



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

**ESTUDIO ANALÍTICO EXPERIMENTAL DE PERFILES T
SOLDADOS SOMETIDOS A CARGA CÍCLICA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA SÍSMICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MIGUEL ANGEL BRAVO HARO

**PROFESOR GUÍA:
RICARDO HERRERA MARDONES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MAURICIO SARRAZIN ARELLANO
CARLOS AGUIRRE AHUMADA**

**SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2013**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil y grado de
Magíster en Ingeniería Sísmica
POR: Miguel Angel Bravo Haro
FECHA:
PROFESOR GUIA: Ricardo Herrera Mardones

ESTUDIO ANALÍTICO EXPERIMENTAL DE PERFILES T SOLDADOS SOMETIDOS A CARGA CÍCLICA

La presente investigación corresponde a un estudio analítico y experimental de perfiles T soldados sometidos a cargas cíclicas, con el objetivo principal, de precalificar su utilización en conexiones de momento del tipo doble T soldadas, para estructuras sismorresistentes. Se generan también, recomendaciones de diseño para la conexión, a partir del uso de las actuales normas para conexiones del tipo doble T compuestas de perfiles laminados (DST).

La primera parte corresponde a una revisión bibliográfica. Con esta se ha construido un marco teórico que permite entender el comportamiento de la conexión completa a partir del estudio del perfil T en forma aislada. Una vez determinados los posibles modos de falla que controlan el comportamiento de los perfiles T soldados, se ha diseñado una serie de 20 probetas con 5 posibles modos de falla teóricos. Esta serie, denominada TSM será estudiada en esta investigación de forma analítica mediante la construcción de un modelo de elementos finitos y luego experimentalmente a través de ensayos.

La segunda parte es la construcción de un modelo computacional de elementos finitos con el *software* ANSYS en su versión 12.1. Corresponde a un modelo 3D, este considera las no linealidades de los materiales y discontinuidades geométricas. La primera calibración del modelo se realizó con los resultados de una serie de ensayos monotónicos realizados, previos a esta tesis.

La tercera parte es el diseño, construcción y calibración del marco experimental. En este, se han desarrollado los ensayos de perfiles T soldados de la serie TSM bajo un protocolo estándar de carga cíclica. Los detalles de este esquema y sus componentes principales se presentan en detalle en el cuerpo de esta tesis.

La cuarta parte es el estudio de la respuesta cíclica de los perfiles mediante el modelo de elementos finitos. Reproduciendo la mayoría de las condiciones de los ensayos experimentales realizados, se ha podido comparar posteriormente ambos resultados, y éstos a su vez, respecto de lo determinado según las normas consideradas para el diseño inicial de las probetas.

Se determinó que el desempeño de los perfiles T soldados es homologable a su par de confección laminado. La soldadura, correctamente materializada no presenta problemas bajo ciclos de carga. El ala del perfil T soldado es la que más contribuye a la deformación y resistencia última. Se recomienda, para el diseño, la utilización de relaciones de espesor ala - alma cercanas 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. Esta combinación es la más recomendada considerando rigidez, deformación y capacidad del perfil; de acuerdo a la filosofía sismorresistente y sus criterios de ductilidad.

Finalmente, se presentan recomendaciones de futuras investigaciones a escala real a partir de los aportes y limitaciones del presente trabajo.

Tabla de contenido

1	Introducción	9
1.1	Motivación	9
1.2	Antecedentes Generales	9
1.3	Antecedentes Específicos	14
1.4	Objetivos	16
1.4.1	Objetivos Generales	16
1.4.2	Objetivos Específicos	16
1.5	Metodología	16
1.5.1	Estudio de los fenómenos mecánicos que gobiernan el experimento	16
1.5.2	Diseño, construcción y puesta en marcha del marco de carga experimental	16
1.5.3	Modelación numérica del experimento a partir de elementos finitos	17
1.5.4	Realización de los ensayos experimentales	17
1.5.5	Estudio de los resultados y recomendaciones	17
1.6	Organización del Informe	17
2	Marco teórico y antecedentes	19
2.1	Marco teórico	19
2.1.1	Comportamiento de conexiones en marcos	20
2.1.2	Conexiones flexibles semi rígidas	22
2.1.3	Conexiones con perfiles T-stub	24
2.2	Girão Coelho et al.	26
2.3	Swanson et al.	28
2.4	Piluso et al.	36
2.5	Herrera et al.	39
3	Modelación: análisis de elementos finitos	43
3.1	Parte I: modelo monotónico	44
3.1.1	Modelo 3D	44
3.1.2	Sistema de carga	45
3.1.3	Materiales	46
3.1.4	Contactos	48
3.1.5	Resultados	50
3.1.6	Resultados	58
3.1.7	Observaciones	59
3.2	Parte II: modelo cíclico	61
3.2.1	Actualización del modelo base	61

4	Parámetros a estudiar	63
4.1	Modos de falla	63
4.1.1	Fractura de los pernos a tracción	64
4.1.2	Plastificación del ala	65
4.1.3	Fractura por corte de los pernos	66
4.1.4	Fluencia del área gruesa	67
4.1.5	Fractura del área neta	67
4.1.6	Bloque de corte	69
4.1.7	Aplastamiento	70
4.2	Probetas de ensayo	71
4.2.1	Materiales	73
4.2.2	Diseño	74
4.3	Instalación Experimental	74
4.3.1	Marco de reacción	74
4.3.2	Actuador hidráulico	75
4.3.3	Celda de carga	75
4.3.4	Unidad de potencia óleo - hidráulica	76
4.3.5	Sistema de control	76
4.3.6	Sistema de adquisición de datos	77
5	Metodología Experimental e Instrumentación	78
5.1	Metodología de ensayo para probetas planas de material base	78
5.1.1	Instrumentación de ensayo para probetas planas de material base	79
5.2	Metodología de ensayo pernos ASTM A325 - A490	80
5.3	Instrumentación de ensayo pernos ASTM A325 - A490	81
5.4	Metodología de ensayo perfiles soldados T-stub	81
5.5	Instrumentación de ensayo perfiles soldados T-stub	84
6	Análisis de ensayos de materiales	87
6.1	Ensayos de probetas planas de acero ASTM A36	87
6.1.1	Probetas planas 4[mm]	89
6.1.2	Probetas planas 5[mm]	90
6.1.3	Probetas planas 6[mm]	91
6.1.4	Probetas planas 8[mm]	92
6.1.5	Probetas planas 10[mm]	93
6.1.6	Probetas planas 12[mm]	94
6.1.7	Promedio de propiedades mecánicas Acero ASTM A36	95
6.2	Ensayos de pernos ASTM A325 y A490	95
7	Presentación y análisis de resultados	101
7.1	Ensayos de sacrificio	101
7.2	Ensayos de perfiles T-stub soldados - Serie TSM	105
7.3	Modos de falla observados	108
7.4	Respuesta global	111
7.5	Respuesta según parámetros de interés	115
7.5.1	TSM1 - TSM2 - TSM3	115
7.5.2	TSM4 - TSM5	117
7.5.3	TSM6 - TSM7	119
7.5.4	TSM8 - TSM9	121
7.5.5	TSM10	123

7.6	Soldadura	125
7.7	Comparación de resultados teóricos y experimentales	127
7.8	Comparación de ensayos monotónicos y cíclicos	128
7.9	Resultados experimentales v/s modelo de elementos finitos I	129
7.9.1	Levantamiento del ala	132
7.9.2	Deformación del alma	132
7.10	Resultados experimentales v/s modelo de elementos finitos II	134
7.10.1	Levantamiento del ala	134
7.10.2	Deformación del Alma	136
7.10.3	Deformación total	138
7.10.4	Deslizamiento	138
8	Conclusiones	140
8.1	Contribuciones de este trabajo	141
8.2	Recomendaciones de diseño	142
8.3	Limitaciones	142
8.4	Futuras investigaciones	143
	Bibliografía	144
A	Diseño de probetas TSM - FEMA 350	146
B	Resultados experimentales serie TSM	177
C	Inspección de probetas serie TSM	263
D	Certificados de calidad	273
E	Planos	278

Índice de figuras

1.1	Esquema conexión DST - Double Split Tee	10
1.2	Esquema conexión pre Northdrige	11
1.3	Tipos de fallas observadas en el terremoto de Northdrige	11
1.4	Esquema del principio columna fuerte/viga débil	15
2.1	Clasificación de conexiones de acero - AISC 2005	20
2.2	Esquema de rotación relativa viga-columna	21
2.3	Curva típica momento-rotación para carga monotónica. (Swanson, 2002)	21
2.4	Curva típica momento-rotación para carga monotónica	22
2.5	Curva típica momento-rotación bajo carga cíclica	23
2.6	Esquema conexión DST	24
2.7	Esquema de efecto de apalancamiento del ala del perfil T-stub. Swanson (2002)	25
2.8	Identificación de perfiles y modelo experimental	26
2.9	Instalación Experimental utilizada por Girão Coelho et al.	28
2.10	Curva típica momento - rotación. Swanson y Leon (2000)	29
2.11	Modelo de Resortes. Swanson y Leon (2000)	30
2.12	Geometría y dimensiones de probetas ensayadas. Swanson y Leon (2000)	31
2.13	Esquema del ángulo de deriva	32
2.14	Esquema del montaje experimental. Swanson y Leon (2000)	33
2.15	Detalle de la instrumentación utilizada. Swanson y Leon (2000)	33
2.16	Curva de carga monotónica v/s carga cíclica. Swanson y Leon (2000)	34
2.17	Fotografías de probetas post ensayo. Swanson y Leon (2000)	34
2.18	Fotografías de probetas post ensayo. Swanson y Leon (2000)	35
2.19	Fotografías de probetas post ensayo. Swanson y Leon (2000)	35
2.20	Modelos teóricos de falla. Piluso et al. 2001	36
2.21	Detalle de los perfiles y montaje experimental. Piluso et al. 2001	38
2.22	Curva de respuesta real v/s curva de respuesta idealizada. Piluso et al. 2001	38
2.23	Fotografía del apalancamiento del perfil soldado - Probeta 12. Piluso et al. 2001	39
2.24	Dimensiones de los perfiles T-stub. Herrera et al. 2009	40
2.25	Configuración experimental y detalle de adquisición de datos. Herrera et al. 2009	41
3.1	Geometría del modelo 3D	44
3.2	Detalle perno	45
3.3	Pretension de los pernos	46
3.4	Aplicación de la Fuerza	46
3.5	Curva bi-lineal de respuesta de material - acero ASTM A-36	47
3.6	Curva bi-lineal de respuesta de material - pernos acero ASTM A-325	47
3.7	Curva de respuesta de material - soldadura ER70S6	48
3.8	Punto triple	49
3.9	Deformación total modelos de elementos finitos - Serie TSD	51

3.10	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 140	51
3.11	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 150	52
3.12	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 160	52
3.13	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 170	53
3.14	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 180	53
3.15	Perno a tensión con flexión inducida producto del apalancamiento	54
3.16	Deformación total modelos de elementos finitos - Serie TSE	54
3.17	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 8	55
3.18	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 10	55
3.19	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 14	56
3.20	Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 16	56
3.21	Detalle de aplastamiento en modelo finito	57
3.22	Aplastamiento experimental v/s teórico - Probeta TSD 140-2	58
3.23	Ciclo de carga - FEMA 350	62
4.1	Identificación de parámetros geométricos de acuerdo al protocolo FEMA 350	64
4.2	Esquema pernos a tracción	65
4.3	Esquema levantamiento del ala y distribución de presión en la cabeza de los pernos	66
4.4	Esquema de fluencia en el área gruesa	67
4.5	Esquema fractura del área neta	68
4.6	Esquema de Whitmore / ancho efectivo del alma	69
4.7	Esquema bloque de corte	70
4.8	Esquema aplastamiento	71
4.9	Identificación de las componentes del perfil T-stub	72
4.10	Esquema global del marco de reacción y sus diversas partes	75
4.11	Fotografía del marco de reacción durante su instalación	75
4.12	Fotografía del actuador y celda de carga durante pruebas de calibración	76
4.13	Fotografía de la servo válvula durante su instalación	77
4.14	Fotografías sistema de control y acondicionamiento de datos	77
5.1	Geometría y dimensiones en [mm] cupón plano - ASTM E8 - 04 (2008)	79
5.2	Máquina universal de carga - MFL	80
5.3	LVDT y probeta plana	80
5.4	LVDT, copla, fijaciones, máquina y pernos	81
5.5	Esquema de vista lateral del sistema de instrumentación	85
5.6	Esquema de vista frontal del sistema de instrumentación	85
5.7	Esquema de vista lateral del sistema de instrumentación	86
6.1	Curva carga - deformación de probeta plana de 4 [mm]	89
6.2	Probetas planas de 4 [mm]	89
6.3	Curva carga - deformación de probeta plana de 5 [mm]	90
6.4	Probetas planas de 5 [mm]	90
6.5	Curva carga - deformación de probeta plana de 6 [mm]	91
6.6	Probetas planas de 6 [mm]	91
6.7	Curva carga - deformación de probeta plana de 8 [mm]	92
6.8	Probetas planas de 8 [mm]	92
6.9	Curva carga - deformación de probeta plana de 10 [mm]	93
6.10	Probetas planas de 10 [mm]	93
6.11	Curva carga - deformación de probeta plana de 12 [mm]	94
6.12	Probetas planas de 12 [mm]	94
6.13	Curva carga - deformación de perno A325-1	96

6.14	Curva carga - deformación de perno A325-2	96
6.15	Curva carga - deformación de perno A325-3	97
6.16	Curva carga - deformación de perno A325-4	97
6.17	Curva carga - deformación de perno A325-5	98
6.18	Curva carga - deformación de perno A490-1	98
6.19	Curva carga - deformación de perno A490-2	99
6.20	Curva carga - deformación de perno A490-3	99
6.21	Detalle de pernos post - ensayo	100
7.1	Notación del alma - Serie TSM	102
7.2	Notación del ala - Serie TSM	102
7.3	Esquema de la desangulación del eje central de carga	103
7.4	Curva típica distorsionada por carga lateral inducida	104
7.5	Desangulación por mala rectificación	104
7.6	Desangulación corregida por placa delgada	104
7.7	Momento inducido	105
7.8	Esquema de falla y deformación máxima para fractura del área neta	106
7.9	Fluencia tipo antes de la fractura	108
7.10	Fluencia tipo antes de la fractura	108
7.11	Fractura tipo del área neta	109
7.12	Levantamiento menor del ala - Probeta TSM-8-1	109
7.13	Levantamiento mayor del ala - Probeta TSM-6-2	110
7.14	Falla en la zona de la soldadura	110
7.15	Cordón de soldadura expuesto por la falla	111
7.16	Curva cíclica de respuesta total. Carga - Deformación - Probeta TSM 7-1	112
7.17	Curva cíclica de deslizamiento. Carga - Deformación - Probeta TSM 6-1	113
7.18	Curva cíclica de respuesta del alma. Carga - Deformación - Probeta TSM 5-2	114
7.19	Curva cíclica de levantamiento del ala. Carga - Deformación - Probeta TSM 7-1	115
7.20	Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM1-2 - TSM2-2 - TSM3-2	116
7.21	Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM1-2 - TSM2-2 - TSM3-2	117
7.22	Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM4-2 - TSM5-2	118
7.23	Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM4-2 - TSM5-2	119
7.24	Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM6-2 - TSM7-2	120
7.25	Curvas cíclicas de levantamiento del ala - Probetas TSM6-2 - TSM7-2	121
7.26	Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM8-1 - TSM9-2	122
7.27	Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM8-1 - TSM9-2	123
7.28	Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM10-1 - TSM10-2	124
7.29	Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM10-1 - TSM10-2	125
7.30	Metalografía y zonas de interés al microscopio	126
7.31	TSM4-2 v/s TSE8	129
7.32	TSM5-2 v/s TSE10	129
7.33	Exp. y FEM - TSM6-2	132
7.34	Exp. y FEM - TSM7-2	132
7.35	Exp. y FEM - TSM8-1	132
7.36	Exp. y FEM - TSM1-2	132
7.37	Exp. y FEM - TSM2-2	132
7.38	Exp. y FEM - TSM3-2	133
7.39	Exp. y FEM - TSM4-2	133
7.40	Exp. y FEM - TSM5-2	133
7.41	Exp. y FEM - TSM9-2	133

7.42	Exp. y FEM - TSM10-2	133
7.43	Levantamiento del ala - Exp. y FEM Cíclico - TSM6-2	135
7.44	Comparación levantamiento del ala TSM6 - 2	136
7.45	Deformación del alma - Exp. y FEM Cíclico - TSM3-2	137
7.46	Alma TSM3-2	137
7.47	Alma FEM TSM3	137
7.48	Deformación total - Exp. y FEM Cíclico - TSM3-2	138
7.49	Deslizamiento - Exp. y FEM Cíclico - TSM3-2	139

Índice de Tablas

2.1	Protocolo de ciclos de carga. FEMA 350 (2000)	31
2.2	Configuración de los perfiles T-stub. Herrera et al. 2009	40
3.1	Modos de falla experimentales	50
3.2	Modos de falla experimentales	59
4.1	Modos de falla perfiles T-stub	64
4.2	Dimensiones de probetas - Serie TSM	73
5.1	Secuencia de ensayos perfiles soldados T-stub	84
5.2	Secuencia de canales del sistema de adquisición de datos	86
6.1	Propiedades geométricas probetas planas Acero ASTM A36	87
6.2	Alargamiento probetas planas Acero ASTM A36	88
6.3	Propiedades de probetas planas de 4 [mm]	89
6.4	Propiedades de probetas planas de 5 [mm]	90
6.5	Propiedades de probetas planas de 6 [mm]	91
6.6	Propiedades de probetas planas de 8 [mm]	92
6.7	Propiedades de probetas planas de 10 [mm]	93
6.8	Propiedades de probetas planas de 12 [mm]	94
6.9	Resumen de propiedades mecánicas acero ASTM A36	95
6.10	Resumen de propiedades mecánicas de pernos A325 - A490	100
7.1	Matriz de ensayos - Serie TSM	102
7.2	Resultados de ensayos cíclicos de la serie TSM	107
7.3	Resultados de ensayos cíclicos del grupo 1	116
7.4	Resultados de ensayos cíclicos del grupo 2	117
7.5	Resultados de ensayos cíclicos del grupo 3	120
7.6	Resultados de ensayos cíclicos del grupo 4	122
7.7	Resultados de ensayos cíclicos del grupo 5	123
7.8	Comparación de valores últimos y modos de falla teóricos y experimentales	127
7.9	Relaciones de espesor ala/alma de la serie TSM	131
7.10	Valores últimos y modos de falla de modelo de elementos finitos y experimentales	131

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Durante la madrugada del 27 de febrero del 2010, un terremoto de magnitud $M_w = 8,8$ con epicentro en la zona centro sur de Chile, desató el caos y refrescó la condición de ser el país más sísmico del mundo. Conocido como el 8,8; éste, el quinto más grande de la historia de la humanidad sobre la cual se tiene registro, puso a prueba no sólo las estructuras sociales y el comportamiento de los habitantes, sino también las estructuras civiles que éstos han construido para habitar, comunicarse, producir, entre otras. Son estas últimas las que motivan la existencia y el desarrollo de la Ingeniería Sísmica aplicada a diversas áreas del quehacer humano. Este desarrollo e investigación dependen directamente de las condiciones a las que se han tenido que adaptar los seres humanos, según el lugar en el que habitan y al nivel de desarrollo socio-económico, que ciertamente condiciona los materiales y la forma según los cuales se deberá construir.

Las estructuras de acero son piezas clave dentro de la actual configuración material de las sociedades. A diferencia de otros países, en Chile el acero como material estructural se encuentra específicamente concentrado en el sector productivo industrial. Por tanto toda investigación que permita avanzar en la comprensión de su comportamiento bajo sus diferentes configuraciones, está directamente vinculada con el devenir productivo del país y por consiguiente con el potencial desarrollo en la calidad de vida de los ciudadanos.

1.2. Antecedentes Generales

Los terremotos de Northridge - 1994 y Kobe - 1995 dejaron al descubierto una serie de fallas producidas en las estructuras de acero, específicamente en las conexiones viga/columna, las cuales hasta esa fecha eran principalmente de momento y completa o parcialmente soldadas. Estas fallas fueron completamente inesperadas porque el conocimiento que de éstas se tenía, y que sostuvo su utilización por largo tiempo, suponía un buen comportamiento respecto de la combinación de cargas, ductilidad y rigidez en los marcos simorresistentes. Comenzó así una identificación minuciosa de todos los tipos de fallas existentes en estructuras post-terremotos. La información recabada sentaría las bases de la investigación y búsqueda de nuevos tipos de conexiones. Aparecen entonces, como

candidatas de interés, las conexiones apernadas. Esto porque se venían utilizando hace ya largos años y presentaban buenas respuestas ante los terremotos; sin embargo habían perdido terreno porque se necesitaban muchas más conexiones apernadas para los sistemas de cargas laterales en las estructuras, comparativamente con las conexiones soldadas. La presente investigación pretende recorrer esta senda, concentrada en el estudio analítico y experimental de uno de estos tipos de conexiones: la DST - *Double Split Tee* - a partir de perfiles soldados, mostrada en la figura 1.1. Será parte importante estudiar y entender las deformaciones y mecanismos de transferencia de carga asociados a los estados últimos que devienen en fallas, como también la generación de modelos, herramientas e indicaciones sencillas pero realistas que sirvan de guía para la utilización de estas conexiones.

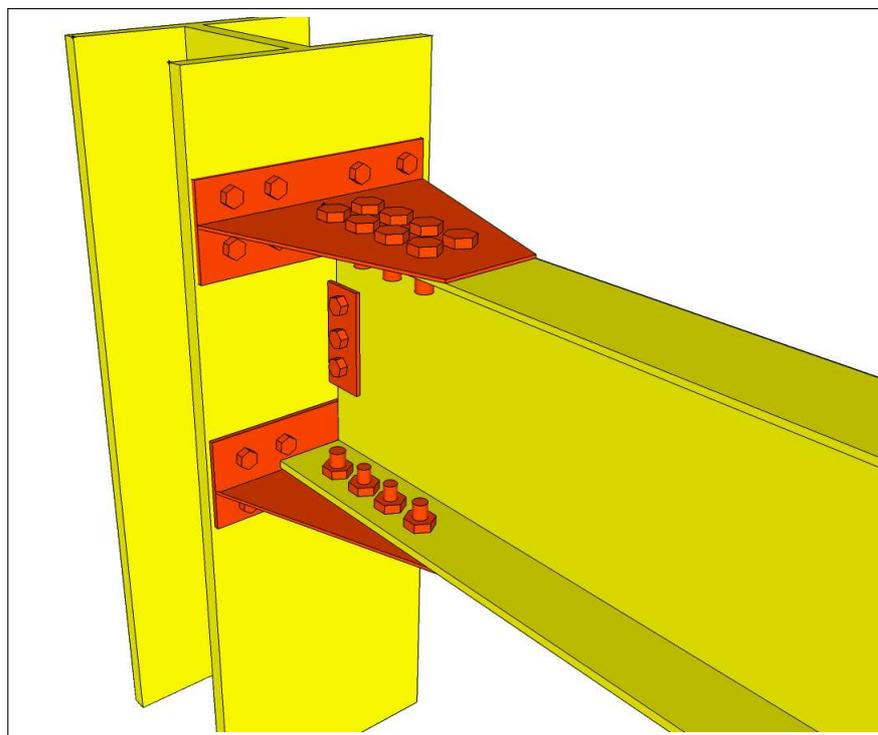


Figura 1.1: Esquema conexión DST - Double Split Tee

Hasta 1994 las conexiones completamente soldadas eran consideradas óptimas y se privilegiaba su utilización en los marcos de momento de acero. Estas conexiones soldadas comenzaron a ser utilizadas en la década de los 50' y fueron las más populares hasta finales de la década de los 70, principalmente en Estados Unidos, país que ha liderado el desarrollo de las estructuras de acero en el mundo. Un esquema de esta configuración se muestra en la figura 1.2. Esta utilización estaba respaldada por las investigaciones experimentales desarrolladas en la época (Popov *et al.*, 1972; Popov & Bertero, 1973) las cuales utilizaron vigas de mediano tamaño para realizar ensayos, así como modelos muy pequeños respecto de los diseños reales actuales. Entonces se prescribieron las recomendaciones de diseño que luego dieron cuerpo a las especificaciones sísmicas (AISC, 1992). En los comentarios de esta última se reafirmaba que mientras se mantuvieran las exigencias geométricas de las conexiones nada en su funcionamiento debería fallar. Así obtuvieron la condición de "pre

calificadas” y para su puesta en terreno sólo se exigía una revisión de la soldadura a través de ultrasonido para asegurar así su calidad. Sin embargo, durante el terremoto de Northridge, más de 200 estructuras de marco de acero presentaron fracturas en sus conexiones, como se muestra en la figura 1.3. Varios tipos de fallas frágiles se pudieron apreciar en el proceso de identificación de daños. Entonces: ¿cuáles fueron las causas?

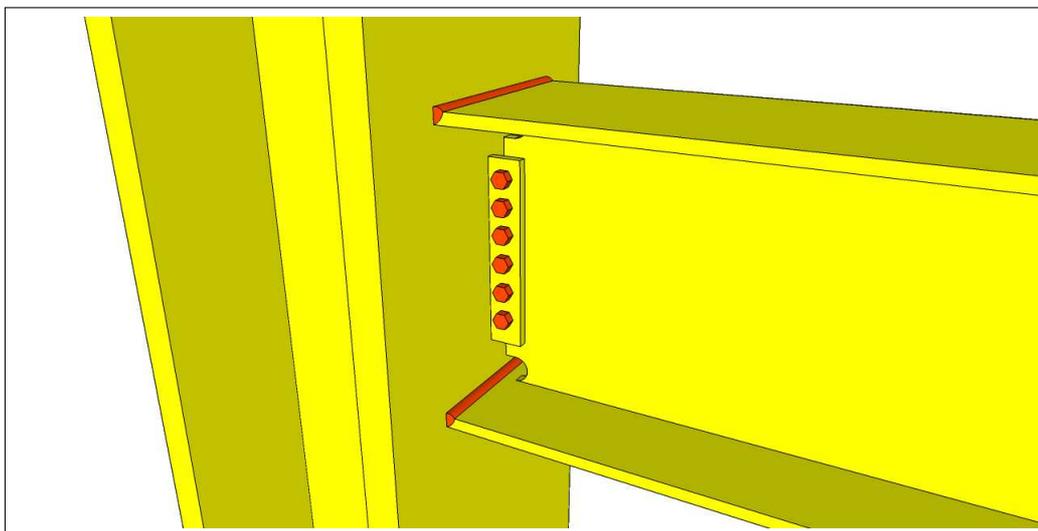


Figura 1.2: Esquema conexión pre Northridge

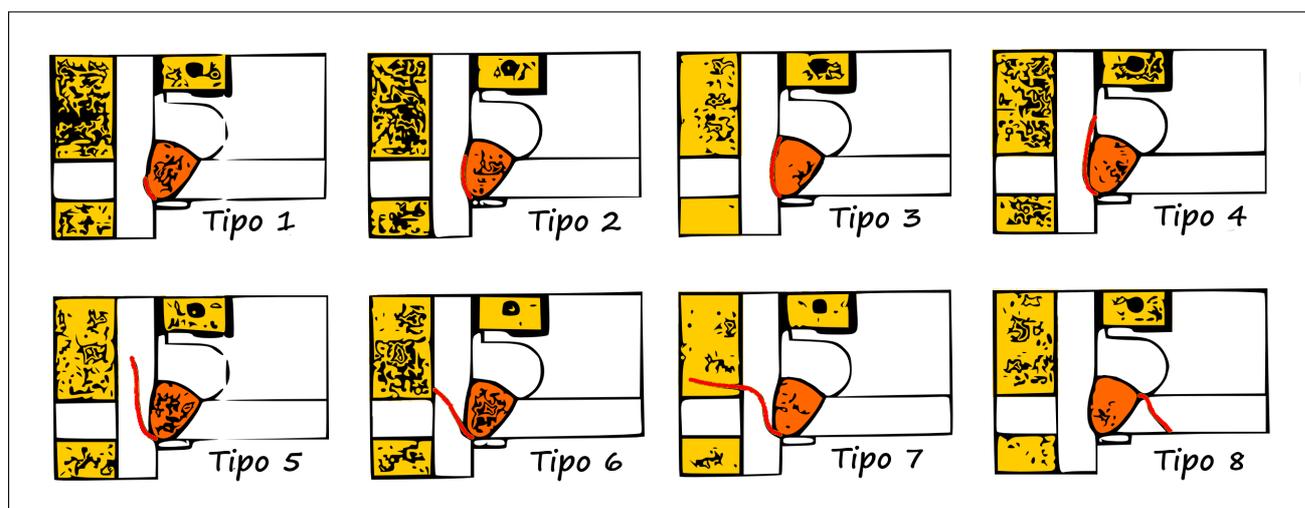


Figura 1.3: Tipos de fallas observadas en el terremoto de Northridge

Las investigaciones realizadas post Northridge dejaron al descubierto las deficiencias asociadas a las fallas presentadas (FEMA 267A., 1997). Se distinguieron así dos tipos de problemas. El primero guarda relación con la caracterización de los materiales y procedimientos de fabricación de las conexiones:

1. La industria del acero privilegió por mucho tiempo las altas tensiones de fluencia en desmedro de la ductilidad de los elementos. A partir de esto se empezó a diseñar las piezas en función

de cargas laterales artificiales, que siempre quedaban cubiertas por las altas resistencias de los materiales, sin embargo no se realizaron las consideraciones asociadas a la deformación de las mismas.

2. A partir de la baja plasticidad antes del endurecimiento por deformación de estos aceros "duros" y la alta relación entre las tensiones de fluencia y rotura; la soldadura se veía obligada a transmitir cargas mayores.
3. No se previó la importancia de la soldadura en el desempeño de la conexión. Los electrodos utilizados demostraron no ser capaces de mantener la capacidad de carga bajo diversos ciclos de comportamiento inelástico
4. Se encontraron problemas graves en la aplicación de las soldaduras, tanto problemas de terreno como de fabricación de las conexiones. Tema trascendente si se considera la importancia de la fabricación de las piezas y materialización de las soldaduras por medio de mano de obra calificada y según todos los protocolos. Considerando además que la revisión posterior con ultrasonido no garantizó el buen desempeño de las conexiones.

El segundo grupo de deficiencias guarda relación con la geometría de las conexiones, supuestos de diseño y la concepción del sistema estructural de los marcos modernos de momento sobre la base de acero.

1. La geometría típica de la conexión pre-Northdrige facilita la concentración de tensión triaxial en una pequeña zona alrededor de la soldadura. Grandes esfuerzos triaxiales pueden impedir que se desarrolle la fluencia por corte y potenciar así una falla frágil de la soldadura.
2. Las fuerzas para diseñar la conexión, son generalmente obtenidas de modelos simplificados que consideran que las secciones planas permanecen planas después de aplicada la carga; sin embargo este supuesto no se cumple en las zonas anteriormente mencionadas en que se concentran las tensiones.
3. Para mejorar la materialización de la soldadura, se utilizaba una barra soldada (plancha de respaldo) que servía de soporte de la viga durante el proceso de montaje de unión viga/columna. Sin embargo, en muchos casos, ésta nunca fue retirada por optimizar tiempo y costos. Este elemento, lamentablemente contribuyó a aumentar la concentración de tensiones y de paso facilitar la propagación frágil de la fractura.
4. La mayoría de las disposiciones de diseño -inclusive algunas hasta la fecha- no reconocen que parte del esfuerzo de corte se transmite a través de las alas de la viga, y no sólo del alma. Esto se tradujo en mayores demandas en la zona de la soldadura.
5. Los normativas pre-Northdrige, por un tema de costos, privilegiaban que las resistencias laterales se concentraran en pocas conexiones, lo que entregaba como resultado grandes vigas y solicitaciones significativas en las columnas con el fin de mantener la propiedad de columna fuerte - viga débil. Estos esfuerzos además no eran calculados considerando la resistencia real

del acero, exacerbando así la concentración de tensiones y problemas asociados a la geometría de la conexión.

6. Muchos de los diseños que fallaron, consideraron una tensión de fluencia menor para las vigas, esto por un procedimiento típico de considerar el valor nominal más bajo de ese tipo de acero, que generalmente correspondía a un ASTM A36. Y lo contrario pasaba con el acero típico de las columnas ASTM A572 para el cual se sobre-dimensionaba el valor nominal de la fluencia. Ciertamente este procedimiento atentó contra la condición esencial de mantener columna fuerte y viga débil.
7. Los ensayos existentes a la fecha tan sólo consideraban solicitaciones cuasi-estáticas, por lo cual el comportamiento bajo condiciones de carga cíclica tan sólo era aproximado.

Identificada esta gama de deficiencias, en particular en Estados Unidos, comenzó un proceso exhaustivo de búsqueda de alternativas para estas conexiones viga-columna. Hasta la década del 50 cuando recién irrumpen los métodos de soldadura, las conexiones a base de remaches y pernos eran las más utilizadas en los diseños estructurales (Leon, 1997); éstas generaban, además, sistemas con altos grados de redundancia por la cantidad de conexiones necesarias. Sumando el revestimiento de hormigón a prueba de fuego, éstas estructuras alcanzaban niveles de rigidez comparables a las estructuras con conexiones soldadas- con bajo número de conexiones- que luego vendrían a ganar terreno por largo tiempo, hasta que el terremoto ya mencionado, sumado al de Loma Prieta - 1989 las pusieran en jaque.

Las principales propiedades que mantuvieron las conexiones apernadas vigentes durante largo tiempo y que hoy son el centro de la búsqueda e investigación post falla de las conexiones soldadas son básicamente:

1. Al no existir materialización de soldadura en terreno, el control de calidad de las conexiones apernadas presenta considerables ventajas.
2. Al existir elementos adicionales en la conexión, principalmente placas(T-stub, clips, etc) y pernos, posee mayor capacidad de ductilidad respecto de las conexiones completamente soldadas.
3. La presencia de un plano de fricción o deslizamiento, considerable respecto del tamaño de la conexión, genera disipación de energía.
4. El mayor número de conexiones apernadas que se necesita respecto de las completamente soldadas, ofrece un sistema estructural más robusto.

Este proceso de investigación en Estados Unidos estuvo a cargo de la Federal Emergency Management Association (FEMA), la cual desarrolló una serie de documentos a medida que se avanzaba en la investigación de nuevas conexiones, trabajo que se viera cristalizado en el documento vigente (FEMA 350., 2000) en el cual se manifiestan las nuevas recomendaciones de diseño y la

precalificación de conexiones para el diseño sísmico de estructuras de acero.

La conexión Double Split Tee (*DST*), es una de las conexiones de momento precalificadas en la actualidad (FEMA 350., 2000). Está conformada de un par de perfiles T que conectan las alas de la viga (superior e inferior) con el ala de la columna. Es aquí donde aparece el punto de inflexión que sostiene y motiva la presente investigación. La conexión precalificada existente tan sólo considera perfiles T laminados, quedando fuera de este marco de precalificación los elementos que típicamente se utilizan en Chile: perfiles soldados.

Resulta importante estudiar el comportamiento de los perfiles T soldados porque a pesar de que los perfiles laminados son cada vez más utilizados en Chile, su oferta sigue siendo muy limitada. La producción o importación de los mismos está sujeta además a las condiciones del mercado que lo regula por lo tanto su disponibilidad tampoco está asegurada. Cabe mencionar que trabajar con perfiles soldados no significa un retroceso en términos de materialización y control de calidad, puesto que la confección de este tipo de conexiones soldadas se realiza en maestranza bajo protocolos estrictos.

La presente investigación busca entonces, acercarse a una precalificación de la conexión DST construida con perfiles soldados. El carácter es numérico-experimental. La parte numérica se basa en el trabajo de modelación con elementos finitos y pretende predecir el comportamiento y los modos de falla de la conexión; para dichos efectos se trabaja con el software de modelación *ANSYS v.12.1*. La parte experimental comprende la fabricación de una serie de probetas a escala - diseñada bajo el protocolo de FEMA 350 - de la conexión, las cuales son ensayadas bajo cargas cíclicas con la intención de poder visualizar los distintos modos de falla asociados. La instalación experimental es también pieza fundamental en tanto requiere el diseño, construcción e implementación de un sistema de marco de carga, adquisición y control de datos.

1.3. Antecedentes Específicos

En general las estructuras son concebidas, calculadas y finalmente materializadas a partir de criterios de desempeño en función del carácter y funcionalidad de la estructura. Claro está que el comportamiento que se espera de un edificio habitacional o un hospital es muy distinto a los que se espera de una estructura industrial o un galpón de acopio de material.

Uno de los principios fundamentales detrás de esta capacidad de las estructuras de desempeñarse correctamente es la capacidad de disipar energía ante las diversas solicitaciones de carga que controlan su diseño. Desde esta óptica, la capacidad de disipar energía en las estructuras es función de las deformaciones que esta sea capaz de desarrollar antes de la falla o fluencia de alguno de sus elementos. Esta capacidad de deformarse y disipar energía corresponde a la *ductilidad* de la estructura y depende directamente de los materiales utilizados, estructuración, conexiones,

condiciones de borde, entre otras variables.

Las estructuras de acero no son la excepción a estos criterios y deben ser capaces de proveer la ductilidad necesaria para disipar las demandas energéticas, siendo los terremotos uno de los más importantes y que generalmente controla el diseño de las estructuras en Chile. Para conocer la ductilidad global de la estructura se debe conocer la ductilidad individual de cada una de las partes que la componen y cómo afectan a estas la diversas formas de materializar las conexiones entre elementos. Por lo tanto, es fundamental conocer las curvas de ductilidad de cada una de las partes involucradas en la estructura con el fin de saber cuánto aportan realmente a la ductilidad global de ésta.

Uno de los criterios fundamentales del diseño actual de estructuras de marcos es el de columna fuerte / viga débil. (Fig. 1.4). Este asegura que durante las deformaciones en el rango no lineal de la estructura las vigas sean siempre capaces de transmitir los momentos a las columnas y que en el momento de tener que transmitir un momento que exceda la capacidad de la estructura, la falla por fluencia se produzca en las vigas y no en las columnas o en las conexiones, de tal manera de asegurar la estabilidad estructural global. Queda de manifiesto el valor de conocer el comportamiento real de las conexiones, desde su aporte individual a la ductilidad global hasta su desempeño en la importante zona de interés viga/columna.

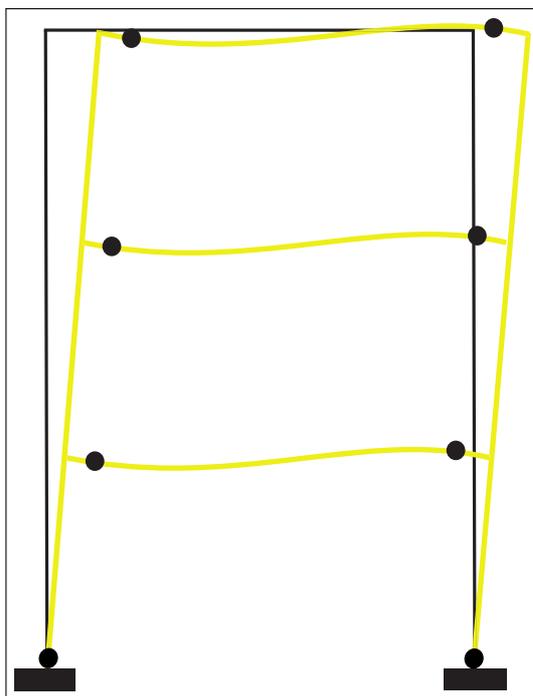


Figura 1.4: Esquema del principio columna fuerte/viga débil

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos Generales

1. Comprender los fenómenos mecánicos asociados a la respuesta cíclica de conexiones soldadas DST, a partir de experiencias de laboratorio en perfiles T-stub soldados sometidos a carga cíclica.
2. Precalificar de la manera más completa posible, a partir de recomendaciones de diseño, la utilización de conexiones soldadas DST.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar, construir y materializar la instalación experimental que permita el correcto desempeño de los ensayos, compuesta principalmente por un marco específico de acero, actuador, celda de carga y sistema de adquisición de datos.
2. Estudiar numéricamente el comportamiento de perfiles T-stub soldados utilizando un modelo de elementos finitos.
3. Estudiar experimentalmente la respuesta de perfiles T-stub sometidos a carga cíclica.
4. Comparar la respuesta experimental de los perfiles T-stub con soldadura de filete y penetración completa, para la unión ala/alma.
5. Generar recomendaciones de diseño sobre la base de las precalificaciones ya existentes para conexiones Doble - T Laminadas, con el fin de poder considerar la factibilidad de este tipo de conexiones.

1.5. Metodología

1.5.1. Estudio de los fenómenos mecánicos que gobiernan el experimento

Es fundamental entender la mecánica del comportamiento de las conexiones, desde la simplificación que se realiza al ensayar perfiles T soldados y no así la conexión completa, hasta los potenciales modos de falla de los perfiles al ser sometidos a carga monotónica o cíclica. Para este propósito, es necesaria una minuciosa revisión bibliográfica de investigaciones pasadas, analíticas y experimentales. Aquellas investigaciones más importantes para el presente trabajo son presentadas en el Capítulo N° 2.

1.5.2. Diseño, construcción y puesta en marcha del marco de carga experimental

La pieza clave de la parte experimental de la presente investigación es el diseño, construcción y puesta en marcha del marco experimental de carga en el cual se ensayarán las probetas soldadas. Este consiste básicamente en el diseño de un marco de acero que permita resistir las cargas aplicadas

a las probetas a partir de un actuador. La carga aplicada se podrá medir a partir de una celda de carga la cual se alinea con la probeta y el actuador en una sola línea. El diseño y detallamiento se presenta en el Capítulo N° 4

1.5.3. Modelación numérica del experimento a partir de elementos finitos

La pieza clave de la parte teórica es la modelación numérica de los perfiles a partir de elementos finitos. El trabajo de modelación comienza a partir de la geometría de un modelo desarrollado por Herrera *et al.* (2008). Sobre esta geometría se realiza la confección del nuevo modelo utilizando el software ANSYS *v* 12,1. Aquí existen dos partes. La primera en la que se calibra el modelo a partir de los ensayos realizados por Herrera *et al.* (2009) de los cuales se tiene toda la información y resultados obtenidos. La segunda parte es la modelación que respecta a la presente investigación.

1.5.4. Realización de los ensayos experimentales

El primer paso es diseñar las probetas que se ensayan para su posterior confección en alguna maestría calificada. Se construyen 20 probetas en total, pero tan sólo 10 tipologías distintas ya que cada uno tiene un copia gemela por protocolo de ensayo. Estas probetas buscan reproducir la mayor cantidad de modos de fallas asociados a los perfiles T. Son luego sometidos a ensayo en cual se aplica una carga cíclica, la cual es controlada por el desplazamiento axial de la probeta. Estos detalles son descritos en el Capítulo 5.

1.5.5. Estudio de los resultados y recomendaciones

En esta etapa se analiza la respuesta de los perfiles y se compara con los resultados obtenidos a partir de su respectivo modelo de elementos finitos. Se analiza también la correlación de los resultados y modos de falla, con los estimados a partir de las pautas de diseño existentes, según las cuales se confeccionaron las probetas. Con todos los antecedentes se propone recomendaciones de diseño con la intención de obtener una precalificación positiva de las conexiones soldadas DST.

1.6. Organización del Informe

El informe de la investigación, se presenta a continuación y se resume de la siguiente forma:

En el **Capítulo 2: Marco teórico y antecedentes** se presentan los principales antecedentes teóricos que rigen el comportamiento mecánico de la respuesta de los perfiles. Se complementa con un resumen de las investigaciones más relevante sobre el fenómeno de estudio.

En el **Capítulo 3: Modelación de elementos finitos I** se presenta el diseño, ejecución y análisis de resultados del modelo de elementos finitos construido para la investigación. En esta primera parte se calibra el modelo a partir de los resultados de la investigación realizada por Herrera *et al.* (2009) para perfiles T-stub soldados bajo carga monotónica.

En el **Capítulo 4: Modelación de elementos finitos II** se presenta la segunda parte de la modelación que comprende el análisis de las probetas que se ensaya en la presente investigación bajo carga cíclica, para su posterior validación con los resultados experimentales.

En el **Capítulo 5 Parámetros de estudio** se presentan las principales consideraciones y características de las probetas que se ensayan cíclicamente, pautas de diseño consideradas y principales parámetros de cada una de las configuraciones individuales de acuerdo al comportamiento y modo de falla esperado de cada uno.

En el **Capítulo 6: Metodología experimental** se presenta el diseño, confección y puesta en marcha de la instalación experimental; complementado con el procedimiento y protocolo de los ensayos experimentales.

En el **Capítulo 7: Análisis de resultados** se presentan los resultados experimentales obtenidos y posteriormente un análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados ordenados de acuerdo a los diferentes parámetros de estudio considerados en el capítulo N°4.

En el **Capítulo 8: Conclusiones** se presentan los principales comentarios, limitaciones y conclusiones de la presente investigación; así como las recomendaciones de diseño y futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Marco teórico y antecedentes

El objetivo del presente capítulo es ofrecer un marco teórico y revisión bibliográfica desde el cual comprender el fenómeno en estudio y conocer el estado del arte respecto de esta línea de investigación.

2.1. Marco teórico

El *American Institute of Steel Construction* (AISC) en su *Manual of Steel Construction* AISC (2005b) define tres tipos de conexiones para marcos de acero:

1. **Conexión de momento FR:** "Fully restrained", que corresponde a una conexión que genera un marco rígido puesto que asume que más del 90% del momento es transmitido desde las vigas hacia las columnas. De acuerdo a la norma, no debe existir rotación viga/columna en la zona de conexión. (figura 2.1(a)). El corte se transmite a partir de una placa de corte conectada al alma de la viga.
2. **Conexión de momento PR:** "Partially restrained", que corresponde a una conexión flexible semi rígida (figura 2.1(b)) que debe asegurar transmitir entre el 20% y 90% del momento desde las vigas hacia las columnas. El Manual de la AISC especifica que en el análisis y diseño de este tipo de conexiones deben ser considerados como demanda: capacidad, rigidez y ductilidad asociadas.
3. **Conexión simple de corte:** Este tipo de conexión (figura 2.1(c)) asume que sólo el corte es transmitido desde las vigas hacia las columnas y los extremos de la viga están libres a la rotación, por esto se les conoce con el nombre de conexiones simples. Generalmente no son capaces de transmitir más del 20% del momento pero teóricamente se asume que transmiten cero momento.

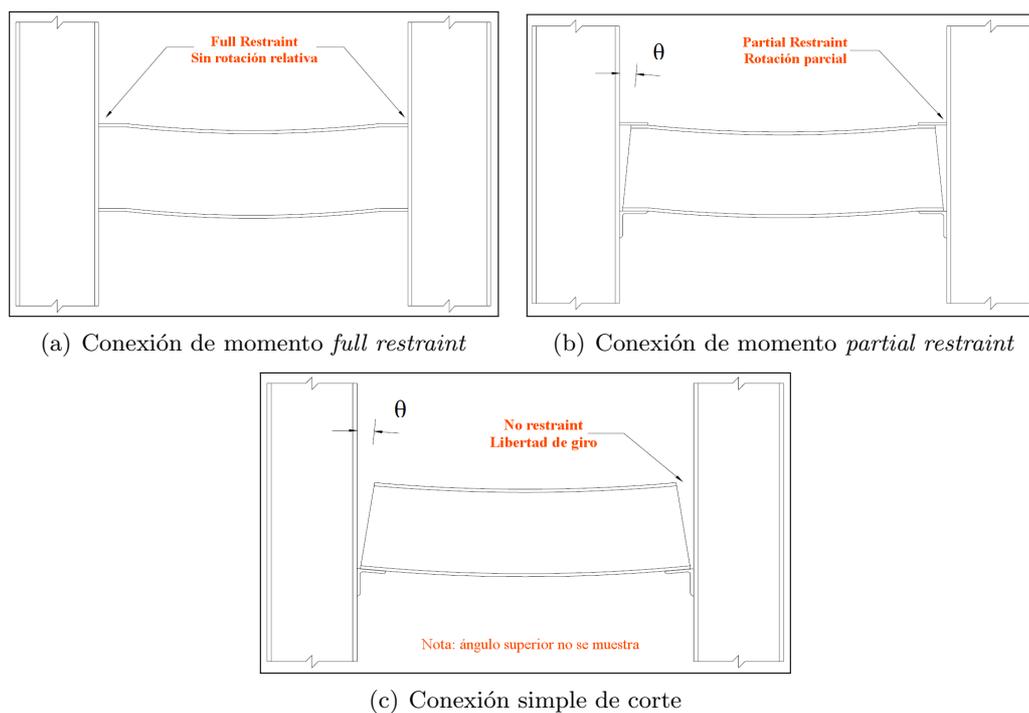


Figura 2.1: Clasificación de conexiones de acero - AISC 2005

2.1.1. Comportamiento de conexiones en marcos

Como se explicó en el capítulo anterior, el comportamiento global de un marco de acero depende directamente de la tipología de cada una de las conexiones viga-columna que se utilice, para lo cual primero es necesario conocer a cabalidad el comportamiento individual de las conexiones. En general, el comportamiento de una conexión viga-columna queda completamente definido a partir de una curva de momento-rotación (M/Θ), donde M representa el momento al cual la conexión es solicitada, y Θ corresponde a la rotación relativa de la conexión (viga v/s columna) ilustrada en la figura 2.2. La curva momento-rotación de una conexión generalmente se obtiene a partir de ensayos experimentales que se contrastan con algún modelo analítico.

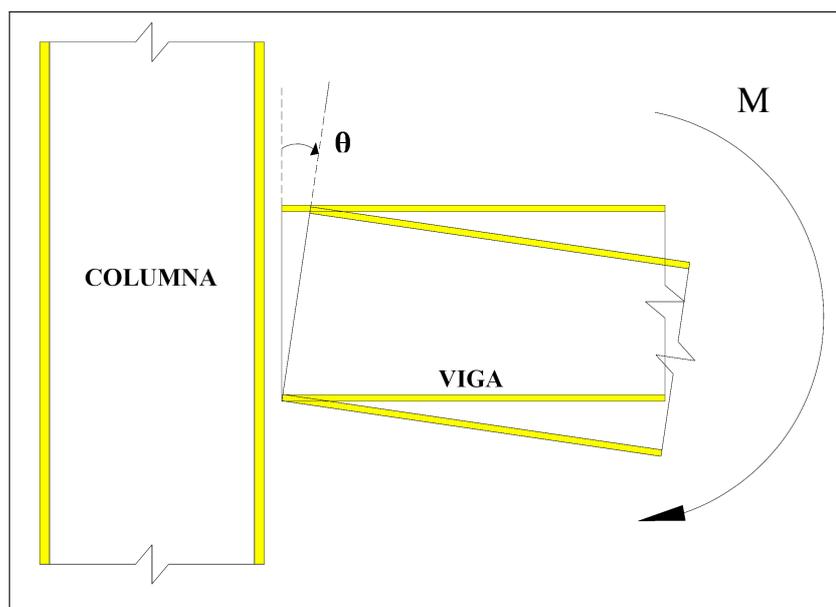


Figura 2.2: Esquema de rotación relativa viga-columna

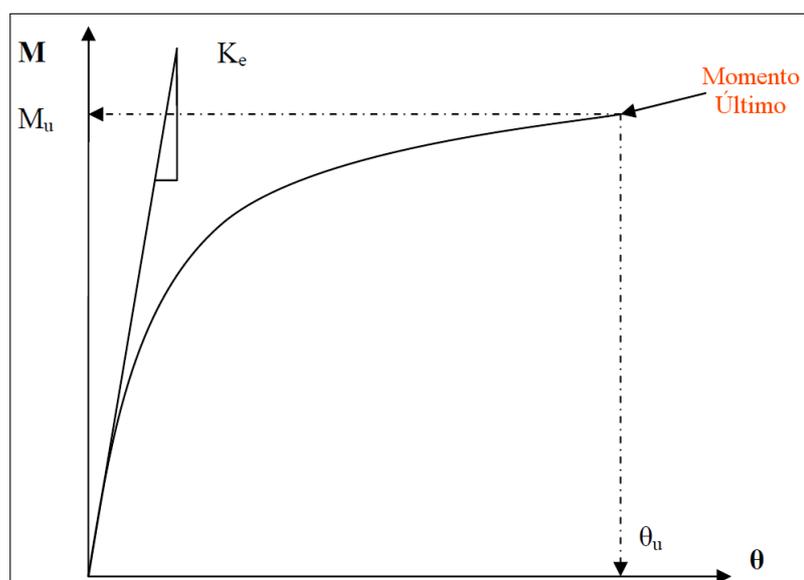


Figura 2.3: Curva típica momento-rotación para carga monotónica. (Swanson, 2002)

Una curva de momento-rotación típica construida a partir de ensayos de carga monotónica se muestra en la Fig. 2.3 La pendiente de la curva tangente al origen corresponde a la rigidez inicial de la conexión: K_e . Se puede observar, a partir de la forma de la curva, que la rigidez decrece a medida que aumenta el momento en la conexión. De esta manera se puede cuantificar la capacidad y ductilidad de cualquier conexión, siendo M_u el momento último capaz de ser traspasado por la conexión desde las vigas hacia las columnas antes de la falla. La flexibilidad de la columna depende de la capacidad de desarrollar deformaciones plásticas antes de la falla, directamente asociado al concepto de ductilidad. θ_u corresponde a la rotación última, asociada a la máxima rotación relativa de la viga cuando ha alcanzado el momento último. Por tanto es una variable que permite cuantificar

la deformación de la conexión, por lo tanto, grandes valores de Θ_u se asocian a grandes ductilidades.

