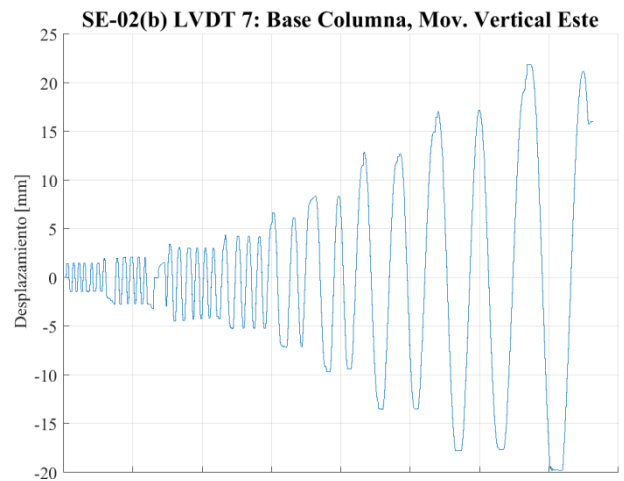
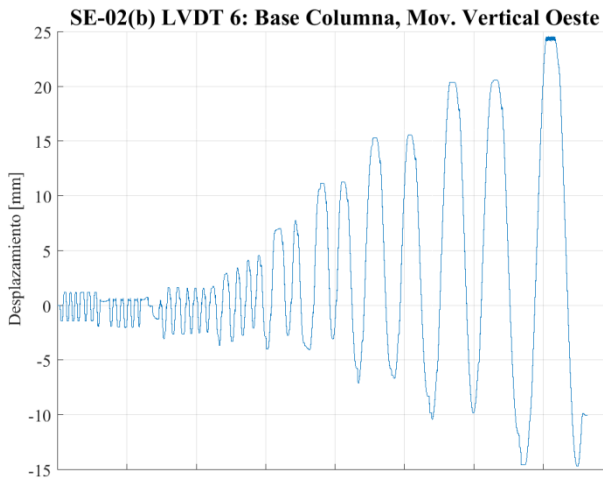
**Figura C.27: Historial de desplazamiento de LVDTs de la zona panel para espécimen SE-02(b).**



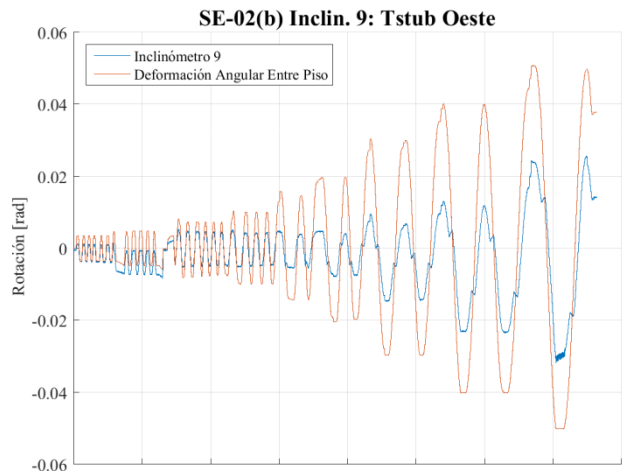
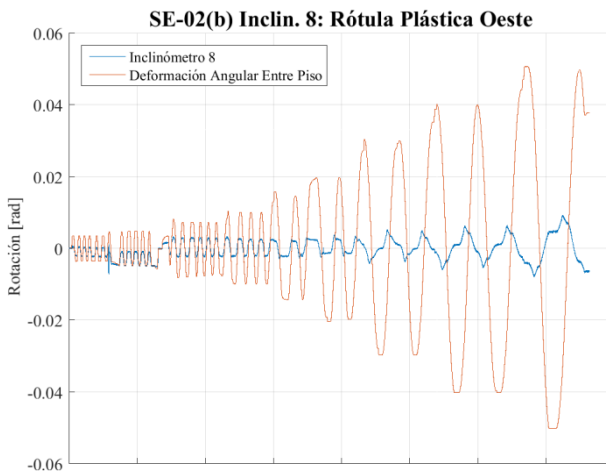
**Figura C.28: Historial de desplazamiento de LVDT en apoyo de viga para espécimen SE-02(b).**



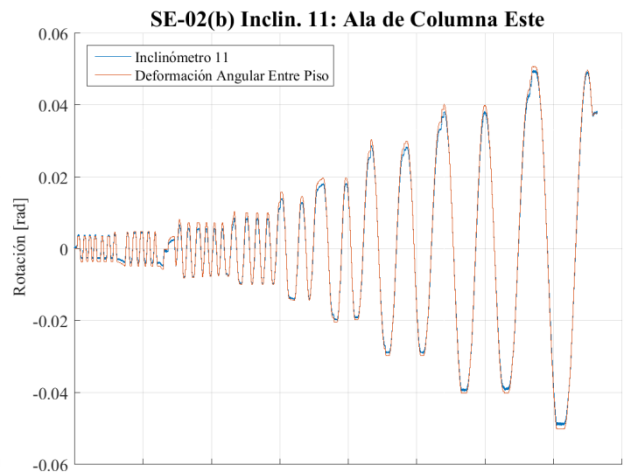
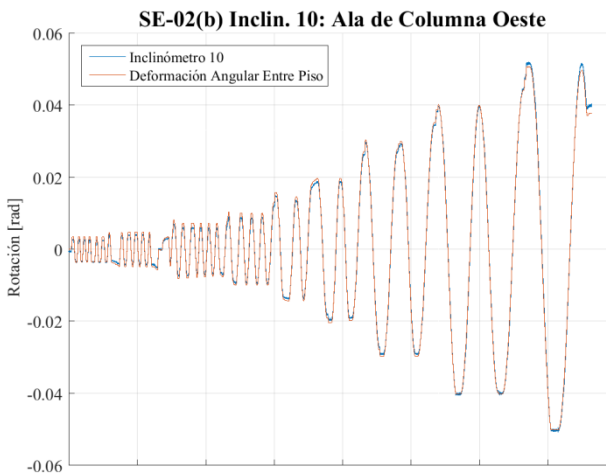
**Figura C.29: Historial de desplazamiento del LVDT 5 para espécimen SE-02(b).**



**Figura C.30: Historial de desplazamiento de LVDT 6 y 7 para espécimen SE-02(b).**



**Figura C.31: Historial de rotación de inclinómetros en la viga para espécimen SE-02(b).**



**Figura C.32: Historial de rotación de inclinómetros en alas de columna para espécimen SE-02(b).**

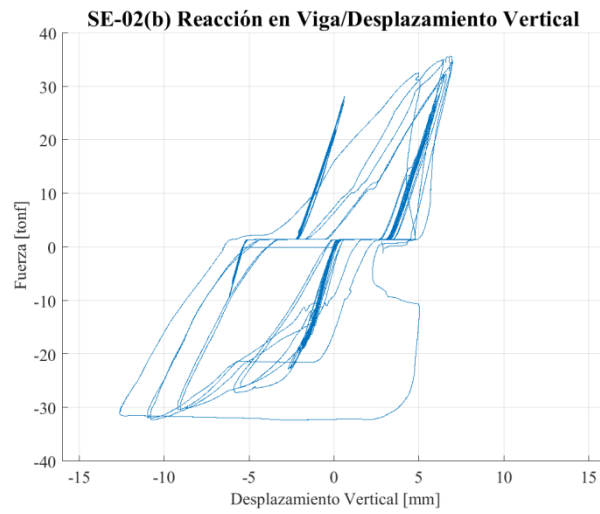


Figura C.33: Reacción vs. Desplazamiento Vertical en apoyo de viga para espécimen SE-02(b).

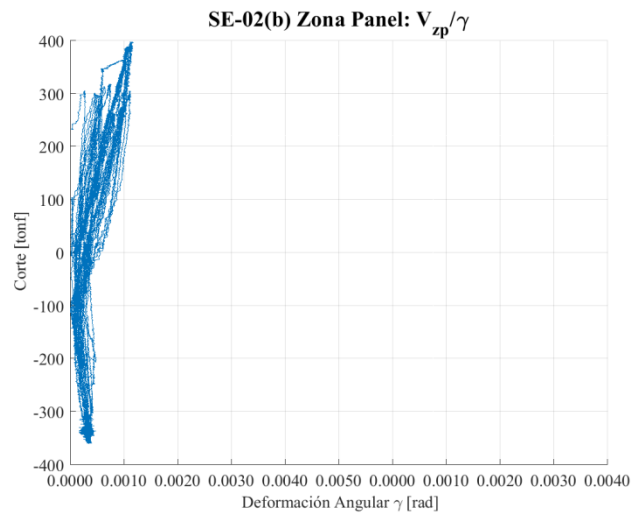


Figura C.34: Corte vs. Deformación Angular en la zona panel para el espécimen SE-02(b).

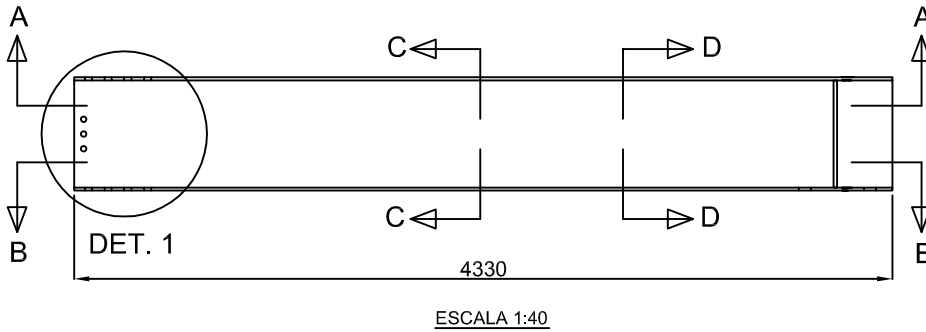


## Apéndice D. Planos de fabricación

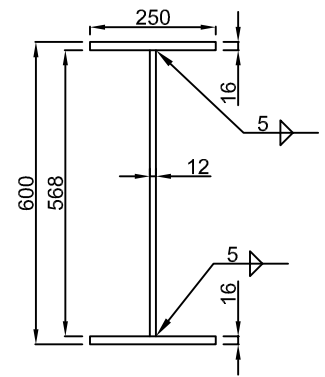
En las siguientes páginas se anexan los planos de fabricación de todas las piezas de acero diseñada para llevar a cabo este estudio experimental. Los planos incluidos son los siguientes:

- Plano de fabricación Vigas.
- Plano de fabricación Perfiles T Soldados.
- Plano de fabricación Columnas 1 de 2.
- Plano de fabricación Columnas 2 de 2.
- Cortes en plancha (para fabricar probetas planas para ensayo).
- Rótula de actuador.
- Planchas 446x200x25 (para suplir altura faltante en apoyos de vigas).
- Plancha 250x250x10 (para suplir longitud faltante en viga sobre MHA).
- Pieza a rectificar.
- Restricción lateral: Viga oeste 1 de 2.
- Restricción lateral: Viga oeste 2 de 2.
- Restricción lateral: Viga este 1 de 2.
- Restricción lateral: Viga este 2 de 2.
- Viga azul 1: 1 de 6.
- Viga azul 2: 2 de 6.
- Columna azul: 3 de 6.
- Perfil canal: 4 de 6.
- Perfiles ángulo: 5 de 6.
- Diagonales: 6 de 6.