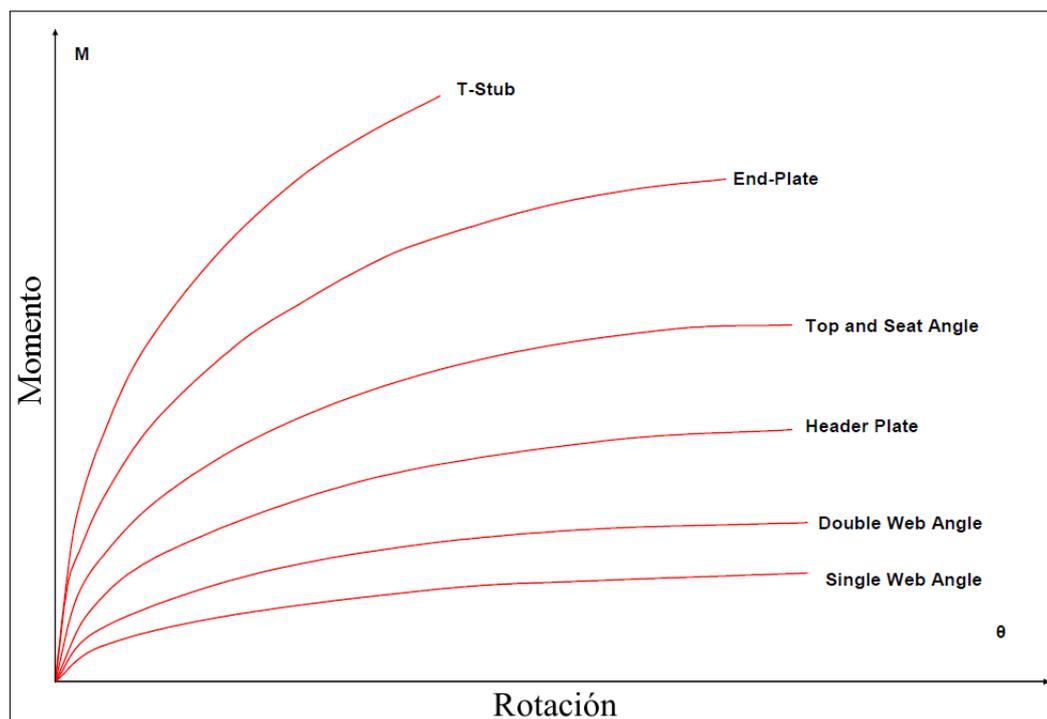


Figura 2.4: Curva típica momento-rotación para carga monotónica

Resulta un buen ejercicio mirar las rigideces de las conexiones desde un punto de vista teórico. Si las conexiones de momento soldadas son capaces de transmitir el 100% del momento desde las vigas hacia las columnas, la pendiente de la curva tangente debiera corresponder al eje-y, vale decir que la rigidez asociada a la conexión es infinita. Simétricamente, para las conexiones de corte simple incapaces de transmitir momento, la pendiente de la curva tangente debiera corresponder al eje-x, vale decir, rigidez cero. Esto último pareciera sensato para tener de cerca los márgenes en los que se mueve el diseño de una estructura de acuerdo a las consideraciones ideales que se haga de cada conexión.

2.1.2. Conexiones flexibles semi rígidas

Esta categoría será de interés pues la conexión DST (*Double Split T*) construida con perfiles T soldados corresponde a esta categoría de la clasificación de conexiones. La Fig.2.4. muestra diversas curvas de momento-rotación para conexiones comunmente utilizadas en marcos de acero. Las curvas se encuentran entre los márgenes que proporciona una completamente rígida y una conexión simple de corte. Se aprecia que la conexión de corte a partir de una placa en el alma de la viga (*single web angle*) transmite muy poco momento por lo cual para diseñar se asume que es completamente apoyada, por tanto no es capaz de transmitir momento. Se puede apreciar que las conexiones a partir de perfiles T-stub y End-plate son capaces de ofrecer grandes rigideces y transmitir momentos mucho mayores; ambas dentro de la categoría flexibles semi - rígidas (*partially*

restrained). Es importante mencionar que cada conexión posee un comportamiento particular por lo cual no se puede generalizar o extrapolar el desempeño de una conexión a otra. Por ejemplo, de acuerdo a la Fig. 2.4 la conexión End-Plate es capaz de ofrecer mayor rotación pero tiene menor capacidad de transmitir momento que la conexión a partir de perfiles T-stub.

Para conocer el comportamiento de una conexión viga-columna en una zona de sismicidad la carga monotónica de los ensayos experimentales no es suficiente puesto que las cargas a las que se verá sometida corresponden a sollicitaciones cíclicas. Para efectos de conocer la respuesta cíclica de la conexión y construir así su curva momento-rotación histerética existen diversos montajes experimentales en los cuales se solicita la conexión o parte de ésta a una serie de ciclos de carga y se captura la rotación de la viga respecto de la columna antes de la falla. El área encerrada por las curvas de histéresis corresponde a la energía que la conexión es capaz de disipar. Una curva típica de respuesta momento-rotación para una conexión parcialmente rígida muestra en la Fig. 2.5 Se aprecia que la pendiente de la tangente para los primeros ciclos corresponde a la rigidez inicial de la conexión, K_e . La rotación y capacidad últimos, Θ_u, M_u , se muestran también en la Fig. 2.5 .

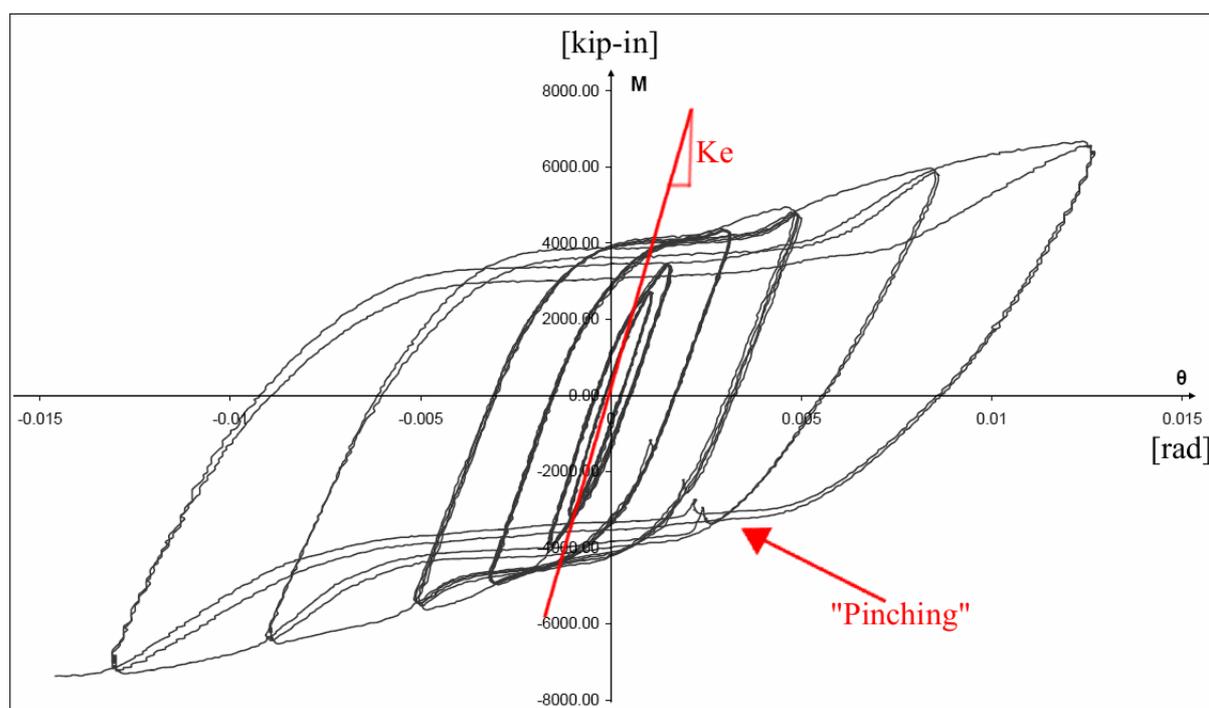


Figura 2.5: Curva típica momento-rotación bajo carga cíclica

La demanda energética de un sismo deberá ser disipada por la estructura. Para esto deberá ser capaz de deformarse plásticamente y es allí donde las conexiones juegan un rol importantísimo. Las conexiones apernadas son capaces de ofrecer la ductilidad necesaria, sin embargo, hay un tópico importante que se debe considerar, que corresponde a cómo aumentan las fuerzas axiales en los pernos a medida que se desarrollan los ciclos de carga, tal como sucederá en un sismo. Cuando aumenta la carga de tracción asociada a los pernos estos son capaces de entrar en fluencia, pero al momento de retornar en el ciclo de carga, las deformaciones plásticas no son completamente

recuperadas generando deformaciones remanentes en la conexión. Esto produce deslizamientos en los pernos, lo cual se traduce en disminución de rigidez. La zona aplanada (*flat*) de la Fig. 2.5 muestra este fenómeno en la respuesta de la conexión. Este aplanamiento de las curvas a medida que se desarrollan los ciclos se conoce con el nombre de "*pinching*" o degradación de la capacidad de la conexión completa. La fluencia de las demás partes de la conexión también contribuyen a desarrollar este fenómeno. El área encerrada por los ciclos de histéresis, que corresponde a la energía disipada va disminuyendo entonces a medida que se aplican los ciclos de carga.

2.1.3. Conexiones con perfiles T-stub

Las conexiones que utilizan perfiles T-stub, como la DST (*Double Split T*) están formadas por dos perfiles T-stub conectando a ambas alas de la viga con el ala de la columna con los cuales se transmite el momento desde la primera hacia la segunda. La conexión completa posee además una(s) placa(s) para transmitir sólo el corte. Durante el proceso de carga cíclico los perfiles T-stub son sometidos a tracción y compresión de forma alternada según la dirección de la fuerza, como se puede observar en la Fig.2.6. De aquí es claro que los pernos que conectan el ala de la columna con el ala de los perfiles T-stub están sometidos alternadamente a carga y descarga. Considerando las recomendaciones del AISC LRFD Manual of Steel Construction, AISC (2005b) los pernos fueron pretensionados, por lo que incluso durante la fase de compresión del experimento éstos permanecen en tracción.

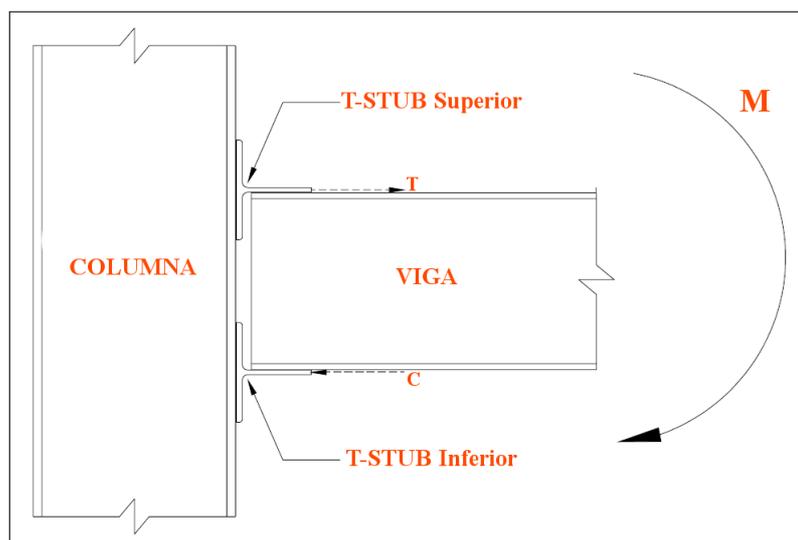


Figura 2.6: Esquema conexión DST

A medida que aumenta el momento en la conexión, aumenta la tracción y compresión en los perfiles T, quedando los pernos sometidos a grandes esfuerzos. Esto genera un levantamiento o *uplift* del ala del perfil T-stub. Este efecto se conoce con el nombre de apalancamiento y se ilustra en la Fig.2.7, donde T es la fuerza de tracción en el perfil T como resultado del momento, B es la fuerza aplicada en el perno y Q la fuerza actuando en el ala, conocida como fuerza de apalancamiento.

Por equilibrio, el esfuerzo de apalancamiento debe ser considerado para los propósitos de diseño y es generalmente ponderado como un porcentaje de la tracción de tensión T .

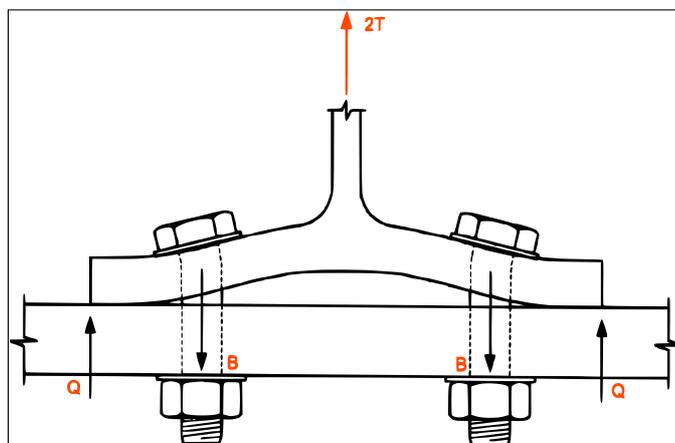


Figura 2.7: Esquema de efecto de apalancamiento del ala del perfil T-stub. Swanson (2002)

Desde el punto de vista del alma del perfil-T, los pernos que lo conectan con las alas de la viga están sometidos a corte y, en función de la ubicación geométrica espacial de los pernos en el alma, pueden aparecer diversos modos de falla o fenómenos mecánicos que deben ser considerados en el desempeño del perfil. Estos fenómenos, al igual que en el comportamiento del ala del perfil, son de mayor interés en la fase de tracción, puesto que en la compresión el alma del perfil entra potencialmente en contacto con el ala, la que oficia de apoyo. Los modos de falla que el protocolo FEMA 350. (2000) y el Manual de la AISC (2005b) identifican corresponden a:

- Corte de los pernos
- Aplastamiento de los orificios
- Bloque de corte
- Rotura del área neta
- Fluencia del área gruesa

Algunos corresponden a estados últimos de diseño y otros a estados de interés de acuerdo a la serviciabilidad debido a su aporte en la deformación total del perfil T. El detalle de cada uno de estos fenómenos, su aporte al desempeño total del perfil y las ecuaciones que los controlan son presentados al comienzo del Cap.4., al momento de definir el criterio de selección de las probetas a ensayar y los modos de falla que controlan cada una de ellas.

La etapa inicial del presente trabajo de tesis comprende una vasta revisión bibliográfica de investigaciones desarrolladas y presentadas a la fecha que guardan relación con el fenómeno que aquí se estudia, considerando alcances teóricos, prácticos y experimentales; con la intención de generar un marco teórico del estudio, un acervo de antecedentes y una guía respecto de la

metodología de investigación teórica y experimental que aquí se desarrolla.

Se presenta a continuación un resumen de las principales investigaciones identificadas en la revisión bibliográfica:

2.2. Girão Coelho et al.

La investigación realizada por Girão Coelho *et al.* (2004) es de carácter experimental. Se presenta todo lo que de allí se puede observar, describir y concluir. Resulta importante para el presente trabajo principalmente porque los 32 perfiles ensayados corresponden a la unión de placas a través de soldadura. Además, la metodología experimental está perfectamente descrita y desarrollada. No obstante, respecto del trabajo que aquí se realiza, presenta diferencias en la geometría de los perfiles, los modos de falla estudiados y la forma de concebir la conexión propiamente tal.

Concepción distinta de la conexión, puesto que la manera de obtener el perfil T que se ensayó, fue a partir de la unión de una columna con una viga que posee una placa en su tramo final (Figura 2.8). Con esa geometría se construyeron las 32 probetas, las cuales fueron sometidas a carga monotónica de tracción hasta la falla, para conocer su rigidez, capacidad de deformación y resistencia al estado último. Los parámetros que gobernaron las distintas geometrías de los ensayos fueron:

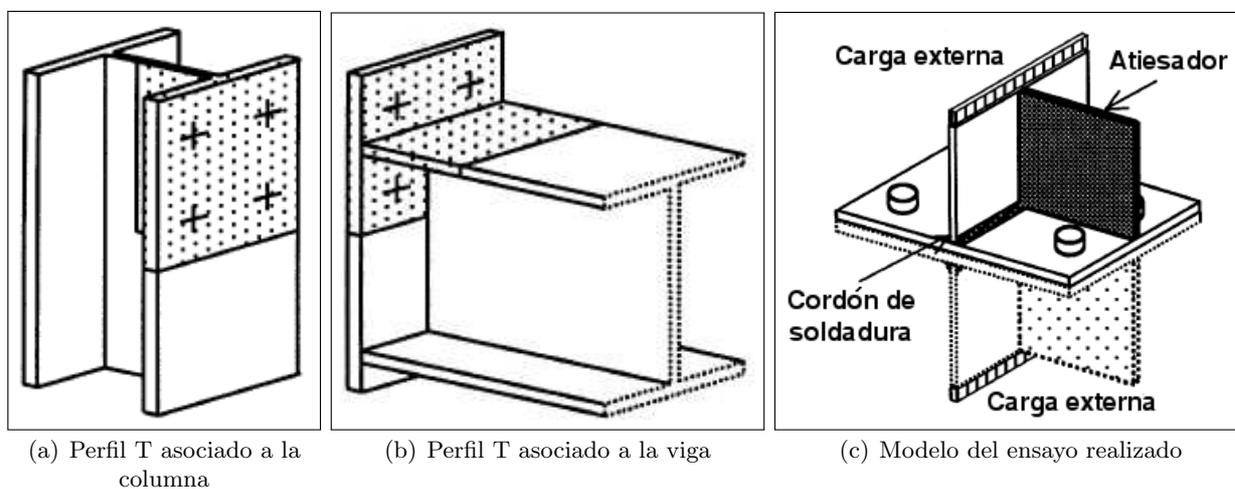


Figura 2.8: Identificación de perfiles y modelo experimental

1. Calidad y diámetro de los pernos
2. Espesor de la garganta de soldadura de filete
3. Grados del acero
4. Atiesadores transversales
5. Dimensiones del perfil
6. Orientación del perfil T

Es claro, a partir de la figura, que los modos de falla potenciales en esta investigación se remiten sólo a la zona de interacción viga/columna: Agrietamiento en zona de soldadura y tracción de los pernos. Esto porque no se considera la zona de pernos trabajando a corte que típicamente conecta el ala de la viga con el alma del perfil T. Según esta experiencia, se aprecian dos tipologías de perfiles T al momento de ser ensayados.(Figura 2.8): El que concierne a la viga que presenta un atiesador transversal correspondiente al aporte del alma de la mimsa; y por otra parte, el de la columna que genera un perfil T sin atiesador. De acuerdo al presente trabajo y a la tipología de la conexión DST se concentrará el estudio en el perfil aislado sin atiesador.

Como es práctica habitual en este tipo de estudios experimentales, se realizaron ensayos de probetas del material base y pernos utilizados; con la intención de conocer las curvas de respuesta reales de los materiales utilizados. Los aceros base utilizados para construir el perfil T - según homologación- correspondieron a: *ASTM: A572 Gr50* y *A514 - 517*. Por su parte los pernos utilizados fueron:*ASTM A325 y A490*. Respecto de la soldadura utilizada, esta correspondió a: *AWS 5,5: E9018-G H4* para el acero *ASTM: A572 Gr50*; y *AWS A5,1: E6018* para el acero *A514 - 517*.

La carga monotónica de tracción fue aplicada a través de una máquina de carga universal del tipo *Schenck*, con una capacidad máxima de $600 [kN]$ y un desplazamiento de pistón de $\pm 125 [mm]$. La carga fue aplicada a través de un par de mordazas que sujetaban los perfiles por el lado del alma (Figura 2.9). Esta fue controlada por desplazamiento con una velocidad de $0,01[mm/s]$ y aplicada hasta alcanzar la falla. Tal como se mencionó anteriormente, tan sólo dos modos de falla fueron obtenidos:

1. Fractura de los pernos a tracción
2. Agrietamiento del ala cerca del cordón de soldadura.

Antes del montaje de las probetas, se midió la geometría real de cada una de ellas para así poder contrastar con la deformación post ensayo. Se alinearon las probetas respecto del eje central de la máquina de carga. La pretensión de los pernos se realizó con una llave de torque, alcanzando así el 70% de la tensión de fluencia asociada al material. Respecto de la adquisición de datos, se utilizó un par de Linear Variable Displacement Transducers (LVDT's) simétricamente dispuestos a cada lado del perfil ensayado con los cuales se pudo medir la deformación del ala o (levantamiento). Respectivamente la deformación asociada a los pernos se midió a partir de la utilización de sensores de desplazamientos con forma de C.(Figura 2.9). Además, en algunos de los experimentos se utilizó Strain Gauges al interior de los pernos. En las alas, para medir la tensión asociada, se utilizó Strain Gauges del tipo TML. La aplicación de la carga monotónica controlada por desplazamiento obedeció al siguiente protocolo: se cargó la probeta hasta alcanzar los $2/3$ de F_{RD} , lo que corresponde nominalmente al límite elástico. F_{RD} corresponde a la capacidad última de la probeta, la cual fue estimada utilizando el Eurocode 3. Luego se descargó la probeta completamente y se volvió a cargar hasta el límite elástico, pero esta vez se detuvo el ensayo allí durante 3 minutos con la intención de analizar la fuerza cuasi-estática. Posteriormente, se continuó cargando a intervalos de $3,6[mm]$ de desplazamiento hasta alcanzar uno de los modos de

falla.

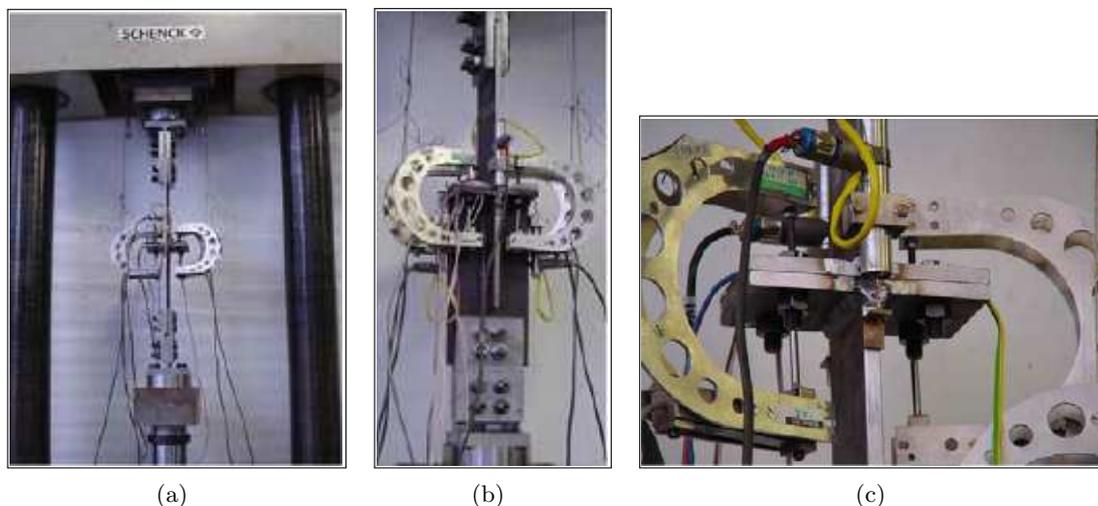


Figura 2.9: Instalación Experimental utilizada por Girão Coelho et al.

Algunas de las principales conclusiones obtenidas por los autores fueron:

1. El incremento del espesor de la garganta de soldadura entrega mayor rigidez y resistencia pero hace decrecer la capacidad de deformación de la conexión. Mismo efecto se produce con la variación del ancho de la T-stub.
2. Si la falla corresponde a la fractura por tracción de los pernos, la utilización de pernos más largos genera una mayor capacidad de deformación
3. Diámetros mayores de pernos, aumentan la capacidad de los mismos; de esta manera se mejora las tres características principales: resistencia, rigidez y ductilidad.
4. Metal base y pernos de mayor resistencia aumentan la capacidad de carga pero disminuyen la ductilidad de la conexión.
5. Respecto de la soldadura, será menester cumplir con los requerimientos mínimos exigidos para elegir el tipo de electrodo a utilizar, además de certificar la ejecución de la misma. Con esto se evitará una fisuración prematura en la Heat Affected Zone (HAZ).

2.3. Swanson et al.

La investigación realizada por Swanson & Leon (2001) es tal vez la más completa y específica respecto del estudio del comportamiento de la conexión DST. Posiblemente por estar bajo el patrocinio y encargo de la Federal Emergency Management Association (FEMA), al igual que Leon; quien lo antecediera en el estudio de diversos tipos de conexiones apernadas generando la primera precalificación de este tipo después del terremoto de Northdrige. Toda la investigación realizada fue presentada paulatinamente (Swanson & Leon, 2000, 2001; Swanson, 2002), esta se basó en el estudio empírico de la conexión DST y de los perfiles T-stub aislados; todos de confección laminada. La casi inexistencia de estudios anteriores bajo sollicitaciones cíclicas, requirió la realización de ensayos bajo carga monotónica y cíclica, para poder así validar los estudios existentes bajo carga monotónica, además de relacionar el comportamiento bajo ambas sollicitaciones, que como se verá más adelante

es necesario e interesante.

El principal objetivo fue desarrollar una guía de diseño para conexiones con perfiles T-stub, concentrado principalmente en conexiones del tipo FS (*Full Strength o resistencia completa*), que presenten comportamiento dúctil y con rigideces cercanas pero no necesariamente del tipo FR (*Full Restraint o completamente rígida*) (Figura 2.10).

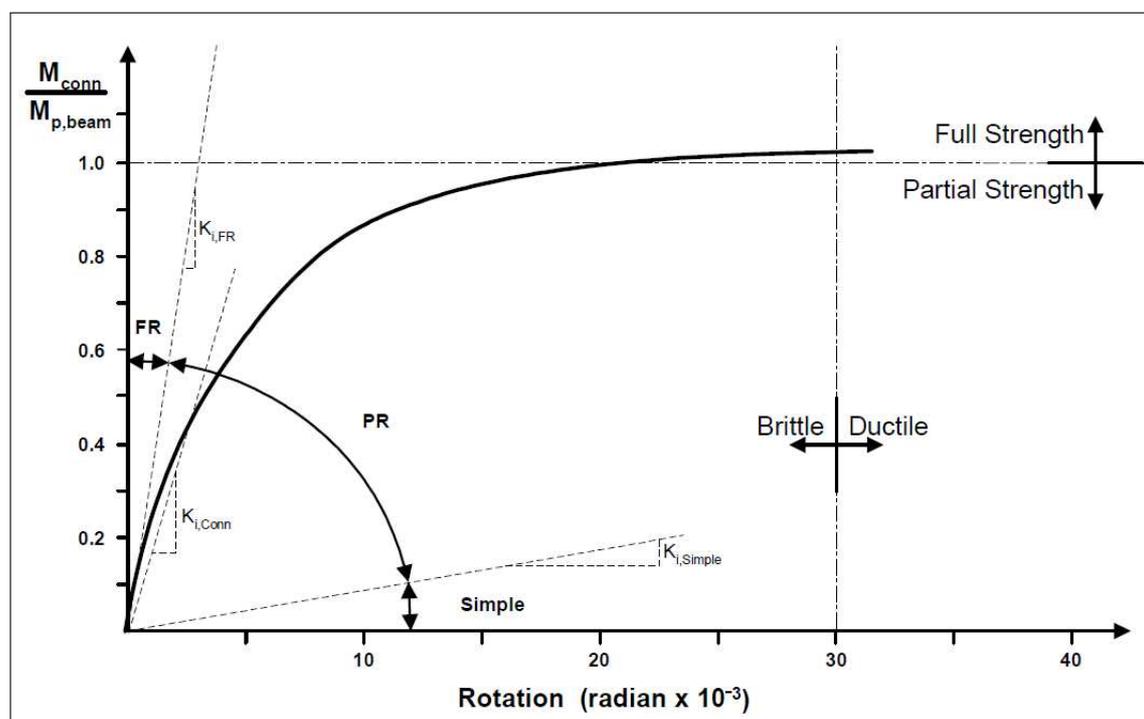
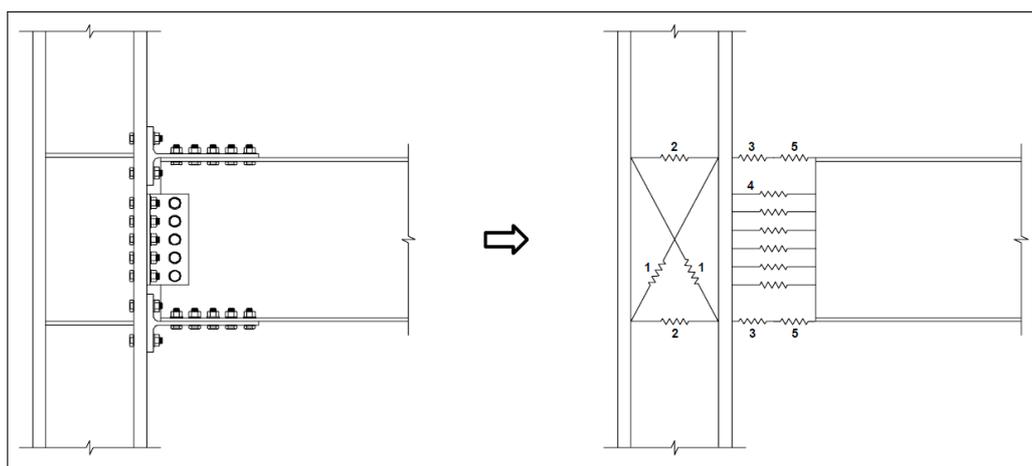
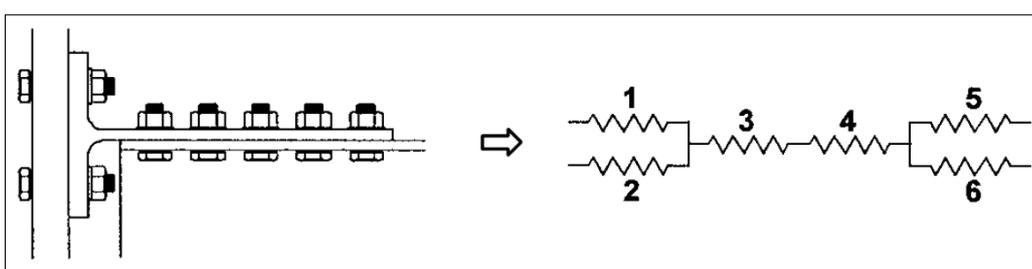


Figura 2.10: Curva típica momento - rotación. Swanson y Leon (2000)

La fenomenología del comportamiento de las conexiones permite conocer la conducta de las conexiones a partir de tres métodos: experimental, elementos finitos avanzados y ajuste de curvas con datos existentes. Sin embargo, ninguno es capaz por si solo de prever de manera segura el comportamiento de la conexión. La otra alternativa es analítica, para la cual se necesita estudiar y comprender muy bien el fenómeno y las distintas variables que interactúan. En particular, para el caso de un perfil T-stub con un claro comportamiento no-lineal, el diseño no es un proceso simple. El que a la fecha presentaba un modelo analítico era el Eurocode (1993), el cual está basado en la modelación de las distintas componentes del perfil T-stub a partir de resortes de carácter lineal y no-lineal, dependiendo del caso, los cuales simulan las rigideces. Según la interacción de las distintas partes, se considera un trabajo en serie o paralelo de los distintos resortes. Con todo esto se construye una curva momento-rotación que describe el comportamiento. A partir de esta propuesta, Swanson y Leon (Swanson & Leon, 2000) utilizan la metodología para desarrollar un modelo, el cual se calibra luego con la etapa experimental. El modelo de resortes utilizado es el que se presenta en la Figura 2.11.



(a) Modelo de resortes conexión DST. Swanson y Leon (2000)



(b) Modelo de resortes perfil T-stub aislado. Swanson y Leon (2000)

Figura 2.11: Modelo de Resortes. Swanson y Leon (2000)

A partir del modelo propuesto y su calibración con los datos de experiencias pasadas existentes en la bibliografía revisada; se diseñó la geometría y dimensiones de las probetas que posteriormente se ensayarían.(Figura 2.12). Se construyeron 48 probetas de perfiles T-stub laminados que fueron ensayados aisladamente y 6 montajes a escala real de conexiones DST viga-columna. Estos últimos fueron muy importantes para comparar los resultados con los perfiles aislados y posteriormente para la calibración de los modelos propuestos.

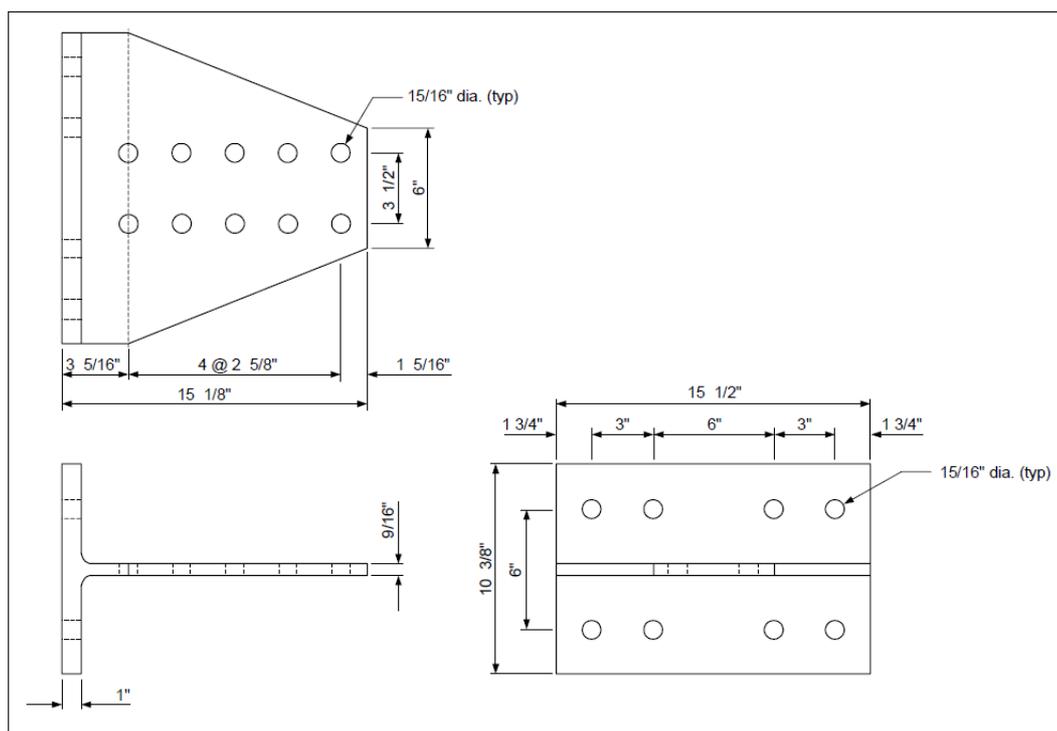


Figura 2.12: Geometría y dimensiones de probetas ensayadas. Swanson y Leon (2000)

Respecto de las probetas construidas, estas se dividieron en 10 grupos, cada uno de los cuales incorporaba alguno de los parámetros variables considerados para el estudio: espaciamiento, grado y diámetro de los pernos, ancho de la probeta, entre otros. Con esto se buscó generar distintos modos de falla, los cuales están principalmente influenciados por el *prying effect* (apalancamiento) y por el aplastamiento del alma producida por los pernos al corte. El acero utilizado para las probetas fue *ASTM A572 Gr50*, y para los pernos *ASTM A325* y *A490*; Con diámetros de 7/8" y 1".

Tabla 2.1: Protocolo de ciclos de carga. FEMA 350 (2000)

Serie de Carga	# ciclos	θ [rad]
1	6	0.00375
2	6	0.005
3	6	0.0075
4	4	0.01
5	2	0.015
6	2	0.02
7	2	0.03
8	2	0.04

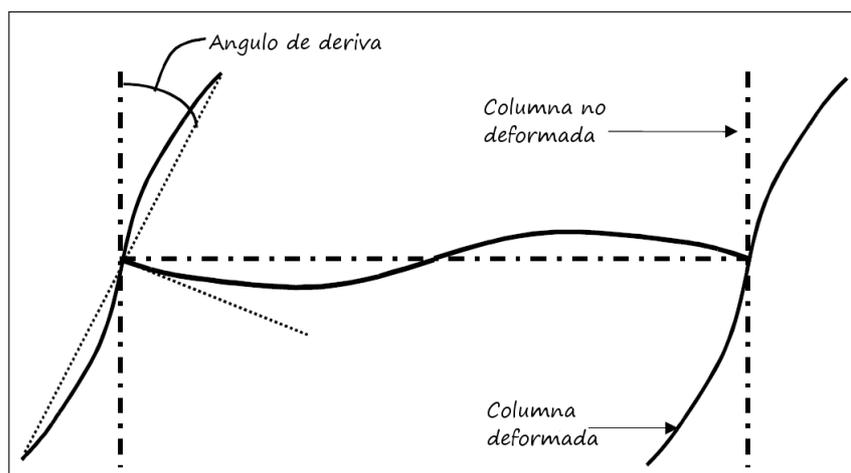


Figura 2.13: Esquema del ángulo de deriva

El protocolo de carga para los ensayos cíclicos corresponde al prescrito por primera vez en FEMA 267A. (1997). En el documento FEMA 350. (2000) se puede encontrar la actual serie de carga que se debe utilizar en los ensayos que busquen precalificar conexiones que aún no han sido estudiadas.(Figura 2.1). Este consiste, en alcanzar a través de un procedimiento específico, un ángulo de deriva en el punto de conexión viga-columna,(Figura 2.13). Este se aplica a incrementos discretos de la deriva de forma angular. Si los ensayos consideran este momento como un par de cargas en tracción y compresión, este protocolo se cumple controlando la deformación axial. Debido a la diferencia de rigidez de los perfiles en tracción y compresión éstos se cargaron en tracción hasta alcanzar el nivel exigido de desplazamiento axial y se grabó el nivel de carga aplicada. Posteriormente, se descargó la probeta y se cargó en compresión hasta alcanzar la mitad de carga que para la tracción. Así sucesivamente con los demás ciclos de carga según el protocolo especificado. Los ensayos fueron realizados utilizando un marco de ensayo exclusivamente construido para esta investigación, compuesto de cuatro actuadores que aplican la carga a partir de un par de vigas robustas de distribución(Figura 2.14), permitiendo alcanzar cargas de 3100 [kN]. Las alas de los perfiles aislados eran apernadas a una columna rígida del tipo W14x257, la que a su vez estaba sujeta a la viga de distribución inferior. Para la adquisición de datos se utilizaron 5 LVDT's, una serie de strain gauges y potenciómetros (Figura 2.15); con estos se pudo medir:

1. (A) LVDT : Deslizamiento entre alma del perfil y ala de la viga.
2. (B) LVDT : Levantamiento del ala respecto de la base de la columna.
3. (C) LVDT : Levantamiento del ala del perfil T a la altura de los pernos a tensión.
4. (D) LVDT : Alargamiento axial del alma del perfil.
5. (E) LVDT : Alargamiento total del perfil.
6. (G) Strain gauges para medir la tensión de los pernos considerado el *prying effect*.
7. (-) Strain gauges para medir la tensión de diversos puntos del perfil.

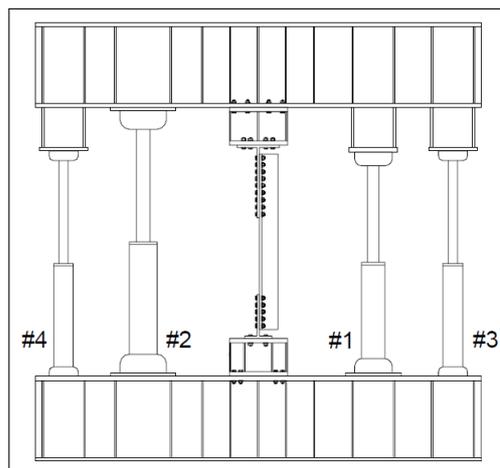


Figura 2.14: Esquema del montaje experimental. Swanson y Leon (2000)

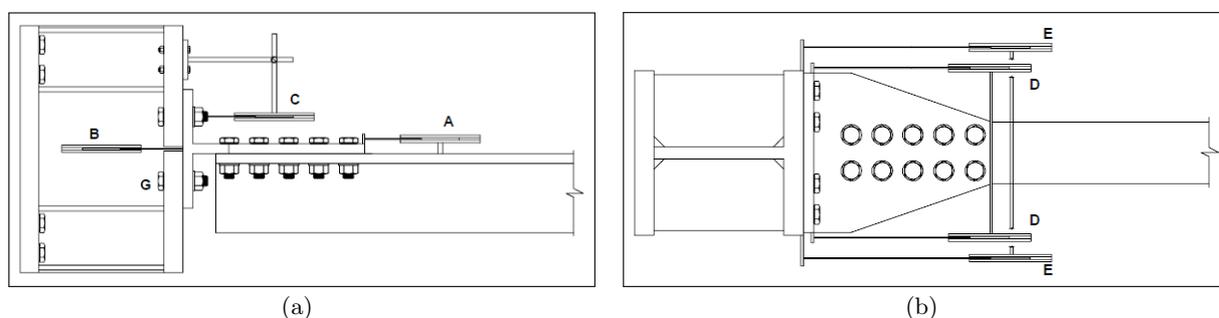


Figura 2.15: Detalle de la instrumentación utilizada. Swanson y Leon (2000)

Es importante presentar uno de los resultados obtenidos antes de dar paso a las conclusiones y propuestas de los autores. De los 48 ensayos, 4 fueron realizados bajo carga monotónica para luego poder compararlos con ensayos cíclicos de probetas gemelas. Como se puede observar en la Figura 2.16, que muestra las curvas de carga de ambos ensayos, el ensayo monotónico es la envolvente del ensayo cíclico. Esto habla de la buena calibración y montaje de la adquisición de datos pero por sobre eso es sumamente valioso observar que los perfiles sometidos a carga monotónica tienen el mismo comportamiento que los sometidos a carga cíclica. Se valida así la utilización de ensayos monotónicos para estudiar este tipo de conexiones.

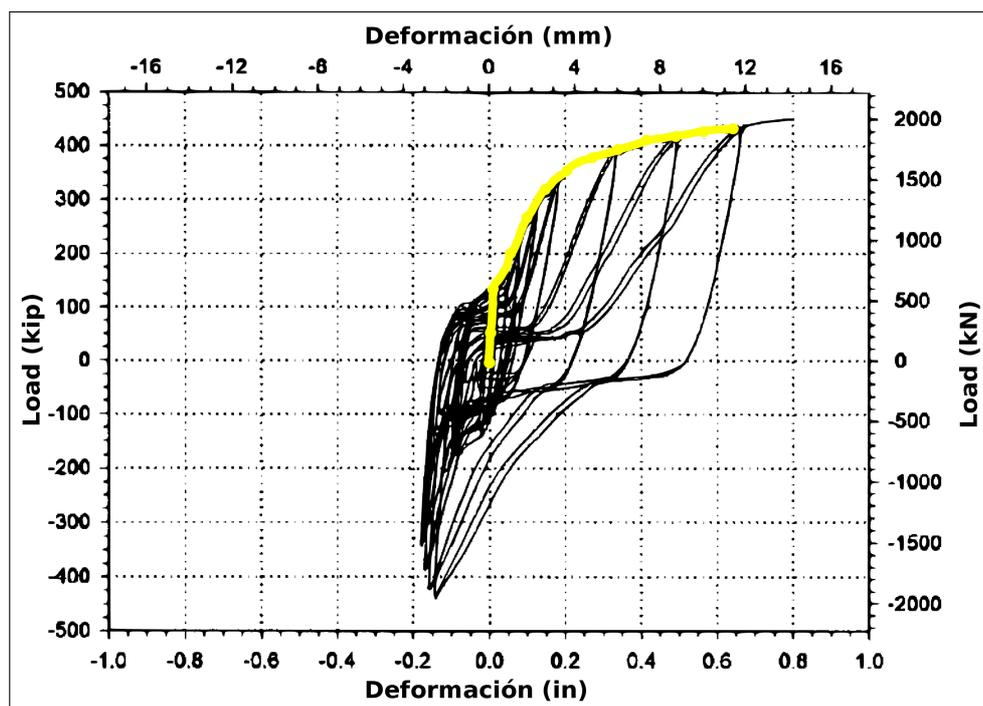
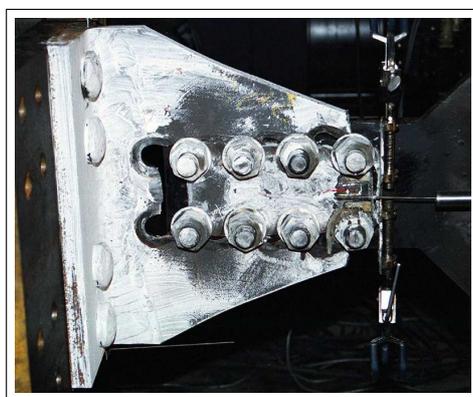


Figura 2.16: Curva de carga monotónica v/s carga cíclica. Swanson y Leon (2000)

Se presenta a continuación una secuencia de figuras de los experimentos realizados, con la intención de mostrar cada uno de los modos de fallas, considerando los detalles más importantes:



(a) Bloque de corte en el alma - Probeta TA-26



(b) Fractura del área neta - Probeta TA-01

Figura 2.17: Fotografías de probetas post ensayo. Swanson y Leon (2000)

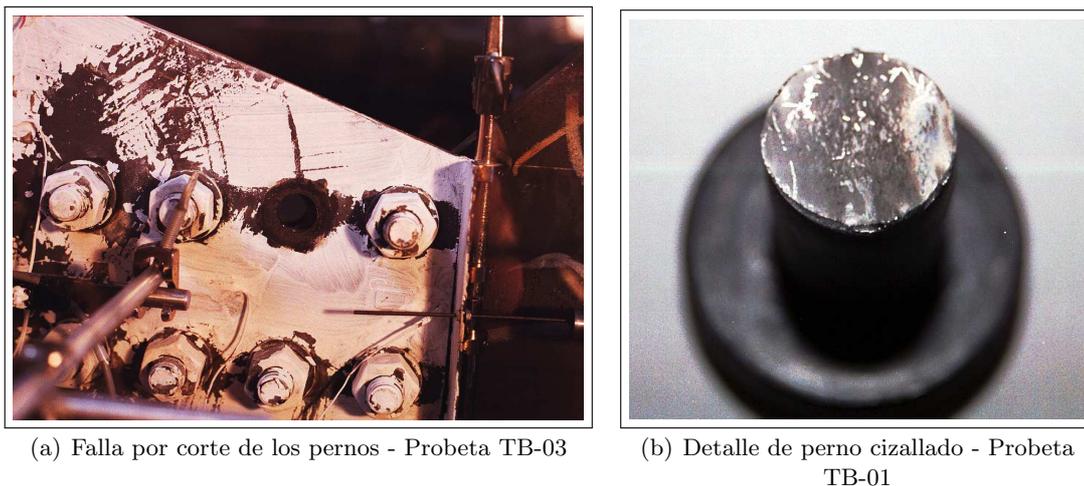


Figura 2.18: Fotografías de probetas post ensayo. Swanson y Leon (2000)

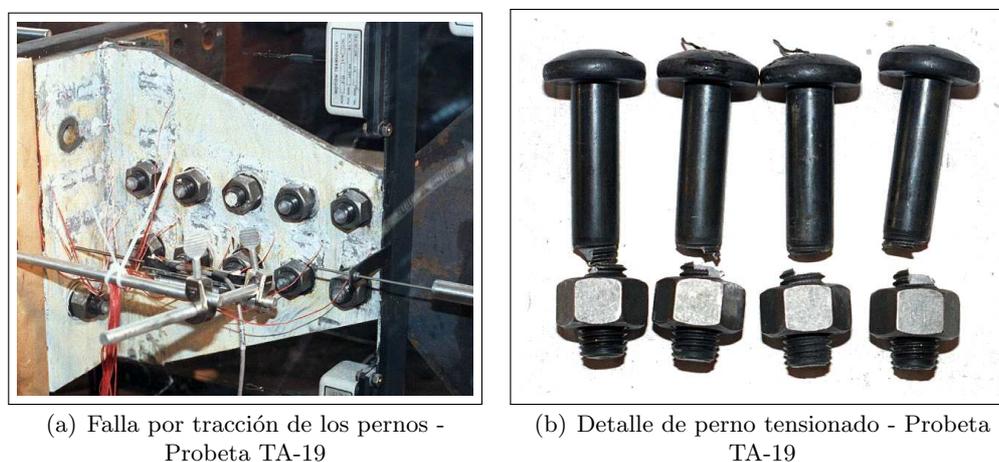


Figura 2.19: Fotografías de probetas post ensayo. Swanson y Leon (2000)

Finalmente, y considerando los 6 ensayos a escala real desarrollados, los cuales sirvieron para validar el comportamiento y modos de falla de los perfiles aislados, los autores concluyen:

1. Los modos de falla obtenidos en los ensayos a escala real son iguales a los obtenidos en los perfiles aislados, sin embargo en el modelo a escala real se desarrollaban mayores deformaciones antes de la falla. Por lo cual los ensayos aislados son una suerte de estimación por el lado seguro del comportamiento.
2. De acuerdo a la deformación global del perfil, las partes que más se deforman, en orden decreciente son: alas, pernos a tensión, alma y finalmente el deslizamiento del alma respecto de la viga.
3. Los mecanismos que más energía disipan son: fluencia de las alas producto del apalancamiento y deslizamiento entre alma del perfil y la viga.
4. Aumentando el espesor de las alas, se aumente considerablemente la rigidez del perfil y

se disminuyen así las tensiones en los pernos. En consecuencia disminuye radicalmente la ductilidad.

5. La capacidad del alma puede incrementarse con un aumento de la separación entre las filas de pernos al corte, con esto se reduce el alargamiento del alma y se aumenta la sección efectiva para el área neta de corte (Sección de Whitmore).
6. Los modelos LRFD - 1999 existentes, proporcionan una adecuada predicción para los esfuerzos de los componentes de los perfiles T-Stub. La predicción para las alas y los pernos en tracción es levemente conservadora. Respecto de los modos de falla de la sección neta y corte de los pernos la predicción es no conservadora. En conclusión, las actuales ecuaciones no consideran factores consistentes con la realidad, por lo cual no debieran ser usadas para estimar el comportamiento último para los diferentes modos de falla.

2.4. Piluso et al.

Esta investigación es de carácter teórico (Piluso *et al.*, 2001a) - experimental (Piluso *et al.*, 2001b). Se estudió el comportamiento de perfiles T-stub soldados, específicamente la respuesta de las alas de los perfiles.

El interés de los investigadores está centrado, al igual que en el trabajo desarrollado por Girão Coelho *et al.* (2004), en estudiar la conexión viga-columna a partir de perfiles T-stub, donde ala y alma corresponden al ala de la columna y ala de la viga respectivamente. Por lo tanto no es un estudio explícito de conexiones DST. Es de interés para la presente investigación por tratarse de ensayos de perfiles soldados y porque el comportamiento del ala es similar, al ser un perfil T-stub. Considerando la relevancia del efecto de apalancamiento en el comportamiento del ala del perfil, se propuso un modelo teórico de la respuesta plástica del ala. (Figura 2.20).