# VIGAS 1 y 2

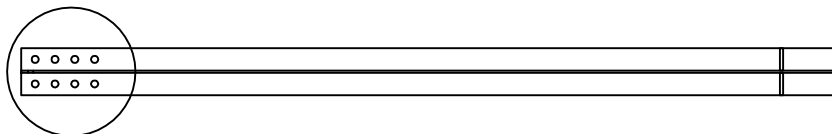


ESCALA 1:40



CORTE C-C

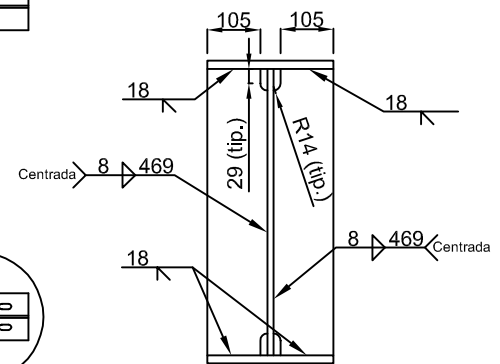
ESCALA 1:15



DET. 2

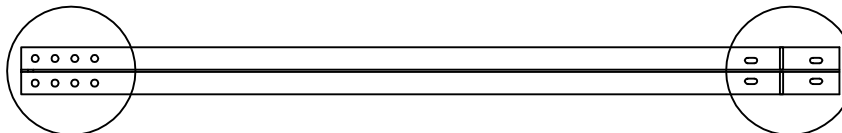
CORTE A-A

ESCALA 1:40



CORTE D-D

ESCALA 1:15

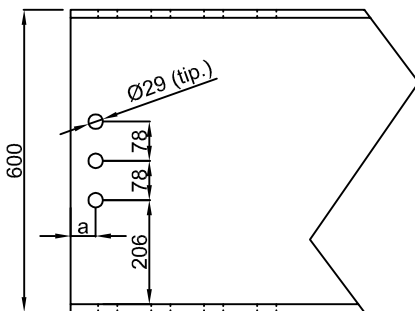


DET. 2

CORTE B-B

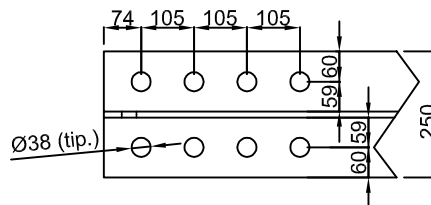
DET. 3

ESCALA 1:40



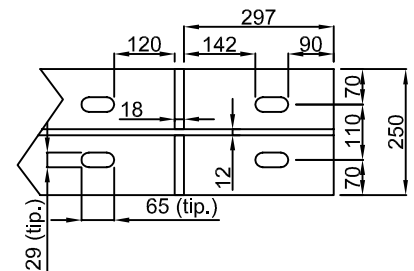
DET. 1

ESCALA 1:15



DET. 2

ESCALA 1:15



DET. 3

ESCALA 1:15

Elemento	Cantidad	a [mm]
VIGA 1	6	50
VIGA 2	2	75

**NOTAS:**

- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero Base ASTM A36
- Electrodo de soldadura AWS E70xx
- Dimensiones de los orificios en [mm]
- dperfor = Ø29 : perno Ø1"
- dperfor = Ø38 : perno Ø1 3/8"

Universidad de Chile  
Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE TÍTULO :  
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONEXIONES DE  
MOMENTO USANDO PERFILES T SOLDADOS

Plano de Fabricación Vigas

Constanza Carolina Salas Quintanilla  
Profesor: Ricardo Herrera Mardones

PROYECTO: C.S.Q  
REVISÓ: C.S.Q  
DIBUJÓ: C.S.Q  
ESCALA: Indicada

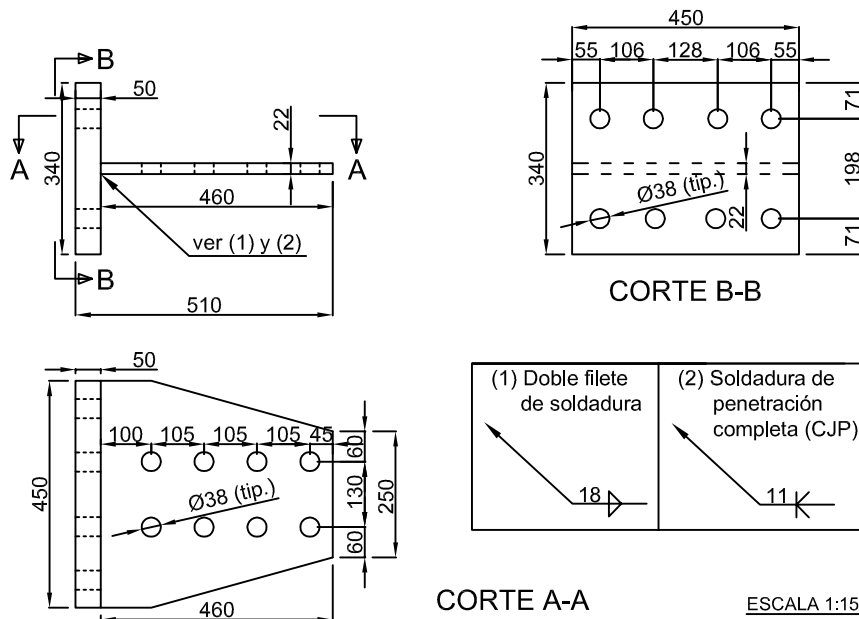
Nº PLANO:  
1 de 1  
B

MEMORISTA DE INGENIERIA CIVIL

FECHA:  
Enero 2018

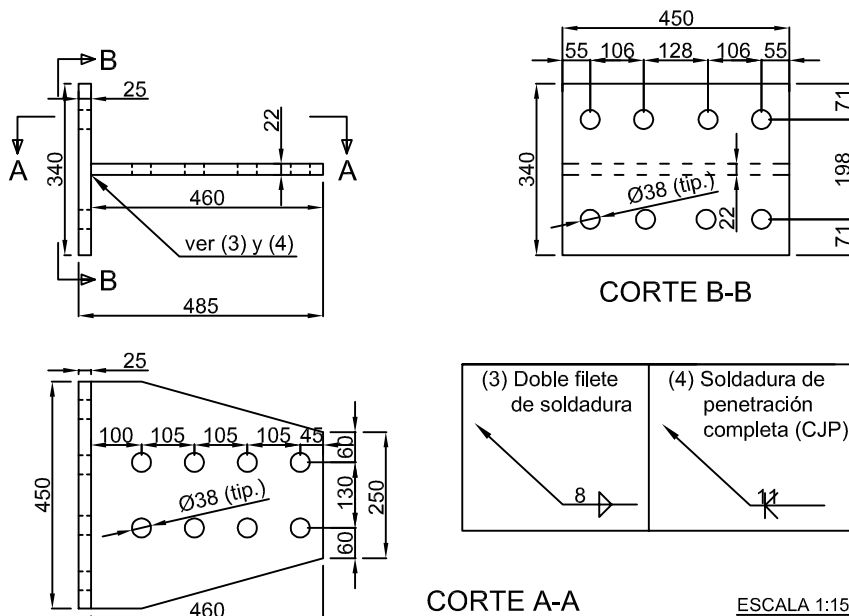
# Perfiles T Soldados

## CONEXIÓN DWT #1



Elemento	Cantidad
DWT #1, soldadura (1)	6
DWT #1, soldadura (2)	6

## CONEXIÓN DWT #2



Elemento	Cantidad
DWT #2, soldadura (3)	2
DWT #2, soldadura (4)	2

**NOTAS:**

- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero Base ASTM A36
- Electrodo de soldadura AWS E70xx
- Dimensiones de los orificios en [mm]
- dperf =  $\varnothing 38$  : perno  $\varnothing 1 \frac{3}{8}$ "

**Universidad de Chile**  
**Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas**  
**Departamento de Ingeniería Civil**

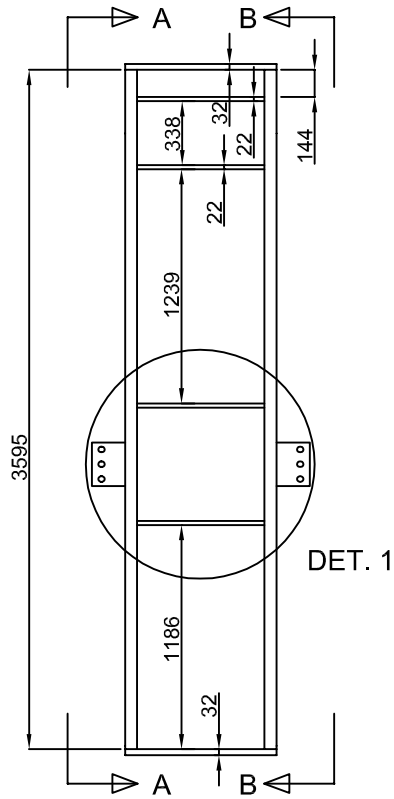
TRABAJO DE TÍTULO :  
**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONEXIONES DE**  
**MOMENTO USANDO PERFILES T SOLDADOS**

**Plano de Fabricación Perfiles T Soldados**

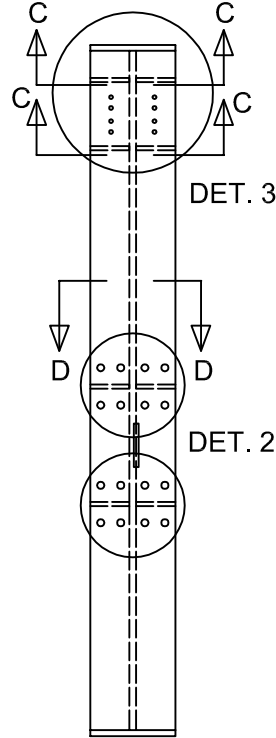
Constanza Carolina Salas Quintanilla  
 Profesor: Ricardo Herrera Mardones

PROYECTO:	C.S.Q	N° PLANO: <b>1 de 1</b> <span style="float: right;">B</span>
REVISO:	C.S.Q	
DIBUJO:	C.S.Q	
ESCALA:	Indicada	
MEMORISTA DE INGENIERIA CIVIL		FECHA: Enero 2018

# COLUMNAS 1&2, 3 y 4

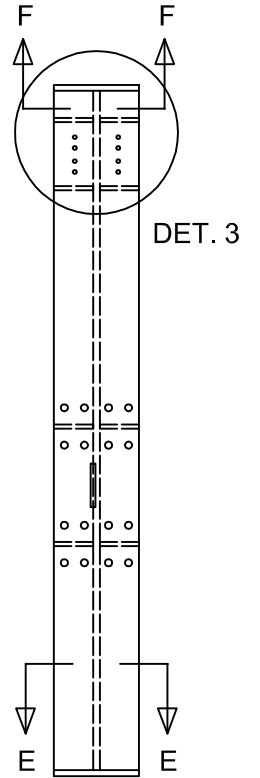


ESCALA 1:40



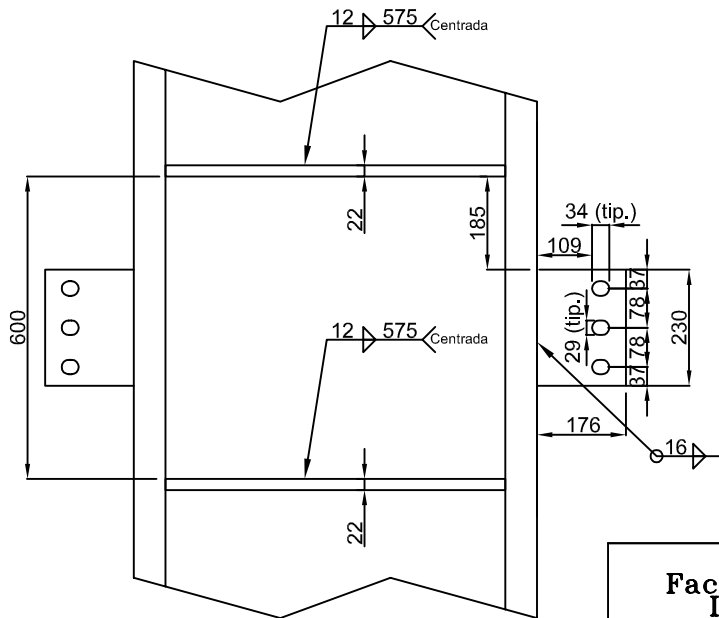
VISTA A-A

ESCALA 1:40



VISTA B-B

ESCALA 1:40



DET. 1

ESCALA 1:15

Elemento	Cantidad	tw [mm]	a [mm]
COLUMNA 1&2	1	35	196
COLUMNA 3	1	18	204
COLUMNA 4	1	25	201

**NOTAS:**

- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero Base ASTM A36
- Electrodo de soldadura AWS E70xx
- Dimensiones de los orificios en [mm]
- dperfor =  $\varnothing 29$  : perno  $\varnothing 1''$

Universidad de Chile  
Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE TÍTULO :

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONEXIONES DE MOMENTO USANDO PERFILES T SOLDADOS**

Plano de Fabricación Columnas

Constanza Carolina Salas Quintanilla  
Profesor: Ricardo Herrera Mardones

PROYECTÓ: C.S.Q

REVISÓ: C.S.Q

DIBUJÓ: C.S.Q

ESCALA: Indicada

Nº PLANO:

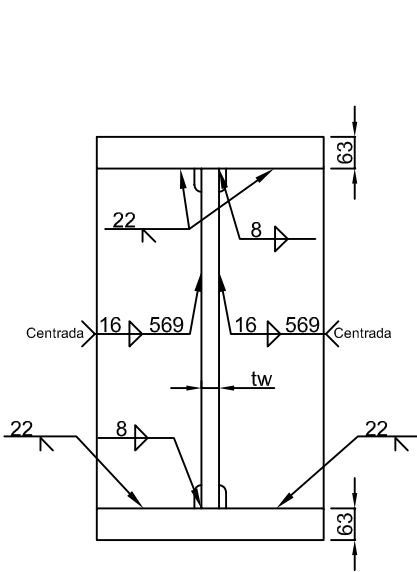
1 de 2

FECHA:

Enero 2018

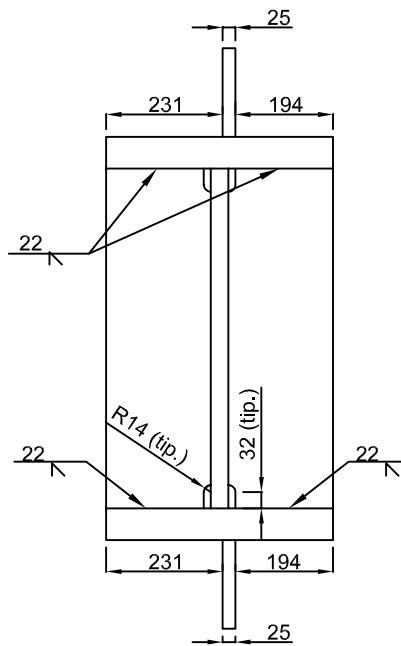
MEMORISTA DE INGENIERIA CIVIL

# COLUMNAS 1&2, 3 y 4



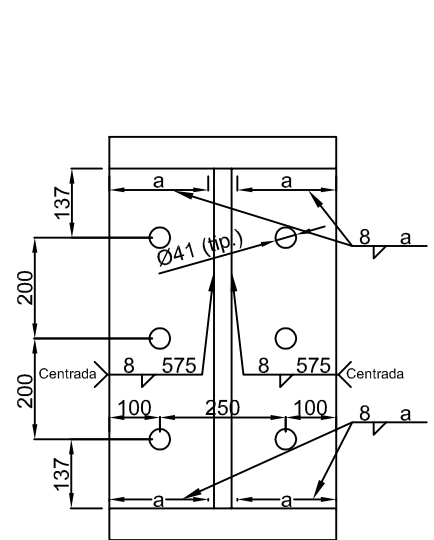
CORTE C-C

ESCALA 1:15



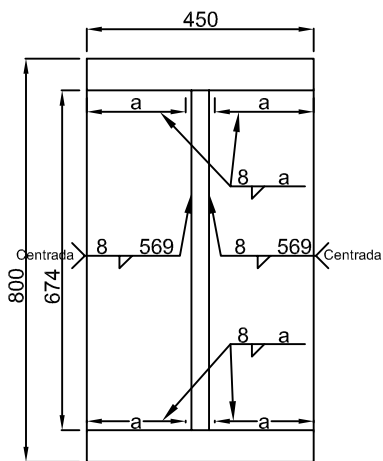
CORTE D-D

ESCALA 1:15



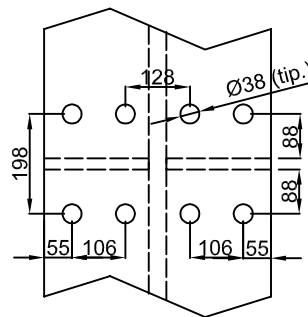
CORTE E-E

ESCALA 1:15



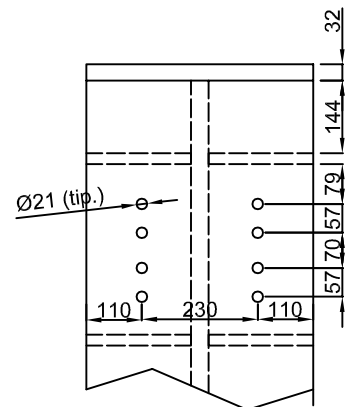
CORTE F-F

ESCALA 1:15



DET. 2

ESCALA 1:15



DET. 3

ESCALA 1:15

Elemento	Cantidad	tw [mm]	a [mm]
COLUMNA 1&2	1	35	196
COLUMNA 3	1	18	204
COLUMNA 4	1	25	201

**NOTAS:**

- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero Base ASTM A36
- Electrodo de soldadura AWS E70xx
- Dimensiones de los orificios en [mm]
- dperf = Ø21 : perno Ø3/4"
- dperf = Ø38 : perno Ø1 3/8"
- dperf = Ø41 : perno Ø1 1/2"

Universidad de Chile  
Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE TÍTULO :  
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONEXIONES DE  
MOMENTO USANDO PERFILES T SOLDADOS