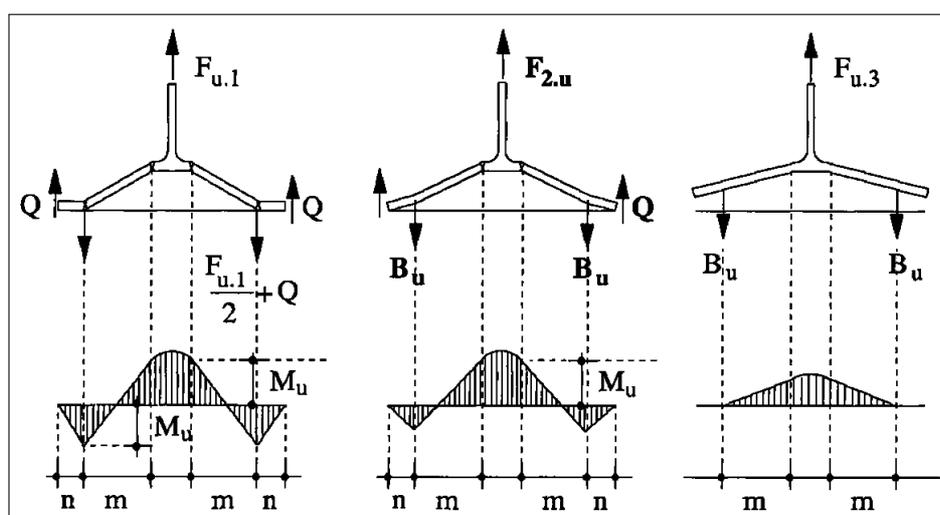


Figura 2.20: Modelos teóricos de falla. Piluso et al. 2001

El modelo presentado está basado en las indicaciones existentes en el Eurocode (1993), y a partir de la posibilidad de desarrollar rótulas plásticas en el ala, se presentaron 3 mecanismos de colapso:

1. Fluencia del ala
2. Fluencia del ala y fractura de los pernos
3. Fractura de los pernos

Este modelo teórico básicamente está construido a partir de la transformación de una curva típica de respuesta real del acero a una de rotación. A partir de esto es más claro trabajar con los momentos existentes en el material, en este caso, los existentes en el ala del perfil. Luego se realiza un diagrama de fuerzas unidimensional del perfil T-stub, considerando las alas como una viga *cantilever* pero con inercias reales. En éste se aprecian tres componentes importantes para el equilibrio: la fuerza aplicada axialmente en el alma del perfil, la fuerza resistente de los pernos y el momento que genera el apalancamiento. Este último modelado como un par de fuerzas situadas en los extremos de las alas. Teniendo entonces toda la geometría del perfil y los esfuerzos que en él actúan se determina la sollicitación real para cada uno de sus elementos dependiendo del nivel de carga axial y de la respuesta real no lineal del acero. Discretizando por tramos en la curva de respuesta, según la carga aplicada, se obtiene un parámetro que relaciona el esfuerzo axial de los pernos y la flexión existente en las alas. Es con este parámetro (β_u) entonces que se determina qué tipo de mecanismo de falla está asociado al perfil T-stub. Conocido esto se puede calcular la capacidad y deformación al momento del colapso.

La segunda parte de la investigación corresponde a la etapa experimental que buscaba la aplicación del modelo teórico planteado, así como su calibración y posterior validación. Tal como en las investigaciones antes mencionadas, se ensayó una serie de 12 probetas de perfiles T-stub en las cuales se variaba la mayoría de los parámetros geométricos que controlan el comportamiento para posteriormente poder comparar las respuestas. Es interesante apreciar que los perfiles corresponden a modelos simplificados en tanto poseen sólo 2 pernos a tensión, uno por cada ala dispuestos simétricamente respecto del eje del alma. El acero base de los perfiles es del tipo *A529 Gr50* y los pernos utilizados son de alta resistencia del tipo *A325* y *A490*.(Figura 2.21). Los ensayos realizados son de carácter monotónico, la aplicación de la carga fue controlada por desplazamiento y utilizando una máquina del tipo *Schenk Hydropuls S56* de capacidad máxima $630kN$ y una capacidad de pistón de $\pm 125mm$. La carga se aplicó progresivamente hasta alcanzar un modo de falla. Cabe mencionar que las probetas fueron diseñadas para tentar la aparición de los dos primeros modos de falla enumerados puesto que la fractura por tracción de los pernos es una falla frágil y no resulta interesante desde el punto de vista del diseño estructural. Tal como se mencionó, una de las partes importantes para estimar el modo y capacidad de falla es conocer el comportamiento real del acero que se utilizará; para esto se realizaron ensayos de probetas laminares según el protocolo RILEM (1990).(Figura 2.22).

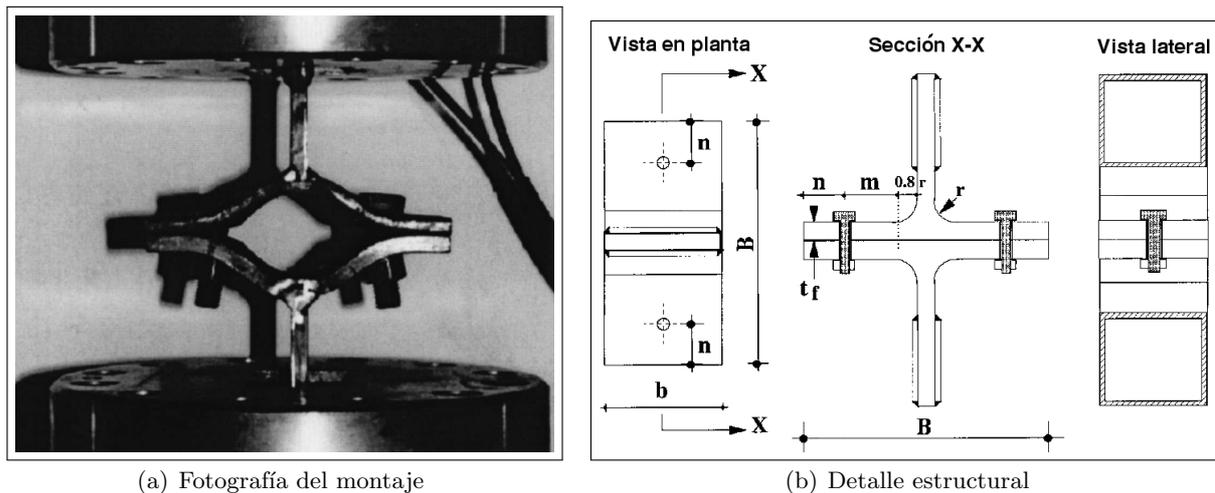


Figura 2.21: Detalle de los perfiles y montaje experimental. Piluso et al. 2001

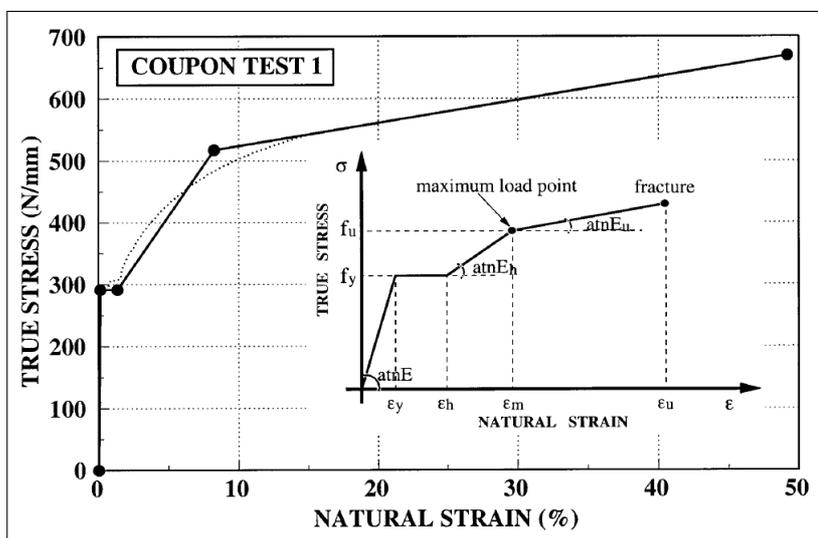


Figura 2.22: Curva de respuesta real v/s curva de respuesta idealizada. Piluso et al. 2001

Los ensayos ratificaron la ubicación de las rótulas plásticas en el ala: en la intersección ala-alma, en la línea de los pernos a tensión o ambas al mismo tiempo. Se observó también, producto del efecto 3D de la placa, que se generaba una concentración de tensiones en la intersección ala-alma que generaba un agrietamiento del material cerca de la zona de soldadura, y que a medida que se aumentaba la carga axial éste se propagaba hacia los ejes de las alas. Respecto del efecto de apalancamiento se observó que el supuesto de modelarlo como un par de fuerzas concentradas en los extremos de las alas no es correcto, ya que éste se propaga a lo largo de toda la zona de contacto de los T-stub ensayados, sin embargo es una buena aproximación para el segundo modo de falla. Se observó también el alto compromiso de los pernos a tracción con la flexión existente en el ala producto del apalancamiento (Figura 2.23).

Respecto de las conclusiones realizadas por los autores:



Figura 2.23: Fotografía del apalancamiento del perfil soldado - Probeta 12. Piluso et al. 2001

1. La comparación entre el modelo teórico presentado y los resultados empíricos obtenidos es satisfactoria, con buen nivel de certeza; como consecuencia, constituye la validación del modelo teórico propuesto.
2. Los resultados de ambas partes ratifican la importancia de las tipologías de colapso que comprometen la fluencia del ala, en particular el modo de falla 1, que proporciona tremenda ductilidad.
3. Ha quedado la evidencia empírica de que la resistencia última a la fractura de un perfil T-stub es mucho mayor que la resistencia plástica al momento de desarrollarse las rótulas plásticas, esto producto del efecto de endurecimiento del material por deformación (*strain hardening*)

2.5. Herrera et al.

Este estudio es de suma importancia para la presente investigación. Principalmente por haber sido desarrollado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile a cargo del mismo tutor que dirige este trabajo, Herrera *et al.* (2009). Por tanto es una suerte de antesala de esta investigación en la cual se ensayan probetas de perfiles T-stub de similares características y propiedades de los materiales; con la gran diferencia que esta vez están sometidos a cargas cíclicas. Sin embargo, se pueden comparar directamente los resultados, lo que como ya se mencionó es de sumo valor para este proceso.

Este trabajo fue principalmente de carácter experimental. Se construyeron 11 tipologías, con 2 probetas gemelas por cada una, por tanto se realizaron 22 ensayos de perfiles T-stub. Fueron sometidas a carga monótonica de tracción axial de manera gradual hasta la falla. Las dimensiones y características geométricas se aprecian en la figura 2.25. Es interesante la construcción de 2 probetas que presentaba los pernos en tracción desalineados con la intención de conocer la respuesta de estos

bajo una condición de escalonamiento. (Tabla 2.2- y Figura 2.24). Las probetas fueron fabricadas con Acero *ASTMA36*, se utilizaron pernos *A325* y el electrodo de la soldadura de filete *ER-70S-6*. Tal como en las investigaciones pasadas, se realizaron ensayos sobre probetas laminares para conocer las propiedades reales del material base, para esto se promediaron varios ensayos que consideraban las probetas en ambos sentidos de la laminación de fábrica.

Tabla 2.2: Configuración de los perfiles T-stub. Herrera et al. 2009

Probeta	Espesor ala [mm]	Espesor alma [mm]	Relación ala/alma	d = distancia entre pernos a tracción [mm]
TSD140	14	8	1.75	70
TSD150	14	8	1.75	75
TSD160	14	8	1.75	80
TSD170	14	8	1.75	85
TSD180	14	8	1.75	90
TSE8	12	4	3.00	75
TSE10	12	5	2.40	75
TSE14	14	8	1.75	75
TSE16	12	8	1.50	75
TSD D1	14	8	1.75	70-90
TSD D2	14	8	1.75	70-90

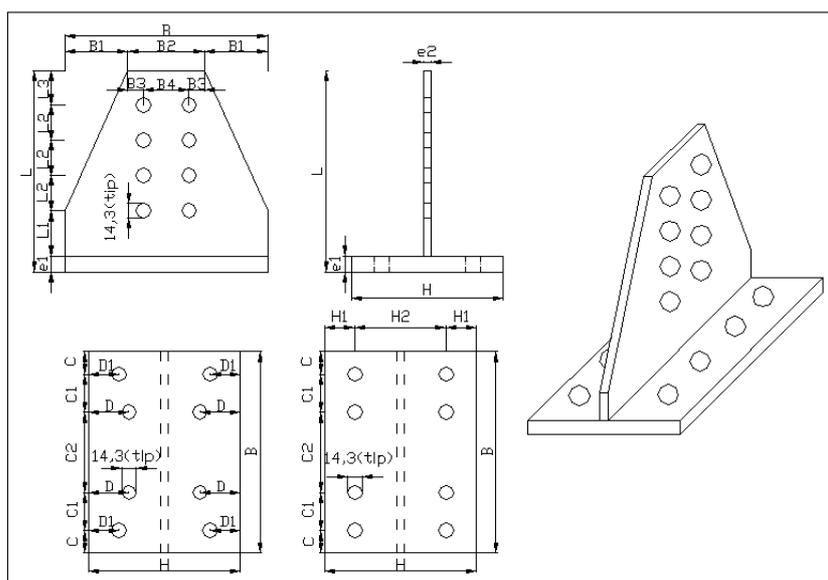
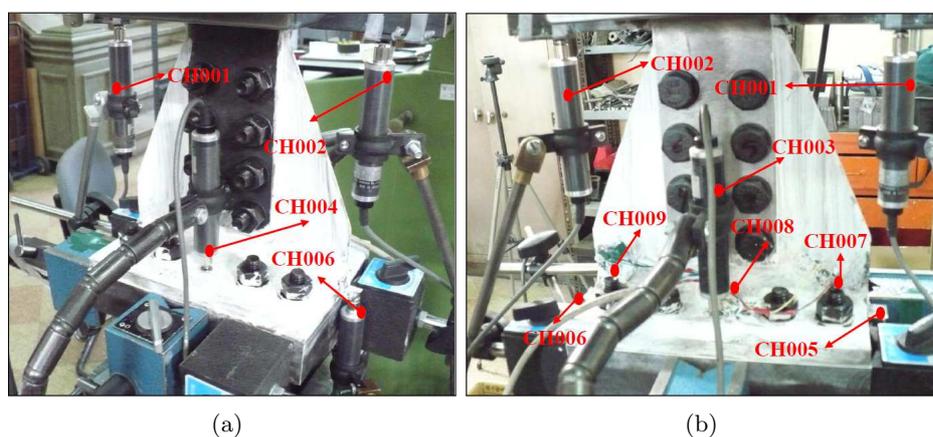


Figura 2.24: Dimensiones de los perfiles T-stub. Herrera et al. 2009

Los ensayos experimentales se realizaron bajo un control de carga aplicada por medio de una máquina universal de capacidad $600kN$. Para la adquisición de datos se utilizaron strain gauges para medir tensiones en el alma de la T y LVDT's para medir la deformación total, el levantamiento del ala en el centro del perfil y en la línea de los pernos; además de sensores de presión para medir la carga total aplicada. (Figura 2.25). Como ya se dijo, los ensayos fueron desarrollados utilizando control de carga, esto por las limitaciones de la máquina utilizada.



Instrumento	Canal asignado
Celda de Carga	CH000
CDP-10 Derecha	CH001
CDP-10 Izquierda	CH002
CDP-5 Al frente	CH003
CDP-5 Atrás	CH004
CDP-5 Derecha	CH005
CDP-5 Izquierda	CH006
Strain Gauge Derecha	CH007
Strain Gauge Central	CH008
Strain Gauge Izquierda	CH009

(c)

Figura 2.25: Configuración experimental y detalle de adquisición de datos. Herrera et al. 2009

Las conclusiones presentadas por los autores son las siguientes:

1. La fractura por tensión de los pernos fue el modo de falla de la mayoría de las probetas. Es de suma importancia entonces el efecto de apalancamiento que genera un aumento por flexión en la sollicitación de los pernos.
2. La capacidad última de los perfiles T-stub fue mayor que la prevista por las recomendaciones de diseño (AISC, 2005a).
3. Para las probetas con espesores de almas más delgados, el modo de falla observado no coincide con el previsto en las especificaciones de diseño.

Es muy importante mencionar que el trabajo descrito estuvo complementado analíticamente por la investigación realizada por Herrera *et al.* (2008), la cual contempló un modelo de elementos finitos en 3D utilizando el software *ANSYS*. Este trabajo no será detallado en este capítulo de

antecedentes puesto que en el capítulo N^o 3 de modelación de elementos finitos será descrito y utilizado.

Capítulo 3

Modelación: análisis de elementos finitos

El año 2006, Herrera y Desjouis desarrollaron un modelo simplificado del comportamiento de un perfil T-stub sobre la base de elementos finitos, utilizando el software de análisis ANSYS. Los resultados más relevantes fueron publicados por Herrera *et al.* (2008). La geometría del presente modelo está construida a partir del trabajo recién mencionado. El comportamiento mecánico ha sido reacondicionado y la interacción de las distintas piezas ha sido también refinada a través de nuevos tipos de contactos que serán descritos en el presente capítulo. Esta etapa de la investigación no tiene por objeto desarrollar una pauta o guía de diseño de la construcción de un modelo complejo de elementos finitos, sino presentar de manera cronológica los pasos y supuestos más importantes dentro de la construcción del modelo para finalmente presentar los resultados.

La intención de la modelación de los perfiles T-stub a partir de elementos finitos es poder complementar y comparar el comportamiento de las probetas ensayadas experimentalmente. Además, es de suma importancia para entender el comportamiento mecánico de la conexión y cómo responde esta a la variación de los diferentes parámetros del modelo: geométricos, propiedades mecánicas, contactos, etc.

La primera parte del presente capítulo comprende la construcción del modelo de elementos finitos en 3D. Para la calibración y validación inicial se trabajará con la geometría de los perfiles ensayados monotónicamente por Herrera *et al.* (2009), de los cuales se tiene toda la información de los ensayos experimentales.

La segunda parte corresponde al trabajo de actualización y calibración realizado sobre el modelo, de tal manera de reproducir el comportamiento de los perfiles sometidos a cargas cíclicas. Se utilizará la misma información experimental de los modelos baja carga monotónica para contrastar resultados respecto del modelo cíclico.

3.1. Parte I: modelo monotónico

3.1.1. Modelo 3D

El modelo está construido sobre elementos sólidos en 3 dimensiones. La metodología utilizada comprende la modelación de la mitad de la conexión T-stub aprovechando la simetría existente. Este cuenta con 21 piezas mayores que corresponden a los diferentes elementos que componen el perfil T-stub:

- 4 pernos sometidos a tracción (cabeza y fuste)
- 4 pernos sometidos a corte (cabeza y fuste)
- 8 tuercas hexagonales
- 2 filetes de soldadura
- Alas del perfil
- Alma del perfil
- Placa rígida para aplicar y transmitir la carga de ensayo

Las piezas de la conexión fueron modeladas utilizando elementos volumétricos hexaédricos y tetraédricos de 20 y 10 nodos respectivamente con el fin de lograr una malla de control uniforme. Estos conforman un total de 11,437 elementos sólidos y 34,619 nodos; cada uno de los elementos sólidos posee 6 grados de libertad. En la figura 3.1 se observa un esquema global de la configuración del modelo, y en la figura 3.2 las componentes de los pernos. Los tipos de elementos utilizados de acuerdo al software corresponden a: Solid 186 (hexaédricos) y Solid 187 (tetrahédricos).

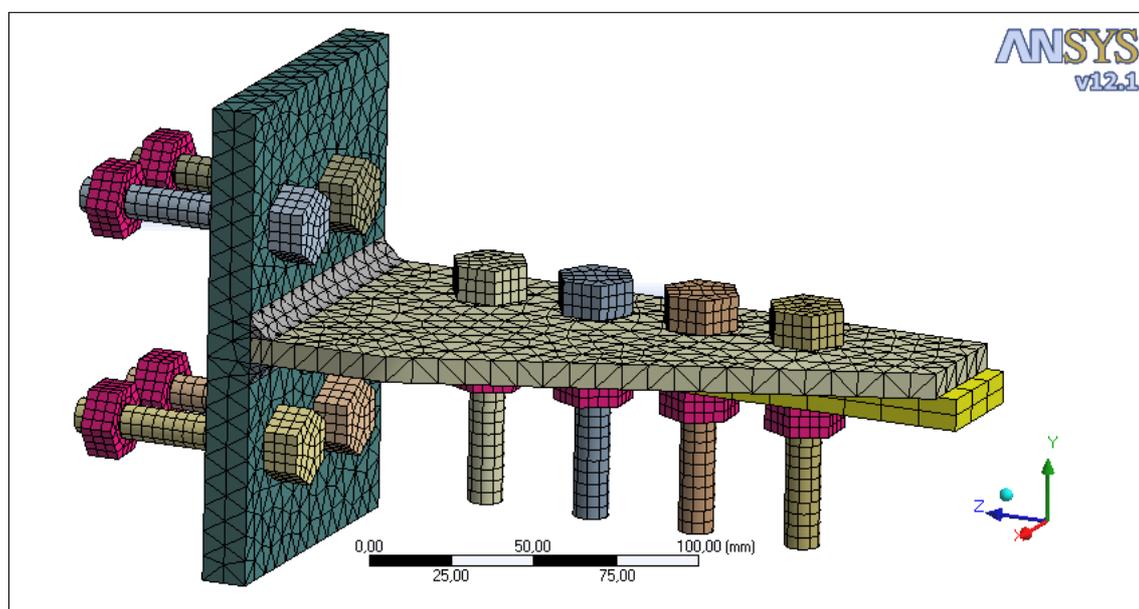


Figura 3.1: Geometría del modelo 3D

El ala de la viga - de color amarillo en la figura - corresponde a un elemento rígido a través del cual se transmite la carga y tiene una rigidez 10 veces mayor que la del acero base. La columna se asocia a una superficie rígida de control compatible sólo a la compresión. Esta última se encuentra

entre la espalda de las alas y las tuercas de los pernos sometidos a tracción - en el vacío que se observa en la figura -. El eje de simetría del modelo está restringido al movimiento fuera del eje axial principal de la T-stub a través del cual se aplica la carga, esto mediante una condición de borde que permite el deslizamiento de esa cara.

Por su parte, los pernos tienen un diámetro de 1/2 pulgada y fueron modelados considerando un área efectiva, la cual corresponde a $91,5[mm^2]$ según recomendaciones de la AISC (2005a). Cada uno de los pernos posee 400 elementos sólidos del tipo hexaédrico y tetraédrico; además de 1,993 nodos.

El comportamiento no lineal de los materiales es modelado utilizando el criterio de fluencia de Von Mises considerando además el endurecimiento isotrópico asociado.

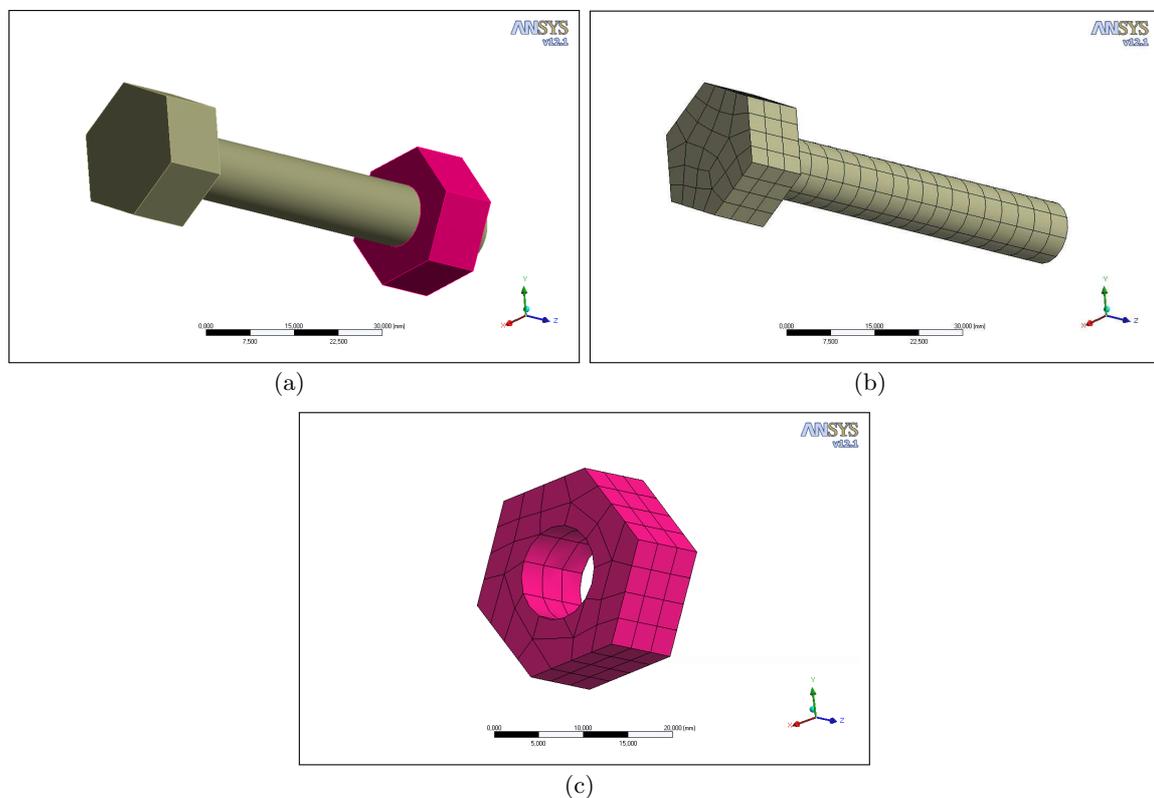


Figura 3.2: Detalle perno

3.1.2. Sistema de carga

La primera carga aplicada al sistema corresponde a la pre tensión asociada a los pernos (figura 3.3). Según disposición de AISC (2005a) alcanza un 70 % de la capacidad a la fluencia de los pernos *ASTMA325*.

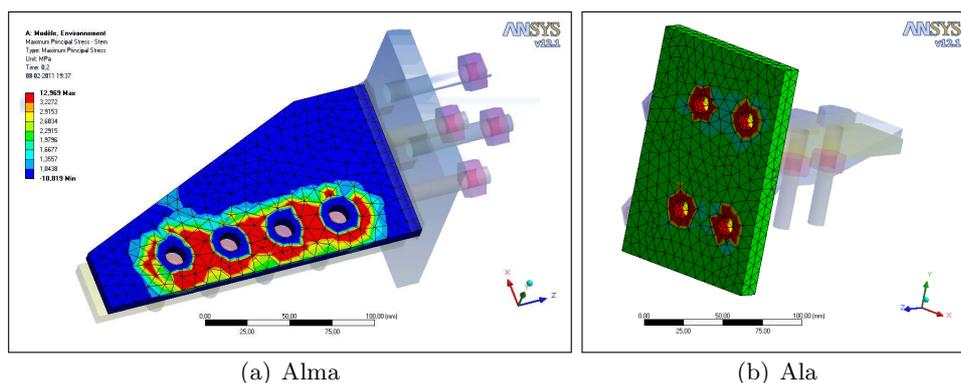


Figura 3.3: Pretension de los pernos

La deformación de la conexión T-stub es controlada a través de la aplicación de una carga aplicada en el extremo del ala de la viga (figura 3.4). Esta se incrementa de forma paulatina a pasos discretos a lo largo del tiempo. Esta carga corresponde a la mitad de la carga aplicada en los ensayos experimentales ya que el modelo trabaja con la mitad de la geometría. El valor último de esta carga corresponde a un criterio arbitrario en el cual se considera un 20% por sobre la carga última esperada por diseño. Luego se inspecciona de acuerdo a las deformaciones observadas en los distintos estados de carga. A lo largo de los análisis se utilizó el método de Newton-Raphson para conocer la respuesta no lineal completa a intervalos discretos de tiempo. La carga asociada a la falla es alcanzada cuando alguna parte de la pieza desarrolla el límite de las deformaciones esperadas según su curva real idealizada de respuesta del material.

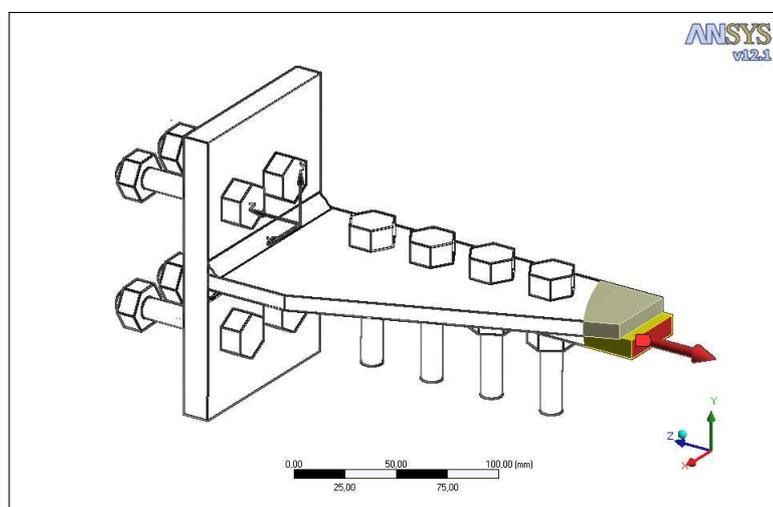


Figura 3.4: Aplicación de la Fuerza

3.1.3. Materiales

Ala y alma de la conexión T-stub corresponden a un material de acero ASTM A36 cuya curva de respuesta real es proporcionada por Herrera *et al.* (2009). Los pernos utilizados corresponden a un material de acero *ASTMA325* cuya respuesta real es proporcionada por los mismos autores. A partir de esto se idealizó ambos comportamientos considerando curvas bilineales las cuales a partir

de la fluencia comienzan el proceso de endurecimiento el cual progresa linealmente hasta alcanzar el estado último de tracción. Respecto del tipo de soldadura, esta corresponde a un material del tipo *ER - 70S - 6* y su curva de respuesta se construye a partir de valores de referencia teóricos entregados por el fabricante, obteniéndose también una curva bilineal. Las curvas de respuesta se presentan en las figuras 3.5, 3.6 y 3.7.

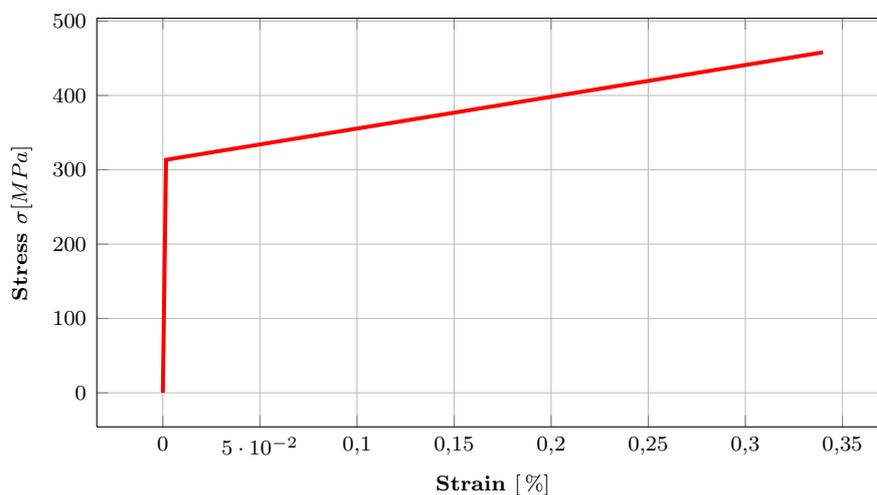


Figura 3.5: Curva bi-lineal de respuesta de material - acero ASTM A-36

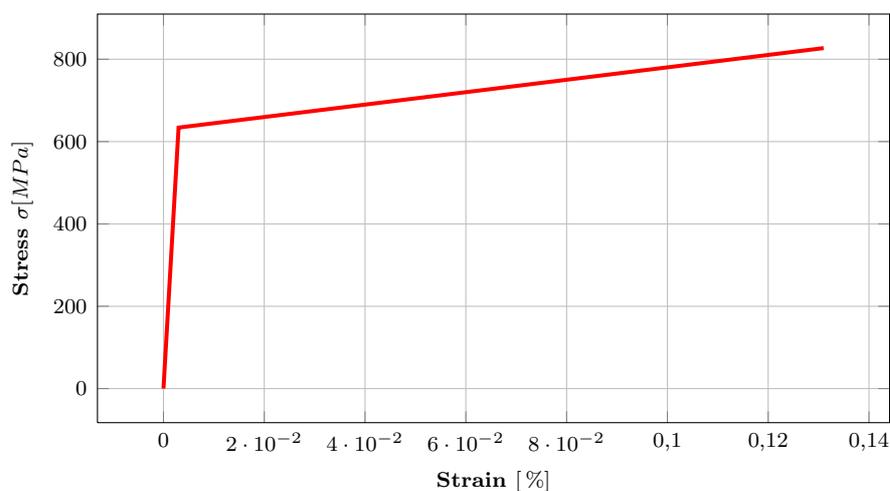


Figura 3.6: Curva bi-lineal de respuesta de material - pernos acero ASTM A-325

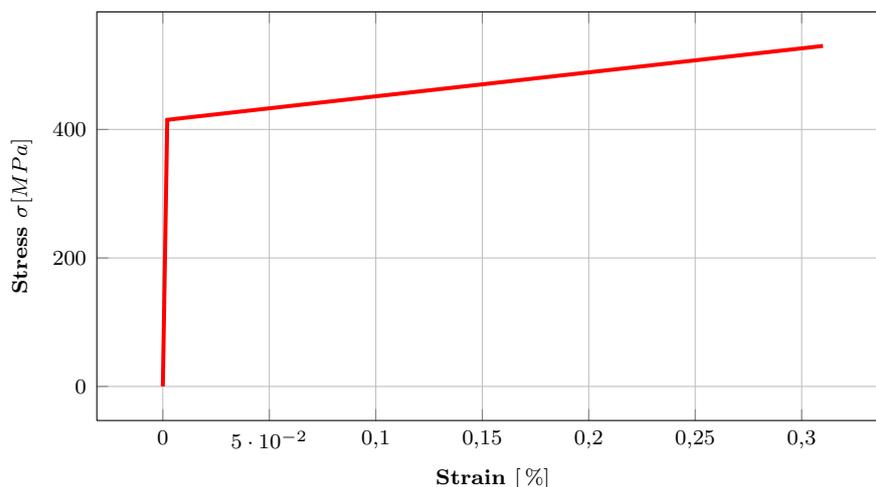


Figura 3.7: Curva de respuesta de material - soldadura ER70S6

3.1.4. Contactos

Una gama importante de contactos fue utilizada para describir la interacción de las distintas piezas de la conexión. En su mayoría estos cumplen una función dual que permite observar la deformación existente en los límites a partir de la penetración relativa de un elemento respecto de otro. El más importante de estos casos corresponde a la interacción entre el alma de la conexión T-stub y los pernos al corte, zona en la que se produce una importante deformación de los orificios por aplastamiento. El contacto que permitió modelar de forma más correcta este fenómeno es del tipo "frictionless", y fue estudiado y comprendido a partir de la investigación realizada por Soo Kim & Kuwamura (2007). De esta manera es posible visualizar la deformación longitudinal total de la pieza en la que el fenómeno de aplastamiento contribuye de manera importante.

Por su parte el contacto entre pernos y tuercas es del tipo "bonded", el cual no permite desplazamiento relativo alguno entre ambas partes. La zona de contacto de mayor área corresponde a la que se produce entre el alma del perfil T-stub y la placa de carga que simula la viga, en la cual la componente importante de resistencia es por fricción producto de la pretensión realizada a los pernos de corte. El contacto utilizado es del tipo "slip critical standard" con un coeficiente de fricción asociado $\mu = 0,33$ de acuerdo a las recomendaciones de RCSC (2005) para elementos conectados con superficie clase A.

Unos de las principales limitaciones de ANSYS es la incapacidad de modelar el comportamiento dinámico de cuerpos rígidos. Esto porque la energía cinética que aporta el movimiento es incapaz de ser compensada con la energía de deformación interna del sistema. Para el presente análisis fue menester resolver de la mejor manera esta problemática, la cual aparece con el movimiento e interacción de los pernos al corte respecto del alma del perfil T-stub. Considerando que existe un espacio entre el cuerpo del perno y el borde cilíndrico de la perforación. Es entonces con los pernos que aparece un movimiento relativo de cuerpo rígido. Tal como se mencionó al comienzo de este capítulo, la forma de resolver dicho problema fue considerando una relocalización relativa del eje

central del perno de tal manera que al momento de calcular la distancia entre el eje de coordenadas principales y los ejes de los pernos, la distancia siempre se mantuviese constante, al menos hasta el momento en que los pernos se ponen en contacto con el alma del perfil T-stub y comienza el proceso de aplastamiento. La consideración del proceso de aplastamiento fue uno de los desafíos de la modelación. Esta no había sido considerada en el modelo simplificado de Herrera *et al.* (2008). Interesante por la complejidad de la deformación que se produce en la zona irregular del borde de la perforación por efecto de la tensión que genera el perno. Fue resuelto, finalmente, después de una gran cantidad de rutinas y análisis realizados; considerando un contacto del tipo "frictionless". Este ha sido utilizado en variadas investigaciones de modelación de placas cargadas por pernos.

Otro punto de importancia en la conexión desde la óptica de los contactos es la zona de interacción triple: alma - ala - soldadura (figura 3.8). Principalmente por la concentración de tensiones que allí se genera, zona en la cual no se cumplen algunos de los grandes supuestos del comportamiento de resistencia de los materiales, como por ejemplo el supuesto de Bernoulli en que las secciones planas permaneces planas luego de la deformación. Distintas posibilidades fueron evaluadas, sin embargo, la consideración geométrica realizada por Herrera *et al.* (2008) en el modelo inicial resultó ser una solución idónea para este problema, por lo cual se mantiene de esta manera. Se considera así el espacio real que existe entre el alma del perfil y las alas, que son luego unidas a partir de los filetes de soldadura.

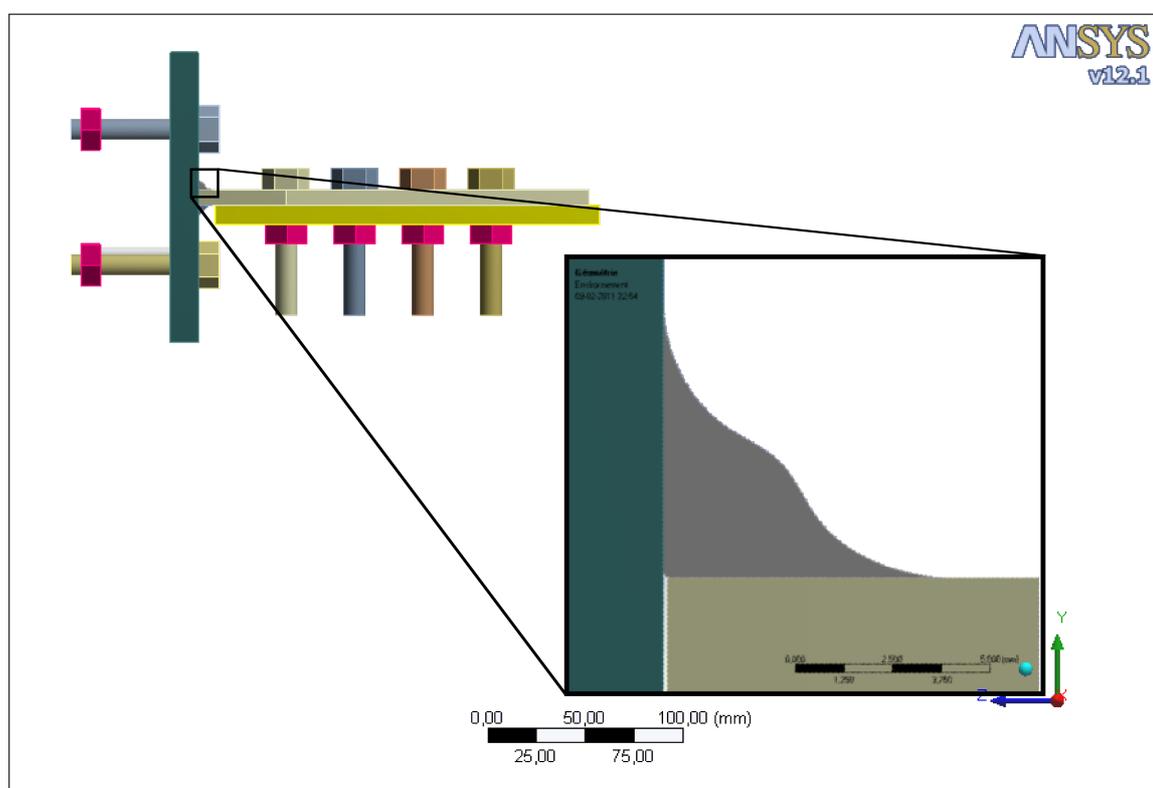


Figura 3.8: Punto triple

3.1.5. Resultados

Los resultados experimentales obtenidos por Herrera *et al.* (2009) muestran dos modos de falla asociados: rotura de los pernos a la tracción y fractura del área neta. Por su parte los resultados analíticos obtenidos de la presente modelación manifiestan perfecta correlación con los modos de falla experimentales. Respecto de las capacidades de carga a la falla los valores son también muy ajustados y las diferencias podrían deberse a ciertas consideraciones que serán comentadas a continuación en las observaciones. Se muestra el detalle en la tabla 3.1

Tabla 3.1: Modos de falla experimentales

Configuración	Modo de falla
TSD 140	corte pernos a tracción
TSD 150	corte pernos a tracción
TSD 160	corte pernos a tracción
TSD 170	corte pernos a tracción
TSD 180	corte pernos a tracción
TSE 8	fractura de área neta
TSE 10	fractura de área neta
TSE 14	corte pernos a tracción
TSE 16	corte pernos a tracción

Serie TSD: Corte por tracción de los pernos

Como se puede observar, la mayoría de las configuraciones consideradas alcanzaron la falla por fractura de los pernos en tracción. La serie *TSD* que fue construida para estudiar principalmente el efecto de levantamiento del ala que induce una flexión en los pernos, presentó este tipo de falla en todas sus probetas. En la Figura 3.9 se muestran las curvas obtenidas para toda la serie *TSD*. En las figuras 3.10 - 3.11 - 3.12 - 3.13 - 3.14 se observan los resultados experimentales en línea continua y en línea segmentada los obtenidos desde la modelación de elementos finitos (FE) para cada uno de los ensayos de la serie *TSD*. Tal como lo reflejan las curvas experimentales, la capacidad de las probetas aumenta a medida que el efecto de apalancamiento es menor, esto se produce al ser más corta la distancia entre las filas de pernos a la tensión y el eje central del alma; alcanzando la máxima capacidad en la probeta *TSD* 140 que tiene la menor distancia entre pernos y eje.

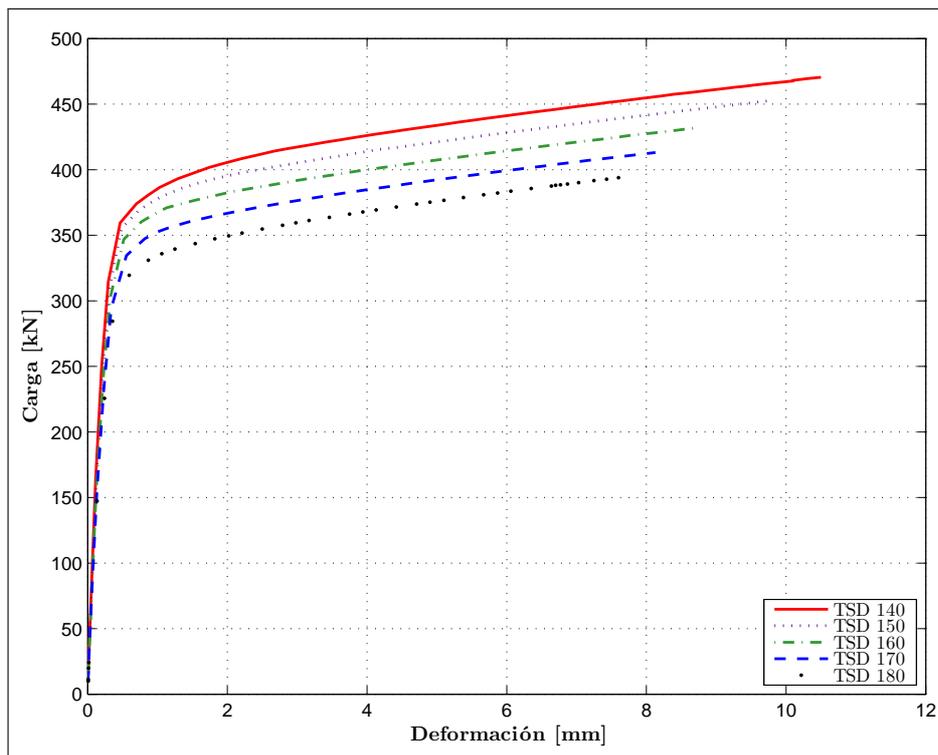


Figura 3.9: Deformación total modelos de elementos finitos - Serie TSD

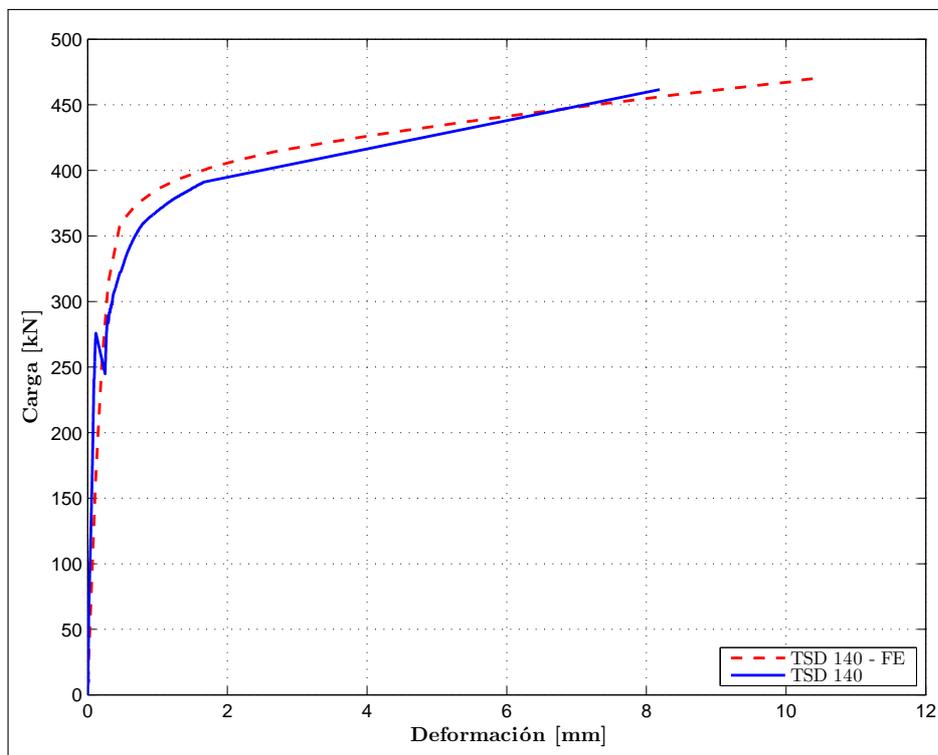


Figura 3.10: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 140

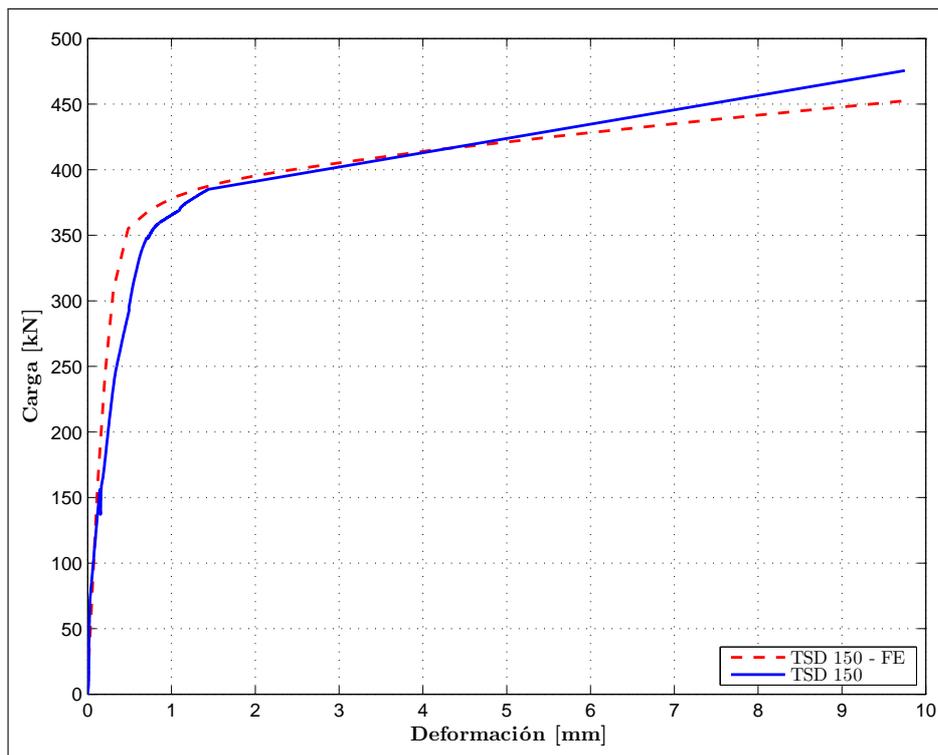


Figura 3.11: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 150

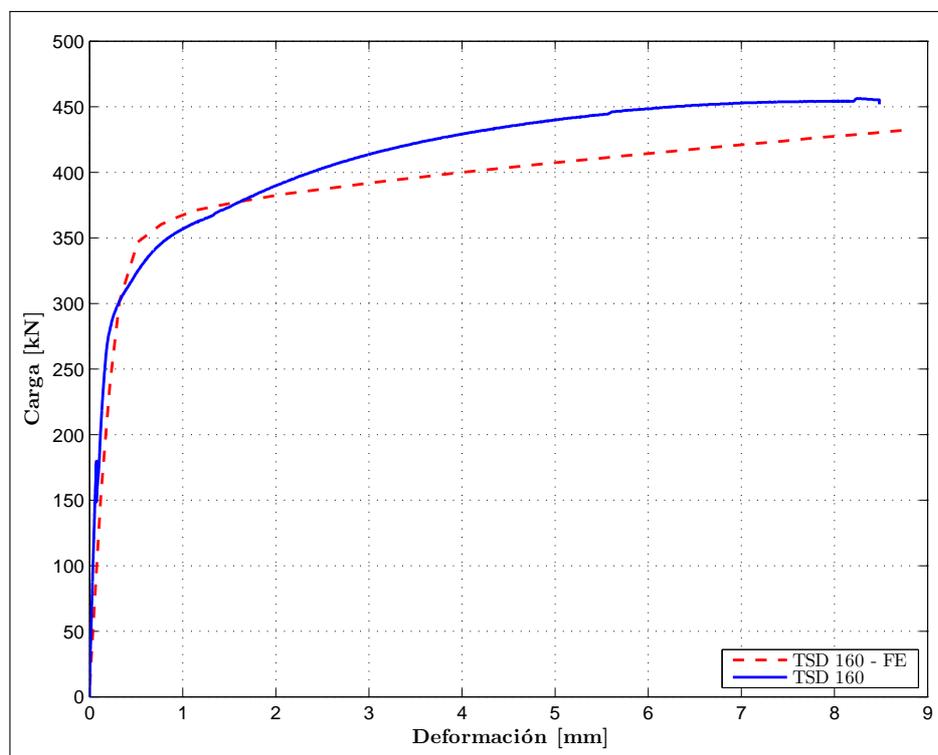


Figura 3.12: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 160

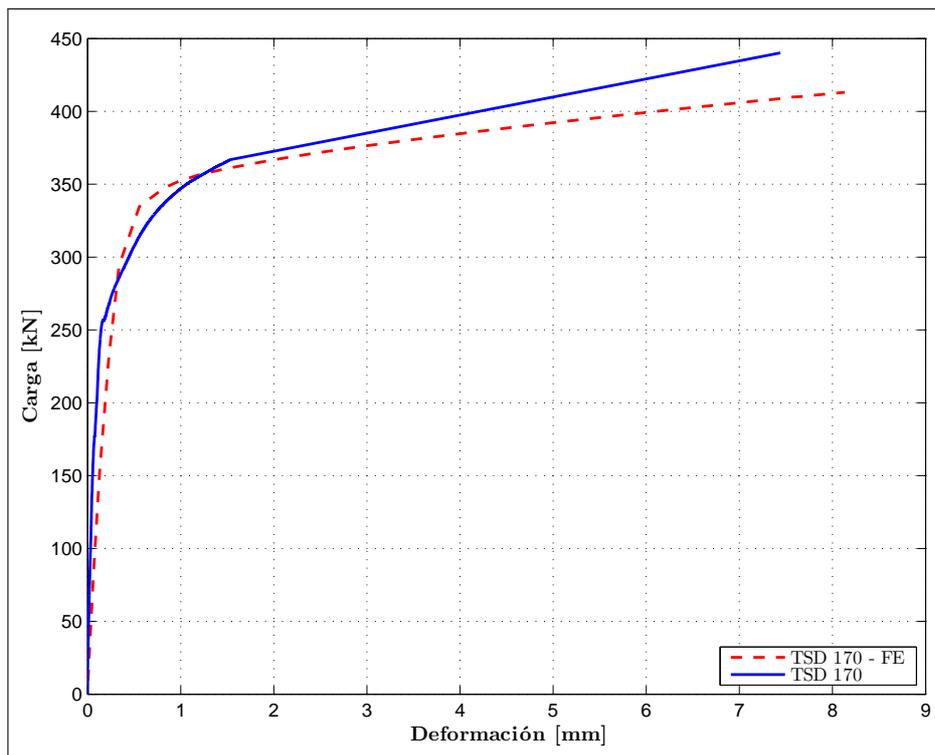


Figura 3.13: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 170

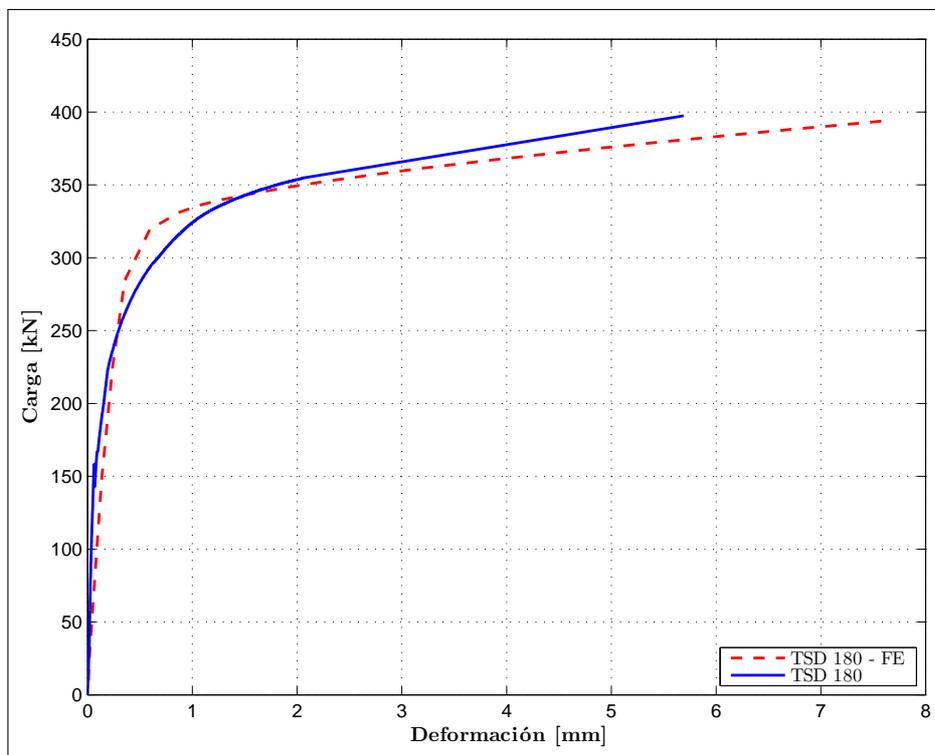


Figura 3.14: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSD 180

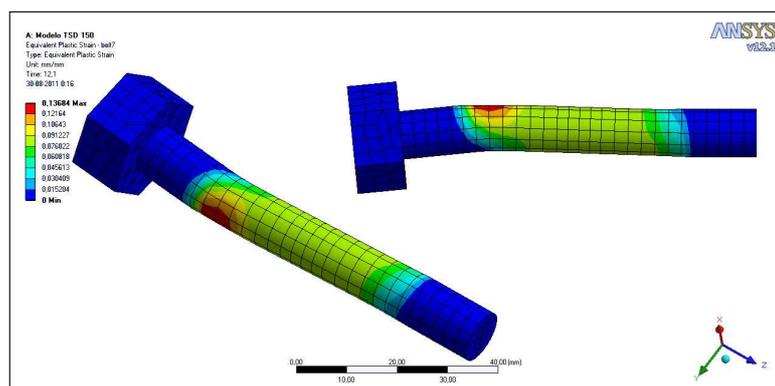


Figura 3.15: Perno a tensión con flexión inducida producto del apalancamiento

Serie TSE: Fractura del área neta y corte por tracción de los pernos

Como se puede observar, tan sólo dos de las configuraciones consideradas alcanzaron la falla por fractura del área neta, éstas son las de la serie *TSE* las cuales tenían el menor espesor en el alma correspondiente a 4 y 5[mm] respectivamente. En la Figura 3.16 se presentan las curvas obtenidas para todos los modelos de la serie TSE. En las figuras 3.17 - 3.18 - 3.19 - 3.20 se presentan los resultados experimentales en línea continua y en línea segmentada los obtenidos a partir de la modelación de elementos finitos (FE) para todas las configuraciones. La probeta *TSE* 10 alcanza una mayor capacidad porque posee el espesor mayor en el alma. Las curvas presentadas están altamente ajustadas y una vez más se obtiene un factor de relación teórico/experimental cercano a la unidad.