Plano de Fabricación Columnas

Constanza Carolina Salas Quintanilla  
Profesor: Ricardo Herrera Mardones

PROYECTO: C.S.Q  
REVISO: C.S.Q  
DIBUJO: C.S.Q

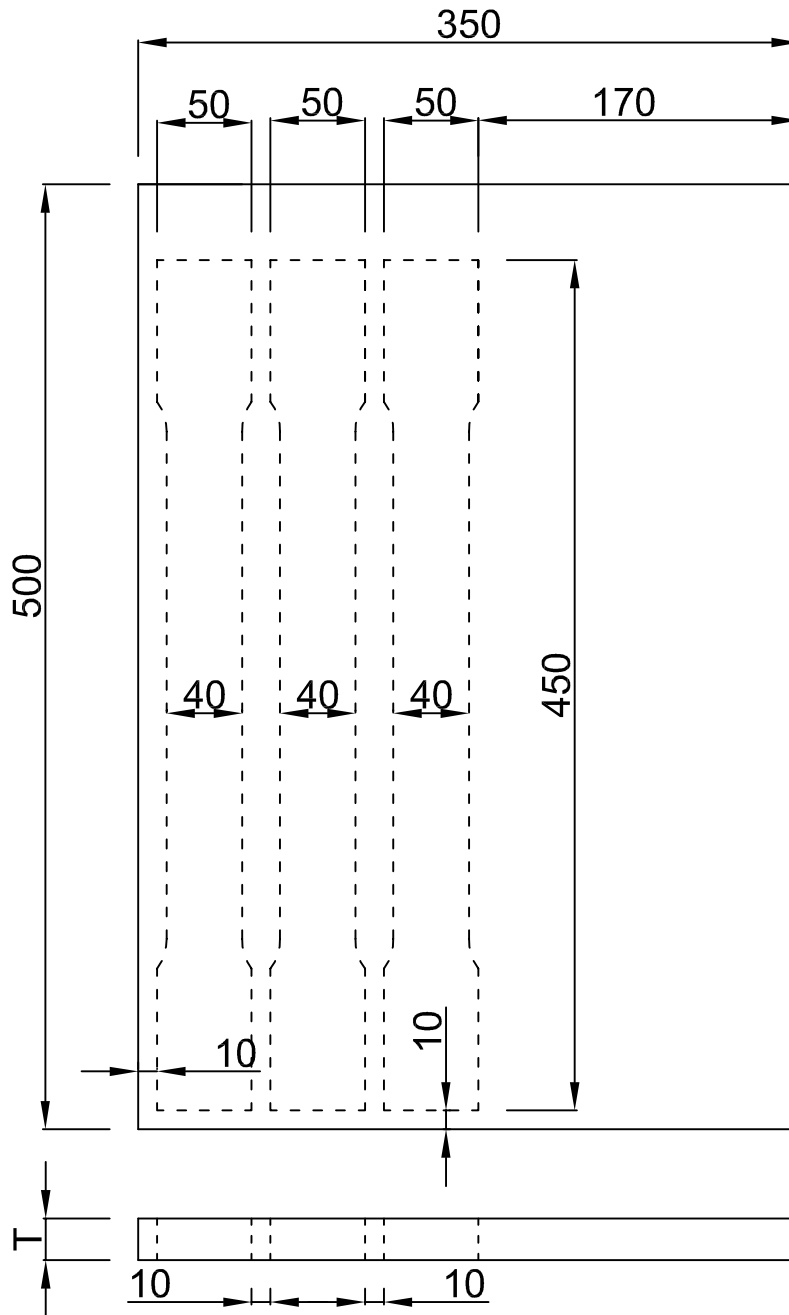
Nº PLANO:  
2 de 2

MEMORISTA DE INGENIERIA CIVIL

ESCALA: Indicada  
FECHA: Enero 2016

# CORTES EN PLANCHA

Escala 1:4



----- CORTES

Plancha original  
PL 500x350xT

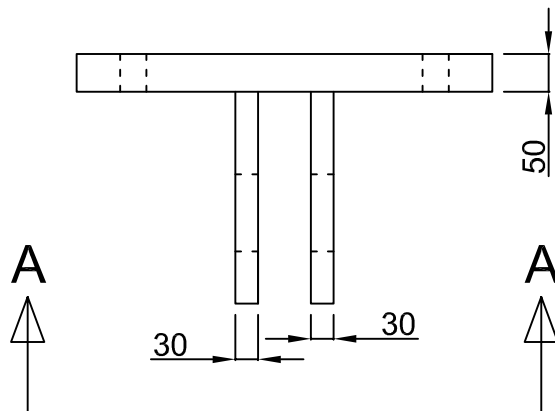
T	N° Planchas
12	1
22	1
25	1

## Notas:

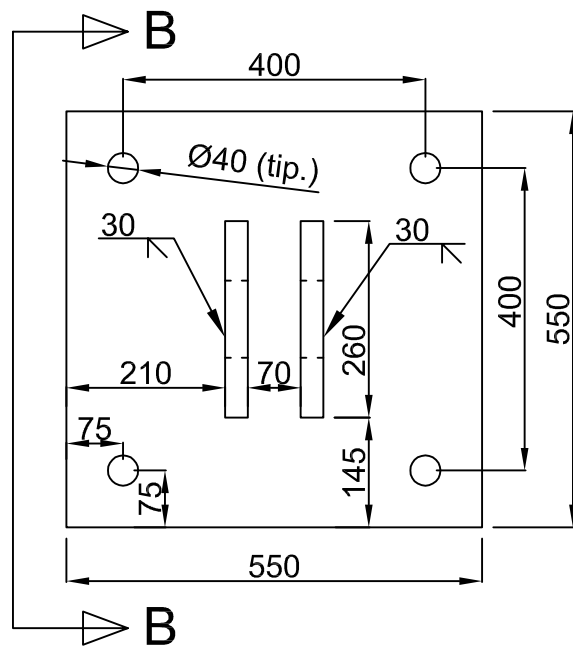
- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero estructural ASTM A36

Constanza Salas Q.  
Dpto. de Ing. Civil  
Universidad de Chile

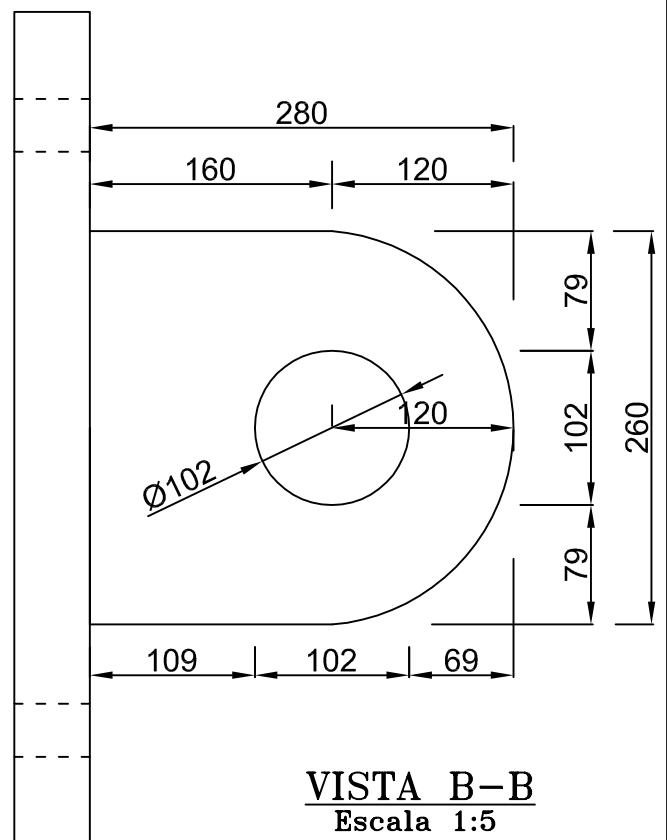
# RÔTULA DE ACTUADOR



Escala 1:10



VISTA A-A  
Escala 1:10



VISTA B-B  
Escala 1:5

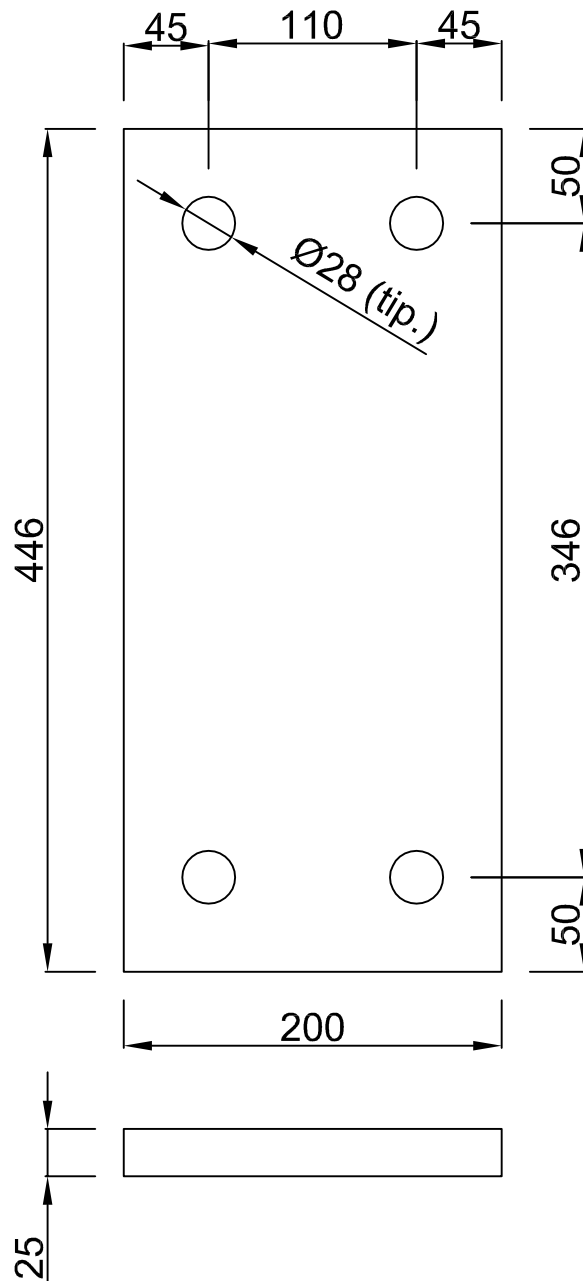
## Notas:

- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero estructural ASTM A36

Constanza Salas Q.  
Dpto. de Ing. Civil  
Universidad de Chile

# PLANCHA 446x200x25

Escala 1:4



N° Planchas
2

## Notas:

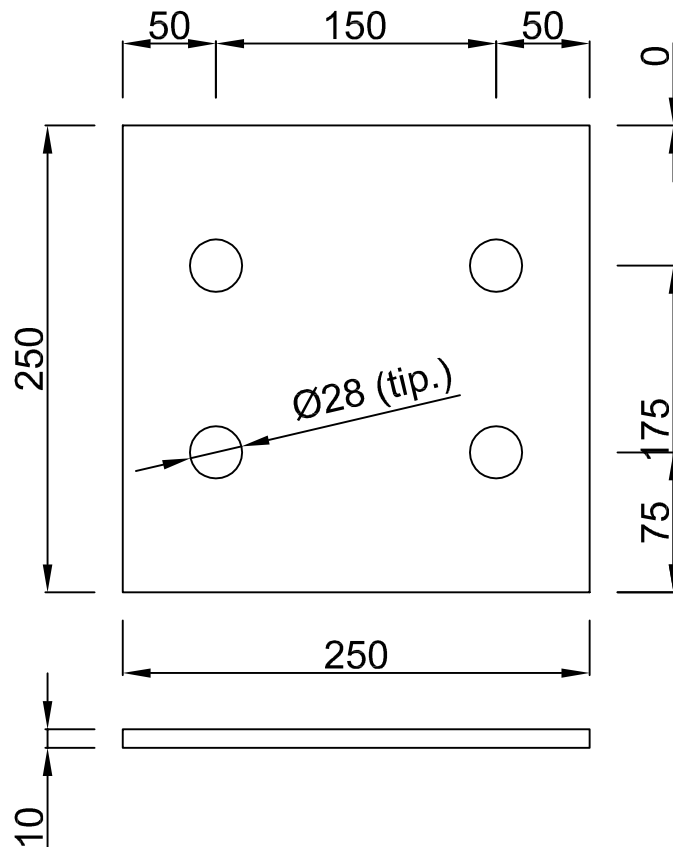
- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero estructural ASTM A36

Constanza Salas Q.  
Dpto. de Ing. Civil  
Universidad de Chile



# PLANCHA 250x250x10

Escala 1:4



N° Planchas
1

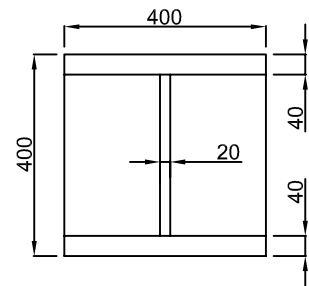
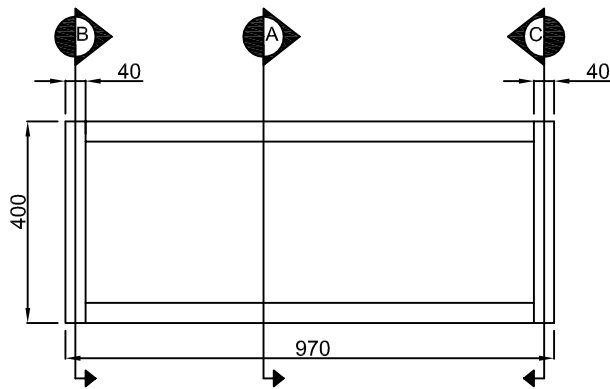
## Notas:

- Todas las dimensiones en [mm]
- Acero estructural ASTM A36

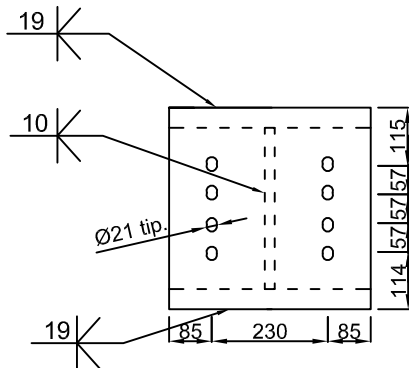
Constanza Salas Q.  
Dpto. de Ing. Civil  
Universidad de Chile

# PIEZA A RECTIFICAR

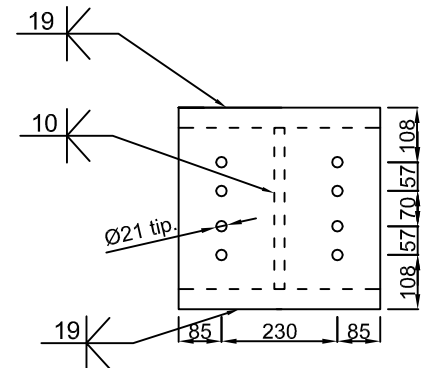
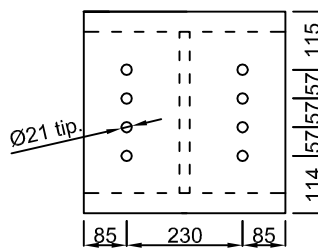
Escala 1:15



Corte A-A



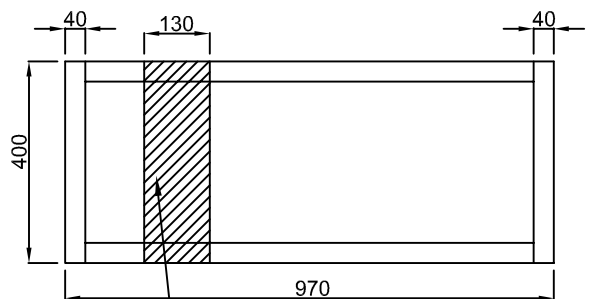
Corte B-B



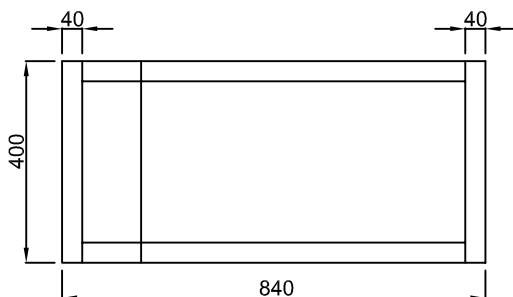
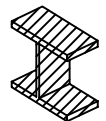
Corte C-C

Perforaciones actuales se encuentran "ranuradas" para que coincidan con una pieza adyacente.

Corte B-B correcto, en caso de volver a soldar una plancha nueva en este extremo de la pieza.



Cortar pieza y eliminar este tramo



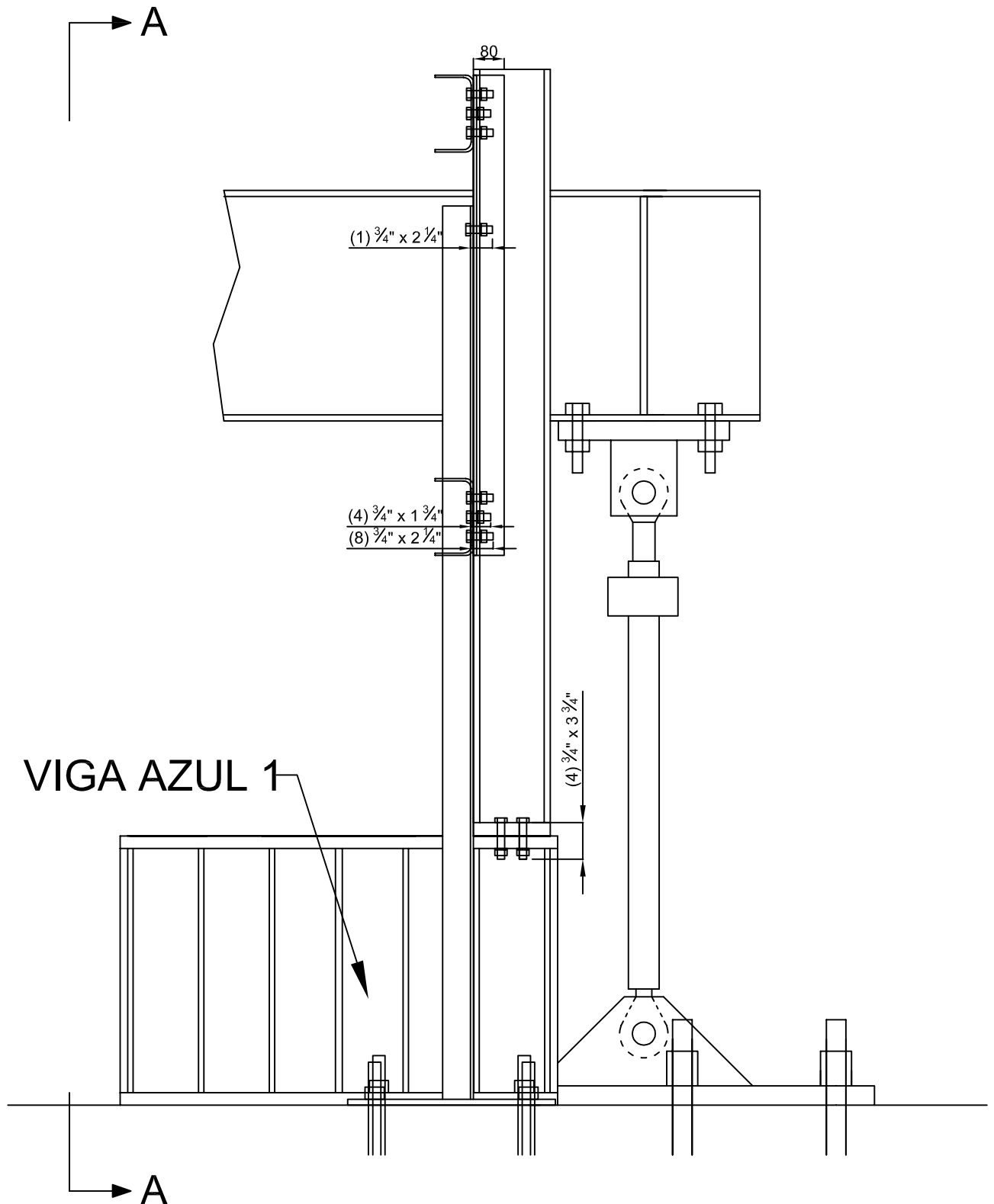
Pieza nueva de largo 840 mm.

Soldadura como indica Corte C-C.