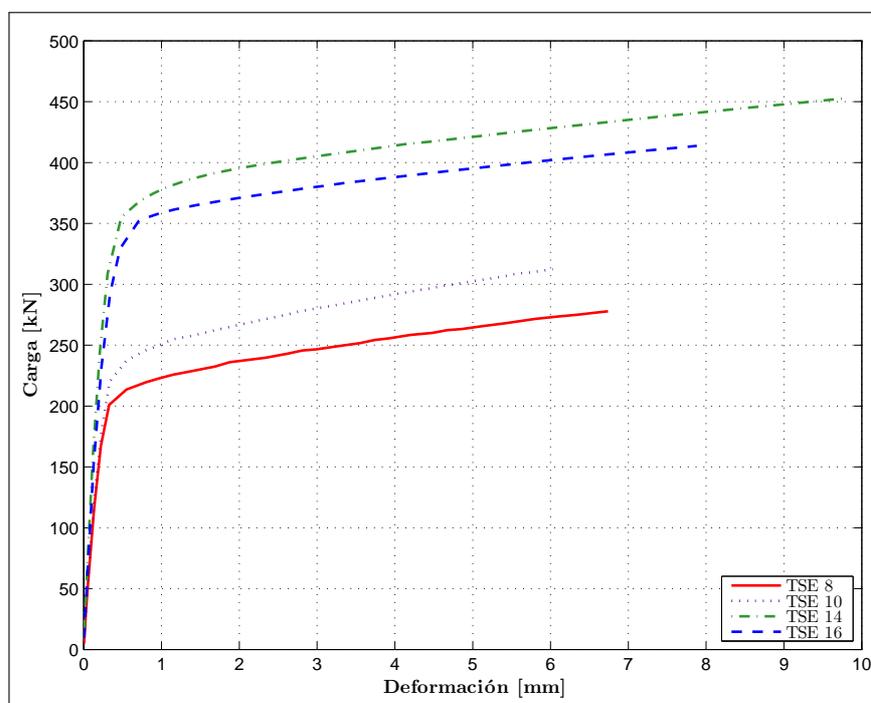


Figura 3.16: Deformación total modelos de elementos finitos - Serie TSE

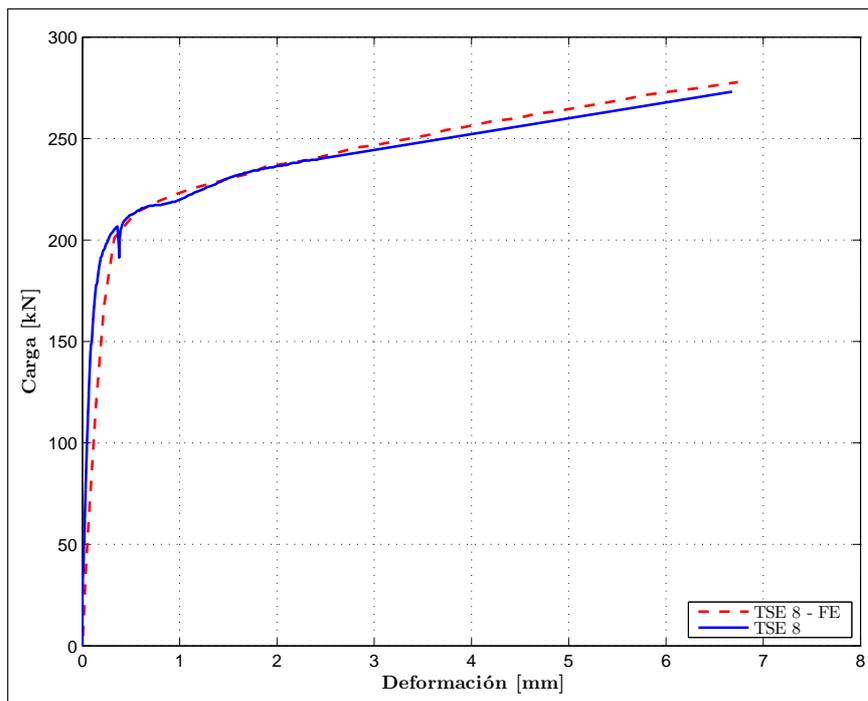


Figura 3.17: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 8

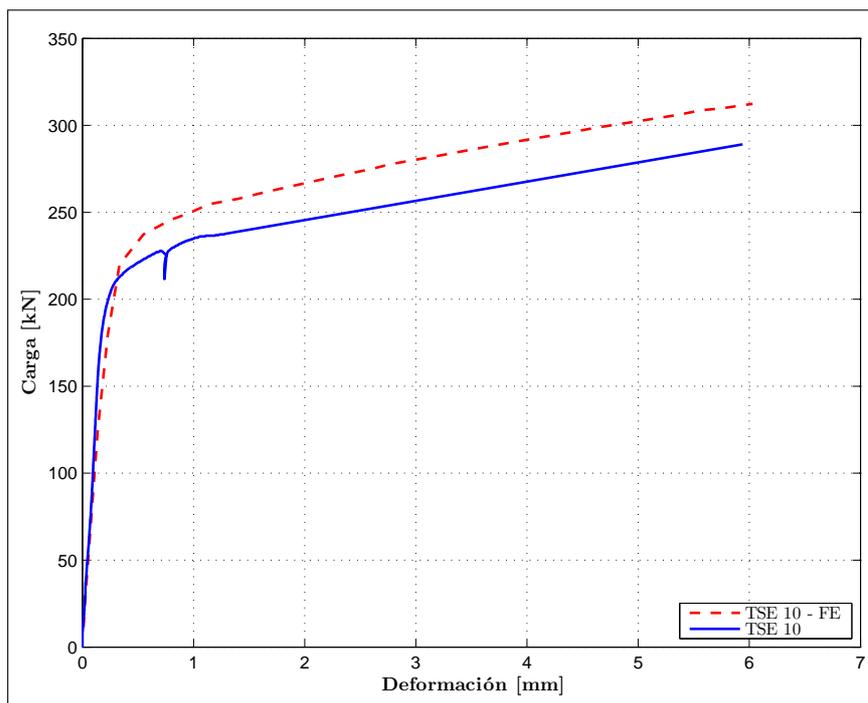


Figura 3.18: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 10

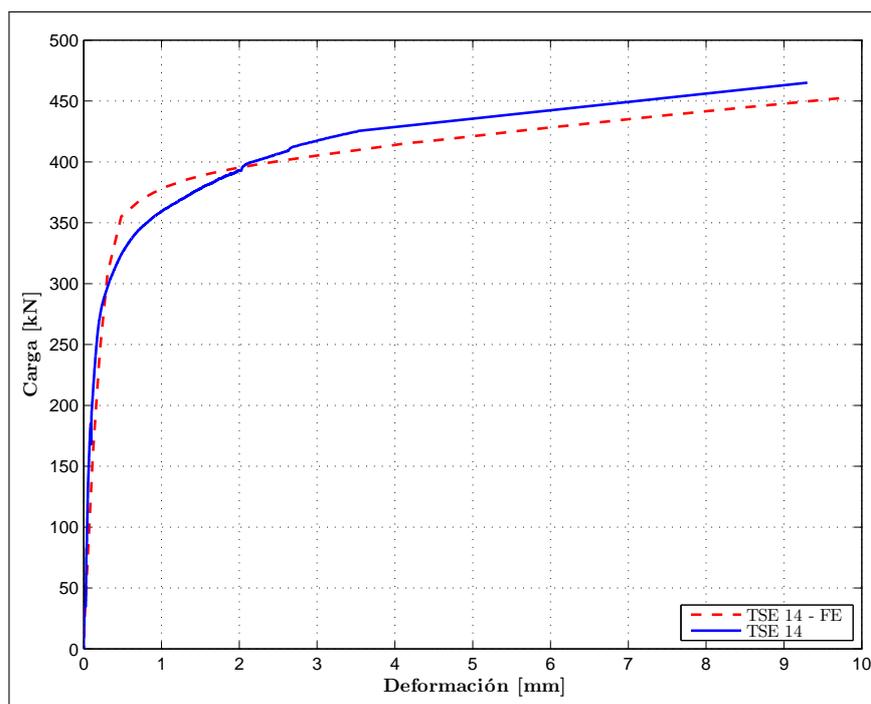


Figura 3.19: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 14

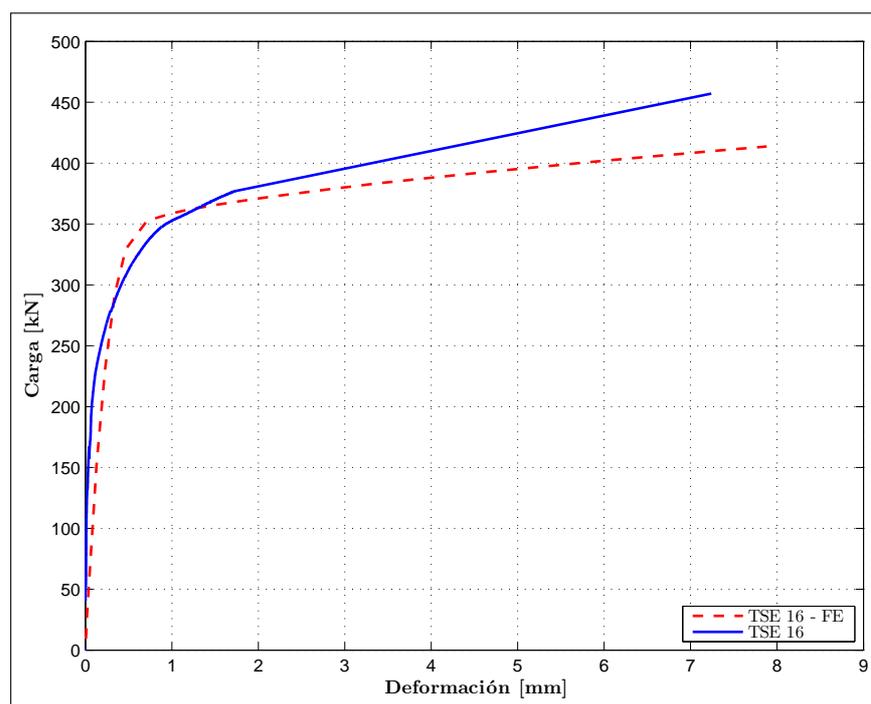


Figura 3.20: Deformación total FE v/s Experimental - Modelo TSE 16

Tal como se mencionó en la construcción del modelo, uno de los tópicos más importantes para obtener el ajuste recién presentado entre los resultados teóricos y experimentales, es el fenómeno de aplastamiento de los orificios del alma producto de la tensión generada por los pernos al corte. Considerando que los niveles de deformación alcanzados en el aplastamiento de los orificios más

cercanos a las alas son de alta contribución a la deformación total del alma hubiese sido imposible alcanzar un buen ajuste de las curvas teóricas sin haber resultado este fenómeno, el cual es complejo para el análisis computacional por la concentración de tensiones que se genera en el contacto de los pernos al corte con el alma. Esto hace aumentar considerablemente el tiempo de procesamiento en los análisis y requiere previamente algunas consideraciones especiales en esa zona, como el refinamiento focalizado de la malla de elementos finitos. (Figura 3.22).

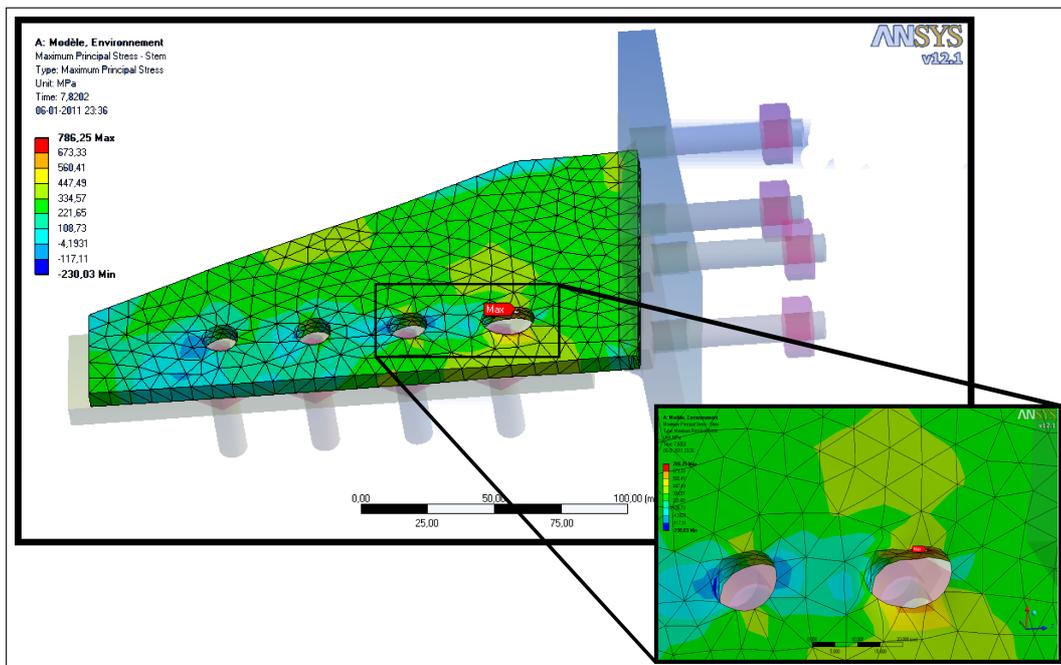


Figura 3.21: Detalle de aplastamiento en modelo finito

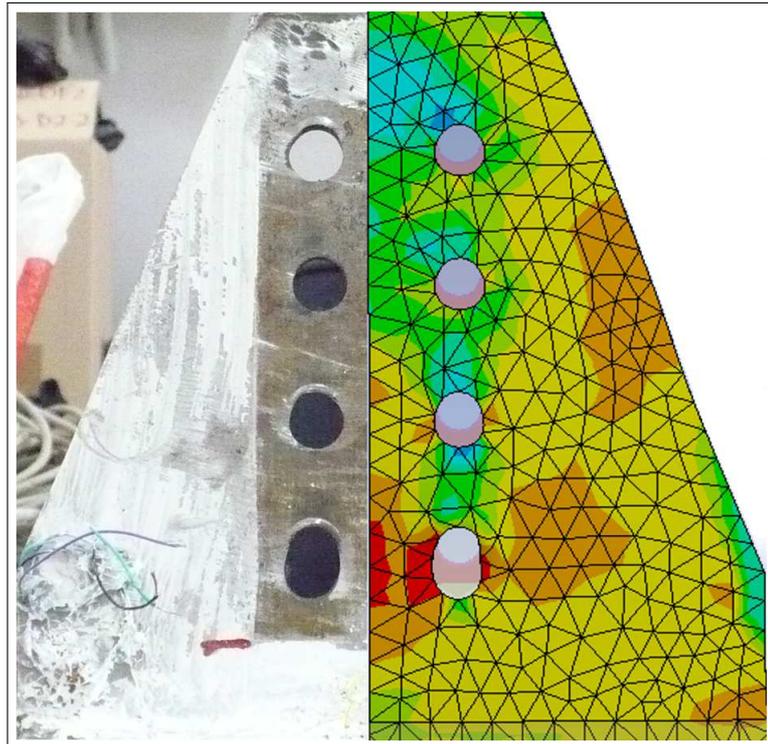


Figura 3.22: Aplastamiento experimental v/s teórico - Probeta TSD 140-2

3.1.6. Resultados

A continuación en la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos (FEM) comparados con los resultados experimentales y estimaciones de la norma AISC 2005 realizadas por Herrera *et al.* (2009). En promedio los resultados experimentales exceden en un 5% a las estimaciones analíticas presentadas.

Tabla 3.2: Modos de falla experimentales

Probeta	Modelo FEM		AISC		Test	
	Modo de falla	Capacidad [kN]	Modo de falla	Capacidad [kN]	Modo de falla	Capacidad [kN]
TSD140-1	F.P.T	472	S	407	H*	449
TSD140-2					F.P.T	478
TSD150-1	F.P.T	452	F.P.T	392	F.P.T	475
TSD150-2					F.P.T	478
TSD160-1	F.P.T	432	F.P.T	359	F.P.T	456
TSD160-2					F.P.T	433
TSD170-1	F.P.T	413	F.P.T	331	F.P.T	437
TSD170-2					F.P.T	406
TSD180-1	F.P.T	393	F.P.T	307	F.P.T	370
TSD180-2					F.P.T	391
TSE8-1	F.A.N	265	B.C	233	F.A.N	260
TSE8-2					F.A.N	261
TSE10-1	F.A.N	306	S	244	F.A.N	277
TSE10-2					F.A.N	274
TSE14-1	F.P.T	452	F.P.T	392	F.P.T	448
TSE14-2					F.P.T	451
TSE16-1	F.P.T	415	F.P.T	288	F.P.T	439
TSE16-2					F.P.T	413

* Probeta falló por desgarre del hilo en perno a tracción

F.P.T: Fractura de pernos a tracción - F.A.N: Fractura del área neta - S: Soldadura - H: hilo

B.C: Bloque de corte en el alma

3.1.7. Observaciones

Algunas de las principales consideraciones realizadas en la modelación, por su potencial nivel de incidencia en el comportamiento analítico y resultados obtenidos, son:

1. El área de los pernos no corresponde a la real para diámetro de 1/2 pulgada. El modelo considera el área efectiva obtenida a partir de la recomendación de la AISC (2005a). La influencia de este parámetro es muy sensible, teniendo una fuerte y directa influencia en la capacidad última del perfil T-stub. De haberse considerado el área real hubiese sido necesario realizar una corrección en la capacidad última del perfil en función de ambas áreas. De acuerdo a lo considerado, las capacidades últimas de las probetas con modo de falla por corte de los pernos a tracción, son levemente poco conservadoras, pero altamente correlacionadas con los valores obtenidos experimentalmente.
2. El comportamiento de los materiales, sobre todo del material base de los perfiles, está idealizado mediante curvas bilineales. Existe entonces un grado de error intrínseco en el comportamiento tensión-deformación al no considerarse un ajuste más realista, polinomial o multilineal de la curva real del material. Este se manifiesta con mayor ahínco en los tramos finales de la

respuesta, en el proceso de "*hardening*" puesto que al acercarse a la falla del material existe un leve descenso de la curva de respuesta tracción-deformación.

3.2. Parte II: modelo cíclico

La presente sección es de suma importancia para esta investigación. Aquí se presenta el modelo de elementos finitos en 3D sometido a carga cíclica que se validará posteriormente a partir de los ensayos experimentales de perfiles T-stub.

La tarea es implementar ciclos de carga tracción-compresión a partir de una deformación dada, en los modelos recién construidos para carga/deformación monotónicas de tracción. Para tales efectos es necesario que el modelo sea capaz de considerar los efectos mecánicos durante la fase de compresión y, además, la transición de fases compresión-tracción y viceversa.

3.2.1. Actualización del modelo base

Fuerza-deformación cíclica

No es necesario hacer consideraciones o actualizaciones respecto de la zona de contacto entre pernos y orificios del alma del perfil T-stub en la fase de compresión, puesto que el contacto considerado conecta toda la superficie cilíndrica de ambas partes, por lo tanto, trabaja correctamente en ambos sentidos de la dirección de carga.

Al comprimir completamente el perfil T-stub podría producirse algún tipo de pandeo o deflexión del perfil fuera del plano de aplicación de la fuerza. Sin embargo, esto queda bien resuelto con la condición de borde en la cara inferior de la placa rígida que simula el ala de la viga de la conexión, la cual corresponde a un apoyo deslizante que impide el desplazamiento perpendicular al plano.

Contacto en el punto triple

La zona de contacto soldadura-ala-alma del perfil, denominada punto triple, debe ser capaz de reproducir los esfuerzos de compresión a los que estará sometida bajo las cargas cíclicas. Como ya se explicó anteriormente, en el modelo monotónico no existe un tipo de contacto entre el alma y ala del perfil T-stub, a pesar de la cercanía de las superficies, porque en realidad no existe allí un contacto y la fuerza en esa zona se transmite desde el alma hacia el ala a través de la garganta de la soldadura. El ajuste realizado al modelo consiste en considerar un potencial contacto entre ala y alma del perfil durante la compresión, de acuerdo a lo cercanas que estas zonas queden según el incremento de carga. Se define entonces una tolerancia de acercamiento correspondiente a $10^{-3}[mm]$. a partir de la cual se materializa un contacto en la zona. La herramienta utilizada para tales efectos fue una de las predefinidas por el programa, de nombre: *adjust to touch*.

Materiales

Se definió el comportamiento a compresión de los materiales, suponiendo que poseen una respuesta similar que a la tracción, idéntico a lo presentado en la primera parte.

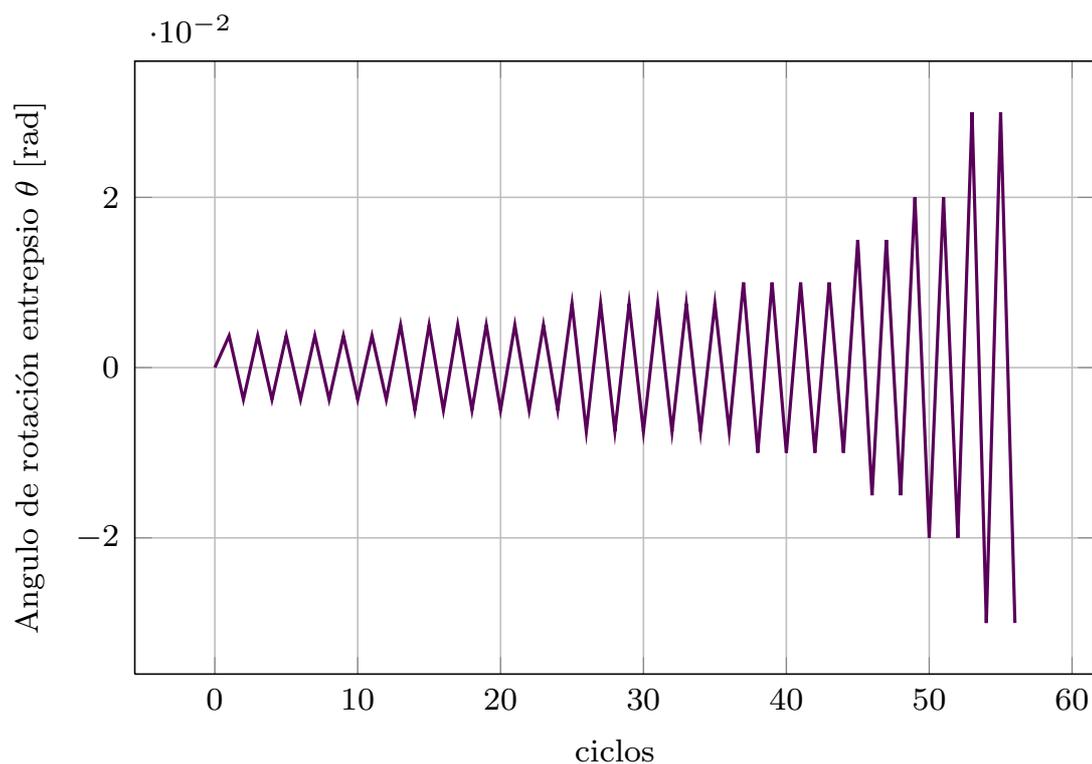


Figura 3.23: Ciclo de carga - FEMA 350

Protocolo de carga

El protocolo de carga cíclica incremental es aplicado en el modelo a través de un control de desplazamiento inducido en el extremo del perfil T-stub. Este protocolo es definido en (Fig. 3.23) *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame building* FEMA 350. (2000). el cual define un ángulo de rotación de entrepiso θ [rad] que depende de las dimensiones y propiedades mecánicas de la viga y columna. Esta rotación debe ser transformada en deformación aplicada a cada una de las alas de la viga para luego ser incorporada tanto en los modelos analíticos como experimentales.

El protocolo de ciclos de carga experimental debe ser igual al considerado en los modelos analíticos. Sin embargo, para la primera calibración de los modelos analíticos correspondientes a la serie de perfiles TSD ensayados por Herrera *et al.* (2009) se aplicó un protocolo de carga arbitrario que mantiene el principio fundamental de los ciclos de carga suministrados por FEMA 350. (2000).

Capítulo 4

Parámetros a estudiar

Se construye una serie de perfiles T-stub los cuales son sometidos a un protocolo de carga cíclica controlada por deformaciones.

La filosofía de diseño para la batería de probetas que se han construido posee dos líneas generales: La primera es que a partir de las tipologías desarrolladas se busca obtener la mayor cantidad de modos de falla posibles. La segunda es poder identificar la importancia de cada uno de los parámetros geométricos y mecánicos en la respuesta de los perfiles.

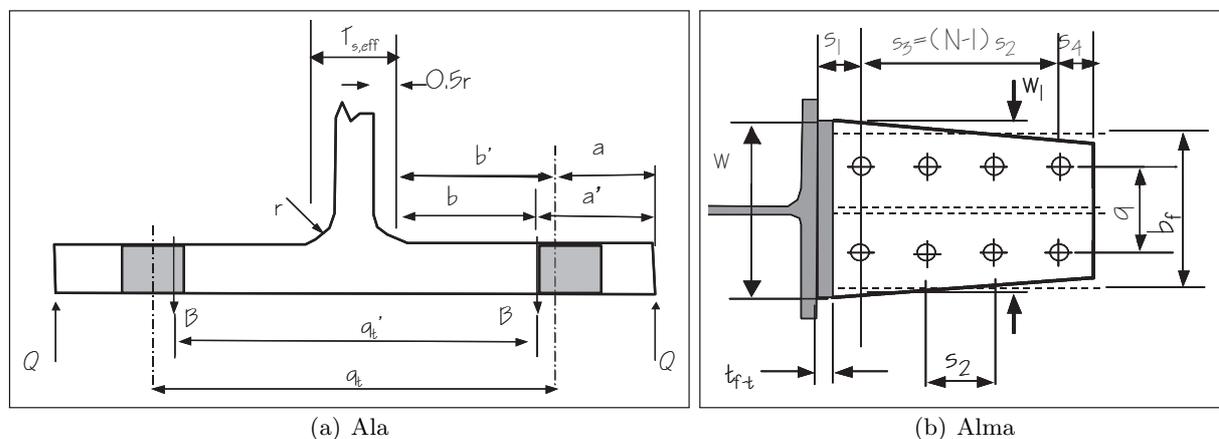
4.1. Modos de falla

La determinación de la capacidad al estado último de falla de los perfiles T-stub es un proceso complejo puesto que es una interacción de las diversas partes que lo componen. Por tanto, se identifican diversos modos de falla.

Las probetas fueron diseñadas a partir del protocolo FEMA 350. (2000) el cual norma el comportamiento de las conexiones *DST construidas con perfiles laminados*. Este ofrece una serie de estados límites a la falla (fractura) además de otros estados asociados a capacidad de diseño (fluencia) o serviciabilidad (excesivas deformaciones). En la tabla 4.1 se muestran los diversos estados asociados al comportamiento de los perfiles.

Tabla 4.1: Modos de falla perfiles T-stub

Modo de Falla	Frágil/Dúctil	Estado
Fractura Pernos a Tracción	Frágil	Último
Levantamiento del ala	Dúctil	Diseño
Corte Pernos	Frágil	Último
Fluencia Area Gruesa	Dúctil	Diseño
Fractura Area Neta	Frágil	Último
Bloque de Corte	Frágil	Último
Aplastamiento	Dúctil	Diseño


Figura 4.1: Identificación de parámetros geométricos de acuerdo al protocolo FEMA 350

A continuación se presentan individualmente cada uno de los modos de falla considerados para la presente investigación. Las ecuaciones que rigen el comportamiento de los perfiles T-stub serán presentadas de acuerdo a la geometría de la Figura 4.1.

4.1.1. Fractura de los pernos a tracción

La capacidad nominal incluyendo el efecto de apalancamiento se puede calcular usando la ecuación 4.1.

$$R_1 = 2n \left[F_{ub}A_b + \frac{wF_{yt}t_f^2}{16a'} \right] \frac{a'}{a' + b'} \quad (4.1)$$

Donde :

F_{ub} : Tensión última de los pernos

A_b : Área de los pernos a tensión

n : Número de pernos a la tensión por fila

w : Ancho del alma

F_{yt} : Tensión de fluencia del acero base

t_f : Espesor del ala

a' : Distancia desde el borde del ala hasta el borde interno de la perforación

b' : Distancia desde el borde de la soldadura hasta el centro del perno

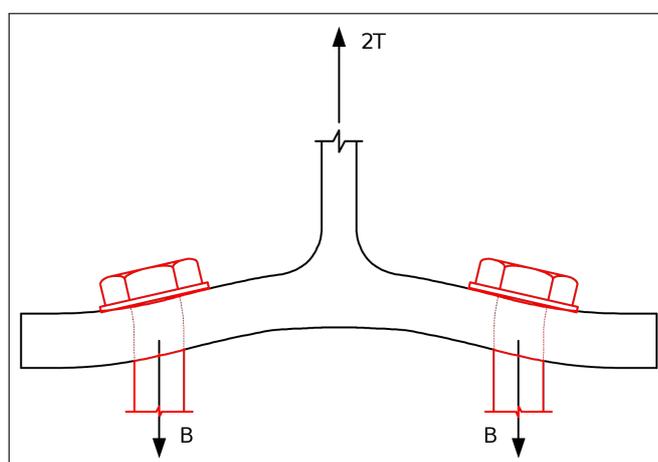


Figura 4.2: Esquema pernos a tracción

Este es un modo de falla frágil sumamente importante porque los pernos no sólo son solicitados a tracción, sino que producto de la construcción geométrica de perfil T-stub aparece una flexión, tal como se aprecia en la Figura 4.2. Se puede ver de la ecuación que la capacidad depende de las propiedades del material base (deformación del ala) y de la geometría específica de los pernos en el ala respecto del eje de simetría(alma).

4.1.2. Plastificación del ala

La capacidad nominal a la plastificación del ala se puede calcular a partir de la ecuación 4,2

$$R_2 = \frac{\left(2a' - \frac{d_{bt}}{4}\right) w F_{yt} t_f^2}{4a'b' - d_{bt}(b' + a')} \quad (4.2)$$

Donde :

d_{bt} : Diámetro pernos a tracción

$$a' = a + \frac{d_{bt}}{2}$$

$$b' = b - \frac{d_{bt}}{2}$$

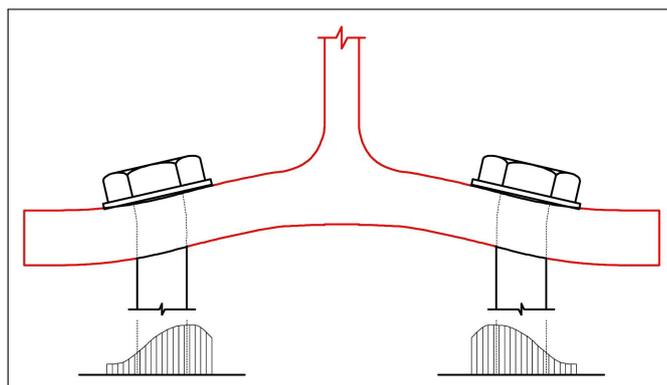


Figura 4.3: Esquema levantamiento del ala y distribución de presión en la cabeza de los pernos

En los modelos existentes para el levantamiento del ala, el concepto más importante es el "prying effect" o *apalancamiento*, que corresponde a la fuerza adicional a la tracción directa en los pernos que induce flexión sobre estos y que está principalmente determinada por la distancia entre los pernos y el eje central del alma. Para el modelo considerado en el protocolo FEMA 350. (2000) el mecanismo básico se muestra en la Figura 4.1 y corresponde a un equilibrio fundamental de fuerzas donde la tensión del perno (B) es la suma del apalancamiento (Q) más la fuerza aplicada al perfil (T). El supuesto de considerar la fuerza del apalancamiento actuando el borde del ala es aceptado, a menos que el largo desde los pernos hasta el borde llegue a ser muy grande o el espesor del ala llegue a ser muy pequeño. Swanson (2002).

En este modelo se considera que la fuerza del perno (B) actúa en la cara interna del orificio, hacia el centro o eje de simetría del perfil T-stub. Como se observa en la Figura 4.3, esta consideración está basada en la distribución de esfuerzos producida por la rigidez de la cabeza de los pernos y el grado de flexión presente en el ala y pernos.

4.1.3. Fractura por corte de los pernos

La capacidad nominal al corte de los pernos se puede estimar a partir de la ecuación 4.3.

$$R_3 = 2nA_bF_{vb} \quad (4.3)$$

Donde :

F_{vb} : Capacidad nominal de corte de los pernos, según AISC LRFD

Corresponde a uno de los mecanismos de falla frágil, por lo tanto no deseable. Replicar este mecanismo de falla de forma experimental es sumamente riesgoso por la violencia y energía liberada al momento de la rotura por corte de alguno de los pernos. En consecuencia, este mecanismo de falla no está incluido en la presente investigación.

4.1.4. Fluencia del área gruesa

La capacidad nominal del perfil a la fluencia del área gruesa se puede estimar a partir de la ecuación 4.4.

$$R_4 = wt_s F_y \quad (4.4)$$

Donde :

t_s : Espesor del alma

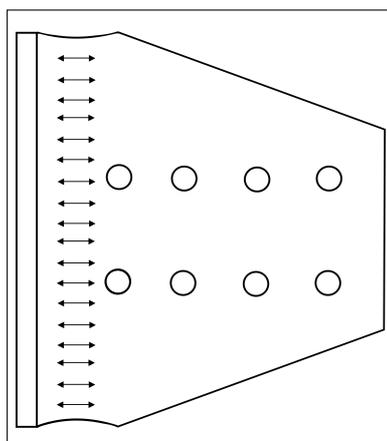


Figura 4.4: Esquema de fluencia en el área gruesa

Este modo de falla es definido por la norma AISC (2005b). Corresponde a la fluencia del área gruesa existente entre la última fila de pernos y el ala del perfil T-stub. Esta no es la única zona del alma que podría presentar deformaciones mayores de fluencia, tal como se muestra en el siguiente modo de falla.

4.1.5. Fractura del área neta

La capacidad nominal del perfil a la fractura del área neta se puede calcular usando la ecuación 4.5.

$$R_5 = F_{uT} (w - 2(d_{bt} + 0,125)) t_s \quad (4.5)$$

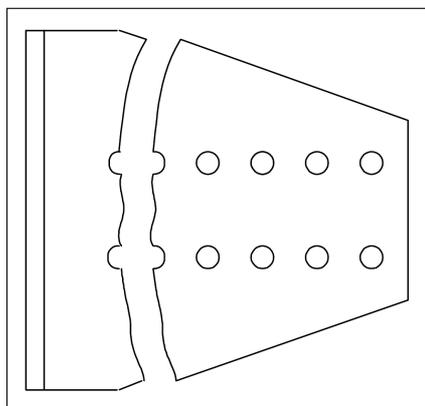


Figura 4.5: Esquema fractura del área neta

La estimación convencional de este modo de falla corresponde al esfuerzo nominal a la rotura del material base en el área neta, que es el área gruesa menos los orificios de los penos en la línea de esfuerzos:

$$A_n = (w - 2d_h)t_s \quad (4.6)$$

Donde :

A_n : Área neta

d_h : Diámetro efectivo de los orificios

Sin embargo, a partir de los ensayos realizados por Whitmore (1950) en conexiones de placas del tipo *gusset*, se concluyó que existe tan sólo un largo efectivo en el cual se desarrolla la fuerza de tracción en el área gruesa. La Figura 4.6 muestra el área neta efectiva a partir del lago efectivo propuesto por Whitmore, el cual se estima considerando una proyección de 30° a partir de la primera fila de pernos al corte en el alma del perfil T-stub.

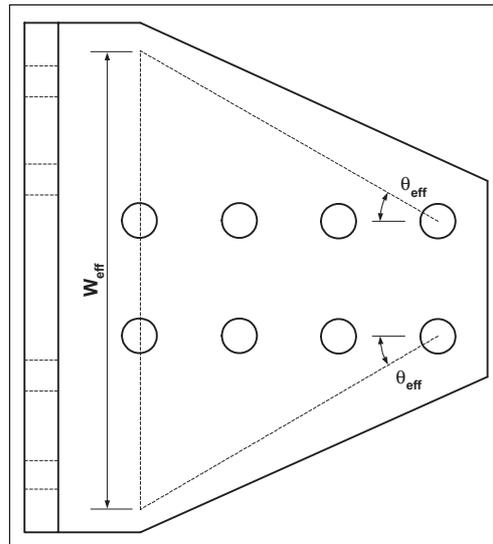


Figura 4.6: Esquema de Whitmore / ancho efectivo del alma

4.1.6. Bloque de corte

La capacidad nominal del perfil a la falla por bloque de corte se puede estimar usando las ecuaciones 4.7 - 4.8.

$$R_{6a} = 0,6F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \quad (4.7)$$

$$R_{6b} = 0,6F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \quad (4.8)$$

Donde :

$A_{g\nu}$: área gruesa sujeta a esfuerzo de cizalle

A_{nt} : área neta sujeta a esfuerzo de tracción

$A_{n\nu}$: área neta sujeta a esfuerzo de cizalle

U_{bs} : 1 para cargas de tracción uniformes

U_{bs} : 0.5 para cargas de tracción no uniformes

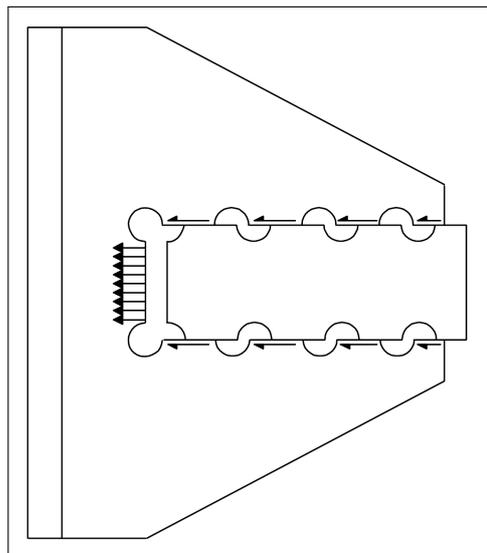


Figura 4.7: Esquema bloque de corte

El mecanismo de falla por bloque de corte presenta dos posibles configuraciones aceptadas. La primera, 4.7, considera fluencia en la zona de corte y rotura de la sección a tracción. La segunda, 4.8, considera rotura de la zona al corte y rotura de la zona en tracción.

Las ecuaciones que describen la falla por bloque de corte han sido constantemente revisadas y modificadas en los códigos de acuerdo a las nuevas investigaciones. Esta corresponde a la considerada en (AISC, 2010b), donde el valor de la variable U_{bs} corresponde a 1 si la carga de tracción es uniforme y a 0,5 si es no uniforme. De acuerdo a (AISC, 2010a) para este caso de estudio $U_{bs} = 1$.

4.1.7. Aplastamiento

La capacidad del perfil al aplastamiento de los pernos se puede estimar usando la ecuación 4.10.

$$R_{7a} = 1,2s_4t_sF_u \quad (4.9)$$

$$R_{7a} = 2,4d_{bt}t_sF_u \quad (4.10)$$

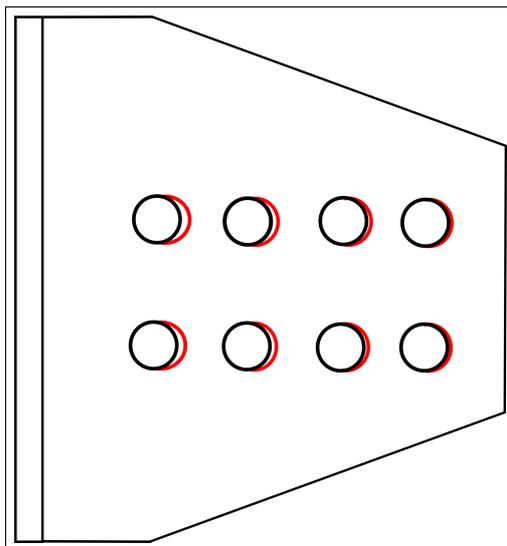


Figura 4.8: Esquema aplastamiento

El aplastamiento no corresponde a un modo de falla, sino a un modo de diseño de acuerdo a la deformación de los orificios que es considerada aceptable. En este caso es un parámetro de interés por la importancia de la deformación por aplastamiento respecto de la deformación total de los perfiles T-stub.

4.2. Probetas de ensayo

Respecto de las probetas que se ensayan en el presente estudio, se construyeron 10 tipologías distintas, cada una de las cuales con una probeta gemela por protocolo de ensayo; por tanto se ensayarán 20 probetas de perfiles soldados T-stub bajo carga cíclica. La geometría de las probetas está basada en el trabajo realizado por Herrera *et al.* (2009) en el cual los ensayos se realizaron bajo carga monotónica de tracción. Una de las posibilidades que ofrece esta opción de geometría es poder comparar la respuesta obtenida bajo carga monotónica en el pasado, contrastado con los resultados cíclicos obtenidos del presente estudio. Para dichos efectos se ha considerado un par de probetas similares al trabajo de Herrera *et al.* (2009) con la intención de poder realizar la comparación directamente.

Tal como se manifestó, uno de los principales objetivos del presente estudio es realizar una precalificación positiva de la utilización de una conexión DST compuesta de perfiles soldados T-stub. Para dichos efectos, la normativa que rige el procedimiento de pre calificación de nuevas conexiones, al cual se ajusta este estudio, corresponde al documento FEMA 350. (2000). Este será el protocolo de diseño de los perfiles, y tiene como base el estudio de la conexión precalificada DST construida de perfiles laminados. Queda de manifiesto, entonces, que la soldadura de los perfiles es uno de los parámetros distintivos sobre los cuales se pondrá atención. Para esto, es menester cuantificar los esfuerzos y deformaciones producidos a lo largo del alma y alas de los perfiles, analizar los diferentes modos de falla y la influencia de la soldadura en cada uno de estos; considerando que las principales variables que gobiernan los diferentes comportamientos corresponden a las siguientes:

1. Ubicación y espaciamiento de los pernos sometidos a tracción en las alas del perfil T.
2. Ubicación y espaciamiento de los pernos sometidos a corte en el alma del perfil T.
3. Razón entre espesores de Ala y alma
4. Tipo y calidad de los pernos a la tensión
5. Tipo y calidad de la soldadura

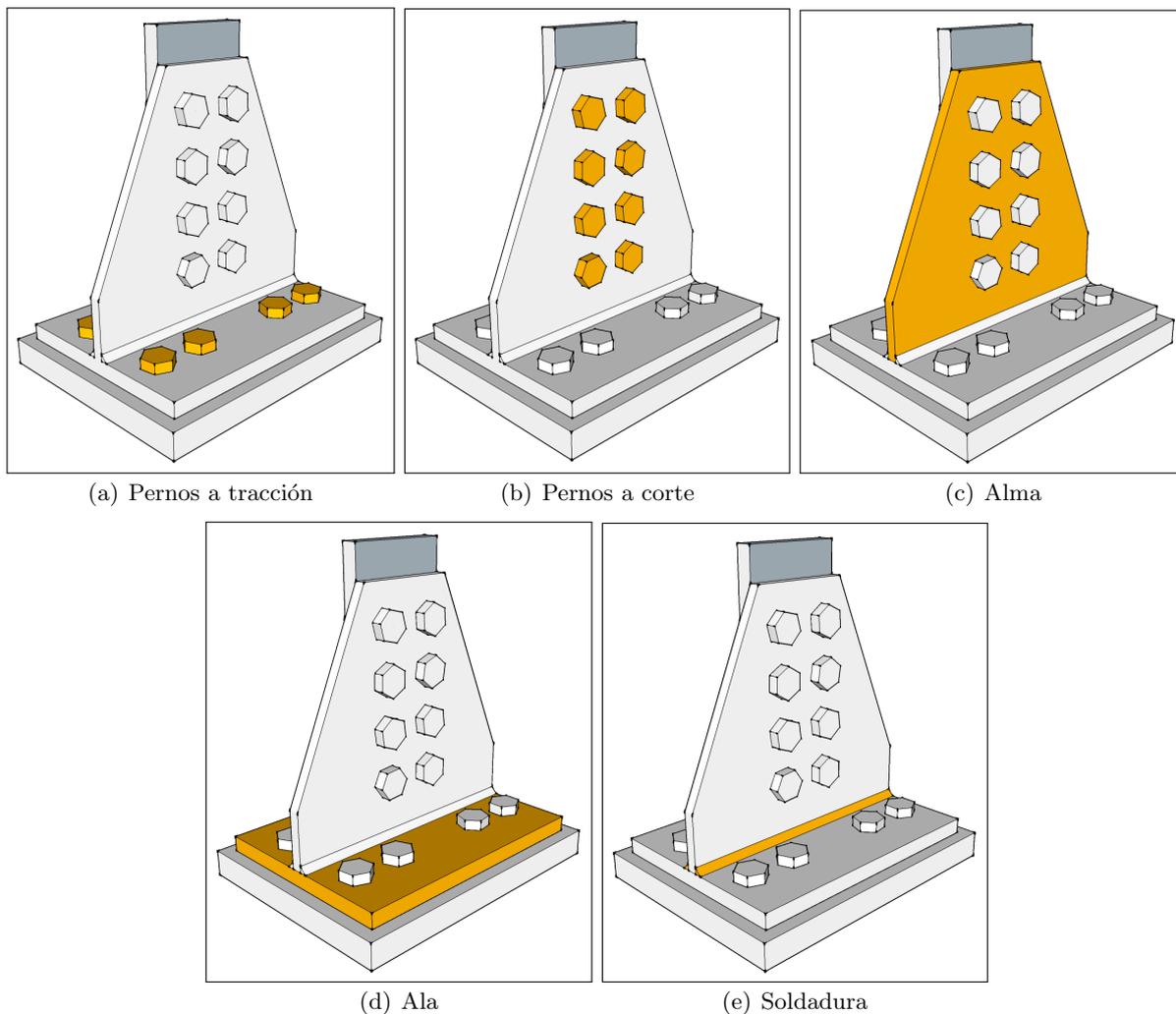


Figura 4.9: Identificación de las componentes del perfil T-stub

A continuación en la tabla 4.2 se presentan las configuraciones geométricas de todas las probetas que se someten a ensayo.

Tabla 4.2: Dimensiones de probetas - Serie TSM

ENSAYO N°	PROBETA N°	DIMENSIONES GLOBALES		DIMENSIONES ZONA REBAJADA			
		LARGO TOTAL [mm]	ANCHO [mm]	LARGO [mm]	ANCHO [mm]	ESPESOR [mm]	AREA [mm]
1	4-1	324	20.61	86.87	12.32	3.84	47.3
2	4-2	323	20.38	82.27	12.15	3.87	47.0
3	5-1	310	20.34	83.93	12.13	4.81	58.3
4	5-2	323	19.86	90.45	12.22	4.78	58.4
5	6-1	310	20.39	83.6	11.50	5.85	67.3
6	6-2	310	19.91	83.91	12.18	5.84	71.1
7	8-1	309	21.12	83.67	11.96	7.79	93.2
8	8-2	310	20.48	83.46	12.75	7.75	98.8
9	10-1	311	20.75	83.12	12.45	10.17	126.6
10	10-2	310	20.48	87.86	12.32	10.22	125.9
11	12-1	324	20.94	88.12	12.06	12.10	145.9
12	12-2	310	20.34	86.32	12.15	12.11	147.1

4.2.1. Materiales

Todos los pernos corresponden a elementos de alta resistencia del tipo ASTM A325 y ASTM A490 de 1/2" de diámetro. De acuerdo a la geometría de la instalación experimental se utilizan pernos a la tracción de 3" y al corte de 2" de largo, respectivamente. Es importante mencionar que en la instalación de los pernos al corte éstos deberán quedar correctamente instalados con el hilo excluido en el plano de corte, tal como se consideró en el diseño para la construcción de las probetas. Los pernos deben ser, además, pretensionados hasta alcanzar un 70% de la tensión de fluencia, lo que será detallado más adelante.