Constanza Salas Q.  
Dpto. de Ing. Civil  
Universidad de Chile

# RESTRICCIÓN LATERAL

Escala 1:15

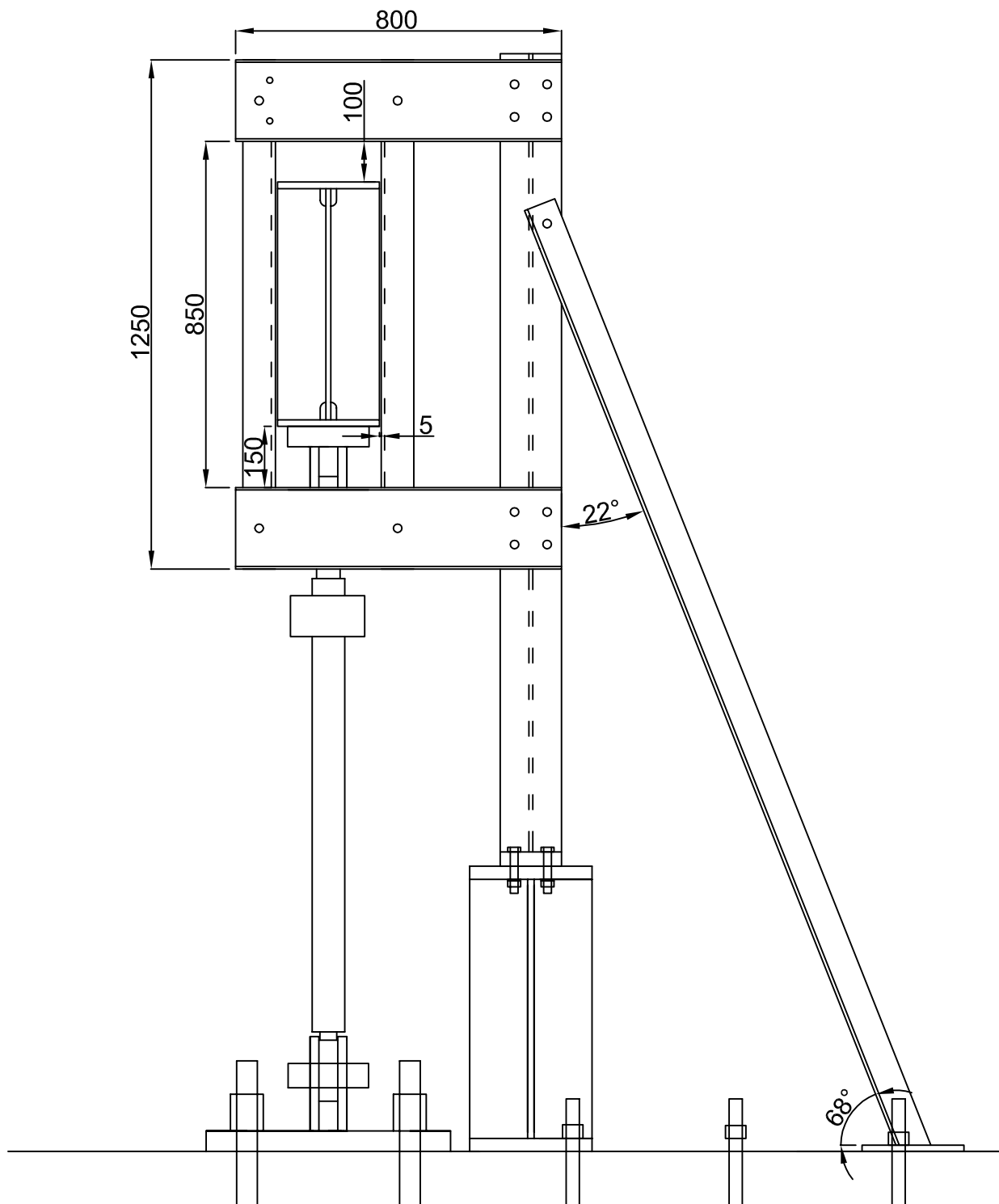


VIGA AZUL 1

VIGA OESTE

# VISTA LATERAL A-A

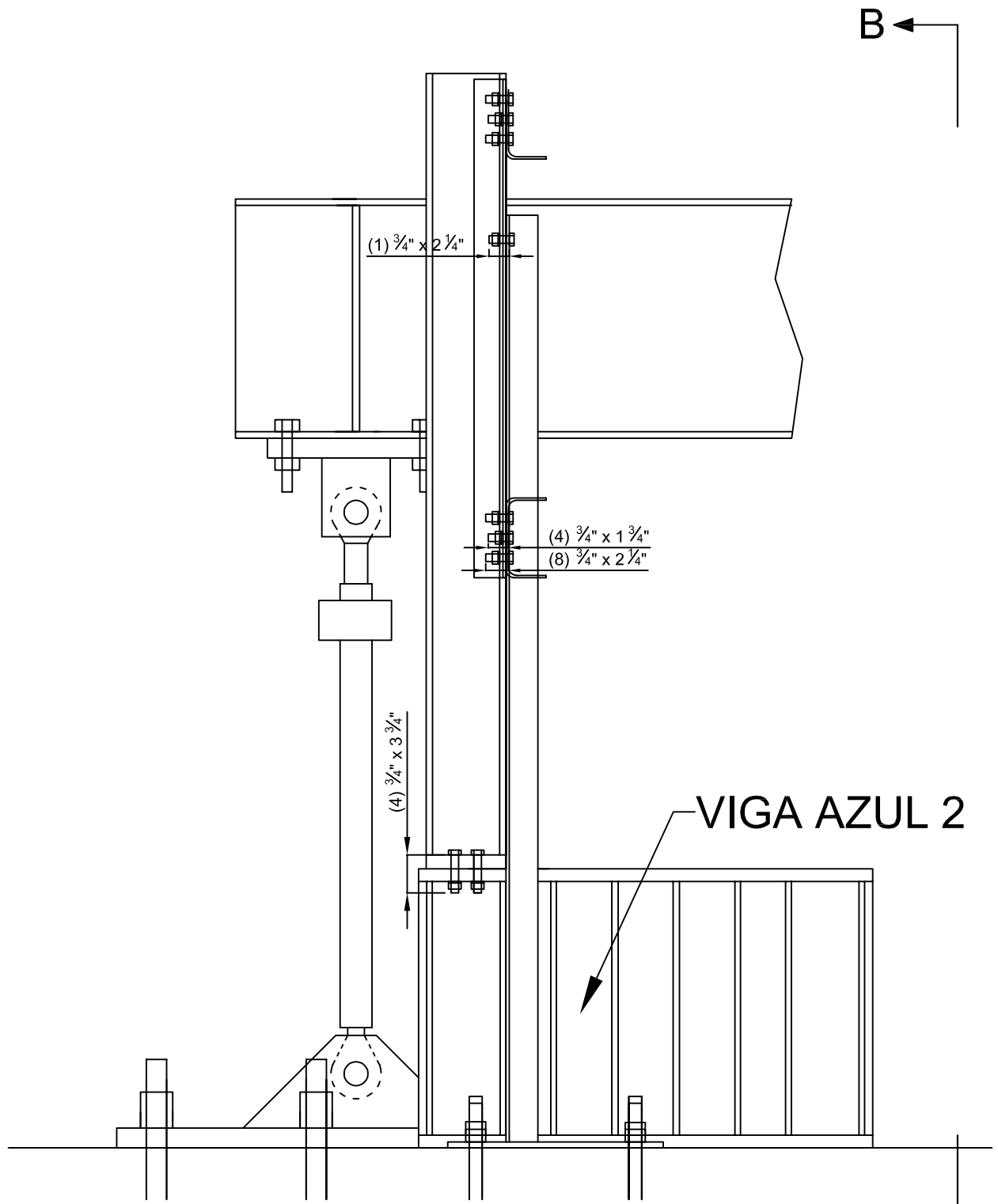
Escala 1:15



VIGA OESTE

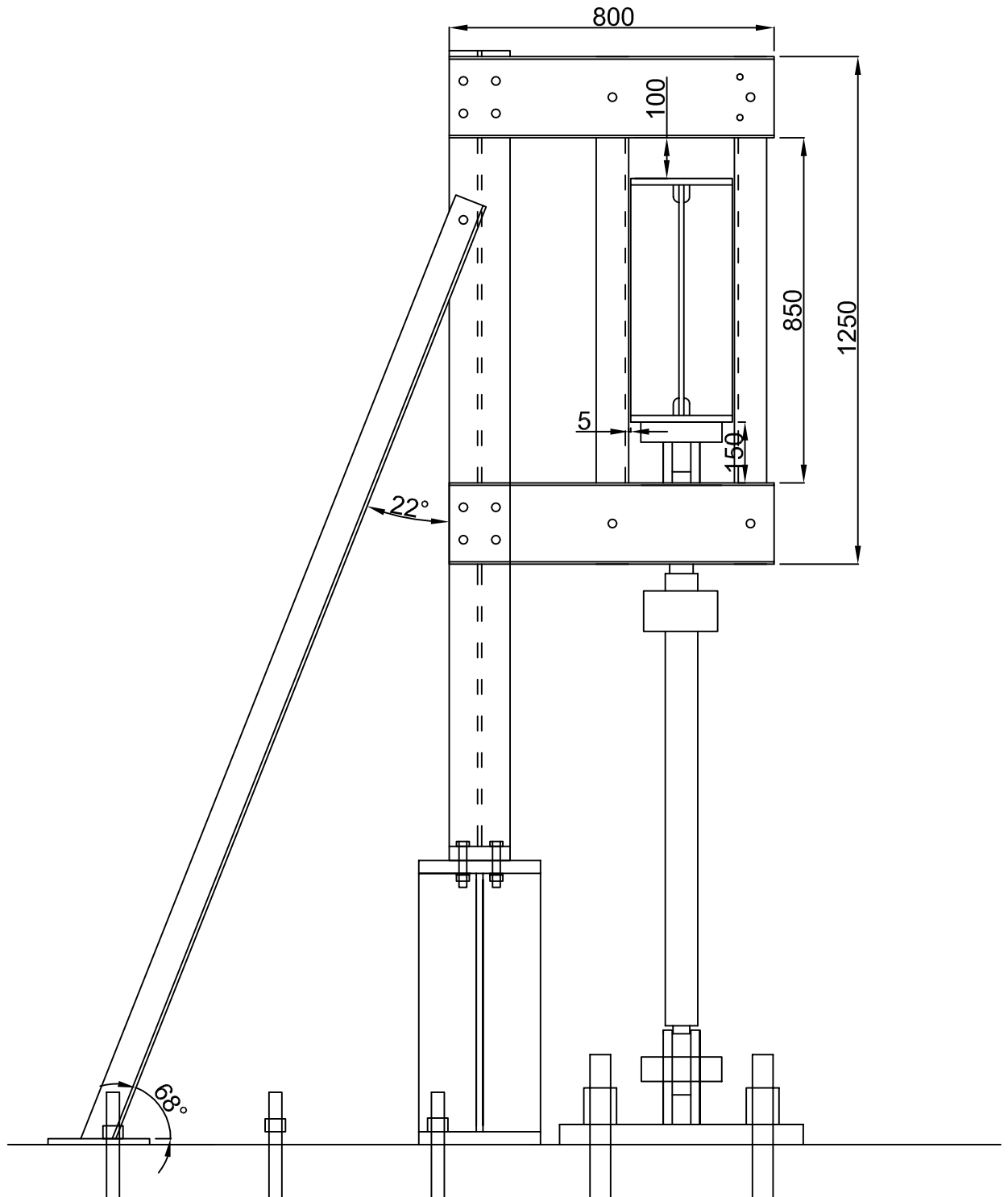
# RESTRICCIÓN LATERAL

Escala 1:15



# VISTA LATERAL B-B

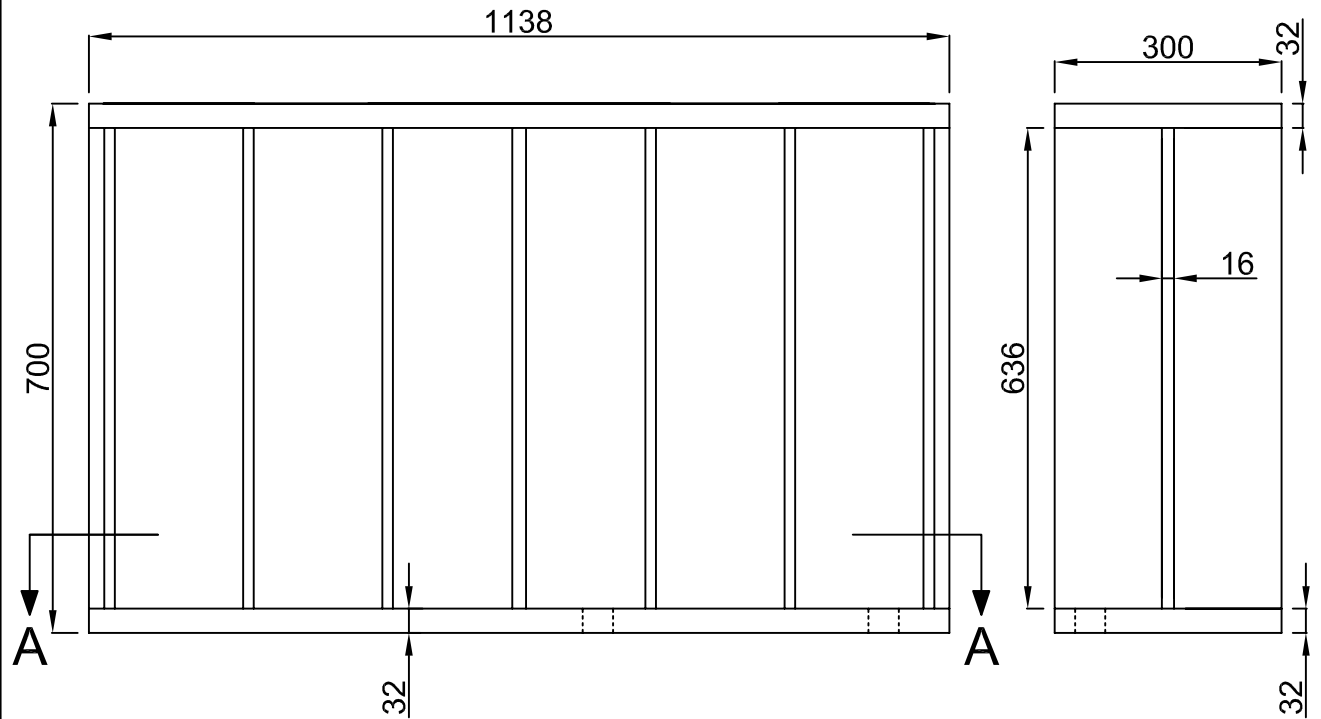
Escala 1:15



VIGA ESTE

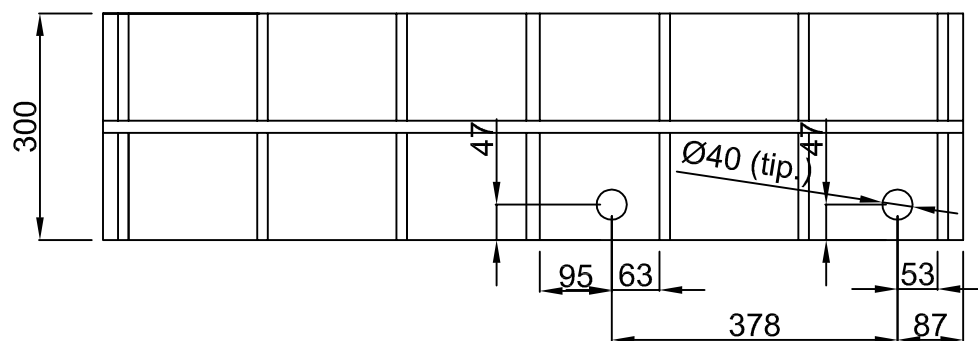