El acero base de los perfiles: ala y alma; corresponde al tipo *ASTMA36*. Para los distintos espesores de los perfiles utilizados se confeccionaron probetas laminares pertenecientes a la misma colada del acero del perfil, con la intención de corroborar las propiedades del acero de forma experimental a partir de un ensayo estándar de tracción. Por cada espesor de perfil se consideró dos probeta laminares, una en sentido longitudinal a la laminación y otra en sentido transversal; esto será detallado más adelante.

Los perfiles se construyeron a partir de planchas del acero especificado que se cortaron de acuerdo a las dimensiones exigidas. Estos perfiles - ala y alma - fueron unidos con un cordón de soldadura tipo filete o penetración completa, según corresponda, materializado de acuerdo a un sistema MIG. La selección del electrodo y tipo de soldadura se realizó de acuerdo a la normativa de ANSI/AWS (2002) y fue luego corroborada con INDURA (2007) según la factibilidad de su materialización en maestranzas chilenas. De acuerdo a la nomenclatura de la *AWS* los electrodos seleccionados corresponden a *ER – 60S – 6* y *ER – 70S – 6* según corresponda.

4.2.2. Diseño

La geometría de los perfiles que conforman este tipo de conexiones es bastante estándar, considerando las revisiones bibliográficas y las actuales pautas de diseño. Sin embargo, corresponde mencionar la diferencia existente en el tramo inicial del alma del perfil-T considerado para los ensayos de esta investigación. Éste corresponde a una sección del mismo ancho hasta donde comienza la última línea de pernos y desde allí hasta el final de alma comienza el angostamiento lineal, tal como se muestra en la figura 4.9. Otra variable que queda a disposición de quien diseña corresponde al número de pernos que se utilizará tanto para resistir los esfuerzos de corte y tracción. En esta investigación se utilizan 16 pernos por cada perfil-T considerando 8 para cada uno de los esfuerzos mencionados.

El diseño de los perfiles se realizó de acuerdo al protocolo para conexiones DTS laminadas de FEMA 350. (2000). Con esto se indentificó el modo de falla que se espera de cada uno de los perfiles y, por supuesto, el valor de la carga asociada al estado último que controla el diseño. Para los perfiles construidos con la intención de observar una falla en la zona de las alas, se verificó también el diseño de acuerdo a los tipos de fallas propuestos por Piluso *et al.* (2001a) presentado en el Capítulo 2. Estos corresponden a: *fluencia del ala y corte de los pernos en tracción previa fluencia del ala*. Ver Figura 2.20.

4.3. Instalación Experimental

Uno de los objetivos importantes para materializar la presente investigación fue el diseño, construcción y puesta en marcha del montaje experimental que permitió desarrollar, de la mejor manera posible, los ensayos de carga cíclica de los perfiles soldados T-Stub.

El montaje experimental se compone de un marco de acero de reacción dentro del cual se ensambla en su línea central un actuador, celda de carga y la probeta del perfil-T. Además del sistema de adquisición de datos que será presentado más adelante.

4.3.1. Marco de reacción

Como se observa en la figura 4.10, la estructura principal corresponde a un par de vigas y columnas dispuestas de forma simétrica, Las columnas corresponden a perfiles doble T. Las vigas, por su parte, también corresponden a perfiles doble T con atiesadores para restringir su deformación. La conexión de estos elementos es a través de una placa plana soldada a las columnas que se conecta con pernos a la viga. El material base corresponde a un acero *ASTMA36* y los pernos utilizados a *ASTMA325*. Los planos y la memoria de cálculo se presentan en el Anexo (Poner Número).

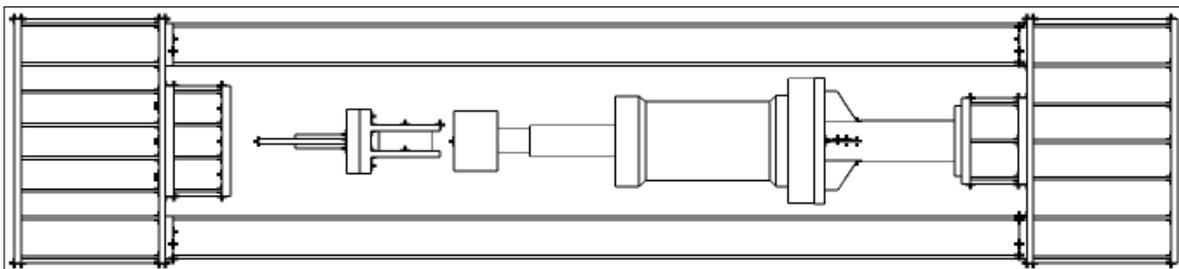


Figura 4.10: Esquema global del marco de reacción y sus diversas partes



Figura 4.11: Fotografía del marco de reacción durante su instalación

4.3.2. Actuador hidráulico

Corresponde a un cilindro hidráulico fabricado en Chile, su capacidad efectiva es de $100[ton]$. Está controlado a partir de una unidad de potencia hidráulica. Se presenta a continuación en la figura 4.12. El plano de diseño se adjunta en el Anexo(Poner Número).

4.3.3. Celda de carga

Como se observa en la figura 4.12, corresponde a una celda capaz de medir en ambas direcciones de carga: tracción y compresión. Fue importada desde Estados Unidos, fabricada por *Interface*, modelo 1200HC.1244. Su capacidad de carga nominal es $1200[kN]$. Esta se conecta directamente a

la cabeza articulada y por el otro lado al actuador a través de un pasador con hilo. La ficha técnica se adjunta en el Anexo (Poner número).



Figura 4.12: Fotografía del actuador y celda de carga durante pruebas de calibración

4.3.4. Unidad de potencia óleo - hidráulica

Corresponde a una unidad de potencia óleo hidráulica compuesta de un estanque de XX litros. El motor en conjunto con los sistemas de filtro y enfriamiento funcionan eléctricamente para lo cual se construyó un empalme eléctrico trifásico de 100 [A]. Esta unidad se dispuso a una presión constante de 150 [Bar] para la realización de los ensayos.

4.3.5. Sistema de control

Corresponde al control digital del actuador a través de una servo válvula Moog del tipo G76 de 63 [lts/min] la cual se operó a través un laptop en el cual se construyó un programa en lenguaje MOOG - MACS que permitía desempeñar todas las funciones requeridas para el desarrollo de los experimentos. En la figura 4.13 se muestra una fotografía de la servo válvula durante su instalación.



Figura 4.13: Fotografía de la servo válvula durante su instalación

4.3.6. Sistema de adquisición de datos

Corresponde al esquema de adquisición de datos provenientes de: celda de carga, actuadores y strain gages. Se construyó una caja de conectores DB9 en la cual convergían los 12 canales de señales análogas, caja que a su vez se conectó a un convertor de señales análogas - digitales (*National Instruments* modelo NI SCXI - 1000). Finalmente se capturaron los datos digitalmente a través de un *laptop* mediante el software *Labview*. El acondicionador de las señales del LVDT principal, celda de carga y servo válvula corresponde a un PLC (*Programmable Logic Controller*).



(a) Convertor de señal análogo - digital



(b) PLC

Figura 4.14: Fotografías sistema de control y acondicionamiento de datos

Capítulo 5

Metodología Experimental e Instrumentación

5.1. Metodología de ensayo para probetas planas de material base

Con la intención de conocer las propiedades mecánicas reales del material base utilizado en la confección de los perfiles soldados T-stub se construyeron cupones de material los cuales fueron sometidos a un ensayo de tracción estándar.

Se confeccionaron 2 probetas planas por cada espesor de plancha utilizado en los perfiles soldados T-stub considerando alma y ala, por lo cual se obtuvieron 12 cupones. El objetivo de ensayar 2 cupones por cada espesor es poder conocer las propiedades reales del material base en el sentido longitudinal y transversal de laminación del material, esto considerando que las placas entregadas por maestranza corresponden efectivamente a lo especificado. Alma y ala del perfil soldado T-stub trabajan en sentido ortogonal. A priori no se conoce el sentido de laminación de los perfiles y la resistencia del acero cambia de forma significativa de acuerdo al sentido de las fibras; por tanto es de suma importancia conocer el comportamiento mecánico en ambos casos para cada uno de los espesores utilizados en los perfiles soldados T-stub.

La metodología de ensayo corresponde a la proporcionada por la norma NCh200 of.72 INN (1972), la cual está basada en la norma internacional E8 – 04 ASTM (2004). Los ensayos fueron desarrollados por el Laboratorio de Estructuras de IDIEM (Instituto de Investigación y Ensayos de Materiales).

La información entregada por los ensayos y de interés para la presente investigación corresponden a:

- Tensión de fluencia
- Tensión de rotura
- Módulo de Young

- Deformaciones

La geometría y dimensiones de los cupones planos se presentan en la Fig. 5.1.

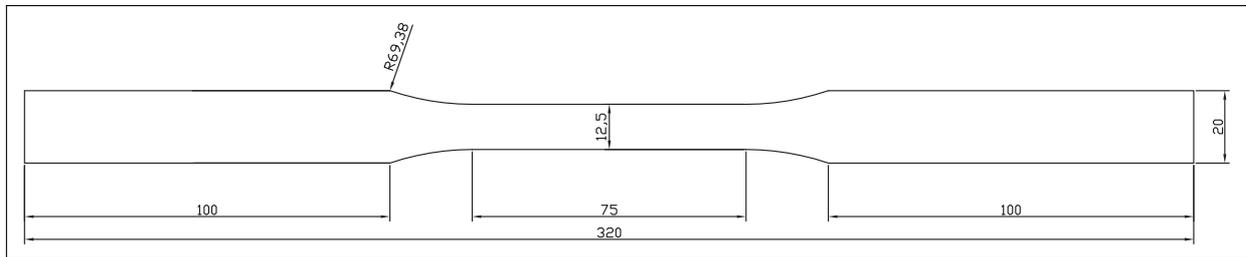


Figura 5.1: Geometría y dimensiones en [mm] cupón plano - ASTM E8 - 04 (2008)

5.1.1. Instrumentación de ensayo para probetas planas de material base

Los ensayos se realizaron sólo a tracción como establece la norma en una máquina universal de carga del tipo MFL con una capacidad de 600 [kN], un LVDT marca TML, modelo EDP-5A-50. Este se conecta digitalmente a una máquina de adquisición de datos, modelo TDS-602 la cual realiza un registro a una frecuencia de 1 [seg]. La zona libre de medición entre ambos extremos del adaptador del LVDT corresponde a $L_0 = 50$ [mm], la cual resulta muy importante pues permite determinar la deformación unitaria del material. En la figura 5.2 y 5.3 se muestra la máquina universal de carga y el LVDT respectivamente.



Figura 5.2: Máquina universal de carga - MFL



Figura 5.3: LVDT y probeta plana

5.2. Metodología de ensayo pernos ASTM A325 - A490

Se realizaron ensayos de tracción para conocer las propiedades mecánicas reales de los pernos utilizados en las diferentes configuraciones de perfiles T-stub soldados.

Los ensayos se realizaron a 5 pernos del tipo A325 y a 3 pernos A490 de alta resistencia; pertenecientes a la partida de pernos adquirida para los ensayos de los perfiles T-stub soldados. Todos de 1/2" de diámetro, los cuales fueron ensayados de acuerdo a la norma internacional A325 ASTM (2010) y encargados al Laboratorio de Estructuras de IDIEM (Instituto de Investigación Y Ensayos de Materiales).

Los parámetros proporcionados por los ensayos y de interés para la presente investigación corresponden a:

- Tensión de fluencia
- Tensión de rotura
- Módulo de Young

5.3. Instrumentación de ensayo pernos ASTM A325 - A490

La máquina de ensayos corresponde a la misma utilizadas para los ensayos de probetas planas, al igual que los LVDT utilizados, que en este caso corresponden a 2 unidades. Para la fijación del perno a la máquina se utiliza en la zona superior una plancha de acero macizo por la cual pasa el perno a través de una perforación, en la zona baja se utiliza una copla cilíndrica en la cual se introduce el perno en la perforación con hilo hembra. Sólo 2 de los 13 hilos quedan al descubierto, generando un largo efectivo inicial de $L_0 = 52$ [mm] entre la copla y la cara inferior de la plancha maciza superior; largo que resulta muy importante pues permite determinar la deformación unitaria del material

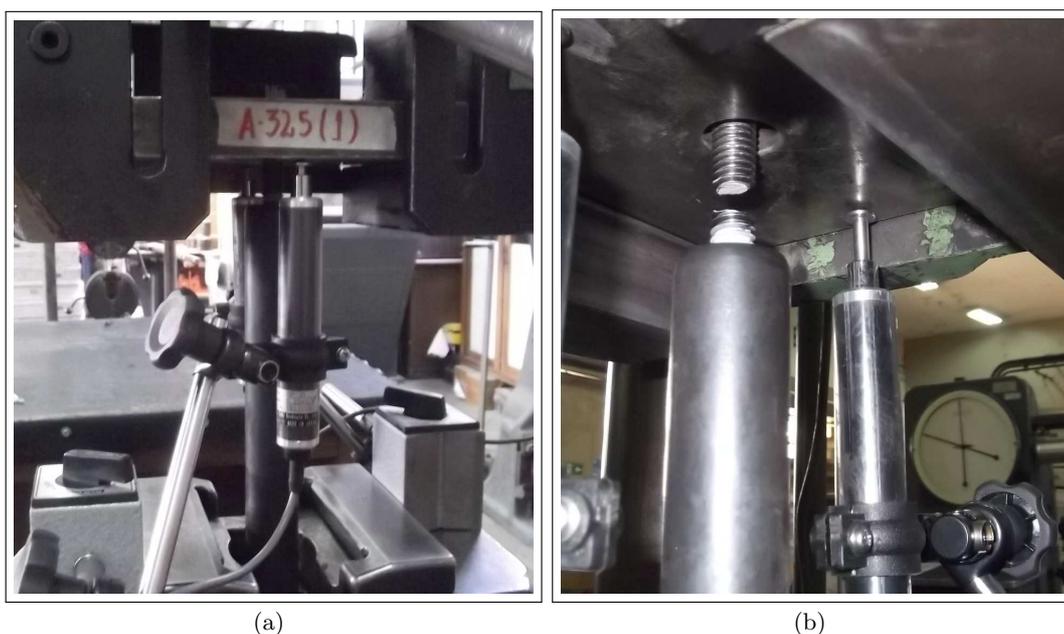


Figura 5.4: LVDT, copla, fijaciones, máquina y pernos

5.4. Metodología de ensayo perfiles soldados T-stub

Los ensayos se realizaron en el Taller de Procesos Mecánicos perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica. Para esto se utilizó el marco de carga construido y toda su instrumentación.

La secuencia de ensayos consideró inicialmente las diez configuraciones con una doble intención: conocer la respuesta de todas las probetas de perfiles T-stub soldados y no realizar de forma seguida el ensayo de dos probetas similares para evitar el riesgo de cometer el mismo posible error de instrumentación y/o procedimiento. De esta forma la secuencia establecida es la que se muestra en la tabla 5.1.

El nombre y ordenamiento de los perfiles se realizó al ser recibidos desde la maestranza, considerando que serían ensayados en el mismo orden, pues se dejó los perfiles T que requerían menos carga en su protocolo de ensayo al comienzo con la intención de comenzar gradualmente

el nivel de esfuerzo al cual se sometería marco de reacción y todo el sistema de experimentación para evitar riesgos iniciales a grandes niveles de carga. Fueron además nombradas para facilitar los ensayos, posterior procesamiento y presentación de resultados.

El primer procedimiento realizado sobre los perfiles T soldados fue revisarlos minuciosamente con la intención de poder explicar posteriores problemas o comportamientos erróneos que tuvieran su raíz en defectos constructivos. En esta inspección se elaboró una Ficha de Inspección para cada probeta la que cuenta además con fotografías de cada una, esta ficha se adjunta en los anexos de la presente investigación. El hecho más importante a consignar producto de esta revisión corresponde a que ambas probetas TSM-6 y la probeta TSM-7-1 fueron rechazadas y sustituidas por la misma maestranza pues las perforaciones correspondientes al alma de los perfiles se encontraban desanguladas impidiendo el correcto montaje para su posterior ensayo. Las demás imperfecciones corresponden a pequeños detalles que no merecen ser enumerados en esta sección pero están consignados en las fichas de inspección correspondientes.

A continuación se enumeran los pasos más relevantes del proceso de ensayo para todas las probetas:

1. Lijar todas las caras libres de las probetas para retirar el óxido. Este procedimiento fue necesario para algunos pasos posteriores.
2. Instalar 3 *strain gages* en el alma de cada probeta, cercanos a la zona de la soldadura y dispuestos simétricamente. Se conectaron los 3 *strain gages* a un solo conector DB9 para ordenar y facilitar la adquisición de datos.
3. Distribuir todos los elementos necesarios para cada probeta, previa revisión del correcto estado, correspondiente a pernos, golillas y tuercas.
4. Conectar los *strain gages* al sistema de adquisición de datos para comprobar su funcionamiento. Se detectaron desfases en los voltajes medios de algunas probetas, pero todos funcionaron correctamente; esta información detallada se encuentra en la ficha de inspección adjunta en los anexos.
5. Pintar con una mezcla de cal (cal en polvo, agua y sal) la cara libre del alma de cada probeta, del mismo lado de los *strain gages* con la intención de ver las líneas de fisuración y estiramiento del alma durante el ensayo.
6. Instalar 2 pequeños perfiles L al nivel de las alas de la probeta (con acero líquido), con la intención de fijar ahí posteriormente 2 LVDT's.
7. Instalar un perfil L de aluminio en el borde del alma de la probeta (con acero líquido), con la intención de fijar ahí posteriormente 2 LVDT's.

8. Conectar el ala de la probeta al marco de reacción, utilizando los pernos de media pulgada de diámetro A325 y A490 de $2\frac{7}{8}$ " de largo según corresponda. Los pernos fueron pretensados con una llave de torque de acuerdo al torque establecido por norma. Esta faena se realizó del lado de las tuercas para los 4 pernos superiores y del lado de las cabezas de los pernos para las 4 inferiores (por limitaciones en el espacio entre el marco y el suelo) por lo cual se utilizó doble golilla (en cabeza y tuerca) para todos los pernos.
9. Instalar la placa rígida respectiva, la cual se conecta al alma de la probeta fijada por los pernos sometidos a cizalle. Esta placa se conectó al sistema de carga a través de 6 pernos de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro. Estos fueron pretensados con llave de torque de acuerdo a norma.
10. Conectar el alma de la probeta a la placa rígida recién instalada, utilizando los pernos de media pulgada de diámetro A325 de 2" de largo. Para la lograr el correcto ajuste de los orificios movió el vástago del cilindro hidráulico de forma muy cuidadosa. Una vez instalados los pernos se pretensaron con una llave de torque de acuerdo a norma.
11. Instalar un perfil L de aluminio transversalmente (con acero líquido) en la placa rígida para fijar ahí posteriormente 2 LVDT's.
12. Instalar los 6 LVDT's utilizados, los cuales se sostuvieron con tenazas a través de bases magnéticas puestas en puntos fijos (columnas y viga del marco de carga). Las puntas de los vástagos de los LVDT's fueron plástificadas para no inducir ruido eléctrico y se fijaron en los orificios de los perfiles instalados a través de un sistema de tuerca y contra tuerca.
13. Conectar los cables de puente para los LVDT's y *strain gages* al sistema de adquisición de datos.
14. Conectar los cables de puente de la celda de carga, LVDT del cilindro y servo válvula al sistema de adquisición de datos.
15. Testear el correcto funcionamiento de todos los canales del sistema de adquisición de datos, así como el correcto funcionamiento del sistema de control.
16. Instalar dos cámaras. Una del tipo *webcam* que permitía ver el desarrollo del ensayo en línea desde el lugar de control. La segunda se instaló en diversos puntos de interés según la probeta, ya sea para captar el levantamiento del ala o la deformación del alma.
17. Una vez encendida la bomba y puesta a unos 150 [Bar] se esperó unos 5 min a que se estabilizara el sistema de control. Con esto se dio comienzo el ensayo en tracción a una velocidad de carga de 0,018 [mm/s]. Una vez alcanzada la deformación requerida en tracción, la cual era proporcionada por los LVDT's correspondientes y visualizada en el monitor de control; se invertía manualmente el sentido del movimiento para comenzar el ciclo en compresión. Así sucesivamente hasta alcanzar la falla de la probeta.

Tabla 5.1: Secuencia de ensayos perfiles soldados T-stub

N° Ensayo	Probeta	N° Ensayo	Probeta
1	TSM1-1	11	TSM1-2
2	TSM2-1	12	TSM2-2
3	TSM3-1	13	TSM3-2
4	TSM4-1	14	TSM4-2
5	TSM5-1	15	TSM5-2
6	TSM6-1	16	TSM6-2
7	TSM7-1	17	TSM7-2
8	TSM8-1	18	TSM8-2
9	TSM9-1	19	TSM9-2
10	TSM10-1	20	TSM10-2

5.5. Instrumentación de ensayo perfiles soldados T-stub

El primer instrumento corresponde al marco de carga construido para desarrollar los ensayos, 1 cilindro oleo hidráulico, 1 sistema de bomba de aceite, 1 celda de carga marca *Interface* de 100 [Tonf] de capacidad en tracción y compresión, 1 LVDT *Macro Sensors* de 10 pulgadas de carrera, 4 LVDT's marca *Schaevitz* de 2 pulgadas de carrera, 2 LVDT's marca *Schaevitz* de 1 pulgada de carrera, 3 *strain gages* marca *Vishay* modelo 250UN, 1 servo válvula marca *MOOG* modelo G76 de 63 [lt/min], 1 PLC (*Programmable Logic Controller*) para controlar digitalmente la servo válvula y adquirir, también digitalmente, los datos de la Celda de carga y el LVDT principal del actuador, 1 conversor de señal análogo digital marca *National Instruments* modelo *NI SCXI - 1000*, 1 computador para controlar el actuador a través del PLC, 1 computador para realizar la adquisición de datos a través de *Labview* y 1 computador para visualizar el ensayo a través de la *webcam*.

A continuación se detalla la ubicación de los sensores principales de medición y qué parámetro de interés capturan:

- 3 *strain gages* (*Vishay* - 250UN) denotados S1, S2 y S3 fueron utilizados en la medición de la deformación del alma se instalaron en la zona baja cercana a la soldadura, como se observa en la figura 5.5.
- 2 LVDT's (*Schaevitz* - DC-SE 1"), denotados E y F, fueron utilizados en la medición de el levantamiento del ala y se fijaron a sendos perfiles L fijos a cada lado del ala del perfil, como se observa en la figura 5.5
- 2 LVDT's (*Schaevitz* - DC-SE 2"), denotados C y D, fueron utilizados en la medición de la deformación del alma y se fijaron a un perfil L de aluminio pegado al alma del perfil T, como se observa en la figura 5.6

- 2 LVDT's (*Schaevitz* - DC-SE 2"), denotados A y B, fueron utilizados en la medición de la deformación total de la conexión. Al ser fijado al perfil L de aluminio pegado a la placa de acero rígida permitía además captar el deslizamiento entre el alma del perfil T-stub soldado y el ala de viga, como se observa en la figura 5.6.
- 1 LVDT (*Macro sensors* de 10") para controlar el movimiento del vástago del actuador oleo hidráulico, como se observa en la figura 5.7.

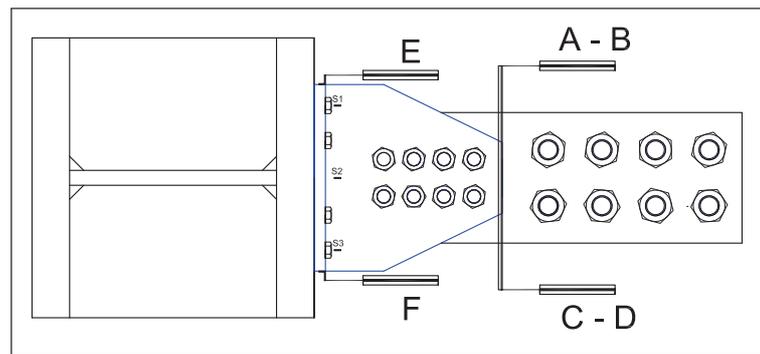


Figura 5.5: Esquema de vista lateral del sistema de instrumentación

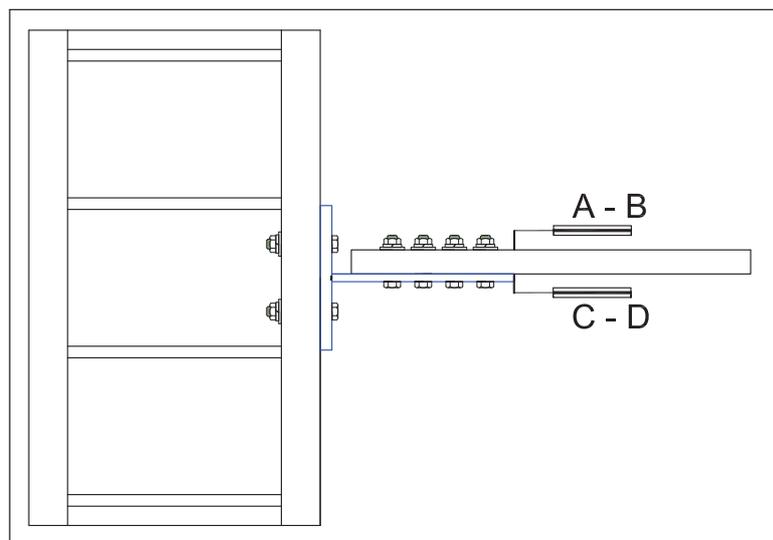


Figura 5.6: Esquema de vista frontal del sistema de instrumentación

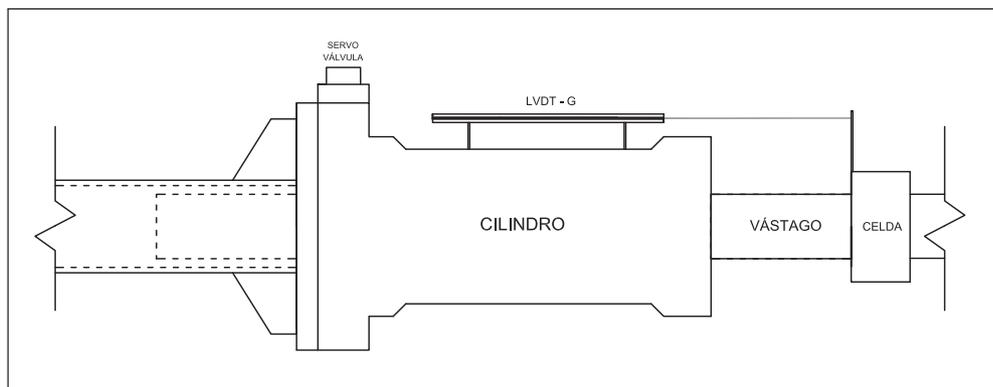


Figura 5.7: Esquema de vista lateral del sistema de instrumentación

Para estandarizar y facilitar la realización de todos los ensayos y posterior procesamiento de información, se utilizó la misma configuración de canales para la adquisición de datos en todos los casos, la que se presenta en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Secuencia de canales del sistema de adquisición de datos

Instrumento	Canal
LVDT - cilindro	1
Celda de carga	2
LVDT 1	3
LVDT 2	4
LVDT 3	5
LVDT 4	6
LVDT 5	7
LVDT 6	8
SG 1	9
SG 2	10
SG 3	11

Capítulo 6

Análisis de ensayos de materiales

6.1. Ensayos de probetas planas de acero ASTM A36

Antes de ensayar las probetas se recogió toda la información geométrica que será necesaria post-ensayo para calcular sus propiedades y desempeño mecánico. En la tabla 6.1 se presentan las medidas geométricas. Con la intención de medir correctamente el alargamiento de la probeta, se realizaron marcas cada 1 [cm] en la zona rebajada, tal como establece la norma especificada anteriormente; se detalla esta información en la tabla 6.2.

Tabla 6.1: Propiedades geométricas probetas planas Acero ASTM A36

ENSAYO N°	PROBETA N°	DIMENSIONES GLOBALES		DIMENSIONES ZONA REBAJADA			
		LARGO TOTAL [mm]	ANCHO [mm]	LARGO [mm]	ANCHO [mm]	ESPESOR [mm]	AREA [mm]
1	4-1	324	20.61	86.87	12.32	3.84	47.3
2	4-2	323	20.38	82.27	12.15	3.87	47.0
3	5-1	310	20.34	83.93	12.13	4.81	58.3
4	5-2	323	19.86	90.45	12.22	4.78	58.4
5	6-1	310	20.39	83.6	11.50	5.85	67.3
6	6-2	310	19.91	83.91	12.18	5.84	71.1
7	8-1	309	21.12	83.67	11.96	7.79	93.2
8	8-2	310	20.48	83.46	12.75	7.75	98.8
9	10-1	311	20.75	83.12	12.45	10.17	126.6
10	10-2	310	20.48	87.86	12.32	10.22	125.9
11	12-1	324	20.94	88.12	12.06	12.10	145.9
12	12-2	310	20.34	86.32	12.15	12.11	147.1

Tabla 6.2: Alargamiento probetas planas Acero ASTM A36

ALARGAMIENTO					
ENSAYO	PROBETA	L_0	L_f	$\Delta = L_f - L_0$	Δ
N°	N°	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
1	4-1	50	64	14	28.0
2	4-2	50	62	12	24.0
3	5-1	50	60	10	20.0
4	5-2	50	62	12	24.0
5	6-1	50	63	13	26.0
6	6-2	50	64	14	28.0
7	8-1	50	62	12	24.0
8	8-2	50	65	15	30.0
9	10-1	50	66	16	32.0
10	10-2	50	67	17	34.0
11	12-1	50	66	16	32.0
12	12-2	50	66	16	32.0

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados a las probetas planas. Corresponden a la información entregada por la máquina universal de carga y el extensómetro utilizados. Se muestran sucesivamente todos los ensayos en respectivos gráficos carga - deformación. Es menester señalar que no todos los ensayos muestran claramente la zona lineal, de fluencia y endurecimiento respectivamente; esto principalmente por una incorrecta realización de los ensayos, en particular por el deslizamiento del extensómetro respecto de la probeta plana. Por lo tanto, el desempeño del material durante el ensayo no queda correctamente registrado. Sin embargo, la capacidad de la probeta que da cuenta de la resistencia última está correctamente registrada pues corresponde a la fuerza entregada por la máquina universal al momento de la falla. La etapa de estricción previa a la rotura no se aprecia pues el extensómetro fue retirado antes de alcanzar esta zona, por seguridad.

A partir de los datos presentados en los gráficos y de acuerdo a lo indicado en Timoshenko & Gere (1962) fue posible obtener los siguientes parámetros relevantes:

- Tensión de fluencia - $[F_y]$
- Tensión última o de rotura - $[F_u]$
- Módulo de Young - $[E]$

Se presentan sucesivamente las curvas de carga - deformación, tabla de propiedades mecánicas y fotografías de las probetas ensayadas, para todos los espesores de probetas planas. Ciertos parámetros figuran sin información pues los datos recibidos de los ensayos no han permitido calcularlos correctamente, ya sea por errores en la realización de los mismos ensayos o en la presentación de los resultados.

6.1.1. Probetas planas 4[mm]

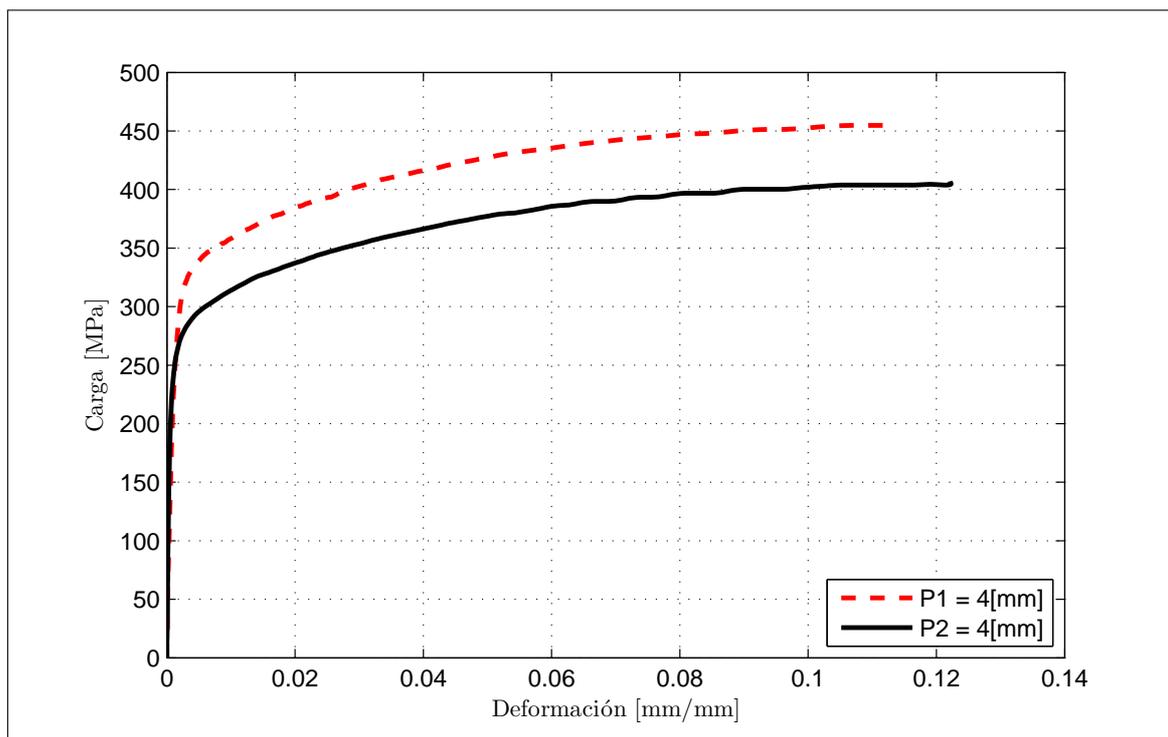


Figura 6.1: Curva carga - deformación de probeta plana de 4 [mm]

Tabla 6.3: Propiedades de probetas planas de 4 [mm]

4 [mm]	Probeta	
	P1	P2
Propiedades		
E [GPa]	-	229.37
Fy [MPa]	279.02	327.52
Fu [MPa]	414.30	459.37
ϵ [%]	28.00	24.00
Laminación	T	L

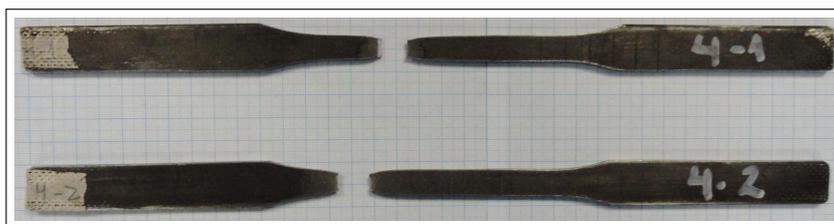


Figura 6.2: Probetas planas de 4 [mm]

6.1.2. Probetas planas 5[mm]

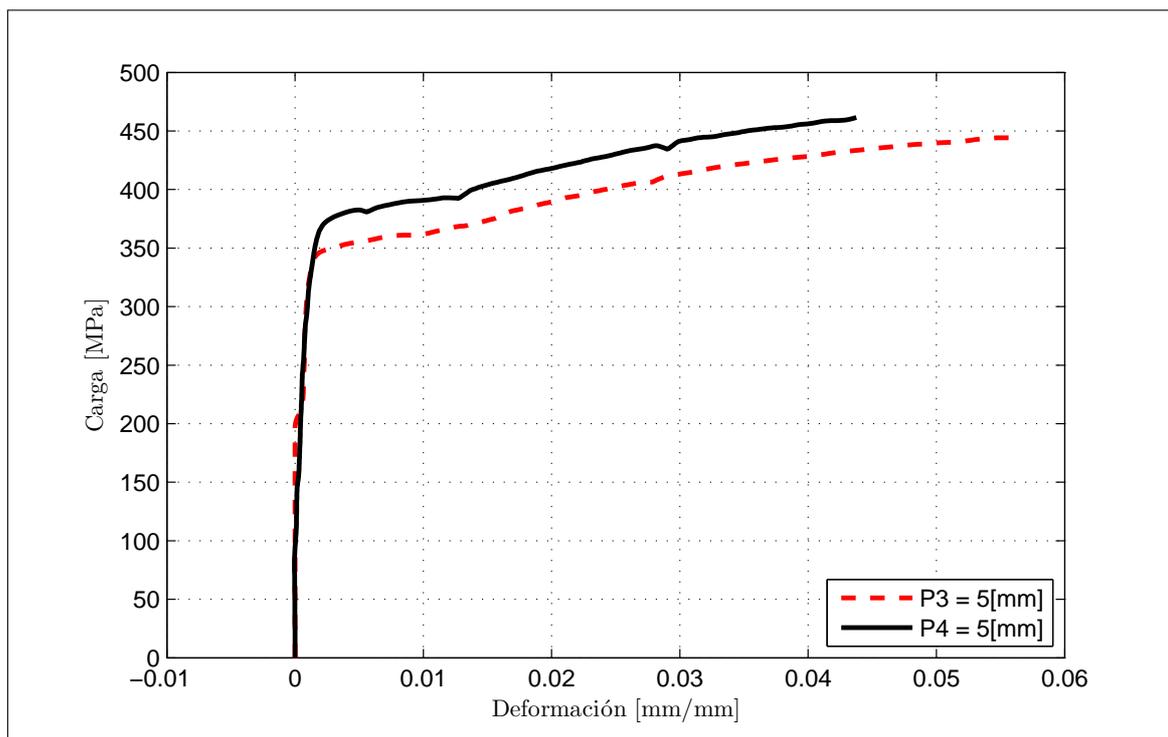


Figura 6.3: Curva carga - deformación de probeta plana de 5 [mm]

Tabla 6.4: Propiedades de probetas planas de 5 [mm]

5 [mm]	Probeta	
	P3	P4
Propiedades		
E [GPa]	219.84	156.00
Fy [MPa]	377.07	-
Fu [MPa]	491.90	477.64
ϵ [%]	20.00	24.00
Laminación	L	T



Figura 6.4: Probetas planas de 5 [mm]

6.1.3. Probetas planas 6[mm]

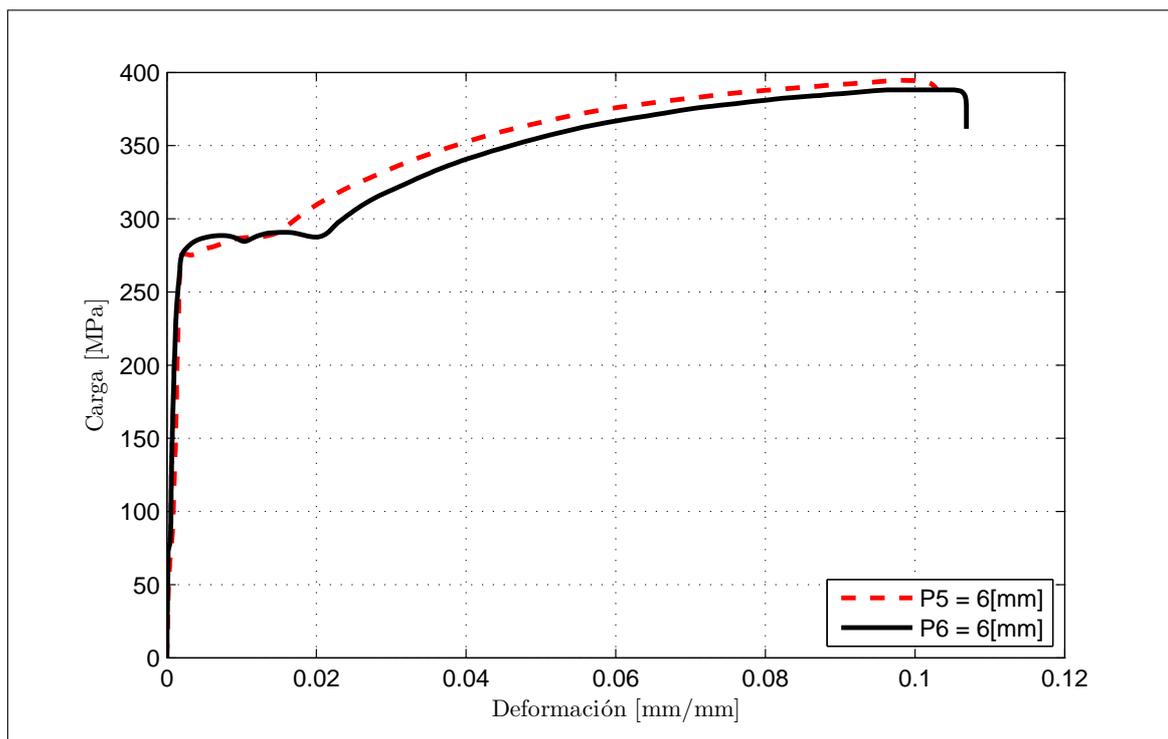


Figura 6.5: Curva carga - deformación de probeta plana de 6 [mm]

Tabla 6.5: Propiedades de probetas planas de 6 [mm]

6 [mm]	Probeta	
	P5	P6
Propiedades		
E [GPa]	180.90	198.20
Fy [MPa]	294.31	283.98
Fu [MPa]	395.39	400.67
ϵ [%]	26.00	28.00
Laminación	T	L



Figura 6.6: Probetas planas de 6 [mm]

6.1.4. Probetas planas 8[mm]

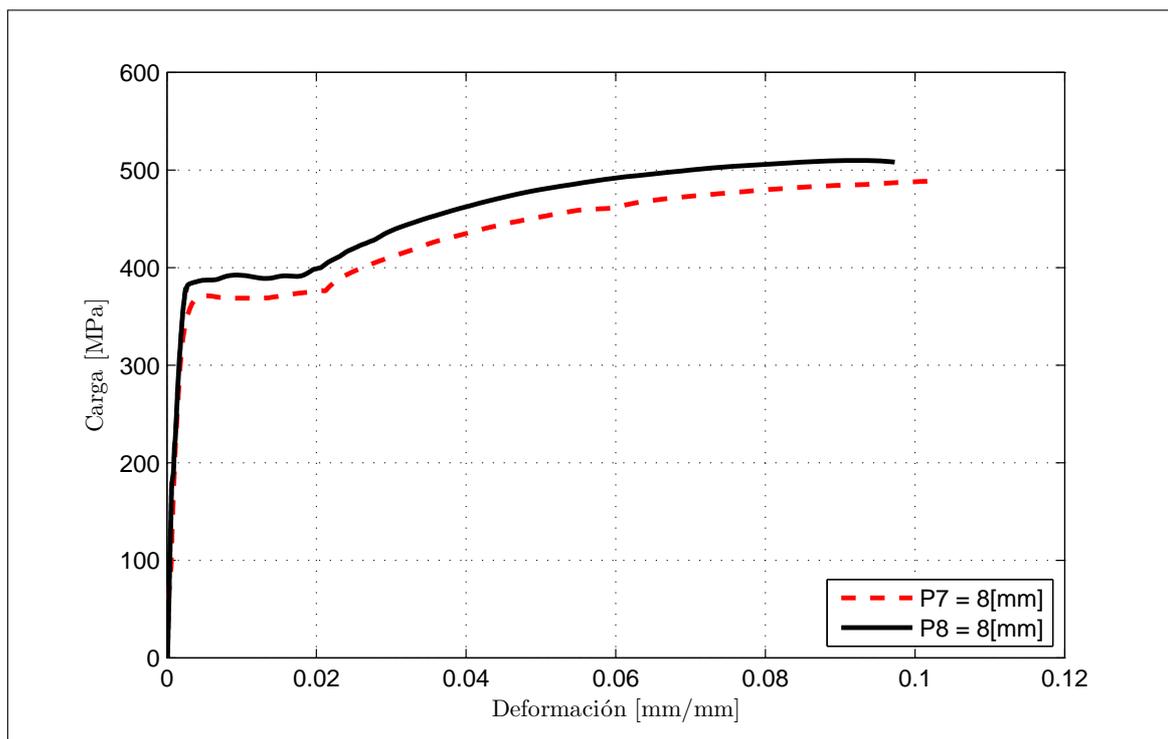


Figura 6.7: Curva carga - deformación de probeta plana de 8 [mm]

Tabla 6.6: Propiedades de probetas planas de 8 [mm]

8 [mm]	Probeta	
	P7	P8
Propiedades		
E [GPa]	175.69	186.45
Fy [MPa]	384.25	376.47
Fu [MPa]	515.20	501.96
ϵ [%]	24.00	30.00
Laminación	L	T



Figura 6.8: Probetas planas de 8 [mm]

6.1.5. Probetas planas 10[mm]

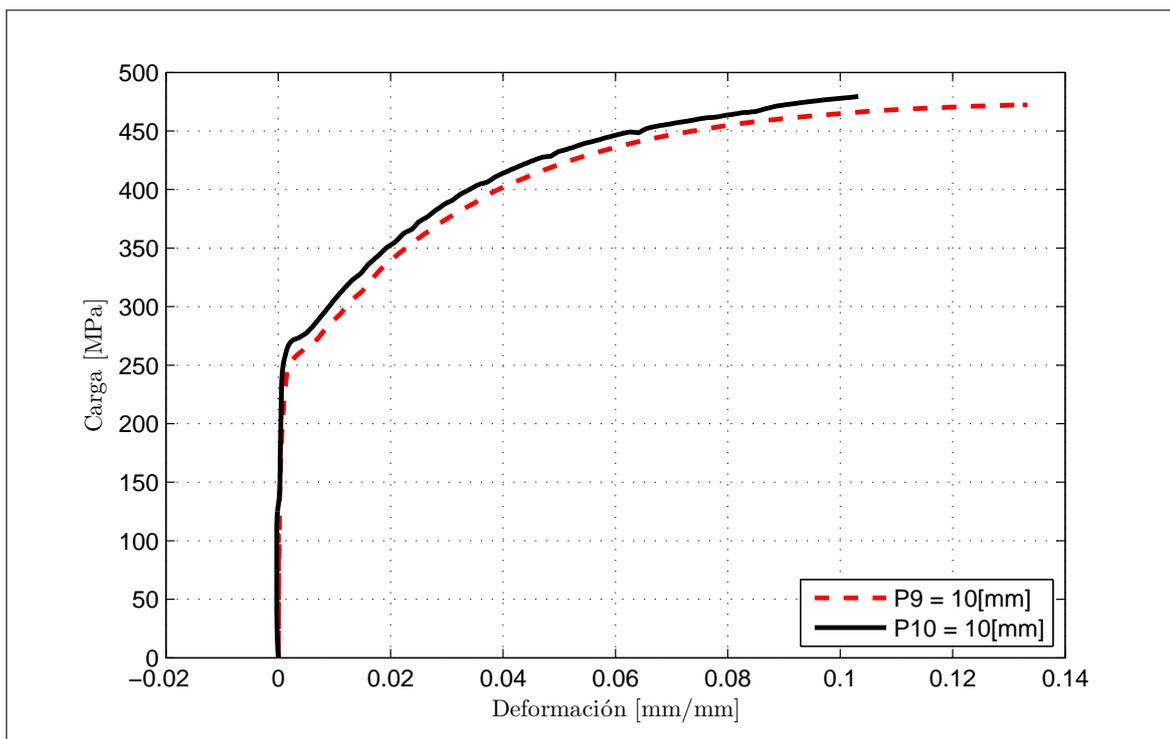


Figura 6.9: Curva carga - deformación de probeta plana de 10 [mm]

Tabla 6.7: Propiedades de probetas planas de 10 [mm]

10 [mm]	Probeta	
Propiedades	P9	P10
E [GPa]	239.21	196.15
Fy [MPa]	281.95	257.33
Fu [MPa]	495.99	486.85
ϵ [%]	32.00	34.00
Laminación	L	T



Figura 6.10: Probetas planas de 10 [mm]

6.1.6. Probetas planas 12[mm]

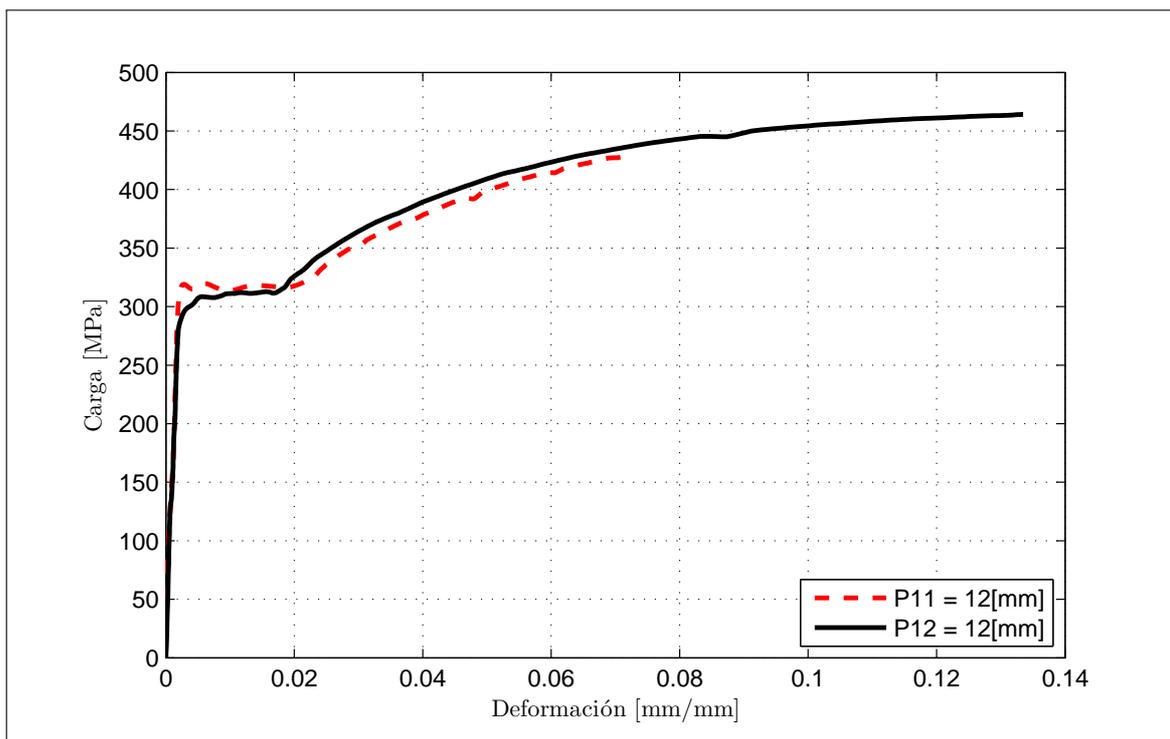


Figura 6.11: Curva carga - deformación de probeta plana de 12 [mm]

Tabla 6.8: Propiedades de probetas planas de 12 [mm]

12 [mm]	Probeta	
Propiedades	P11	P12
E [GPa]	139.14	134.11
Fy [MPa]	316.60	320.79
Fu [MPa]	474.21	477.11
ϵ [%]	32.00	32.00
Laminación	T	L



Figura 6.12: Probetas planas de 12 [mm]

Analizados de forma grupal, los ensayos de probetas planas muestran adecuados resultados. Tan sólo en dos probetas no se pudo estimar correctamente la tensión de fluencia y el módulo de Young. El promedio de los resultados está dentro de lo exigido por la norma Standard (n.d.), la cual demanda un tensión de fluencia mínima de 248 [MPa], un rango de tensión última entre 450 y 550 [MPa] y finalmente un alargamiento mínimo del 23 %. Los resultados presentados en la tabla 6.9 corresponden al promedio de las muestras con un intervalo de confianza del 90 %, el cual deja fuera los datos extremos que podrían estar eventualmente mal estimados experimentalmente.