# VIGA AZUL 1

Escala 1:10



(VIGA OESTE - Perforar la base)

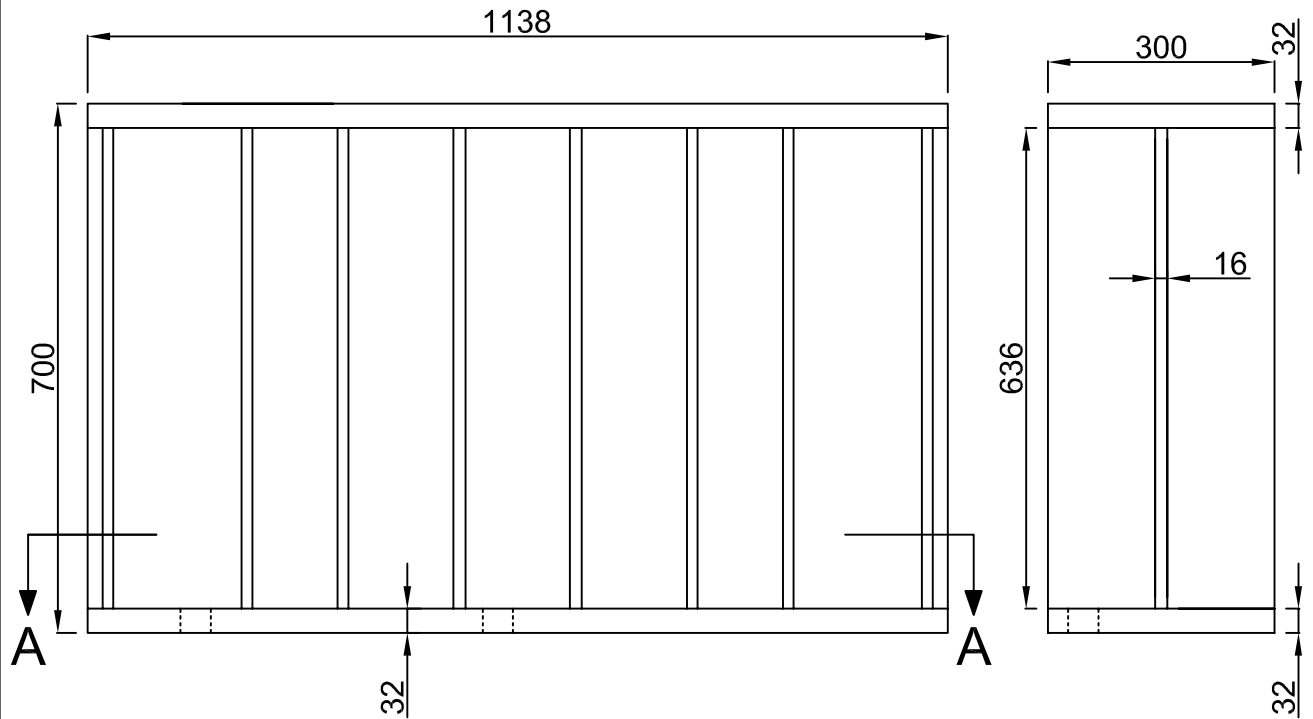
e = 32 mm



Corte A-A

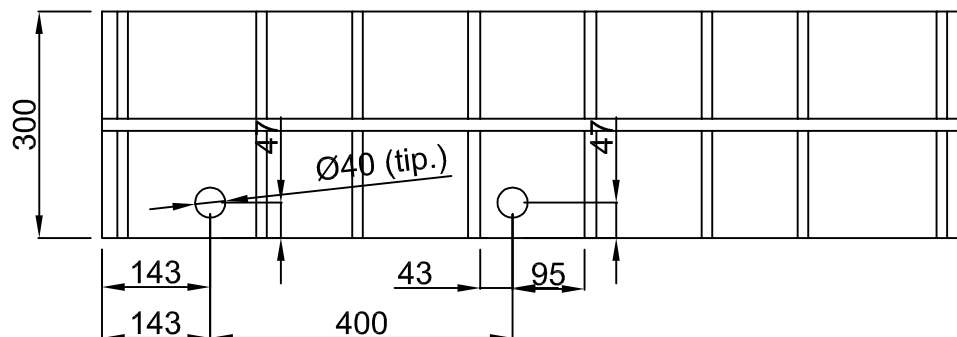
# VIGA AZUL 2

Escala 1:10



(VIGA ESTE - Perforar la base)

e = 32 mm

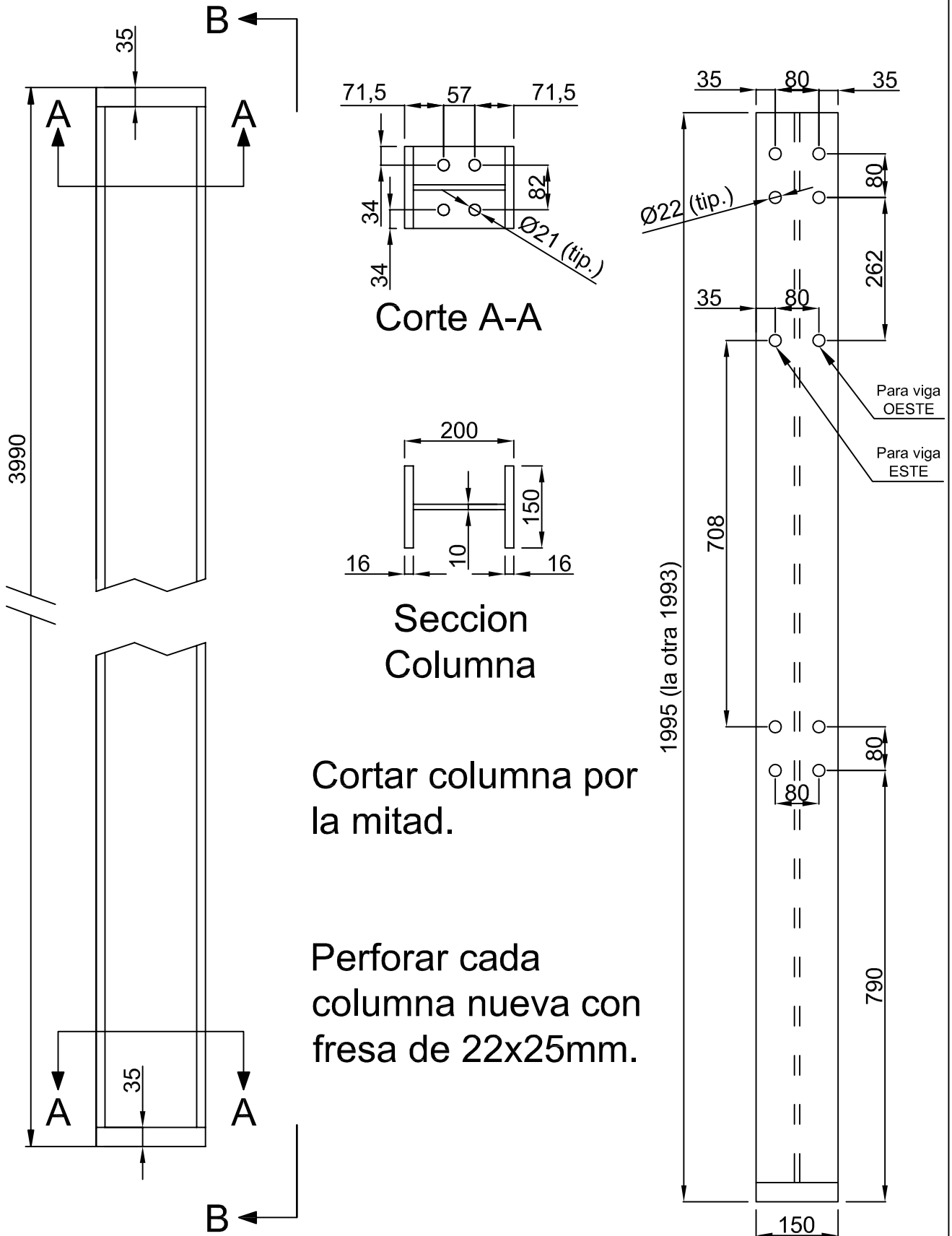


Corte A-A



# COLUMNA AZUL

Escala 1:10

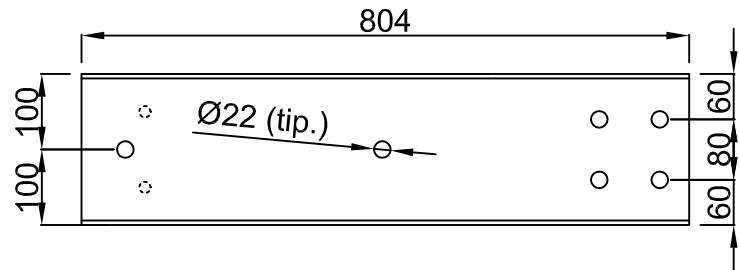
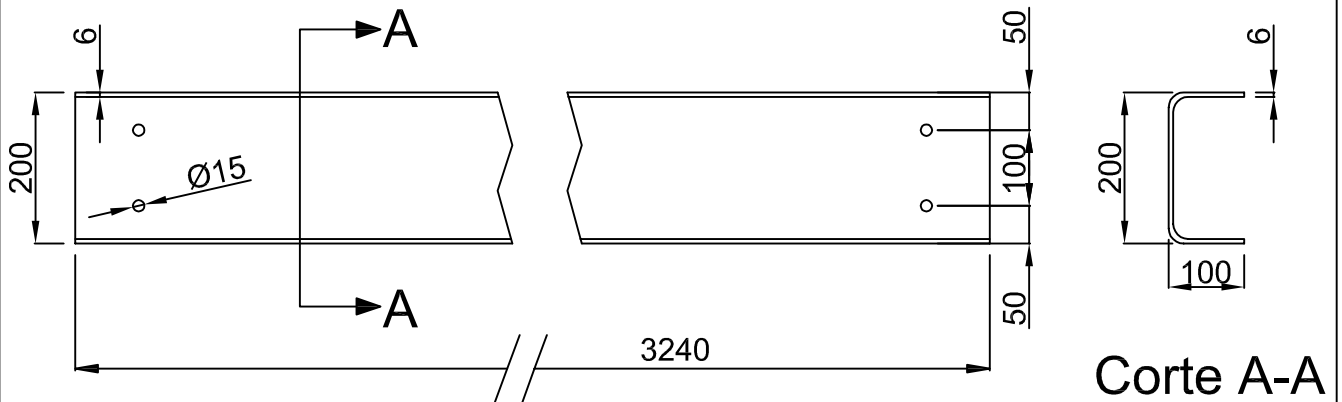


Cortar columna por la mitad.