6.1.7. Promedio de propiedades mecánicas Acero ASTM A36

Tabla 6.9: Resumen de propiedades mecánicas acero ASTM A36

Propiedades		Promedios	
E	[GPa]	190.96	183.38
Fy	[MPa]	322.20	313.22
Fu	[MPa]	464.50	467.27
ϵ	[%]	27.00	28.67
Laminación		T	L

6.2. Ensayos de pernos ASTM A325 y A490

Se presentan a continuación los resultados de los ensayos de pernos A325 y A490. Las curvas de carga - deformación están corregidas para no considerar la deformación de la zona de ajuste del sistema de carga antes de que el perno tome carga efectiva. Todos los pernos fallaron en la zona del hilo por lo cual se realizó una corrección del área para considerar el área efectiva de la zona de fractura como se observa en la ecuación 6.1:

$$A_{efectiva} = 0,785 \left(d_b - \frac{0,9743}{n} \right)^2 = 91,5 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (6.1)$$

Donde

d_b : Diámetro del perno

n : Número de hilos por pulgada

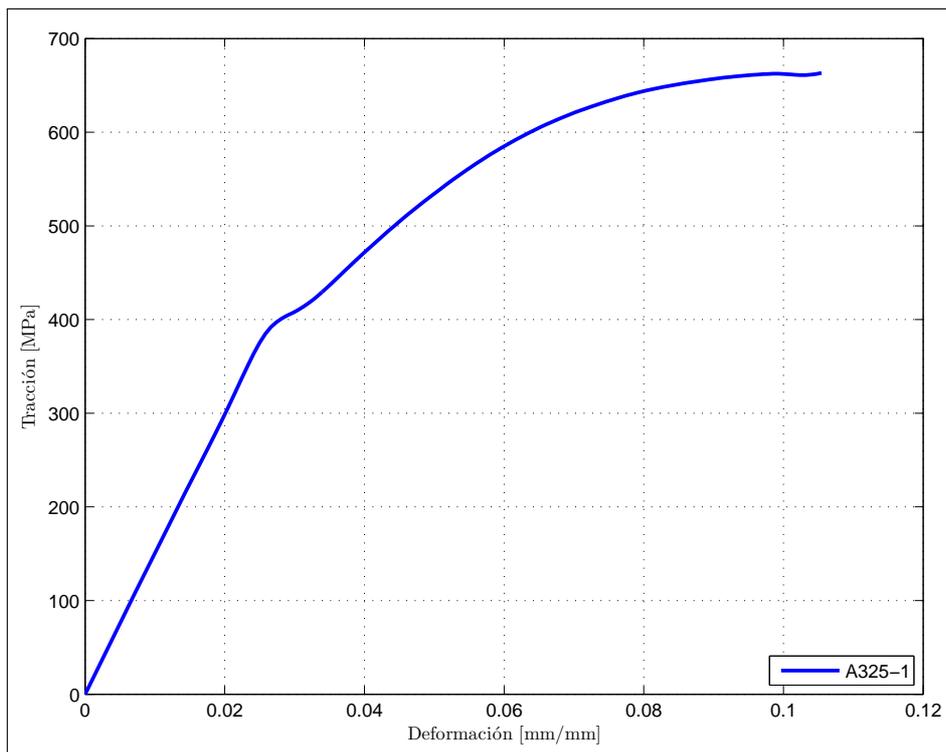


Figura 6.13: Curva carga - deformación de perno A325-1

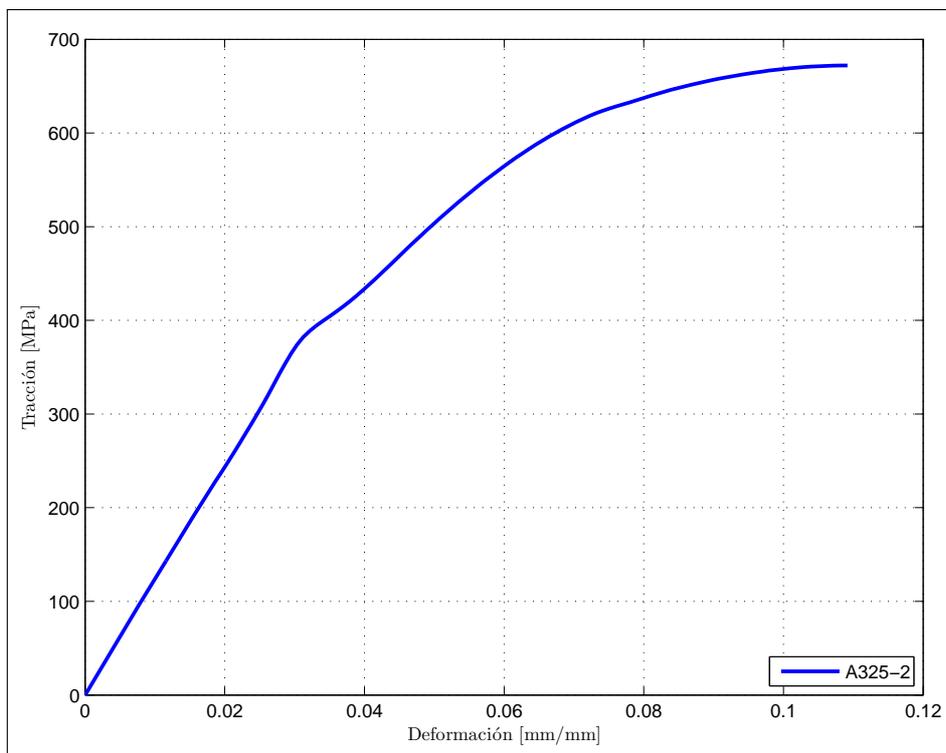


Figura 6.14: Curva carga - deformación de perno A325-2

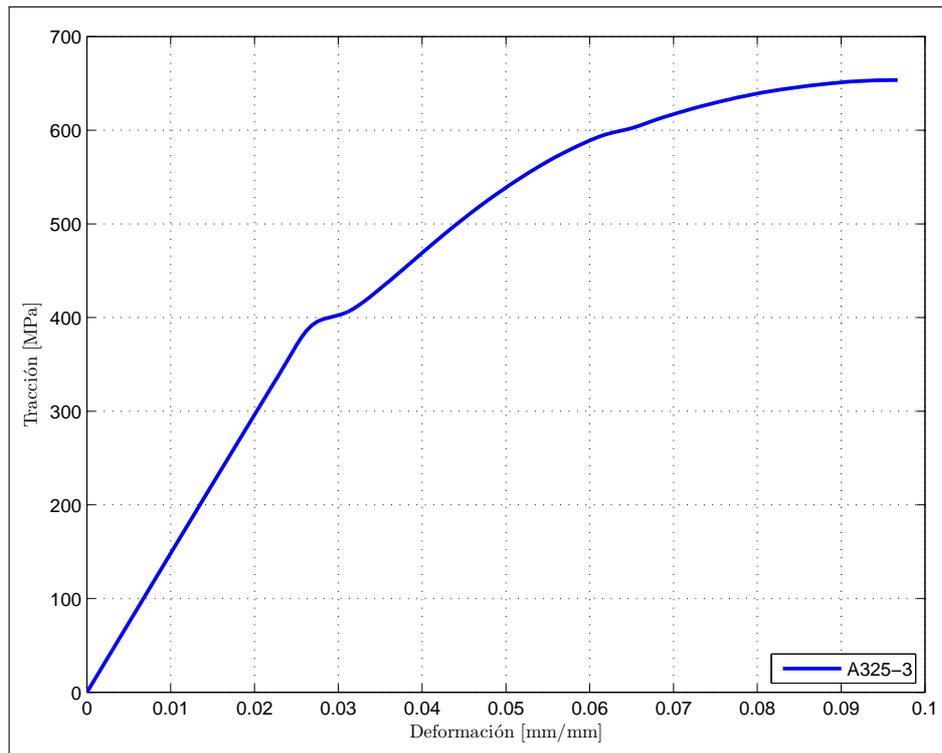


Figura 6.15: Curva carga - deformación de perno A325-3

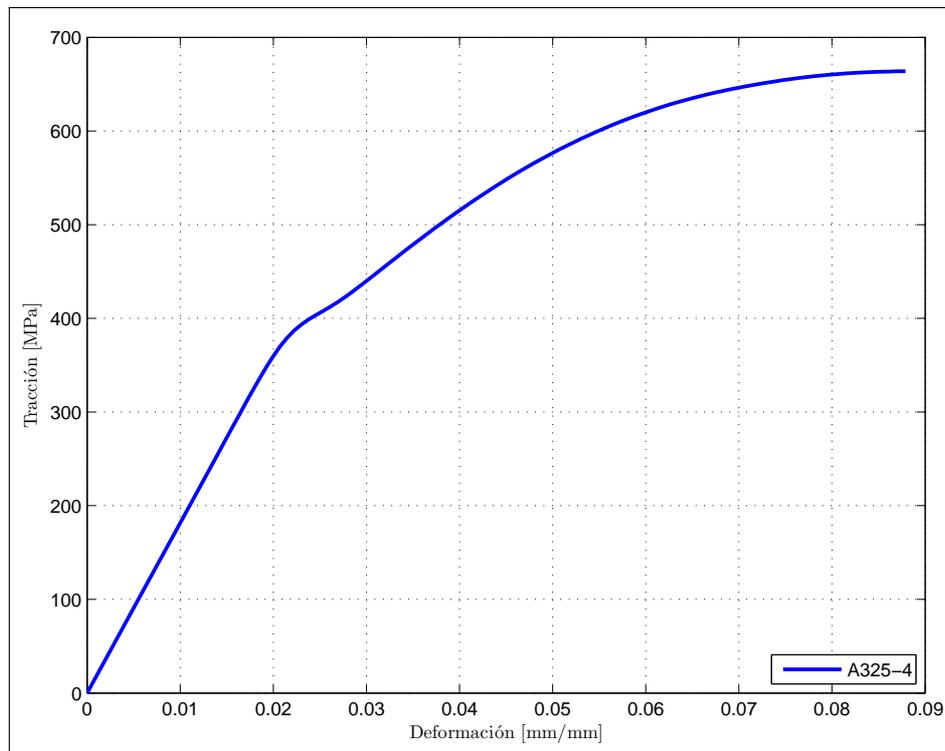


Figura 6.16: Curva carga - deformación de perno A325-4

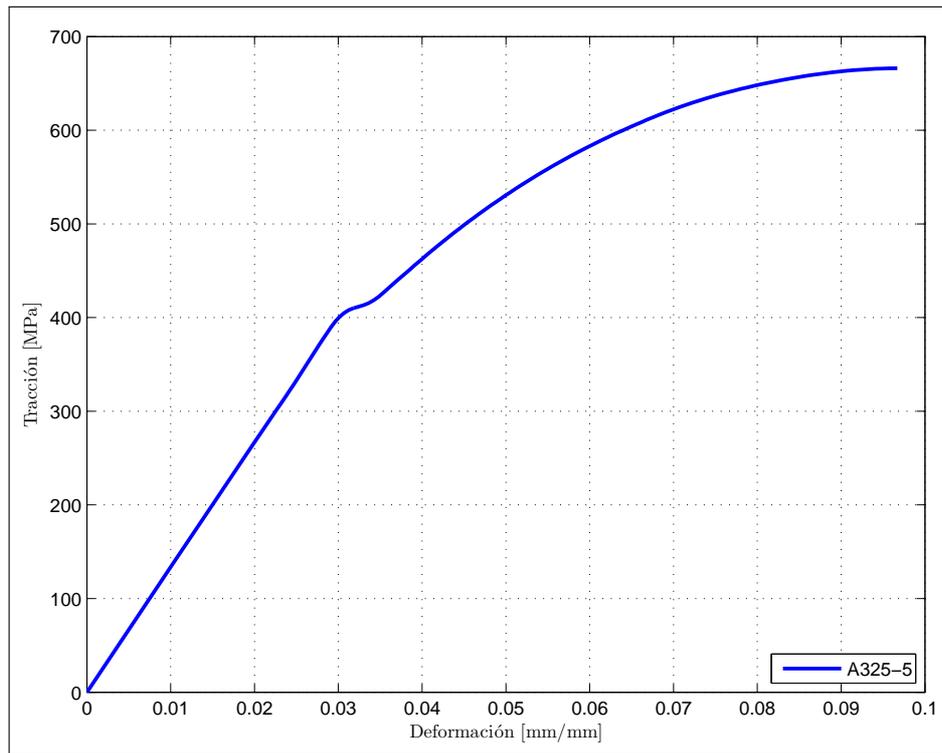


Figura 6.17: Curva carga - deformación de perno A325-5

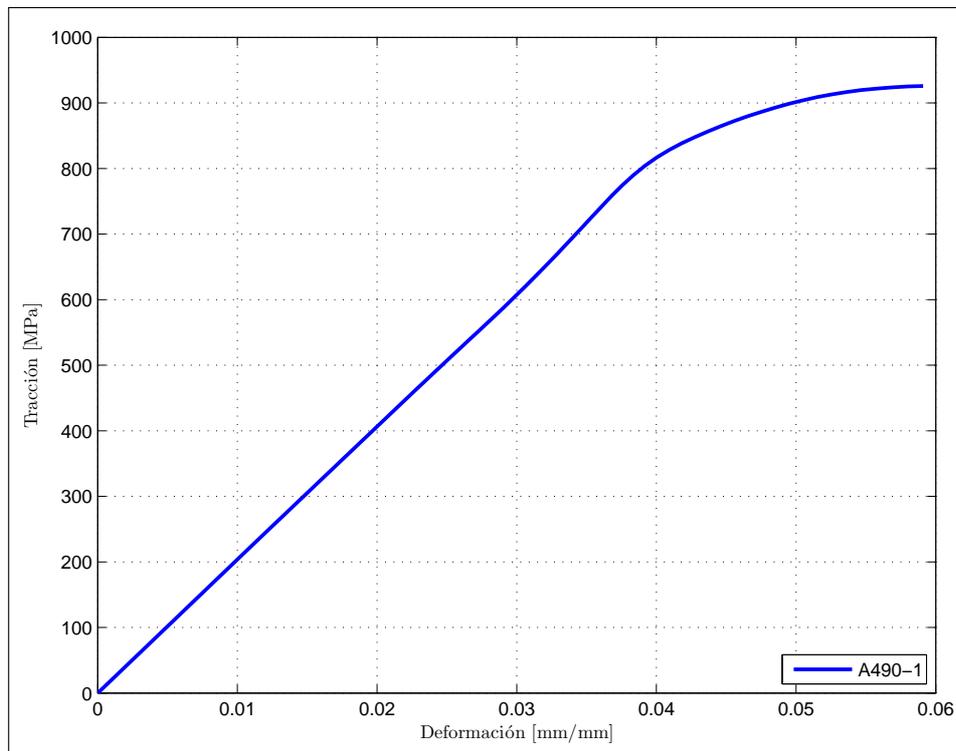


Figura 6.18: Curva carga - deformación de perno A490-1

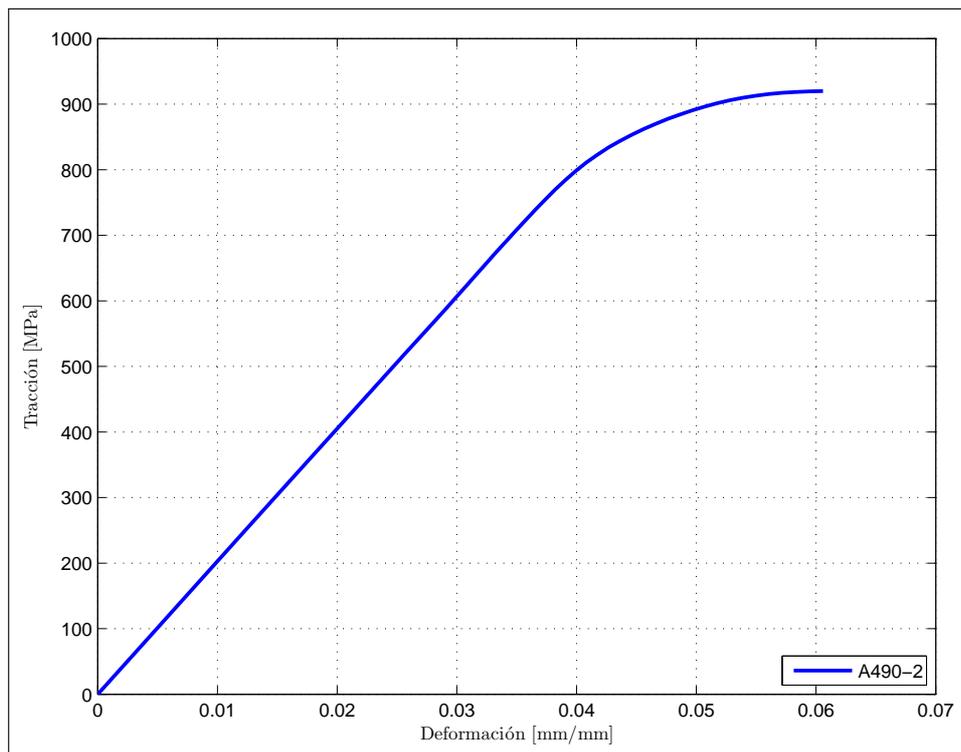


Figura 6.19: Curva carga - deformación de perno A490-2

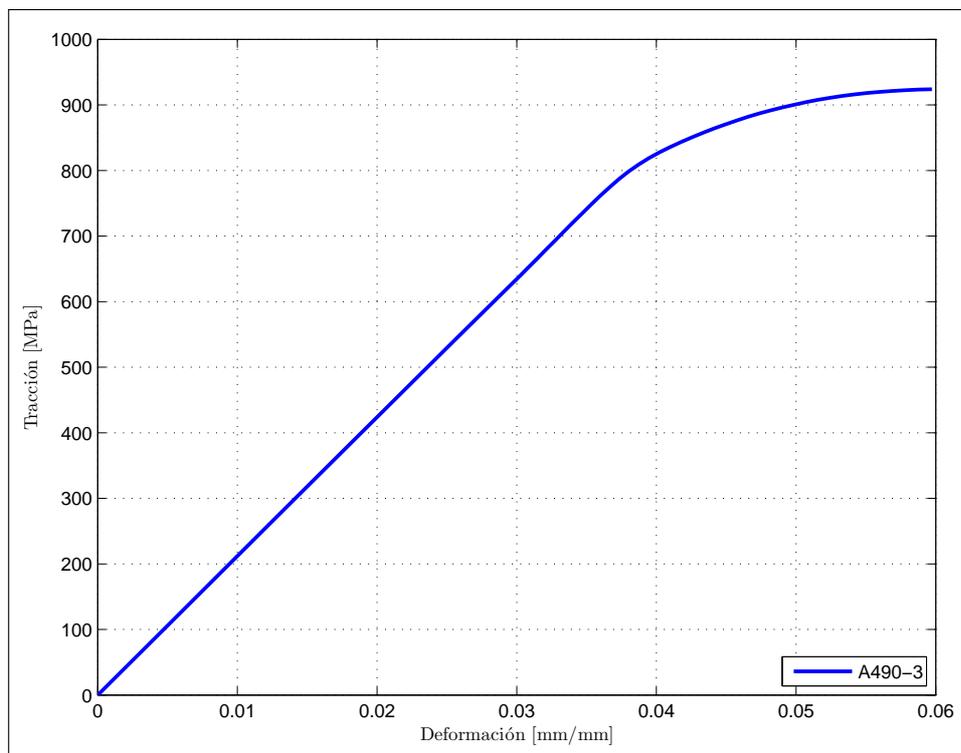


Figura 6.20: Curva carga - deformación de perno A490-3

Luego de revisar minuciosamente cada una de las curvas de carga obtenidas, se presentan en la tabla 6.10 los valores obtenidos para cada ensayo y el correspondiente valor promedio por tipo de perno. Se observa que la capacidad de los pernos A325 es prácticamente la misma que la certificada por el vendedor, en cambio los pernos A490 presentan en promedio una sobre resistencia de 7,3% respecto de su valor certificado. Estos últimos se presentan en el capítulo anexo de certificados de materiales.

Perno	F_u [MPa]	F_y [MPa]	$E_{elástico}$ [GPa]	$E_{plástico}$ [GPa]
A325-1	663.28	404.66	14.99	3.47
A325-2	672.16	403.30	12.24	3.66
A325-3	653.54	404.84	14.81	3.43
A325-4	663.79	390.82	18.17	4.13
A325-5	666.19	408.08	13.33	4.10
Promedio	663.79	402.34	14.71	3.76
A490-1	925.82	810.00	20.29	5.07
A490-2	919.84	813.42	20.24	4.40
A490-3	923.94	801.30	21.17	3.57
Promedio	923.20	808.24	20.57	4.35

Tabla 6.10: Resumen de propiedades mecánicas de pernos A325 - A490

Finalmente, en la figura 6.21 se muestra una fotografía de los pernos post - ensayo.

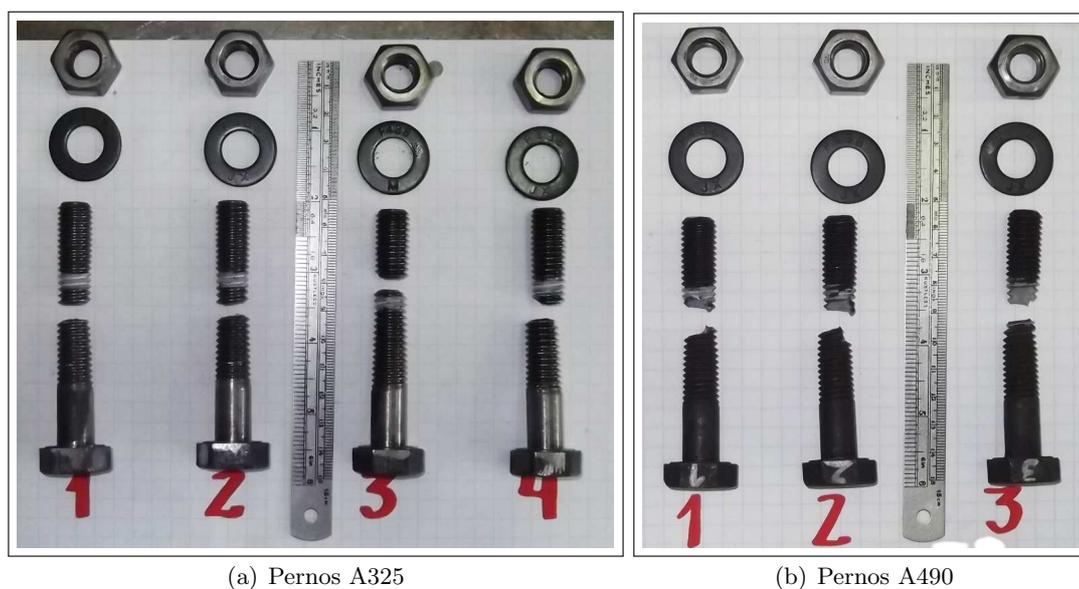


Figura 6.21: Detalle de pernos post - ensayo

Capítulo 7

Presentación y análisis de resultados

Este es el capítulo más relevante de la presente investigación. Aquí se presentan los resultados de los ensayos cíclicos de perfiles T-stub soldados denotados con la serie TSM. Posteriormente se analiza la respuesta global de los perfiles en función de los parámetros de interés más relevantes para el diseño. Hecho esto, se compara la respuesta experimental con el desempeño teórico esperado de acuerdo al cual se diseñan los perfiles T soldados. Además, se compara la respuesta experimental con los resultados del modelo analítico de elementos finitos, el cual se ha alimentado con los parámetros de respuesta de los materiales.

Finalmente, se abre la discusión del comportamiento global teórico, analítico y experimental de los perfiles T-stub soldados, con la intención de ordenar lo aprendido en la presente investigación. Esta discusión es la base de las conclusiones que se presentan en el capítulo final.

7.1. Ensayos de sacrificio

Se mencionó en el Capítulo 5 que al momento de recibir las probetas desde la maestranza y realizar la inspección de rigor, se encontró que tres de estas (TSM6-1, TSM6-2 y TSM7-1) no cumplían los requerimientos solicitados por presentar desangulaciones más allá de las tolerancias aceptables en las perforaciones del alma. Estas fueron reemplazadas por la maestranza. Sin embargo, las tres probetas rechazadas fueron mecanizadas de forma de poder ensamblarlas correctamente en la zona de ensayo del marco de carga y realizar con ellas los primeros ensayos de prueba, llamados de aquí en adelante *ensayos de sacrificio*. Estos ensayos permitieron el correcto desarrollo de los ensayos cíclicos de la serie TSM.

Se presenta en la tabla 7.1 la matriz de ensayos de la serie TSM, de acuerdo a la notación de las figuras 7.1 y 7.2.

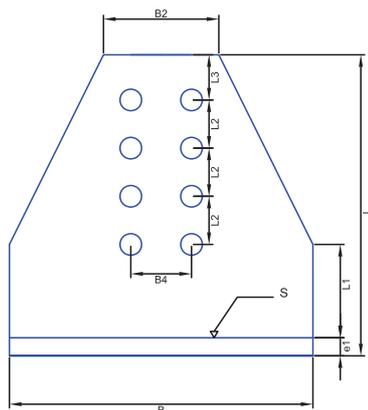


Figura 7.1: Notación del alma - Serie TSM

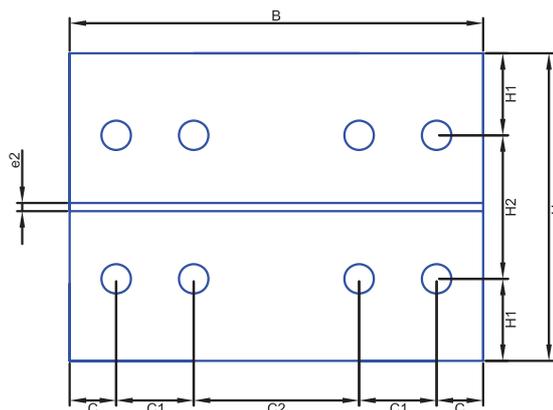


Figura 7.2: Notación del ala - Serie TSM

Tabla 7.1: Matriz de ensayos - Serie TSM

Probeta	e1	e2	S	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2	F.E
TSM1-1	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	62	32	30	150	40	70	B.C
TSM1-2	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	62	32	30	150	40	70	B.C
TSM2-1	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	53	35	30	150	40	70	B.C
TSM2-2	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	53	35	30	150	40	70	B.C
TSM3-1	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	44	38	30	150	40	70	B.C
TSM3-2	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	44	38	30	150	40	70	B.C
TSM4-1	12	4	3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	F.A.N
TSM4-2	12	4	3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	F.A.N
TSM5-1	12	5	3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	F.A.N
TSM5-2	12	5	3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	F.A.N
TSM6-1	10	8	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	30	90	F.P.T
TSM6-2	10	8	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	30	90	F.P.T
TSM7-1	10	8	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	40	70	F.P.T
TSM7-2	10	8	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	40	70	F.P.T
TSM8-1	12	6	5+3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	F.A.N
TSM8-2	12	6	5+3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	F.A.N
TSM9-1	12	5	3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	S
TSM9-2	12	5	3	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	38	75	S
TSM10-1	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	34	38	40	150	40	70	F.A.B
TSM10-2	12	4	3	200	76	40	22.5	37.5	80	200	34	38	40	150	40	70	F.A.B

F.E: Falla esperada - B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta
 F.P.T: Fractura de pernos a tracción - F.A.B: Fractura del área bruta - S: Soldadura
 Todos los pernos son ASTM A325 - 1/2'', excepto los pernos a tracción de TSM6 y TSM7 - ASTM que corresponden a ASTM A490

Cada uno de los ensayos, de sacrificio y posteriores, requirió de un largo y correcto proceso de montaje y desarrollo del experimento mismo; en el cual se debía controlar paralelamente una serie de variables, principalmente del control y adquisición de datos. Los ensayos de sacrificio permitieron ver las primeras interacciones de estas variables y sobre todo permitieron familiarizarse con el proceso que posteriormente debía realizarse con todas las probetas de la serie TSM. Con esto se elaboró un protocolo de montaje y desarrollo de los experimentos; además de un control de calidad interno para cada proceso.

Además de lo expuesto, lo más relevante fue la detección de una serie de problemas mecánicos y fenómenos propios del caso en estudio. El primero y más relevante corresponde a la desangulación existente entre la línea de piezas del lado de actuador y el alma de la probeta. Vale decir, que una vez

montada el alma de la probeta con sus pernos respectivos, el alma de la misma no se alineaba con la placa rígida impidiendo conectarla correctamente con los pernos sometidos a cizalle. En la figura 7.4 se observa el problema de desangulación. Considerando que el extremo del marco contrario a la zona de ensayo es altamente rígido, lo mismo que toda la línea de piezas del eje central, la solución adoptada fue agregar unas placas delgadas de acero en la zona de contacto con la viga del marco de tal forma de rotar los 5° de desangulación del sistema, tal como se muestra en la figura 7.3.

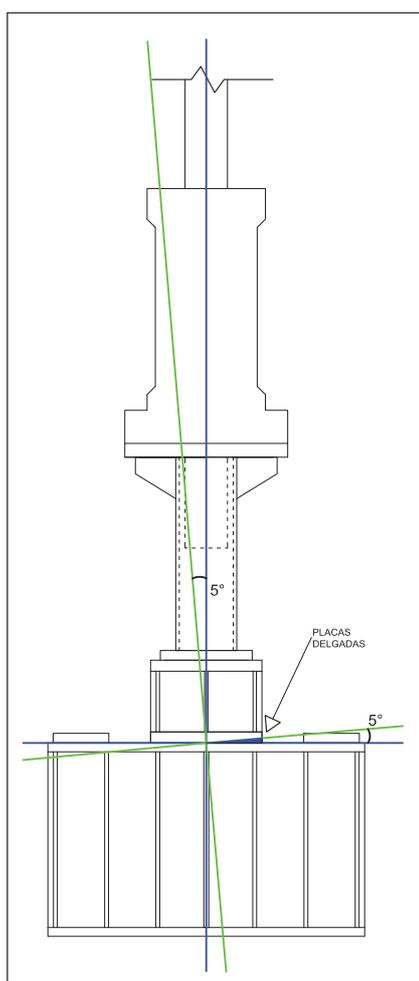


Figura 7.3: Esquema de la desangulación del eje central de carga

Resuelto el problema recién expuesto se dio paso a la secuencia de ensayos de la serie TSM, sin embargo, se observaron malos resultados en la primera configuración: aún existía una tendencia a desplazarse lateralmente fuera del plano de carga axial ideal. La curva típica obtenida se muestra en la figura 7.4. Revisando minuciosamente el esquema experimental se determinó que dos de las piezas existentes entre la celda de carga y la probeta de ensayos no se encontraban correctamente rectificadas, como se muestra en la figura 7.5, de tal forma que al empalmarse se generaba una desangulación local, la cual se amplificaba al momento de cargar el sistema en función del movimiento del cabezal o cáncamo. Otra vez la solución adoptada para corregir la desangulación fue la colocación de una placa delgada permitiendo rotar los 3° faltantes, ver figura 7.6.

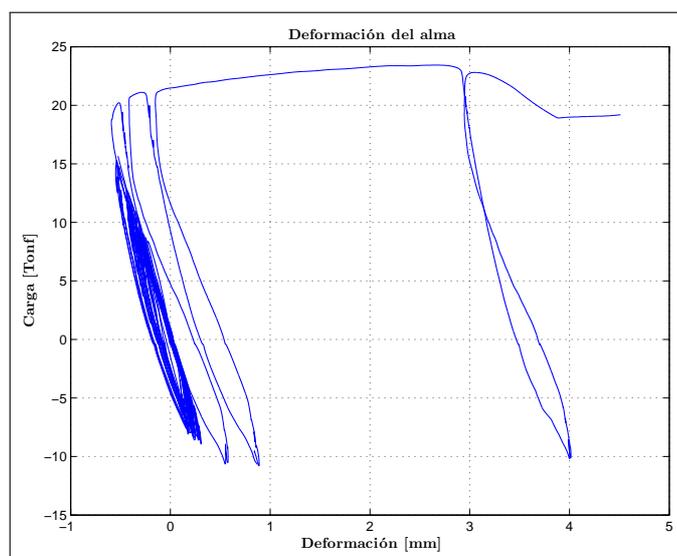


Figura 7.4: Curva típica distorsionada por carga lateral inducida

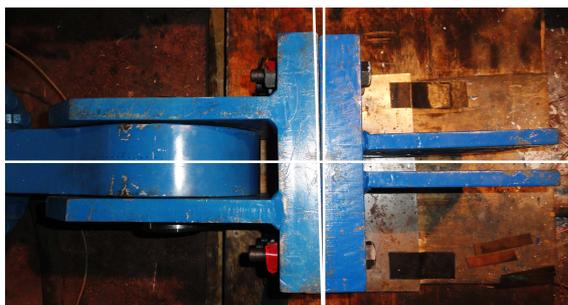


Figura 7.5: Desangulación por mala rectificación



Figura 7.6: Desangulación corregida por placa delgada

Con las medidas expuestas se logró establecer las condiciones experimentales para generar un esfuerzo prácticamente axial cíclico. Finalmente, es muy importante mencionar que a partir del fenómeno carga lateral evidenciado por imperfecciones de diseño y montaje, se detectó un fenómeno de similares características, pero propio de la configuración del diseño experimental y, en alguna medida de la conexión DST misma. Este corresponde al momento inducido producto del brazo que se genera entre el eje central de la placa rígida que simula el ala de la viga de la conexión y el alma del perfil T-stub soldado, presentado en la figura 7.7. Este brazo es intrínseco a la configuración de la conexión, sin embargo, en condiciones reales, el alma de la viga aporta una rigidez importante en el plano del momento inducido y el perfil T simétrico de la otra ala de la viga reacciona contra la columna, disminuyendo considerablemente la importancia del momento inducido. En el esquema experimental considerado sólo figura el ala de la viga (placa rígida) la cual tiene una flexibilidad lateral siempre mayor que si se hubiese considerado al menos la mitad del alma de la viga para ofrecer una rigidez lateral mayor.

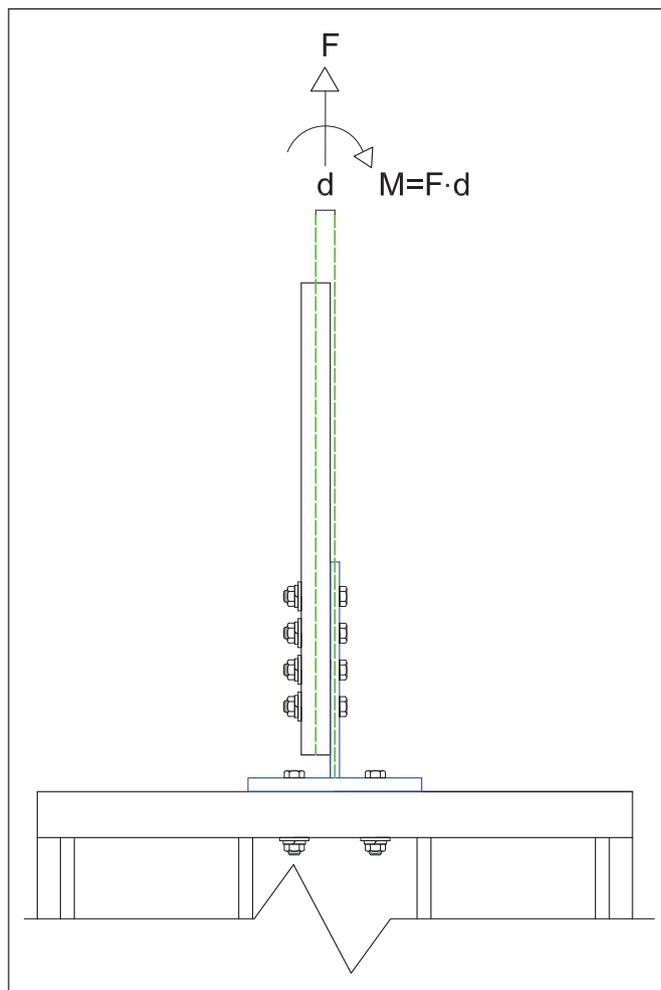


Figura 7.7: Momento inducido

7.2. Ensayos de perfiles T-stub soldados - Serie TSM

La tabla 7.2 muestra los resultados más relevantes de las 20 probetas de la serie TSM. Se muestra la carga máxima a tracción, mínima y máxima deformación, rigidez inicial y la energía disipada durante el ensayo. A continuación, se definen los parámetros recién mencionados. La información detallada de cada uno de los experimentos se encuentra en los anexos.

- Fuerza de tracción: Corresponde a la fuerza de tracción máxima experimentada durante el ensayo y no está asociada necesariamente a la carga en la falla del perfil T-stub soldado.
- Deformación máxima: Corresponde a la deformación máxima experimentada en tracción ya sea durante o antes de la falla. Para las probetas que fallaron por fractura del área neta el punto de deformación máxima corresponde al momento en que comienza la fractura, tal como se presenta en la figura 7.8.

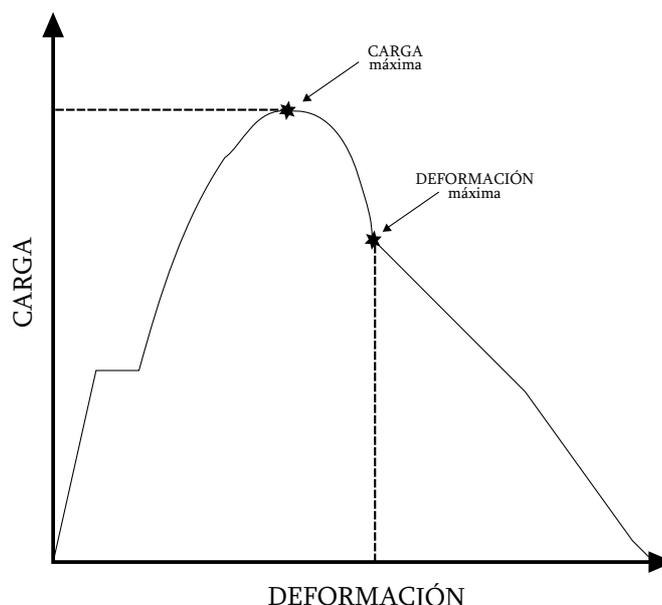


Figura 7.8: Esquema de falla y deformación máxima para fractura del área neta

- Deformación mínima: Corresponde a la mínima deformación registrada durante la etapa de los ciclos en compresión ante de la falla.
- Rigidez inicial: Se define como la rigidez axial del perfil T-stub soldado durante el primer ciclo de carga, se calcula de la siguiente forma:

$$k_{s_i} = \frac{P_{1, \max} - P_{1, \min}}{\Delta_{1, \max} - \Delta_{1, \min}} \quad (7.1)$$

Donde

k_{s_i} : rigidez axial inicial

$P_{1, \max}$: carga máxima en tracción del primer ciclo

$P_{1, \min}$: carga mínima en compresión del primer ciclo

$\Delta_{1, \max}$: deformación máxima en tracción del primer ciclo

$\Delta_{1, \min}$: deformación mínima en compresión del primer ciclo

- Energía disipada: Corresponde a la sumatoria de la energía disipada durante el ensayo. Se calcula de la siguiente forma:

$$E_T = \sum_{i=2}^n (\Delta_i - \Delta_{i-1}) \left(\frac{P_i + P_{i-1}}{2} \right) \quad (7.2)$$

Donde

E_T : energía total disipada en el ensayo

Δ_i : deformación adquirida en el paso i

P_i : carga adquirida en el paso i

n : número de datos adquiridos

Tabla 7.2: Resultados de ensayos cíclicos de la serie TSM

Probeta	Modo de Falla	Carga Máxima	Def. Max.	Def. Min.	Rigidez Inicial	Energia Dis.
		[tonf]	[mm]	[mm]	[tonf / mm]	[tonf - mm]
TSM1 - 1	F.A.N	23.34	4.73	-0.08	14.97	331.87
TSM1 - 2	F.A.N	23.05	9.82	-0.05	31.91	379.25
TSM2 - 1	F.A.N	24.57	8.76	-0.01	14.02	411.75
TSM2 - 2	F.A.N	26.16	8.97	-0.14	27.03	426.62
TSM3 - 1	F.A.N	16.92	2.50	-0.37	10.42	191.88
TSM3 - 2	F.A.N	23.24	7.80	-0.26	30.89	454.42
TSM4 - 1	F.A.N	22.13	8.05	-0.04	38.66	385.31
TSM4 - 2	F.A.N	25.60	9.28	-0.27	24.27	559.05
TSM5 - 1	F.A.N	31.98	8.69	-0.08	44.90	574.66
TSM5 - 2	F.A.N	32.59	10.19	-0.11	33.70	697.90
TSM6 - 1	F.P.T	48.78	12.63	-0.02	52.35	1423.44
TSM6 - 2	F.P.T	43.85	12.97	-0.16	33.49	1074.67
TSM7 - 1	F.A.N	48.47	11.58	-0.20	43.17	1370.21
TSM7 - 2	F.A.N	53.80	16.53	-0.13	51.53	1729.35
TSM8 - 1	F.P.T	43.61	12.47	-0.02	36.24	947.79
TSM8 - 2	S	36.16	8.74	-0.21	34.97	754.28
TSM9 - 1	F.A.N	31.03	8.27	-0.17	38.08	579.43
TSM9 - 2	F.A.N	29.42	11.04	-0.30	32.69	743.61
TSM10 - 1	F.A.N	26.90	7.33	-0.17	35.34	502.03
TSM10 - 2	F.A.N	26.01	7.02	-0.15	32.76	391.06

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

Una observación relevante es que la energía disipada mostrada en la tabla 7.2 no representa completamente el comportamiento de los perfiles soldados T-stub. A pesar de realizar los ensayos con el mayor apego posible al protocolo de carga presentado, no siempre se cumplió a cabalidad con éste, pues cerca de la falla de la probeta el proceso de adquisición y control manual del cilindro oleo-hidráulico no siempre permitió realizar todos los ciclos. Cabe destacar que los ciclos cercanos a la falla son de grandes deformaciones y carga, por lo cual aportan una cantidad importante de la energía disipada.

7.3. Modos de falla observados

16 de las probetas fallaron por fractura del área neta, vale decir, la mayoría de la serie TSM. Ésta corresponde a una falla frágil. 3 de las probetas fallaron por rotura en tracción de los pernos del ala. Ésta corresponde a una falla violenta y frágil; en la cual el único indicador de la potencialidad de la falla es la evidente deformación por apalancamiento del ala. Finalmente una de las probetas falló en la zona de la soldadura, la cual es también una falla violenta y frágil; ésta tiene especial interés y será descrita y analizada más adelante en este mismo capítulo.

Las probetas que presentaron fractura del área neta siempre estuvieron precedidas por una clara fluencia en el alma del perfil, como se muestra en las figuras 7.9 y 7.10. Posterior a esta fluencia comenzaba una deformación muy marcada entre los dos pernos al corte de la última línea - la más cercana al alma- lo que generaba una fractura en la misma zona que posteriormente se propagaba hacia los bordes del alma de forma dúctil, tal como se muestra en la figura 7.11.



Figura 7.9: Fluencia tipo antes de la fractura

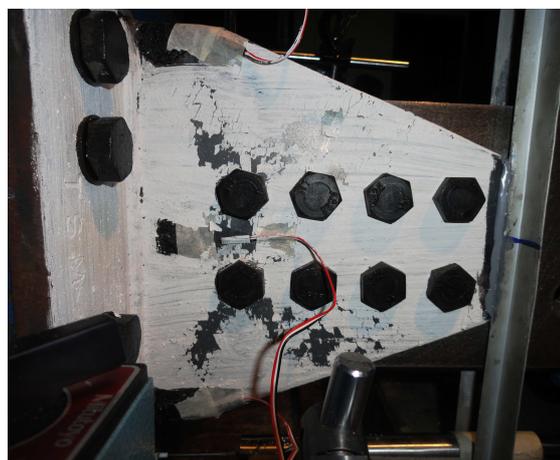


Figura 7.10: Fluencia tipo antes de la fractura

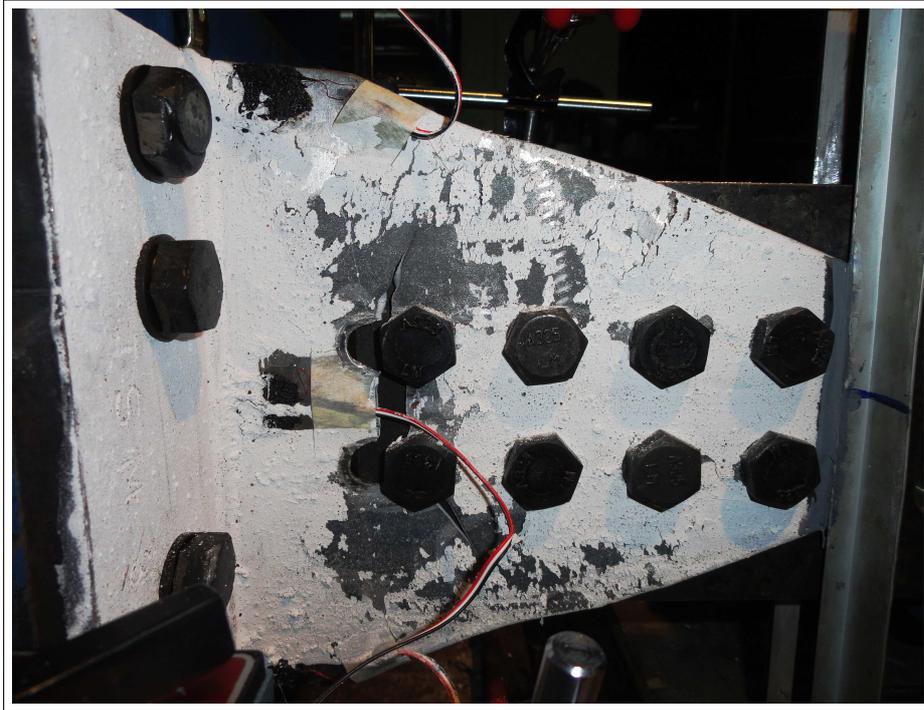


Figura 7.11: Fractura tipo del área neta

Las probetas que fallaron por fractura de los pernos en tracción, mostraron previo a la falla un levantamiento del ala producto del apalancamiento. Sin embargo, de acuerdo a los parámetros considerados en cada configuración, no siempre se observa una gran deformación del ala, como se observa en la figura 7.12 y 7.13 .

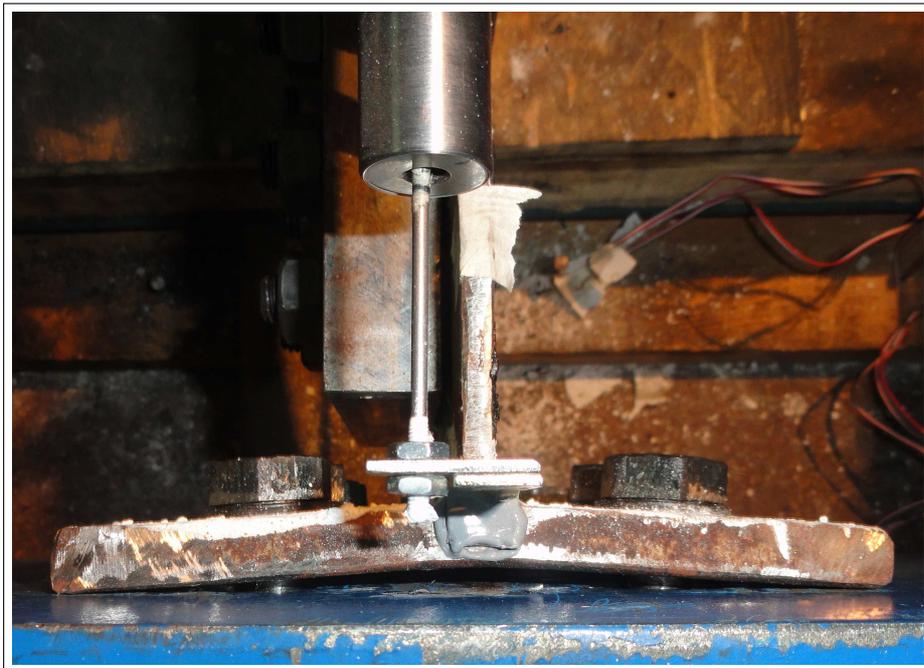


Figura 7.12: Levantamiento menor del ala - Probeta TSM-8-1

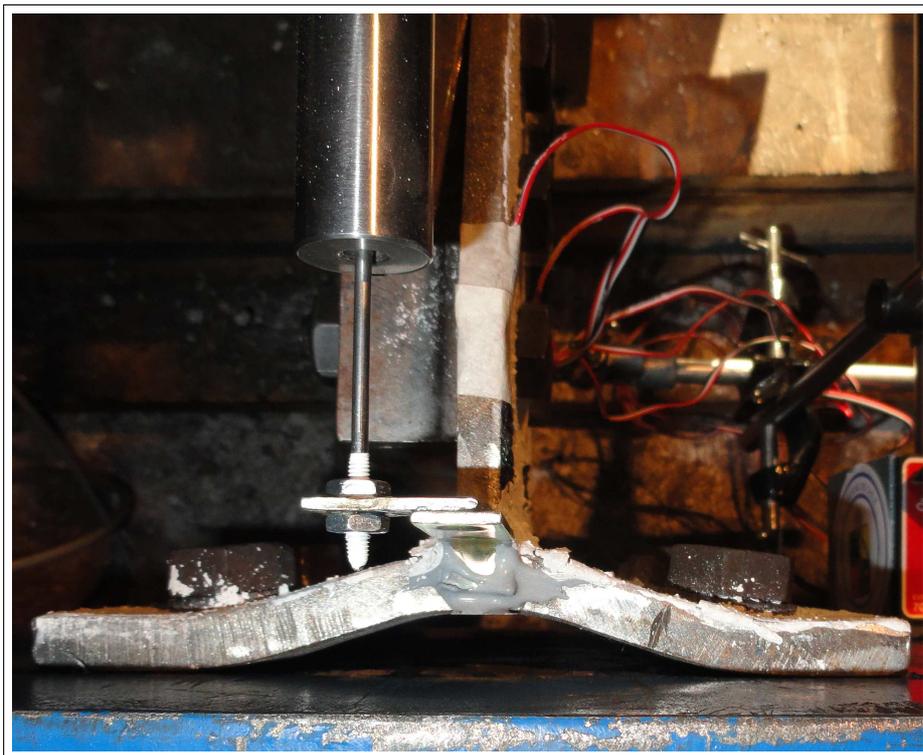


Figura 7.13: Levantamiento mayor del ala - Probeta TSM-6-2

Finalmente, se observó un falla en la zona de la soldadura, la cual se desencadenó de forma frágil. Esta correspondió a la probeta TSM8-2 la cual en su diseño teórico estaba controlada por la fractura del área neta. Debe considerarse que la probeta gemela de similares características TSM8-1 falló experimentalmente por fractura del área neta. Desde esto se generó un estudio minucioso de la materialización de la soldadura de la probeta mediante un corte transversal para una prueba metalográfica. Esta será presentada en detalle más adelante. La falla se muestra en las figuras 7.14 y 7.15.



Figura 7.14: Falla en la zona de la soldadura

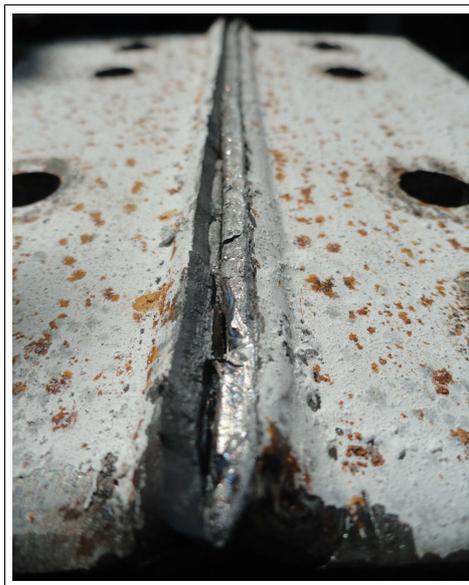


Figura 7.15: Cordón de soldadura expuesto por la falla

7.4. Respuesta global

La figura 7.16 muestra la curva típica de respuesta global de los perfiles T-stub soldados sometidos a carga cíclica. Se observa claramente que los ciclos en tracción son más grandes que su par respectivo en compresión, en función de lo expuesto anteriormente. Si a partir de ésta se quisiera estimar la rotación de la conexión, se puede dividir el rango de desplazamiento axial máximo por la altura de la viga y así obtener el ángulo de rotación. Por su parte, el momento correspondería a la fuerza máxima obtenida multiplicada por la altura de la viga. La figura 7.17 muestra la respuesta del deslizamiento de los perfiles sometidos a carga cíclica. A medida que se avanza en los ciclos durante el experimento, la resistencia al deslizamiento va disminuyendo o deteriorándose, por lo que se observa una leve inclinación hacia el lado izquierdo, desde el origen del gráfico. Esto se explica porque a medida que avanzan los ciclos de carga los orificios del alma de la probeta se modifican o aplastan. Esta condición de aplastamiento de los orificios debiera aplicar también para las perforaciones del ala de la viga en condiciones reales, sin embargo, aquí se desarrollan sólo los del alma del perfil T-stub soldado, pues según la configuración experimental el ala de la viga corresponde a una placa de rigidez axial mucho mayor. Es por esto que para evaluar el desempeño del perfil no se debe considerar un valor absoluto de la deformación sino el rango total de ésta.

La figura 7.18 muestra la respuesta del alma del perfil T-stub soldado sometido a carga cíclica. Se consigna que el conjunto de la deformación plástica se produce durante la tracción. La figura 7.19 muestra el levantamiento típico del ala de los perfiles T-stub soldados sometidos a carga cíclica. La deformación del ala por apalancamiento se acentúa en los perfiles que posteriormente fallaron por rotura de los pernos a tracción, esto según lo discutido anteriormente.

Finalmente, se puede observar que el deslizamiento del alma y el levantamiento de ala son los

mecanismos que disipan más energía.

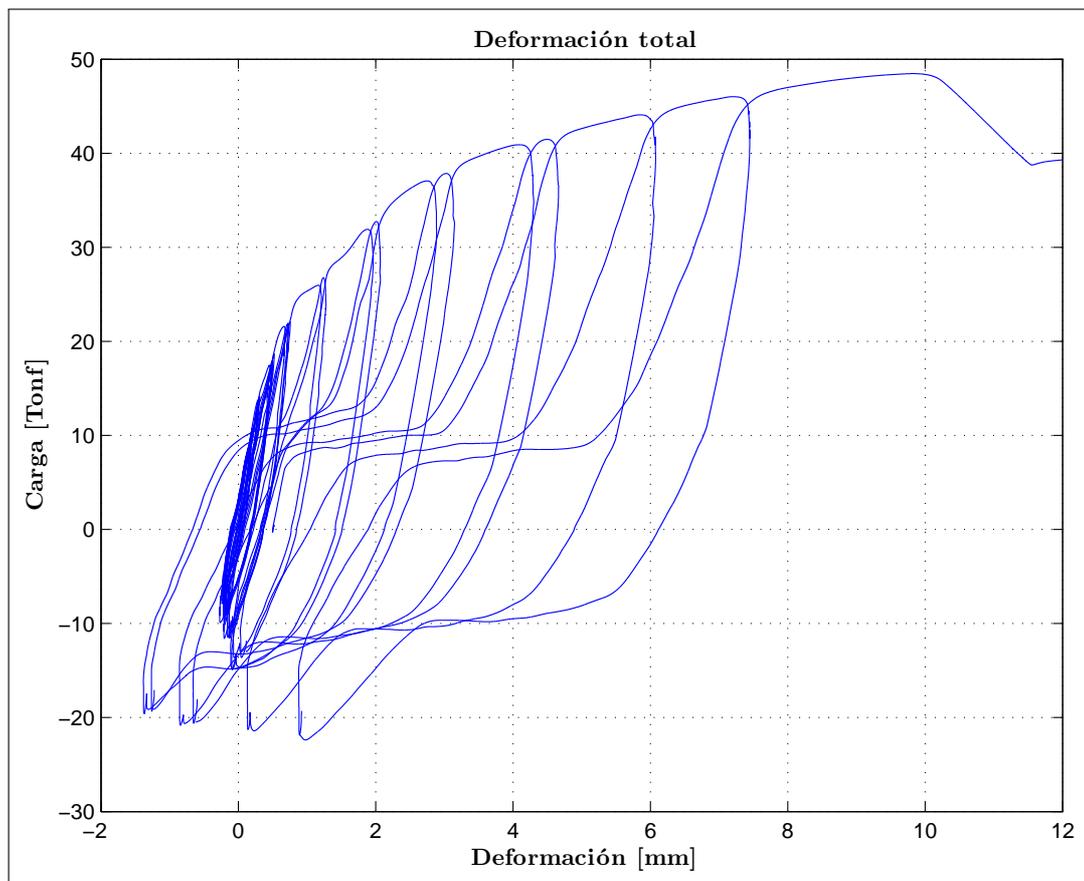


Figura 7.16: Curva cíclica de respuesta total. Carga - Deformación - Probeta TSM 7-1

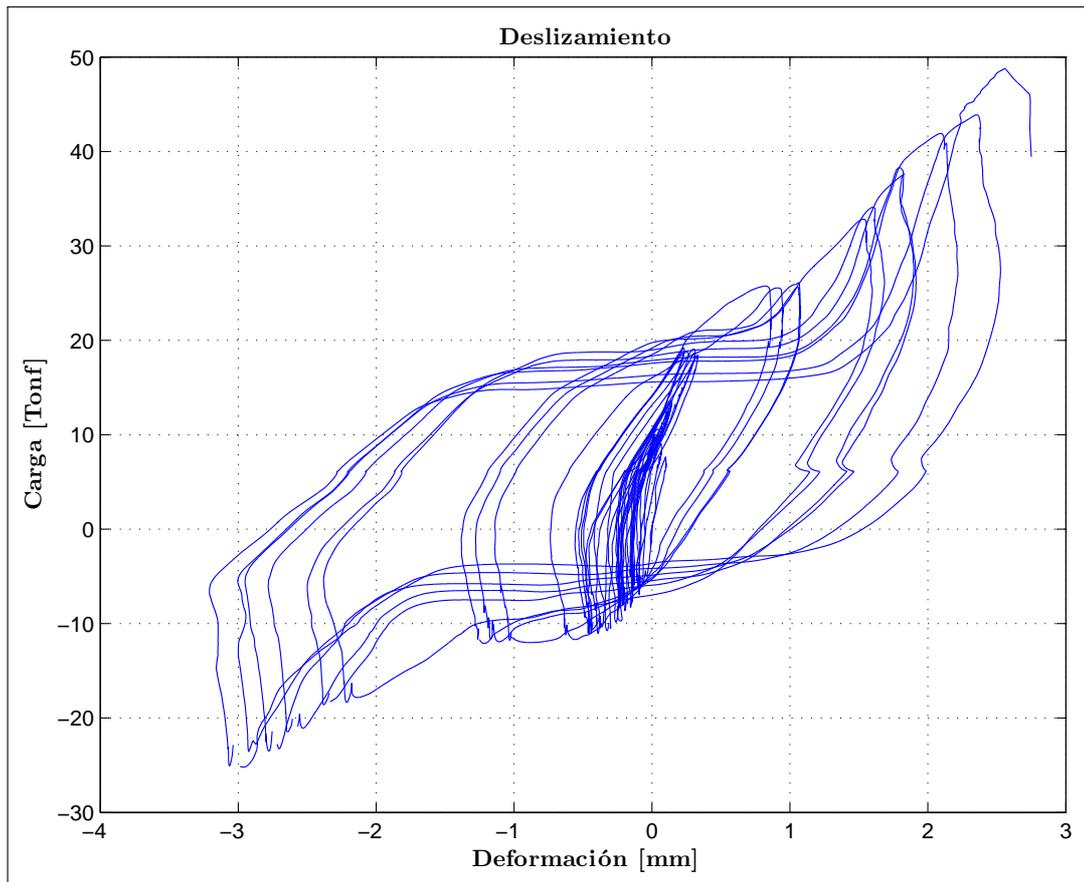


Figura 7.17: Curva cíclica de deslizamiento. Carga - Deformación - Probeta TSM 6-1

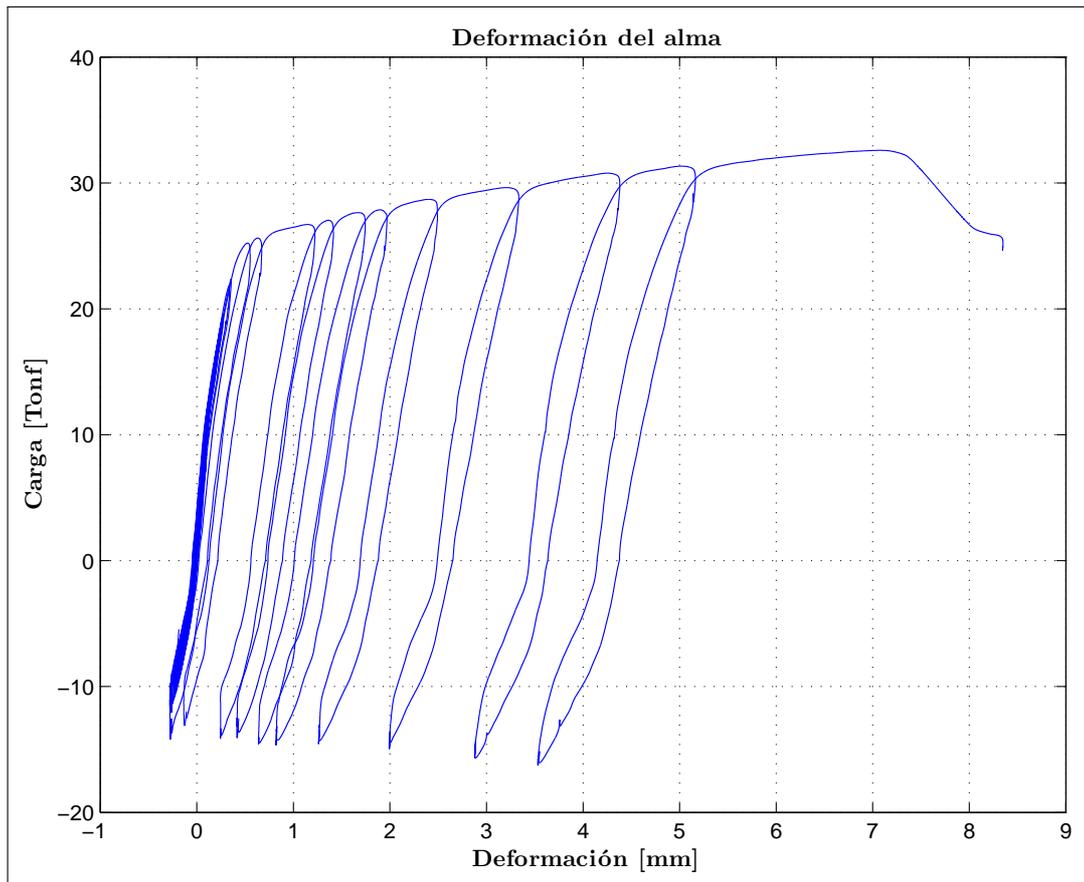


Figura 7.18: Curva cíclica de respuesta del alma. Carga - Deformación - Probeta TSM 5-2

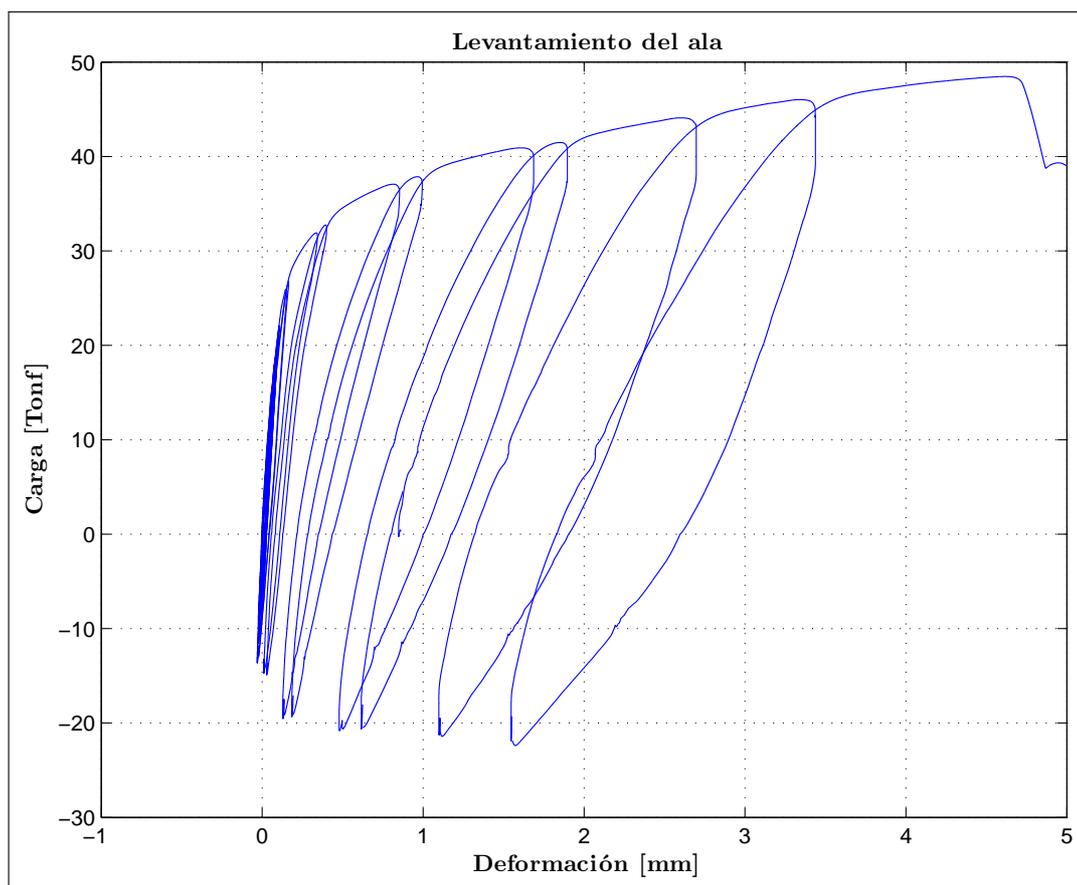


Figura 7.19: Curva cíclica de levantamiento del ala. Carga - Deformación - Probeta TSM 7-1

7.5. Respuesta según parámetros de interés

7.5.1. TSM1 - TSM2 - TSM3

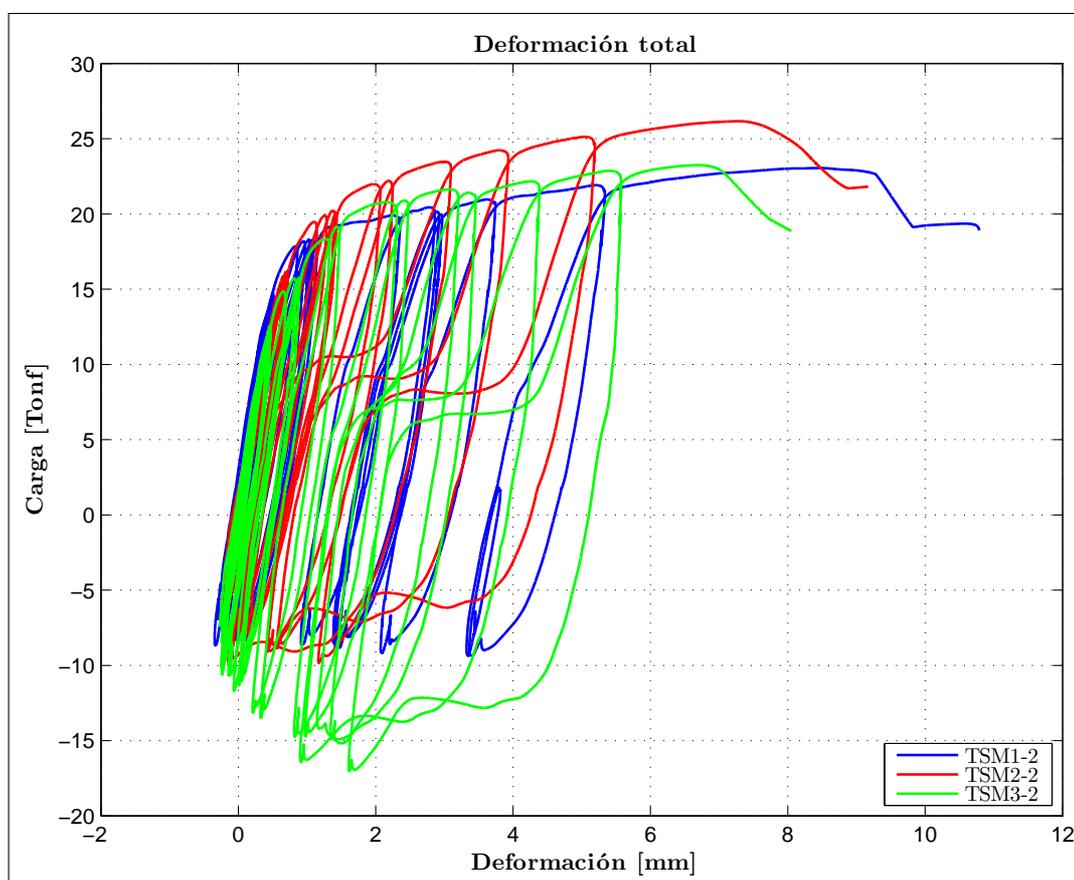
El objetivo de estas tres configuraciones fue estudiar la influencia de la distancia entre los pernos sometidos al corte en el alma del perfil T-stub soldado. Para eso se consideraron espaciamientos entre pernos de 32, 35 y 38 [mm] respectivamente para las probetas TSM1, TSM2 y TSM3. El modo de falla teórico para estas tres configuraciones fue el bloque de corte en el alma. Sin embargo, las tres configuraciones fallaron por fractura del área neta. Las alas no presentaron mayor deformación por los espesores de ala y alma: 12 y 4 [mm] respectivamente. Los resultados se muestran en la tabla 7.3. Cabe destacar que el ensayo TSM3-1 muestra una muy baja capacidad y unas curvas de respuesta muy afectadas por el problema de carga lateral descrito en el ensayo de sacrificio, se considerará entonces para los análisis posteriores la respuesta de la probeta TSM3-2 como representativa del par.

Tabla 7.3: Resultados de ensayos cíclicos del grupo 1

Probeta	Modo de falla	Carga Máx.	Def. Máx.	Def. Mín.	Rigidez Inicial	Energía Dis.
		[kN]	[in]	[in]	[kN/ in]	[kN - in]
TSM1 - 1	F.A.N	228.856	0.184	-0.003	3728.364	128.100
TSM1 - 2	F.A.N	226.032	0.383	-0.002	7947.683	146.392
TSM2 - 1	F.A.N	240.958	0.342	0.000	3491.231	158.935
TSM2 - 2	F.A.N	256.571	0.350	-0.005	6733.623	164.676
TSM3 - 1	F.A.N	165.885	0.098	-0.014	2594.511	74.064
TSM3 - 2	F.A.N	227.954	0.304	-0.010	7693.612	175.407

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

En las figuras 7.20 y 7.21 se presentan las respuestas de las tres probetas a modo de comparación.

**Figura 7.20:** Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM1-2 - TSM2-2 - TSM3-2

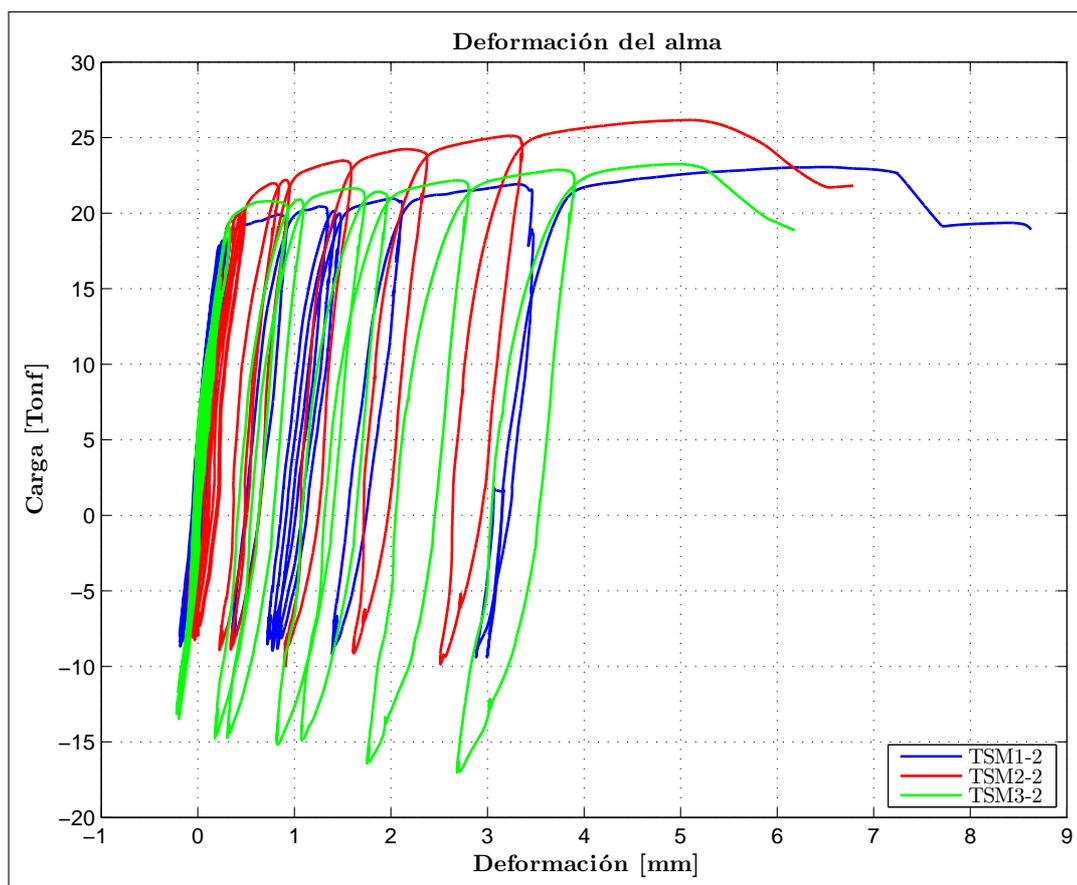


Figura 7.21: Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM1-2 - TSM2-2 - TSM3-2

7.5.2. TSM4 - TSM5

El objetivo de este par de probetas fue estudiar la influencia del espesor del alma de los perfiles T-stub soldados. La probeta TSM-4 y TSM-5 tienen espesores de 4 y 5 [mm] respectivamente. El modo de falla teórico para estas dos configuraciones es la fractura del área neta, mismo modo de falla obtenido experimentalmente. El espesor del alma de los perfiles T-stub soldados es una variable muy importante, aún más cuando el modo de falla se ubica en el alma. Es evidente la mayor capacidad del alma de mayor espesor. Los resultados se muestran en la tabla 7.4.

Tabla 7.4: Resultados de ensayos cíclicos del grupo 2

Probeta	Modo de falla	Carga Máx.	Def. Máx.	Def. Mín.	Rigidez Inicial	Energía Dis.
		[kN]	[in]	[in]	[kN/ in]	[kN - in]
TSM4 - 1	F.A.N	216.990	0.314	-0.002	9628.784	148.730
TSM4 - 2	F.A.N	251.049	0.362	-0.010	6045.141	215.794
TSM5 - 1	F.A.N	313.647	0.339	-0.003	11184.843	221.818
TSM5 - 2	F.A.N	319.610	0.397	-0.004	8393.552	269.389

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

En las figuras 7.22 y 7.23 se presentan las respuestas de las dos probetas a modo de comparación.

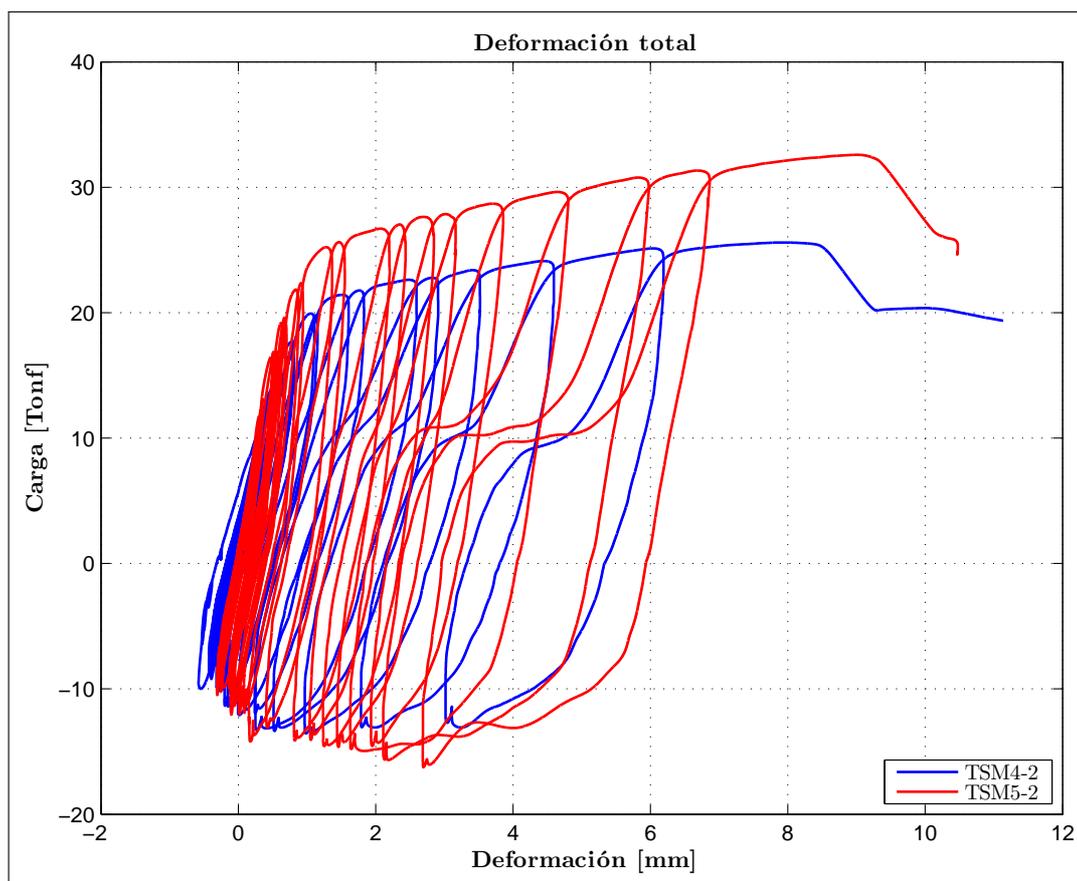


Figura 7.22: Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM4-2 - TSM5-2

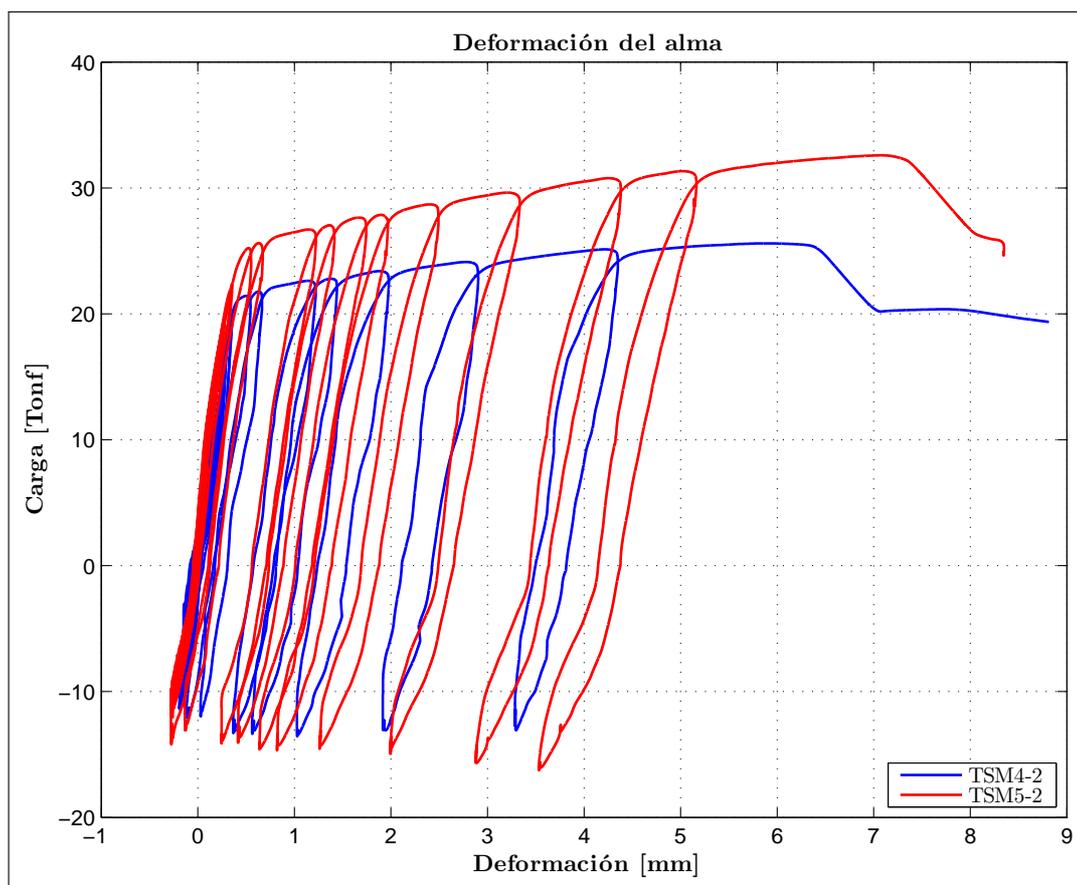


Figura 7.23: Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM4-2 - TSM5-2

7.5.3. TSM6 - TSM7

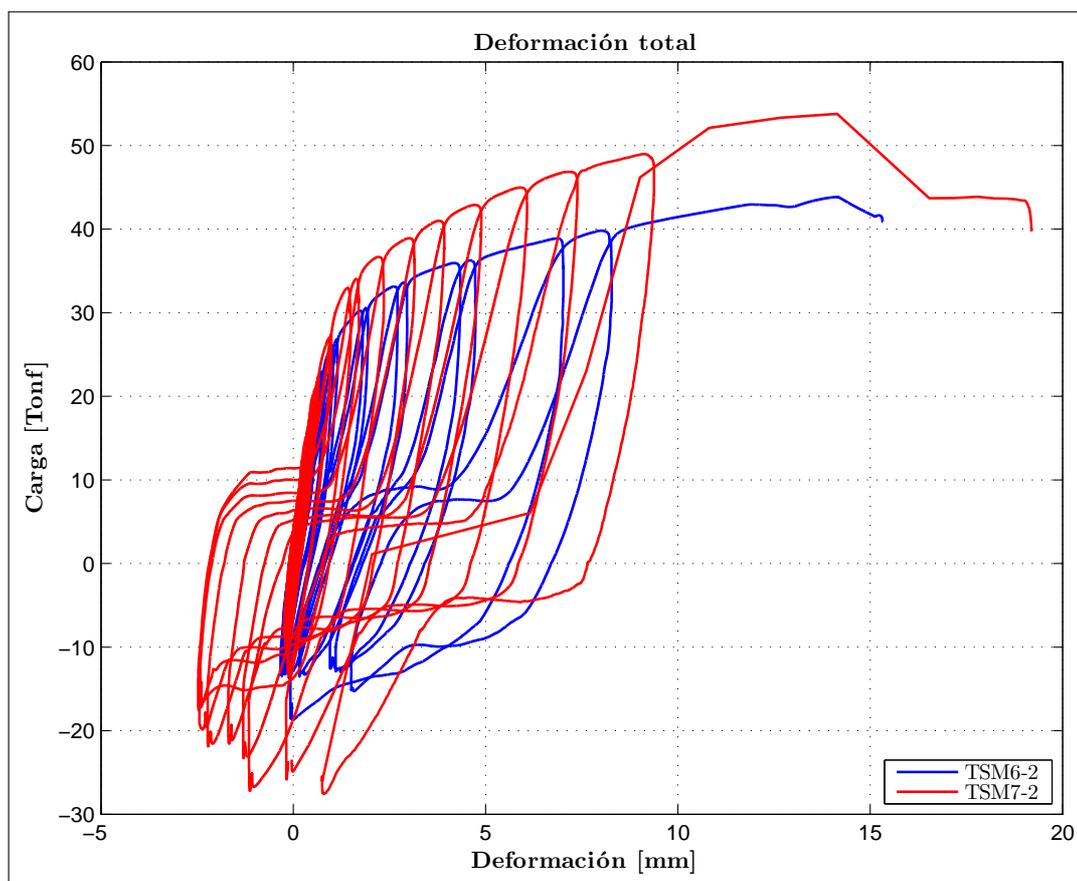
El objetivo de estas configuraciones fue estudiar el levantamiento del ala por apalancamiento a partir de la distancia entre los pernos a tracción que conectan ala del perfil y la columna de la conexión. La distancia entre pernos considerada corresponde a 90 y 70 [mm] para TSM6 y TSM7 respectivamente. Estas son las únicas probetas en las que se utilizaron pernos de alta resistencia A490 siempre de 1/2" de diámetro. Las cargas máximas se muestran en la tabla 7.5. Las probetas TSM6 presentaron una falla por rotura de los pernos a tracción posterior a una importante deformación del ala. Por su parte las configuraciones TSM7 mostraron una deformación menor del ala y finalmente fallaron por fractura del área neta. En promedio la capacidad de las probetas TSM6 fue 10,4% mayor que las TSM7.

Tabla 7.5: Resultados de ensayos cíclicos del grupo 3

Probeta	Modo de falla	Carga Máx.	Def. Máx.	Def. Mín.	Rigidez Inicial	Energía Dis.
		[kN]	[in]	[in]	[kN/ in]	[kN - in]
TSM6 - 1	F.P.T	478.405	0.493	-0.001	13040.307	549.446
TSM6 - 2	F.P.T	430.066	0.506	-0.006	8341.991	414.821
TSM7 - 1	F.A.N	475.335	0.452	-0.008	10752.674	528.901
TSM7 - 2	F.A.N	527.617	0.645	-0.005	12834.311	667.528

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

En las figuras 7.24 y 7.25 se presentan las respuestas de las dos probetas a modo de comparación.

**Figura 7.24:** Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM6-2 - TSM7-2

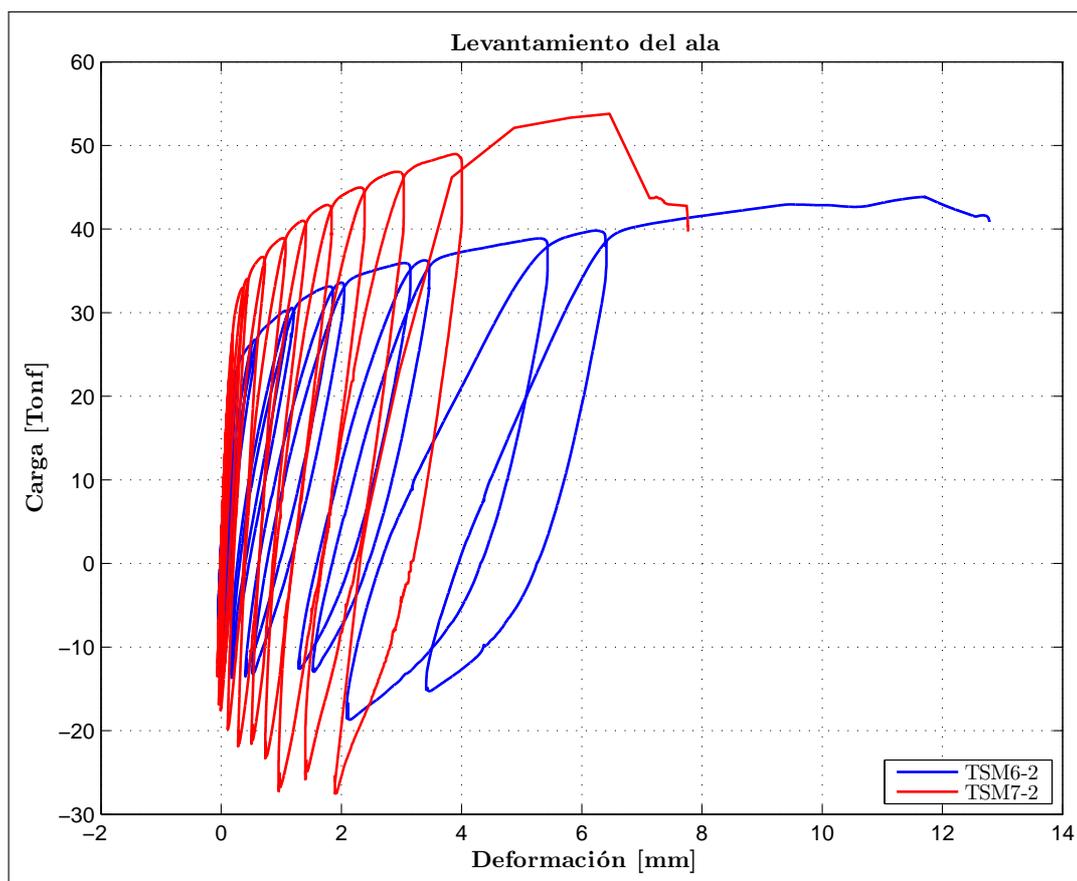


Figura 7.25: Curvas cíclicas de levantamiento del ala - Probetas TSM6-2 - TSM7-2

7.5.4. TSM8 - TSM9

El objetivo de estas dos configuraciones fue estudiar el comportamiento de la soldadura a partir de una soldadura de filete y una de penetración completa (CJP) para las probetas TSM8 y TSM9 respectivamente. Esta última corresponde a la única configuración con soldadura de penetración completa de la serie TSM. La probeta TSM8-1 presentó una falla por rotura de los pernos a tracción, antecedido de un levantamiento del ala en el cual no se alcanzó a observar fluencia del ala sino un levantamiento triangular, esto debido al espesor de 12 [mm] de la misma. Los pernos a la tracción son de alta resistencia A325 de 1/2" de diámetro. Por su parte, la probeta TSM8-2 presentó una falla temprana y violenta en la zona de la soldadura. La probeta TSM8-1 presentó 31 % más de resistencia que la TSM8-2. La falla en la soldadura de penetración completa se debe a una incorrecta materialización de la misma en la maestranza.

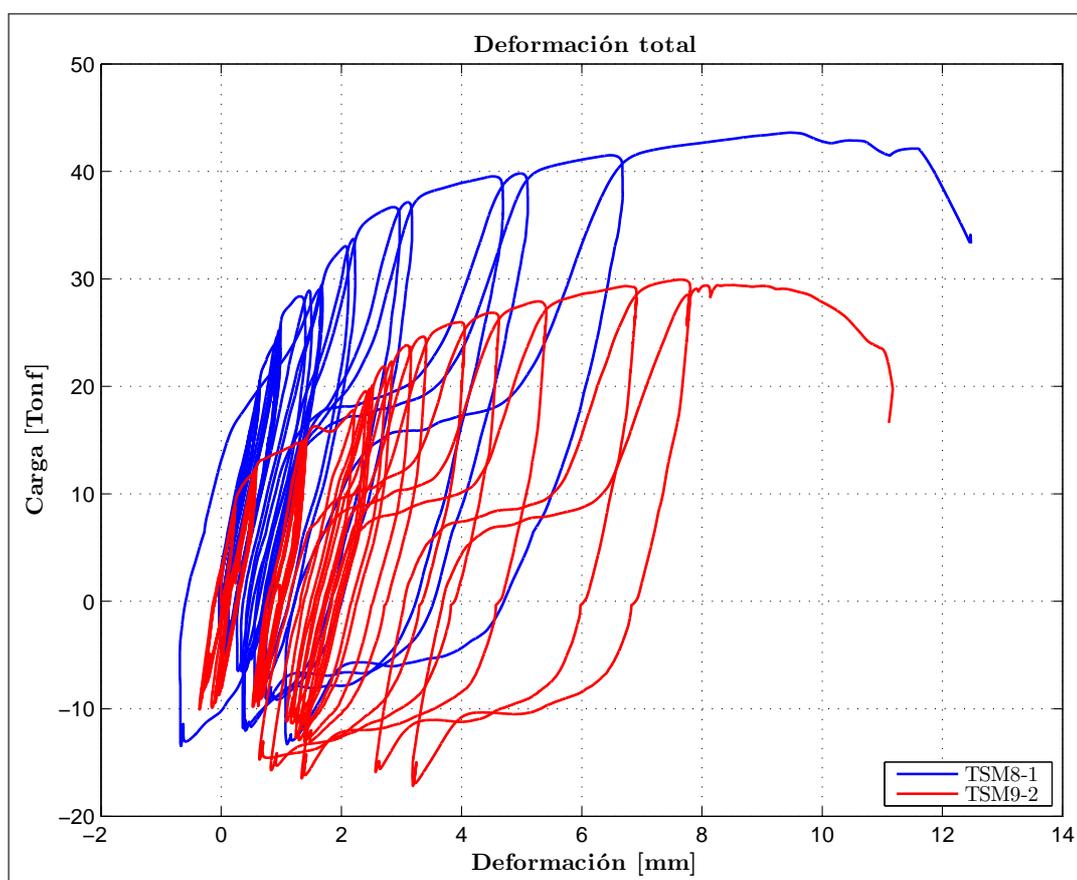
Por su parte, ambas probetas TSM9 fallaron por una fractura del área neta, presentando una leve diferencia en sus capacidades últimas. La soldadura de filete no presenta problemas. Los resultados se presentan en la tabla 7.6.

Tabla 7.6: Resultados de ensayos cíclicos del grupo 4

Probeta	Modo de falla	Carga Máx.	Def. Máx.	Def. Mín.	Rigidez Inicial	Energía Dis.
		[kN]	[in]	[in]	[kN/ in]	[kN - in]
TSM8 - 1	F.P.T	427.644	0.486	-0.001	9026.238	365.845
TSM8 - 2	S	354.611	0.341	-0.008	8709.895	291.152
TSM9 - 1	F.A.N	304.331	0.323	-0.007	9486.305	223.658
TSM9 - 2	F.A.N	288.561	0.431	-0.012	8143.467	287.034

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

En las figuras 7.26 y 7.27 se presentan las respuestas de las dos probetas a modo de comparación.

**Figura 7.26:** Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM8-1 - TSM9-2

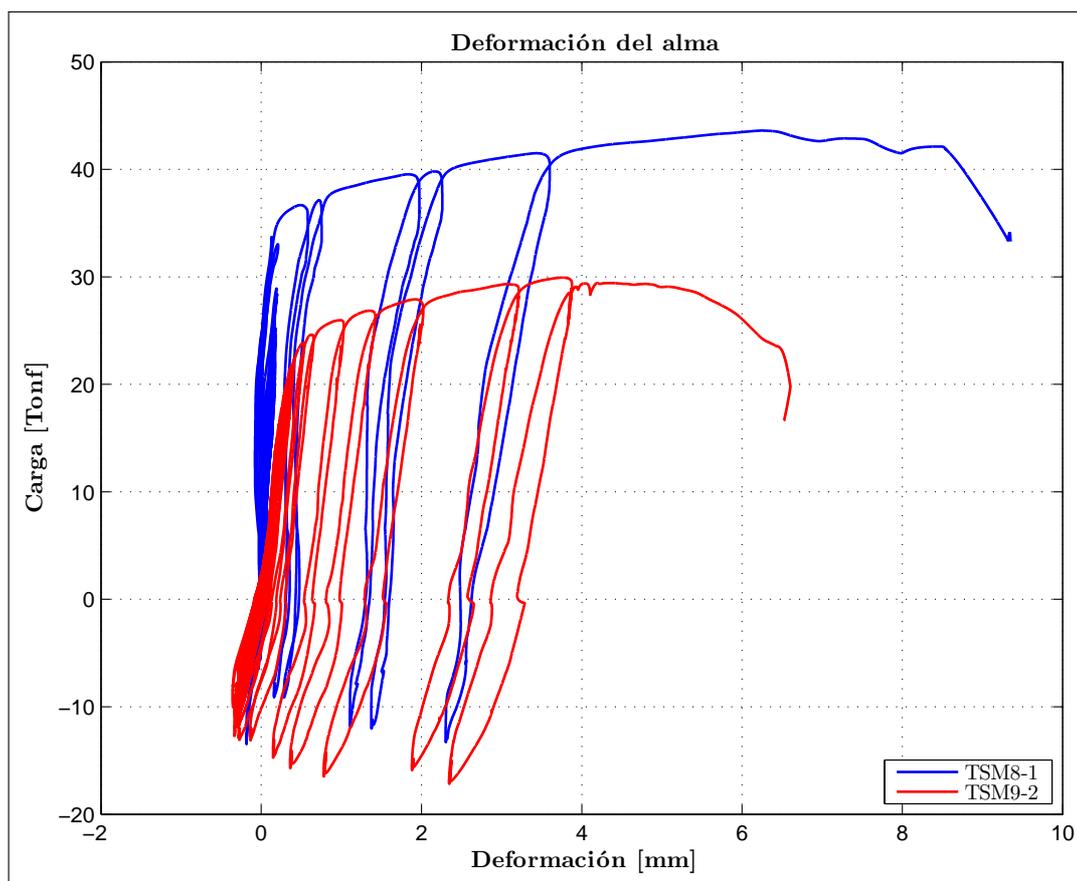


Figura 7.27: Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM8-1 - TSM9-2

7.5.5. TSM10

El objetivo de esta última configuración fue inducir una falla por fluencia del área gruesa; se diseñó teóricamente para estos efectos. Experimentalmente ambas probetas presentaron una alta fluencia del alma, sin embargo fallaron por una fractura en el área neta. El comienzo de la fractura en el alma, al igual que en el resto de las configuraciones, comenzó entre los dos últimos pernos. Sin embargo, fue muy sutil e imperceptible, y su propagación hacia el exterior tomó mucho más tiempo que en una probeta de espesor de alma más delgado. Las curvas reflejan entonces alta ductilidad. Sus capacidades últimas son muy similares. Se presentan los resultados en la tabla 7.7.

Tabla 7.7: Resultados de ensayos cíclicos del grupo 5

Probeta	Modo de falla	Carga Máx.	Def. Máx.	Def. Mín.	Rigidez Inicial	Energía Dis.
		[kN]	[in]	[in]	[kN/ in]	[kN - in]
TSM10 - 1	F.A.N	263.848	0.286	-0.007	8802.556	193.784
TSM10 - 2	F.A.N	255.060	0.274	-0.006	8160.156	150.949

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

En las figuras 7.26 y 7.29 se presentan las respuestas de las dos probetas TSM10 a modo de

comparación.

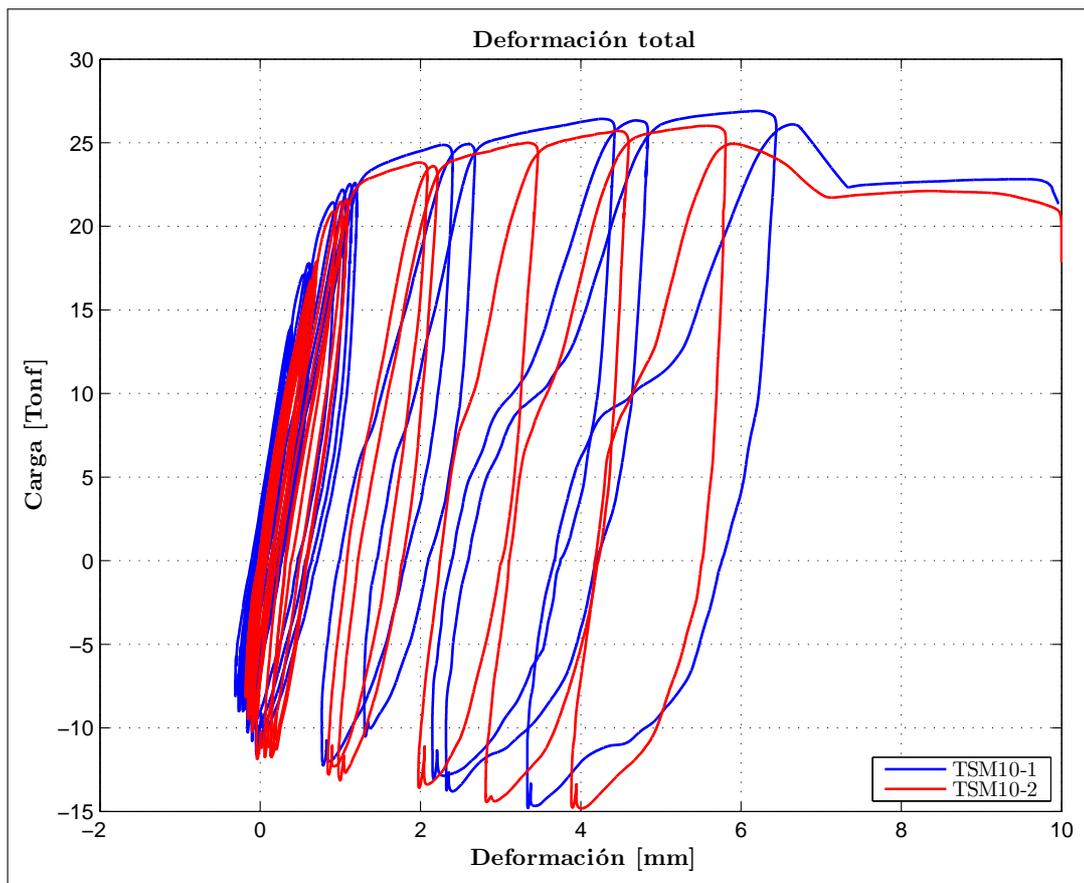


Figura 7.28: Curvas cíclicas de respuesta total - Probetas TSM10-1 - TSM10-2

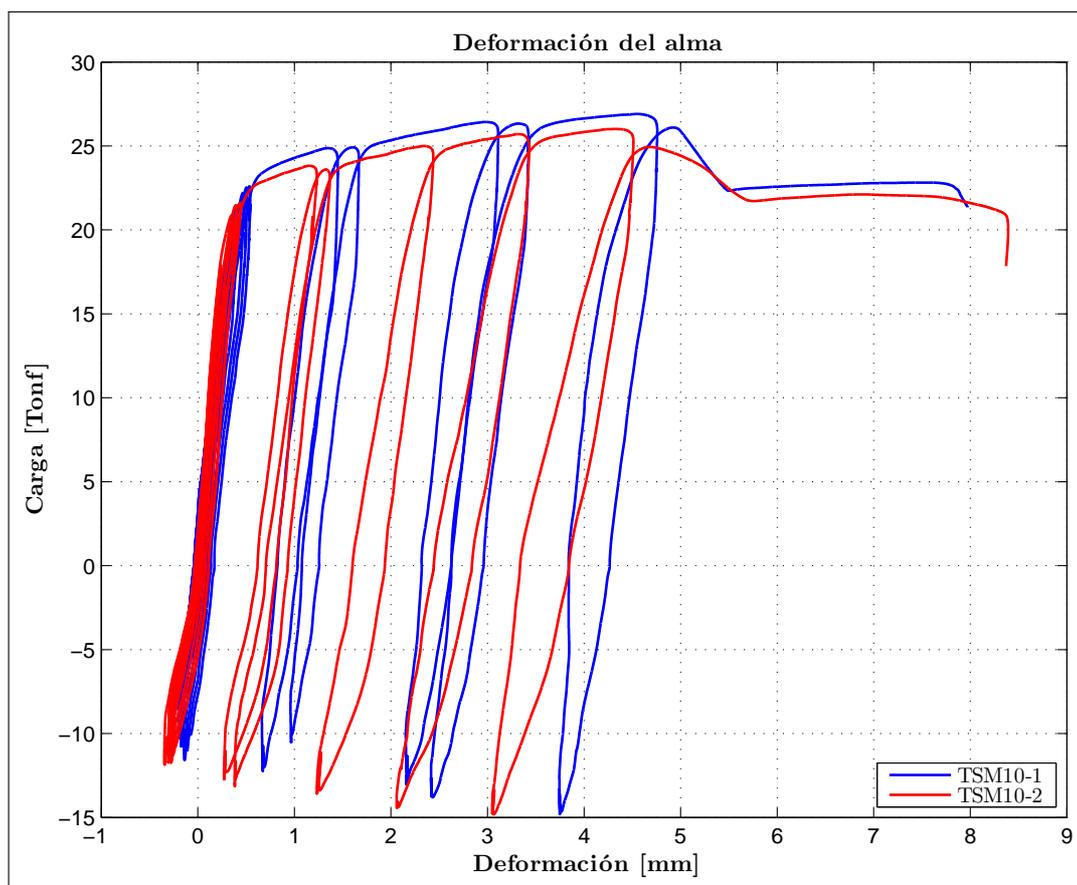


Figura 7.29: Curvas cíclicas de respuesta del alma - Probetas TSM10-1 - TSM10-2

7.6. Soldadura

Casi la totalidad de las probetas de la serie TSM se confeccionó con filetes de soldadura para conectar ala y alma. Sin embargo, dos de éstas se construyeron con una soldadura de penetración completa, en ambos casos con la mínima cantidad que establece la norma. La única probeta que presentó problemas en la zona de la soldadura corresponde a una de estas últimas. Como su probeta análoga, la TSM8-1 presentó un correcto comportamiento en la zona de soldadura, resultaba imperativo indagar en esta falla; por lo demás, este corresponde a uno de los parámetros de estudio más importantes de la presente investigación, como ya se ha señalado.

Se realizó un análisis metalográfico cortando transversalmente el ala de la probeta. Con esto se construyó un cupón de ensayo de 1 x 3 [cm]. Una de sus caras se limó con un esmeril angular bajo lijas al agua de 320 y 1200 poros. Posteriormente se aplicó Nitral al 3% (ácido nítrico más alcohol) durante 1 [min] para hacer reaccionar químicamente la soldadura y poder así observarla con microscopio. El resultados de la metalografía se observa en la figura 7.30; se puede apreciar un detalle de las zonas más importante las cuales fueron capturadas a través de microscopio con diferentes alcances de zoom (50x - 80x).