Perforar cada columna nueva con fresa de 22x25mm.

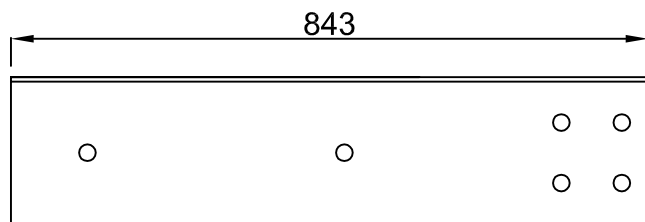
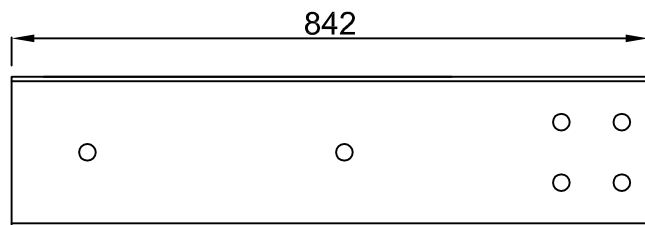
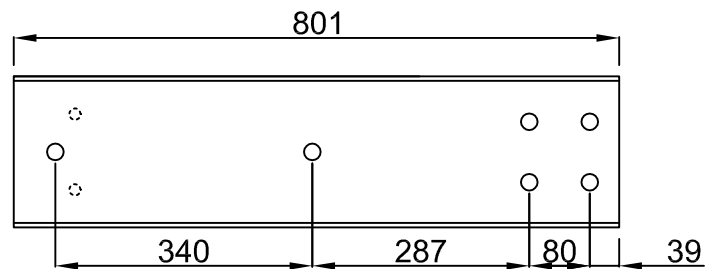
# PERFIL CANAL

Escala 1:10



Cortar canal en cuatro tramos.

Perforar cada canal nuevo con fresa de 22x25mm.



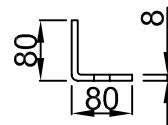
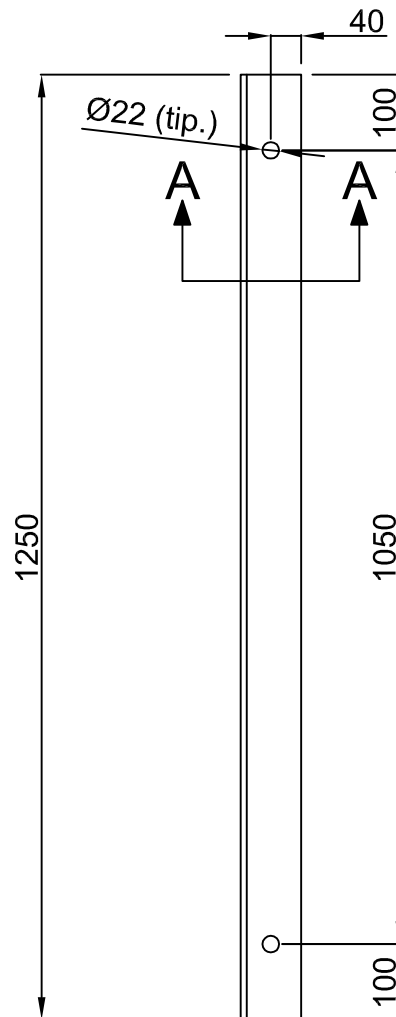
◦ Perforación existente

# PERFILES ÁNGULO

Escala 1:10

Disponible: cuatro tiras de perfil L 80x80x8 de 2,5m.  
Cortar dos por la mitad: 4 tramos de 1250mm de largo.

(Cantidad: 4)



Corte A-A

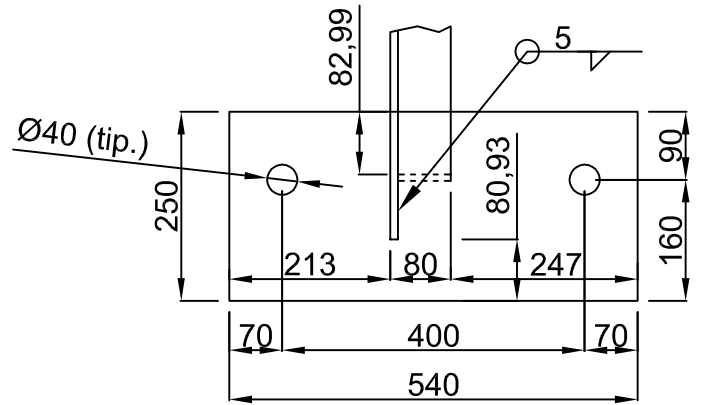
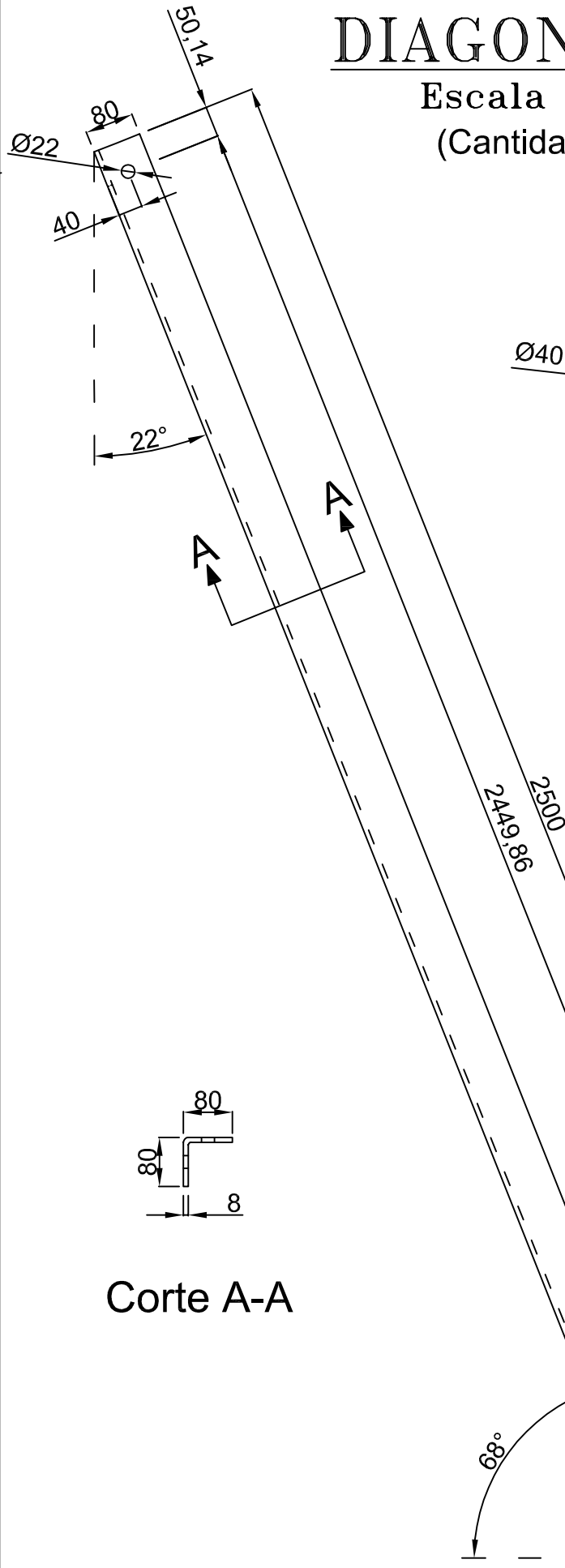
# DIAGONALES

Escala 1:10

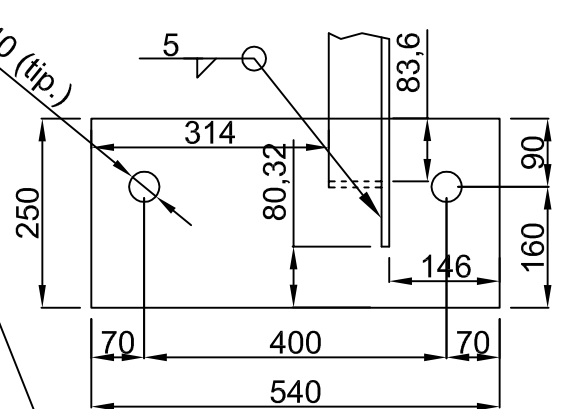
(Cantidad: 2)

PLACA BASE

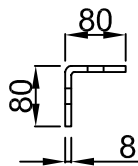
e = 16 mm



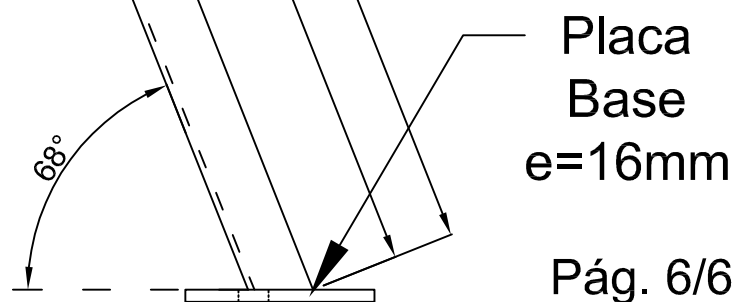
(Viga ESTE)



(Viga OESTE)



Corte A-A



Placa Base  
e=16mm