En el esquema presentado, se observa que las zonas H, G y F corresponden a los bordes libres

de la zona fracturada de soldadura, en los cuales no se encontraron rastros de material base del alma del perfil. En medio de ambos filetes de soldadura se encontró material base del alma, lo que hace pensar en una incompleta penetración de la soldadura; es desde esa zona, además, que se propaga hacia arriba una grieta. Se concluye que entre el filete izquierdo de soldadura y el material base del alma no hubo una correcta fusión y, por tanto, esa zona sufrió un desprendimiento, lo que de acuerdo a la orientación y materialización del ensayo se vio favorecido por el momento inducido durante el experimento. Se piensa que una vez ocurrido esto, el filete de soldadura del lado derecho comenzó a tomar toda la carga, desgarrándose posteriormente. Este desgarramiento es en la zona de transición alma-soldadura la que posiblemente tampoco alcanzó una correcta fusión. Finalmente, se observan unas estrías en la zona H, las cuales están orientadas de acuerdo a la tracción realizada, por lo cual se cree que allí se produjo la máxima concentración de tensiones y propagó la falla una vez desprendida el alma respecto del filete de soldadura del lado izquierdo.

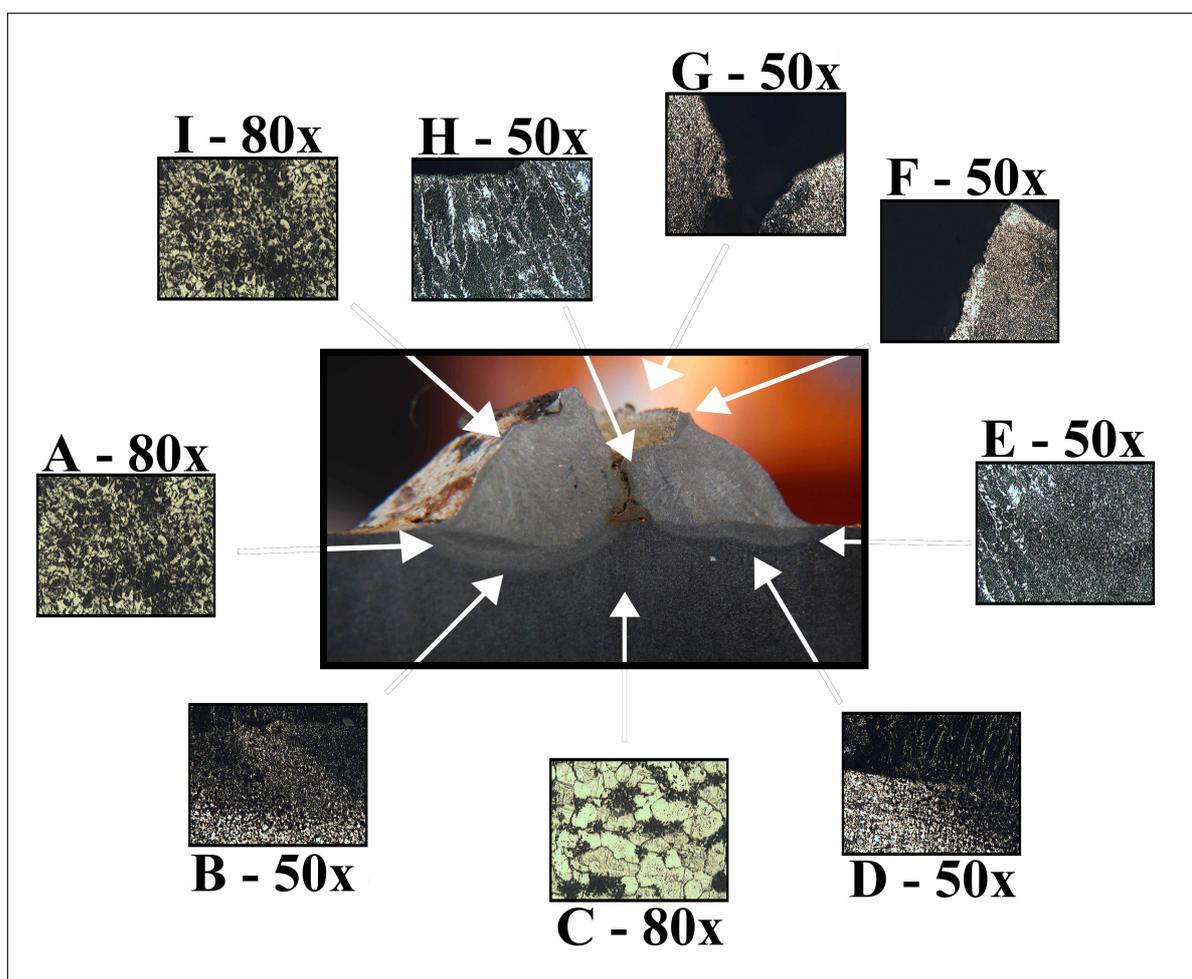


Figura 7.30: Metalografía y zonas de interés al microscopio

7.7. Comparación de resultados teóricos y experimentales

Resulta muy importante comparar los valores últimos y modos de falla teóricos con los obtenidos experimentalmente, pues se deben validar los ensayos realizados para perfiles T-stub soldados con los criterios teóricos utilizados válidos para perfiles T-stub laminados. Las diferencias que aquí se manifiesten serán de gran importancia para establecer los criterios finales de diseño que den cuenta del comportamiento de perfiles T-stub soldados para conexiones DST.

En la tabla 7.8 se presentan los valores de carga últimos y modos de falla que controlan el comportamiento de cada una de las configuraciones consideradas, según el diseño teórico de FEMA 350. (2000) y su par experimental. Las capacidades según el FEMA 350. (2000) fueron estimadas considerando las propiedades nominales de los materiales.

Tabla 7.8: Comparación de valores últimos y modos de falla teóricos y experimentales

Probeta	Teórico FEMA -350		Experimental	
	Modo de Falla	Carga [kN]	Modo de Falla	Carga [kN]
TSM-1	B. C	198.911	F.A.N	227.282
TSM-2	B. C	218.687	F.A.N	248.587
TSM-3	B.C	238.454	F.A.N	227.791
TSM-4	F.A.N	307.779	F.A.N	316.403
TSM-5	F.A.N	246.225	F.A.N	233.853
TSM-6	F.P.T	367.324	F.P.T	453.912
TSM-7	F.P.T	458.101	F.A.N	501.118
TSM-8	F.A.N	369.342	F.P.T - S	427.339
TSM-9	S	297.156	F.A.N	296.234
TSM-10	F.A.B	250.566	F.A.N	259.269

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

Los resultados de los valores experimentales, en promedio, presentan una sobrerresistencia del 7,9% respecto de los teóricos de diseño. La primera apreciación entonces corresponde a la subvaloración de las capacidades últimas por parte de los criterios de diseño considerados. Estos últimos se acercan al comportamiento de los perfiles T-stub soldados con un factor de utilización menor que 1, vale decir, con un grado de seguridad mayor que uno.

Las tres primeras configuraciones (TSM-1, TSM-2, TSM-3) con espesores de alma de 4[mm] quedaron controladas teóricamente por una potencial falla de bloque de corte de alma. Sin embargo, el modo de falla observado corresponde a una fractura del área neta del alma. Ambos corresponden a fallas dúctiles que tienen el mismo origen una vez que comienza la deformación del alma. Es muy interesante que en los videos capturados se puede apreciar claramente el movimiento en bloque de la zona de pernos a cizalle en el alma una vez que la probeta comienza a tomar carga. Pero

una vez que comienza la fractura entre los dos últimos pernos a cizalle ésta se propaga hacia los bordes del alma produciendo la fractura completa del área neta. El parámetro más sensible del diseño corresponde a la estimación de la sección de Whitmore, el cual produce un valor último muy cercano para el modo de falla por fractura del área neta.

La configuración TSM7 quedó teóricamente controlada por una potencial fractura de los pernos en tracción, sin embargo, la respuesta experimental fue una fractura del área neta del alma. Cabe destacar que las capacidades de ambos modos de falla teóricos son muy cercanas. La contraparte de este hecho es la probeta TSM8, que teóricamente queda controlada por una fractura del área neta en el alma, tiene un modo de falla experimental consistente en una fractura de los pernos a tracción.

Por su parte, las configuraciones TSM9 y TSM10 quedaron teóricamente controladas por potenciales fallas en la soldadura y fluencia del área bruta, respectivamente. Sin embargo, la respuesta experimental de ambas quedó controlada por una fractura del área neta en el alma. Al igual que el caso anterior, las capacidades teóricas para los dos modos de falla son muy cercanas, y las capacidades de carga experimental registradas difieren sólo en 0,3% y 3,4% respecto de las teóricas, a pesar de presentar otro modo de falla, vale decir son prácticamente iguales.

Las capacidades en general quedan entonces bien predichas y sólo difieren ciertos modos de falla que en la teoría están también muy cercanos en capacidad, vale decir, no se observa un comportamiento extraño o un modo de falla que no esté en el rango de respuesta y capacidades esperadas.

A pesar de que no se aprecian grandes diferencias, se deben considerar las siguientes variables en esta comparación teórico - experimental para poder explicar sus diferencias:

- Las propiedades mecánicas de los materiales utilizadas
- Problemas experimentales ya sea de carga o adquisición de datos

7.8. Comparación de ensayos monotónicos y cíclicos

Dos de las configuraciones de la serie TSM son idénticas mecánica y geoméricamente a dos probetas de la serie TSE ensayadas monotónicamente por Herrera *et al.* (2008). Los modos de falla obtenidos para todas las configuraciones son una fractura del área neta del alma. Utilizando la información de la deformación del alma se comparan a continuación, en la figura 7.31 y 7.32, ambos ensayos:

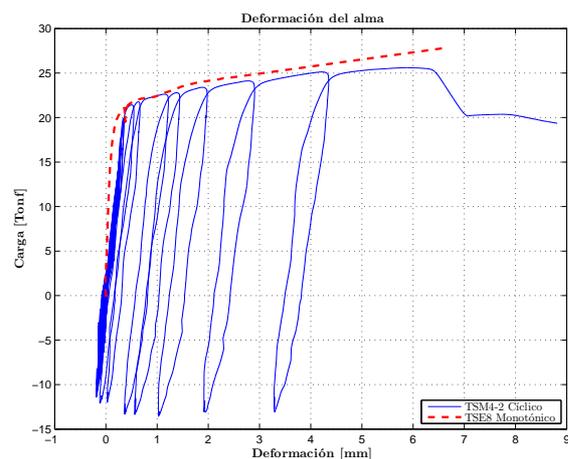


Figura 7.31: TSM4-2 v/s TSE8

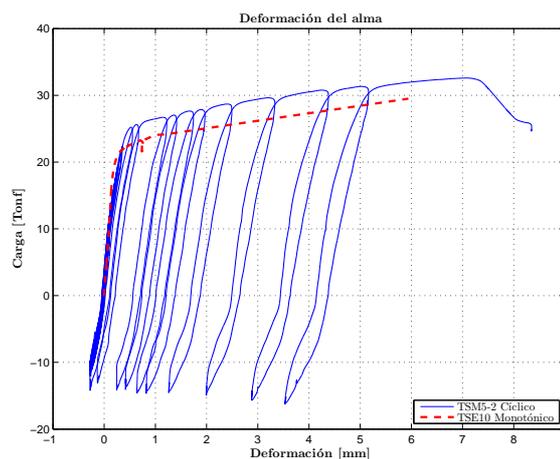


Figura 7.32: TSM5-2 v/s TSE10

Estos ensayos son comparables pues la geometría, metal base, pernos a cizalle y tracción son nominalmente idénticos. La figura 7.31 muestra muy buenos resultados, pues la curva monotónica del ensayo TSE8 se comporta como la envolvente de la respuesta cíclica de la probeta TSM4-2. Por su parte, la figura 7.32 muestra que la respuesta monotónica del ensayo TSM10 está levemente bajo la envolvente de la respuesta dinámica de la probeta TSM5-2; sin embargo, esto se puede explicar por alguna diferencia en las propiedades mecánicas reales de los pernos o el metal base, incluso en la fuerza de torque realizada para la pretensión de los pernos. Se observa claramente que en particular la tensión de fluencia de alguno de los materiales del ensayo monotónico está bajo la media, pues las rigideces lineales y plásticas se ajustan bastante bien. Respecto de la capacidad última de carga y deformación; es importante mencionar que los ensayos monotónicos desarrollados por Herrera *et al.* (2008) no fueron llevados hasta la falla por seguridad de la instrumentación, por lo que el último tramo de la zona plástica hasta la falla es una proyección realizada durante esa investigación.

Finalmente, se observa a priori que la respuesta monotónica es comparable con la respuesta dinámica, pues en esta última la capacidad del perfil no se ha visto degradada por los ciclos.

7.9. Resultados experimentales v/s modelo de elementos finitos I

Inicialmente se presentan los resultados obtenidos con el modelo de elementos finitos de carga monotónica, el cual fue alimentado con las propiedades mecánicas respectivas para cada una de las configuraciones, de acuerdo a los ensayos de probetas planas y pernos. En el caso de la soldadura se utilizaron los valores nominales según certificados de calidad. Cada uno de los modelos de la serie TSM para elementos finitos considera las siguientes variables:

- Metal base A36 : Tensión de fluencia y módulo tangente según propiedades mecánicas de ensayo de tracción. De acuerdo al espesor de ala y alma correspondiente
- Pernos A325 : Tensión de fluencia y módulo tangente según propiedades mecánicas de ensayo de tracción. De acuerdo al tipo de pernos a cizalle y tracción según corresponda
- Pernos A490 : Tensión de fluencia y módulo tangente según propiedades mecánicas de ensayo de tracción. De acuerdo al tipo de pernos a tracción
- Soldadura : Tensión de fluencia y última de acuerdo a certificados de calidad de acuerdo al tipo de electrodo

Tal como se ha consignado en las investigaciones pasadas, la relación entre el espesor del ala y alma es un parámetro muy importante (R_{ea}). No define por si solo el comportamiento del perfil pues existe una serie de otros parámetros ya mencionados, sin embargo, es una variable gravitante en el desempeño global del perfil. En la tabla 7.9 se presentan los espesores asociados y su relación. Aquellas probetas de la serie TSM que presentan un $R_{ea} > 2$ prácticamente no presentan deformación del ala por apalancamiento, siendo el alma la que desarrolla las mayores tensiones y deformaciones que finalmente devienen en una falla por fractura del área neta. Por su parte, las probetas con un $R_{ea} < 2$ presentan deformación importante y evidente del ala por apalancamiento, controlando a veces el modo de falla por rotura de los pernos a tracción; aquí el alma también se deforma y toma carga. En este último grupo es interesante el comportamiento del perfil TSM-7 el que presenta una deformación evidente del ala y finalmente queda controlado por la deformación del alma que se fractura en la zona del área neta.

Se ha presentado el parámetro R_{ea} pues en los modelos de elementos finitos es también muy relevante. Tal como se describió en el Capítulo N°3 la modelación tanto del alma como del ala de los perfiles se realizó con elementos del tipo sólido. Sin embargo, en las probetas donde la deformación del ala es considerable y prácticamente corresponde a la deformación total del perfil T, el ala se comporta prácticamente como un elemento *shell* de acuerdo a sus dimensiones y la deformación transversal alcanzada por la flexión inducida producto del apalancamiento. Es por esto que la modelación hasta aquí considerada no es capaz de reproducir correctamente el comportamiento de las probetas que presentan un $R_{ea} < 2$. Se realizaron entonces algunas pruebas considerando el ala como un elemento *shell*, sin embargo, como se esperaba, el tiempo de análisis que superó las 80 [hrs] no es razonable, esto por la interacción del ala con el resto de los partes modeladas como sólidos. Entonces, se probó la modelación cambiando el tipo de contacto entre los pernos a la tracción y el ala del perfil T-stub soldado, utilizando un contacto del tipo *frictionless* similar al utilizado en el contacto de los pernos sometidos a cizalle con el alma del perfil. Esto admite un grado de

deformación por parte del elemento que presenta menor rigidez, permitiendo la deformación del ala respecto de los pernos a tracción. Este tipo de modelo también presentó un largo tiempo de análisis, sin embargo permitió dar cuenta del comportamiento del ala y por tanto de la deformación y capacidad últimas de los perfiles.

Tabla 7.9: Relaciones de espesor ala/alma de la serie TSM

Probeta	Espesor		Relación R_{ea}
	Ala[mm]	Alma[mm]	Ala / Alma
TSM-1	12	4	3.00
TSM-2	12	4	3.00
TSM-3	12	4	3.00
TSM-4	12	4	3.00
TSM-5	12	5	2.40
TSM-6	10	8	1.25
TSM-7	10	8	1.25
TSM-8	12	6	2.00
TSM-9	12	5	2.40
TSM-10	12	4	3.00

El modelo de elementos finitos reproduce correctamente el modo de falla de cada uno de los perfiles de la serie TSM. En promedio, la capacidad última a la falla de los modelos de elementos finitos es 5,38 % mayor que los valores experimentales. Los modelos por supuesto son altamente sensibles a las propiedades mecánicas de los materiales y de haber utilizado propiedades mecánicas promedio por material para todas las probetas las diferencias serían mayores. En la tabla 7.10 se muestran los resultados en contraste con los valores experimentales.

Tabla 7.10: Valores últimos y modos de falla de modelo de elementos finitos y experimentales

Teórico FEM			Experimental	
Probeta	Modo de Falla	Carga [Tonf]	Modo de Falla	Carga [Tonf]
TSM-1	F.A.N	24.313	F.A.N	23.192
TSM-2	F.A.N	24.313	F.A.N	25.366
TSM-3	F.A.N	24.932	F.A.N	23.244
TSM-4	F.A.N	34.558	F.A.N	32.286
TSM-5	F.A.N	26.364	F.A.N	23.863
TSM-6	F.P.T	43.068	F.P.T	46.318
TSM-7	F.A.N	52.890	F.A.N	51.135
TSM-8	F.P.T	46.300	F.P.T - S	43.606
TSM-9	F.A.N	31.544	F.A.N	30.228
TSM-10	F.A.N	26.794	F.A.N	26.456

B.C: Bloque de corte - F.A.N: Fractura de área neta - F.P.T: Fractura de pernos a tracción
F.A.B: Fluencia del área bruta - S: Soldadura

7.9.1. Levantamiento del ala

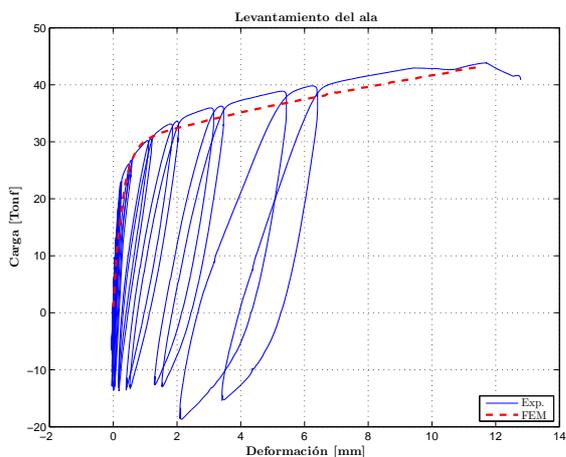


Figura 7.33: Exp. y FEM - TSM6-2

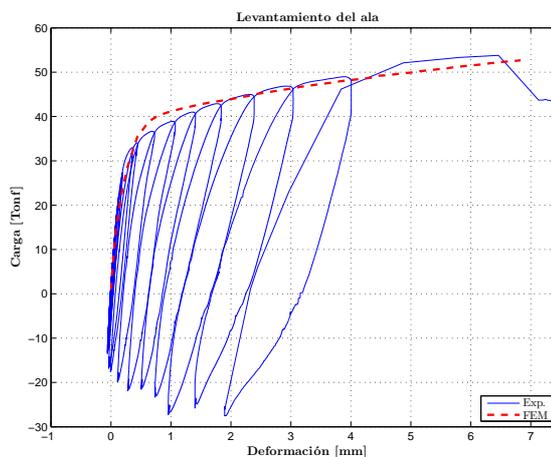


Figura 7.34: Exp. y FEM - TSM7-2

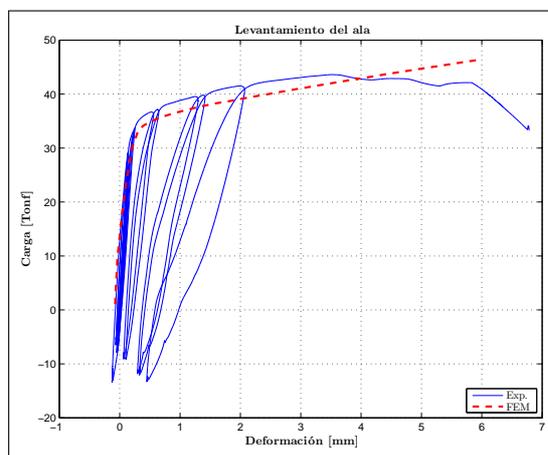


Figura 7.35: Exp. y FEM - TSM8-1

7.9.2. Deformación del alma

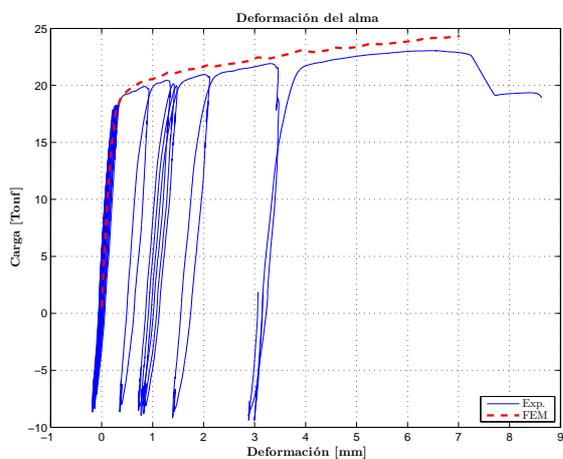


Figura 7.36: Exp. y FEM - TSM1-2

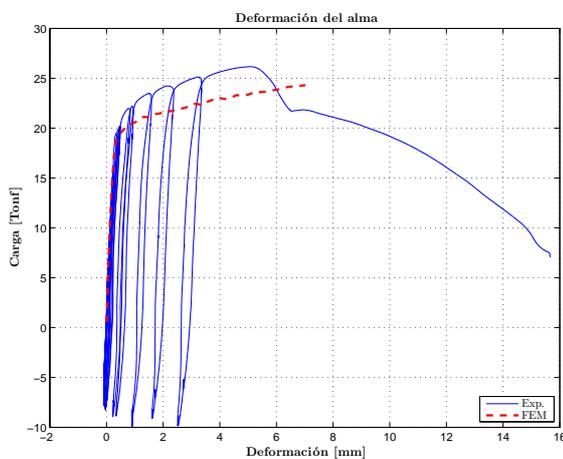


Figura 7.37: Exp. y FEM - TSM2-2

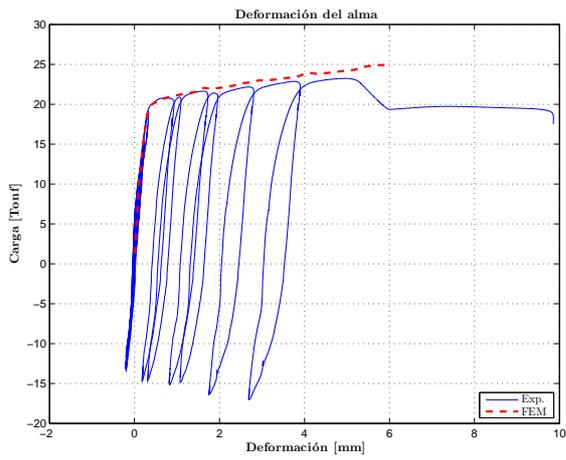


Figura 7.38: Exp. y FEM - TSM3-2

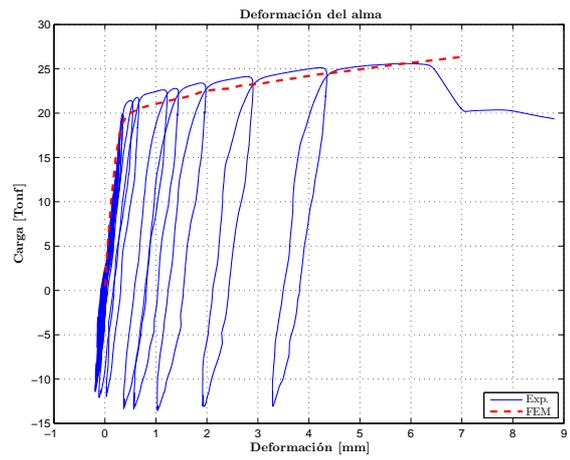


Figura 7.39: Exp. y FEM - TSM4-2

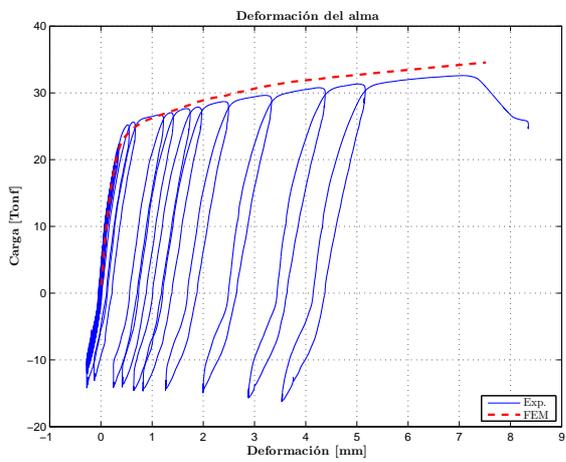


Figura 7.40: Exp. y FEM - TSM5-2

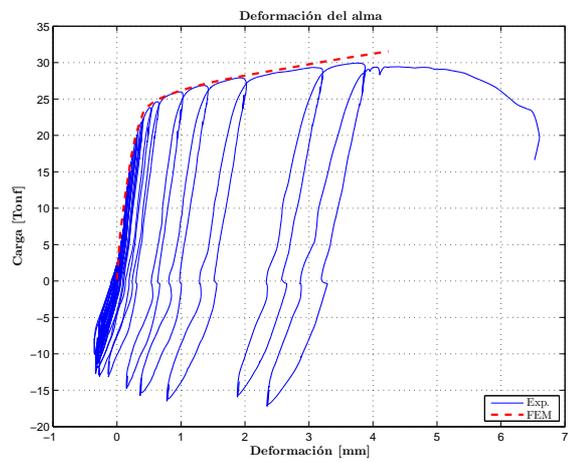


Figura 7.41: Exp. y FEM - TSM9-2

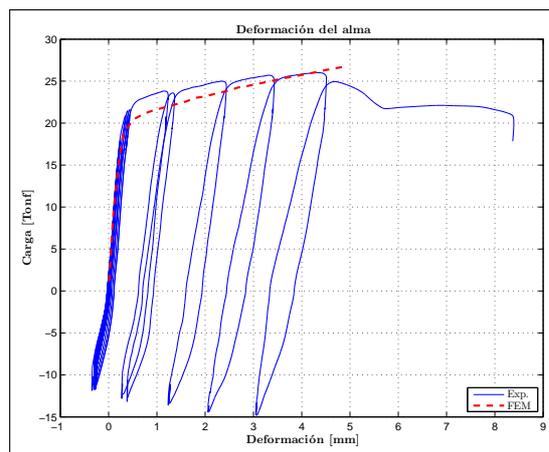


Figura 7.42: Exp. y FEM - TSM10-2

7.10. Resultados experimentales v/s modelo de elementos finitos II

Los resultados presentados en esta sección corresponden al modelo de elementos finitos sometido a carga cíclica. Se presentan de forma global de acuerdo al comportamiento según la relación de espesor ala/alma, que define los modos de falla y el desempeño de las distintas partes del perfil T-stub soldado. Los modelos desarrollados y presentados deben ser considerados como estimaciones aproximadas del comportamiento real de los perfiles T-stub soldados.

El modelo será presentado de forma global de acuerdo al comportamiento de los perfiles T-stub soldados según los parámetros de interés. Cabe mencionar que aquellos modelos de la serie TSM que presentan una importante deformación del ala demandaron un tiempo de análisis por sobre las 70 [hrs].

7.10.1. Levantamiento del ala

La mayoría de las probetas controladas por fractura del área neta prácticamente no presentaron deformación del ala producto del apalancamiento. Para presentar este parámetro se ha considerado la probeta TSM6, pues presenta la mayor deformación del ala. El modelo cíclico reproduce bien la capacidad y deformación última del ala hasta la falla de los pernos por tracción. En la figura 7.43 se muestran las curvas de carga deformación experimental y teórica. Se observa que para los primeros ciclos de carga el modelo de elementos finitos no alcanza la misma deformación en compresión y para los últimos ciclos se observa que también en compresión se desarrolla un deslizamiento que en la respuesta experimental no se observa. A priori, entonces, el modelo reproduce correctamente la rigidez en compresión del perfil T hasta el momento del deslizamiento crítico, después del cual tiene una capacidad menor. Sin embargo, cuando se muestre el comportamiento del deslizamiento en el modelo se observará que la rigidez y el deslizamiento crítico a tracción modelan correctamente el comportamiento experimental de los perfiles T-stub soldados.

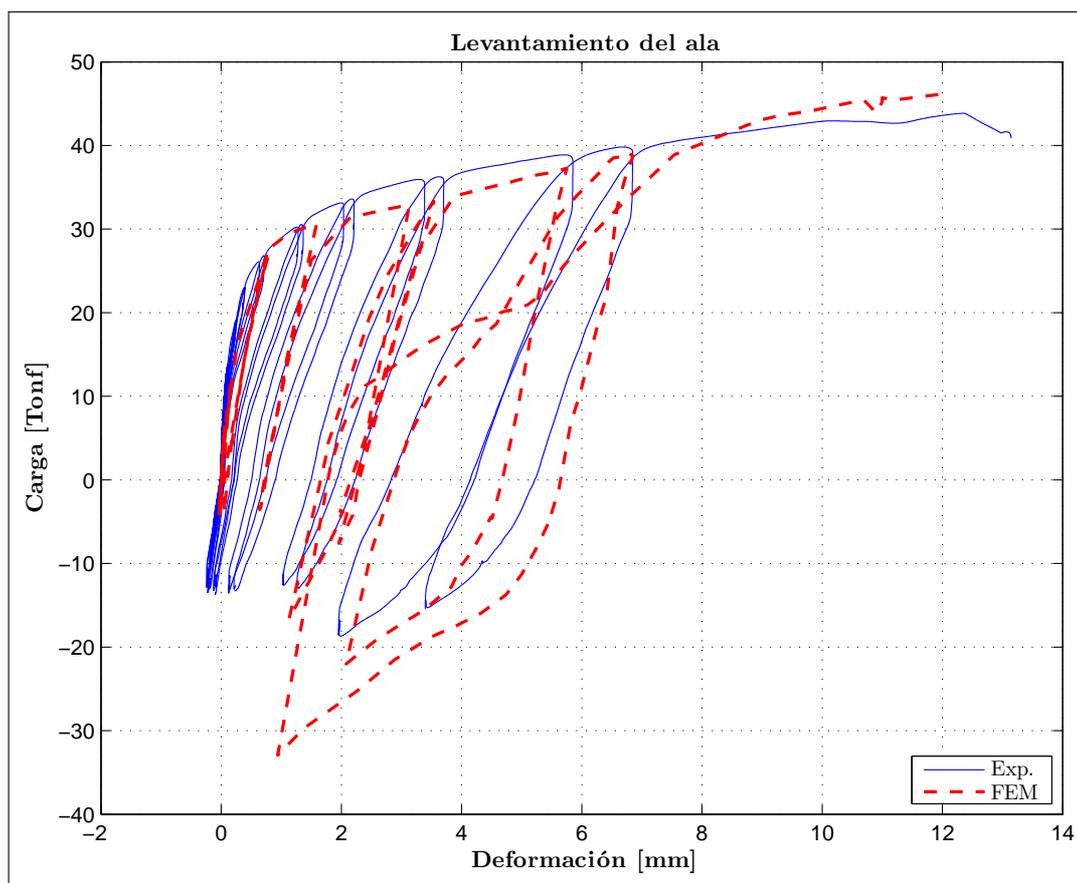
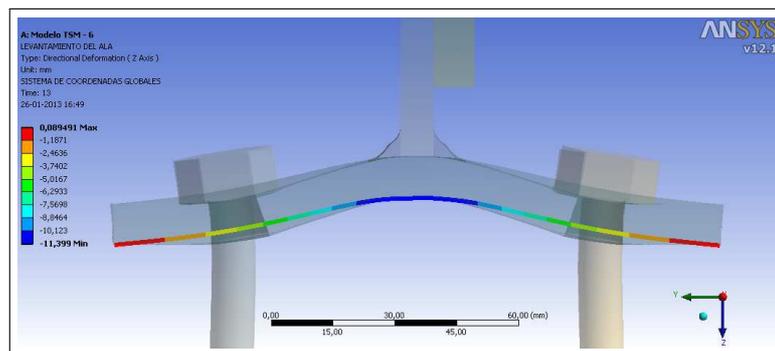
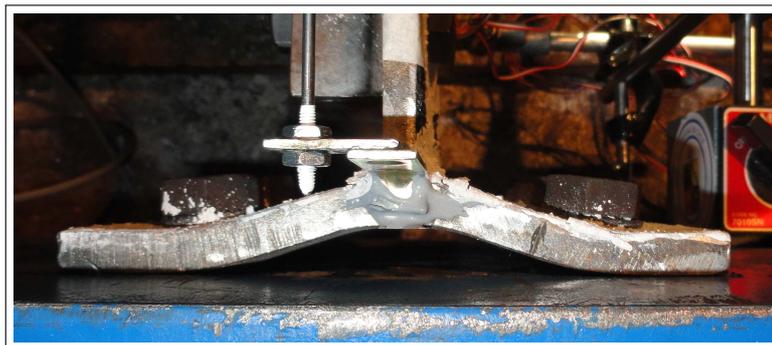


Figura 7.43: Levantamiento del ala - Exp. y FEM Cíclico - TSM6-2

La figura 7.44 es comparativa de los levantamientos del perfil TSM6. La deformación experimental es mayor que la entregada por el modelo sólo en un 5,4% al momento de la fractura de los pernos a tracción.



(a) FEM cíclico - TSM6



(b) TSM6-2

Figura 7.44: Comparación levantamiento del ala TSM6 - 2

7.10.2. Deformación del Alma

Se presenta el comportamiento tipo del modelo para la deformación del alma a partir de la probeta TSM3-2 que fallara por una fractura del área neta. Esta, como la mayoría de las probetas controladas por el mismo modo de falla, presenta una deformación del ala marginal respecto de la deformación total de la probeta. Se muestra en la figura 7.45 que la capacidad y deformación última quedan bien representadas por el modelo; se vuelve a observar que la rigidez en compresión del modelo de elementos finitos para los primeros ciclos no reproduce el comportamiento real.

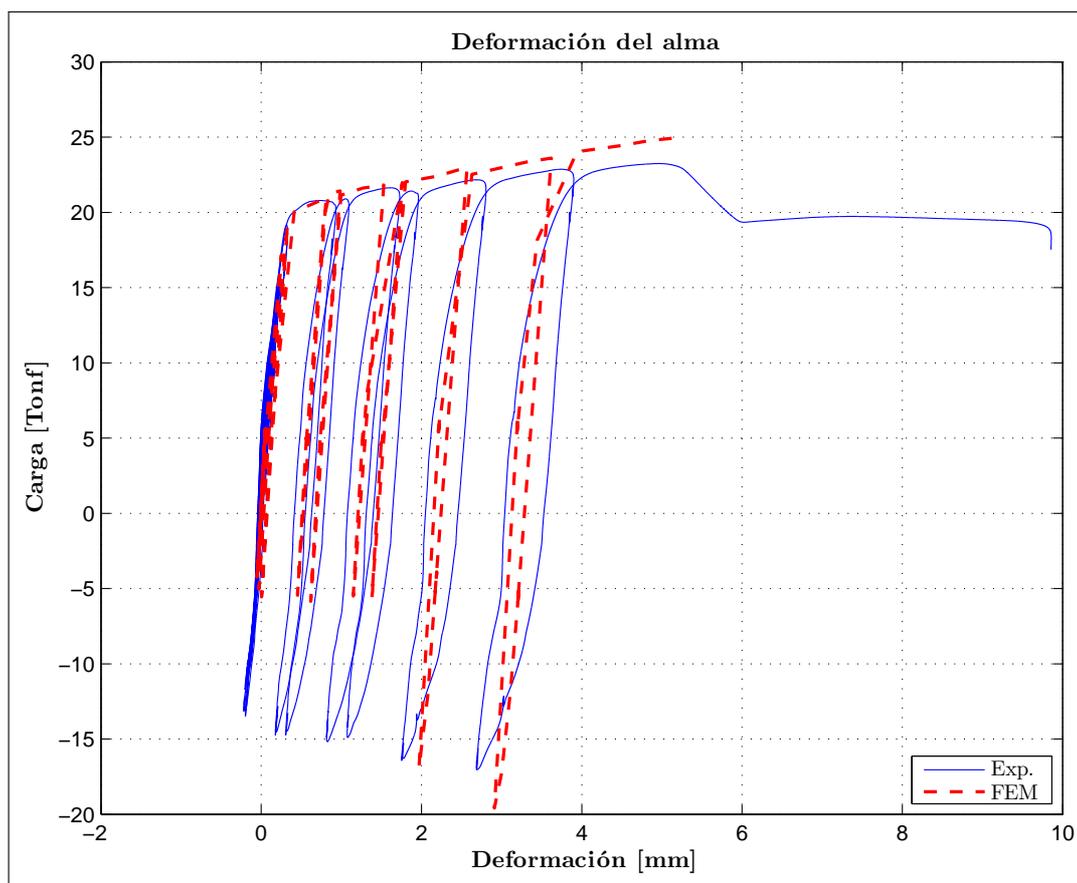


Figura 7.45: Deformación del alma - Exp. y FEM Cíclico - TSM3-2

Se muestra en las figuras 7.46 y 7.47 la deformación tipo del alma que se manifiesta en todos los perfiles que están controlados por una fractura del área neta. En la figura 7.47 se puede observar el aplastamiento en tracción y compresión de las perforaciones del alma.

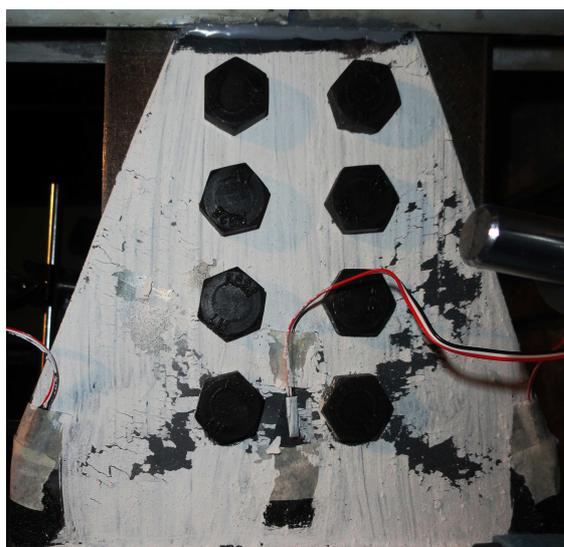


Figura 7.46: Alma TSM3-2

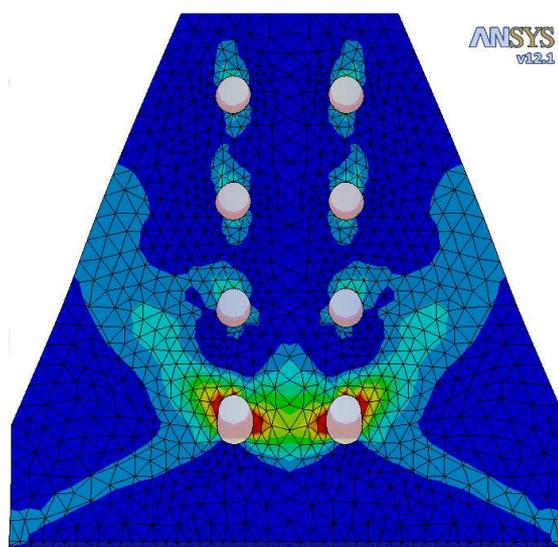


Figura 7.47: Alma FEM TSM3

7.10.3. Deformación total

El modelo hace una buena estimación de la capacidad y deformación total de los perfiles T-stub soldados antes de la falla. En particular, se muestra en la figura 7.48 el comportamiento de la probeta TSM3. El modelo no es capaz de reproducir correctamente la degradación en la capacidad al deslizamiento del perfil T-stub soldado pues muestra el mismo valor de carga crítica al deslizamiento desde el comienzo del primer ciclo. Por lo mismo en los primeros ciclos de carga no se alcanza la deformación experimental en tracción ni en compresión.

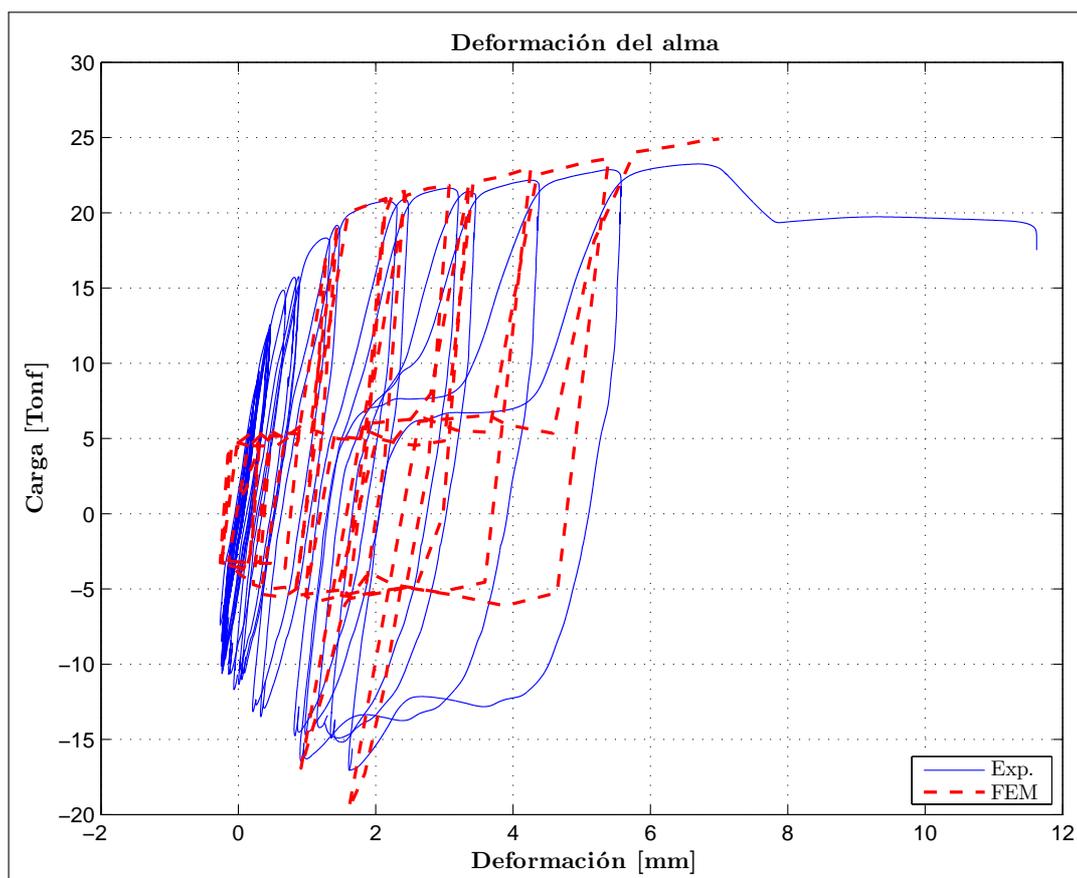


Figura 7.48: Deformación total - Exp. y FEM Cíclico - TSM3-2

7.10.4. Deslizamiento

Se presenta en la figura 7.49 el deslizamiento tipo a través de la probeta TSM3. El modelo no es capaz de dar cuenta de la carga y desplazamiento para los primeros ciclos de carga, pues muestra un deslizamiento temprano entre el alma y ala de la viga. Sin embargo, para los ciclos últimos proporciona una buena estimación tanto de carga como deformación. En particular la capacidad crítica al deslizamiento en tracción queda bien modelada para los últimos ciclos de carga, sin embargo este valor en compresión está sub valorado por parte del modelo cíclico de elementos finitos.

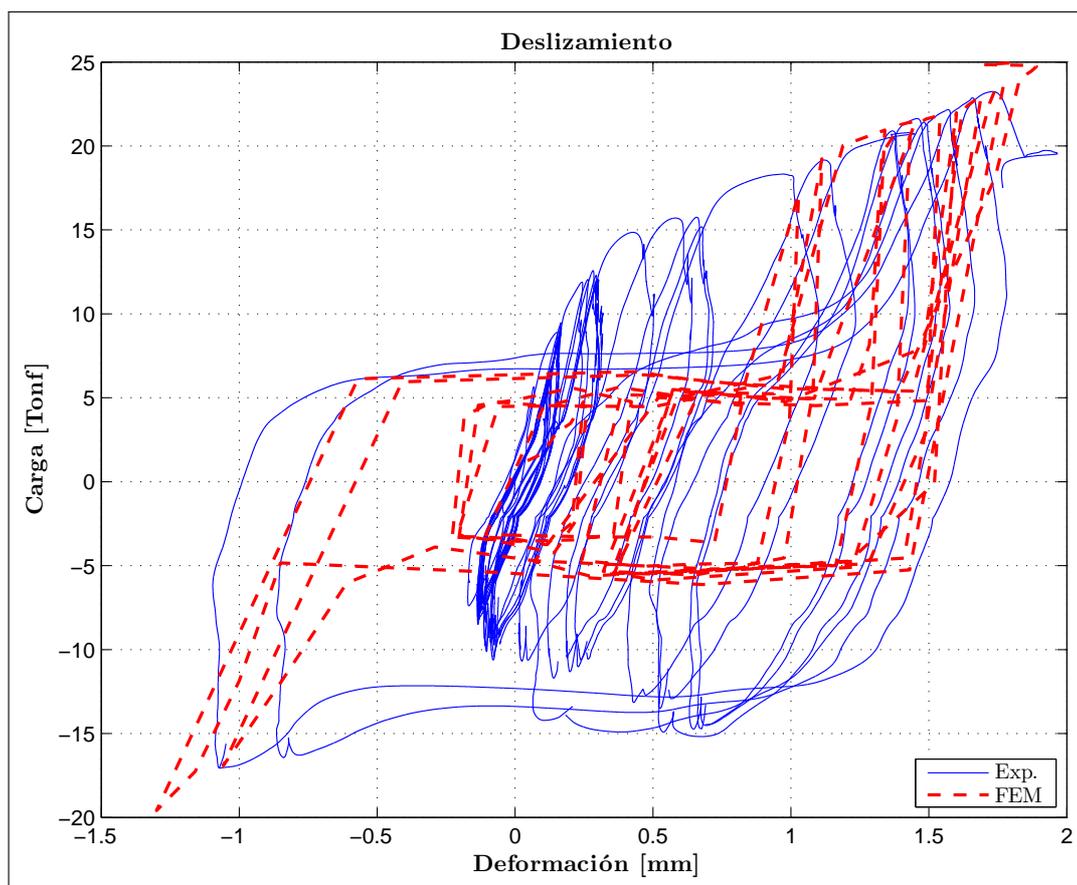


Figura 7.49: Deslizamiento - Exp. y FEM Cíclico - TSM3-2

Capítulo 8

Conclusiones

El objetivo principal de la presente investigación fue estudiar el comportamiento de perfiles T-stub soldados bajo cargas cíclicas, considerando las variables que controlan su desempeño, pero centrando en particular el interés sobre la unión soldada entre ala y alma del perfil. Éste y los objetivos secundarios fueron alcanzados por medio de la realización de 20 ensayos de perfiles T-stub soldados sometidos a carga cíclica y al estudio de un modelo de análisis con elementos finitos.

El diseño de los perfiles T-stub soldados se realizó considerando normas que rigen el desempeño de perfiles T-stub laminados, con la intención de extender la validación de éstas a elementos que presentan un nuevo parámetro, como es la soldadura y por consiguiente, la posibilidad de contar con espesores distintos de ala y alma; lo que ciertamente favorece su costo, disponibilidad y eficiencia.

La respuesta de la soldadura es satisfactoria en tanto permite el correcto desempeño del perfil T-stub soldado bajo cargas cíclicas. Diseñando este parámetros bajo las normas consideradas actualmente no debieran presentarse problemas en la zona de la soldadura. Sin embargo se debe tener en cuenta la importancia del control de calidad en el proceso de construcción, pues de existir negligencias en la confección en maestranza u obra, el sistema completo está a merced de una falla temprana y violenta, ciertamente no deseada, tal como se observó en el proceso experimental.

El comportamiento global del perfil T-stub soldado es completamente homologable al desempeño de su par laminado, pues los fenómenos observados están controlados por los mismos parámetros: levantamiento del ala por apalancamiento, deslizamiento entre alma del perfil y ala de la viga, deformación del alma y transferencia de carga por aplastamiento en los orificios del alma.

El modelo de elementos finitos entrega una sobre estimación del 5% de las capacidades de carga y deformación respecto de los resultados experimentales. Además es capaz de reproducir los modos de falla. El modelo, entonces, se considera efectivo y aceptable como herramienta para el diseño.

La fluencia de los pernos a tracción no debe ser considerado como un mecanismo válido para disipar energía, sino esta debe ser proporcionada por una conjunción de factores: levantamiento

del ala, fluencia del alma y deslizamiento; siendo gobernado el perfil T-stub soldado por una falla dúctil como lo es la fractura del área neta.

Los resultados experimentales presentan una resistencia última mayor de 7,9% en promedio, respecto de los valores teóricos entregados por el protocolo FEMA 350. Este valor es pequeño y en general no es significativo. Se puede atribuir por ejemplo a los errores en la estimación de las propiedades de los materiales en los ensayos realizados. Sin embargo se debe consignar que los modos de falla estimados por el protocolo FEMA 350 para el bloque de corte y fractura del área gruesa no concuerdan con los modos de falla observados que corresponden a una fractura del área neta para esas configuraciones.

8.1. Contribuciones de este trabajo

El modelo 3D de elementos finitos desarrollado como parte de esta investigación, debe ser considerado sólo como una herramienta de ayuda para el diseño para futuras conexiones. Este modelo resultó complejo y caro en recursos computacionales debido al detallamiento necesario para presentar las condiciones reales pues deben considerarse propiedades no lineales de los materiales y contactos para poder describir el comportamiento de un perfil T-stub soldado sometido a carga cíclica. El modelo en si mismo es un avance en esta área de investigación, pues presenta resultados satisfactorios respecto del desempeño global de los perfiles T-stub soldados reproduciendo sus modos de falla y capacidad de carga y deformación.

Se ha realizado un aporte a la base de datos existente sobre ensayos de perfiles T-stub, en particular no se conocen a la fecha datos de perfiles T-stub soldados bajo cargas cíclicas. Por supuesto, estos resultados podrán ser utilizados para el desarrollo de nuevos modelos o para la evaluación y calibración de modelos ya existentes.

El modelo corrobora que la zona de soldadura presenta una distribución de esfuerzos uniforme a lo ancho del perfil T-stub soldado.

Se logró construir y calibrar una instalación experimental compleja capaz de reproducir cargas cíclicas a través de control digital. También se implementó un sistema robusto de adquisición de datos que fue capaz de captar la respuesta de los perfiles hasta el momento de la falla y la descarga post- fractura. Este esquema experimental es un avance en si mismo respecto de la capacidad y estado del arte de los laboratorios del país.

8.2. Recomendaciones de diseño

De acuerdo al protocolo de ensayos cíclicos desarrollados según FEMA 350, es recomendable la utilización de perfiles T soldados para conexiones DST en zonas sísmicas.

El comportamiento más deseable de los perfiles T soldados para conexión, es el que alcanza un levantamiento del ala sin llegar a rangos de fluencia en los pernos a tracción, y paralelamente desarrolla la fluencia total del alma. Esta condición simultánea permite la mejor combinación entre rigidez, deformación y capacidad del perfil T soldado.

En consecuencia con lo anterior, un buen indicador para el diseño de los perfiles corresponde a la relación de espesores entre Ala y Alma (R_{ea}). Se recomienda el uso de valores de R_{ea} cercanos a 1.25 para garantizar resistencia y rigidez. Deberá controlarse en paralelo la distancia entre los pernos a tracción del ala de tal forma de no incursionar en rangos plásticos de estos.

Es recomendable la utilización de filetes de soldadura para espesores de alma delgados, que generalmente determinan espesores de soldadura mínimos. Para espesores mayores, se recomienda la utilización de soldaduras de penetración completa previo biselado del alma para asegurar una correcta materialización de la misma y evitar fallas como la observada en esta investigación.

Es recomendable la utilización de pernos de tensión controlada, pues existe una alta dependencia de la calidad de los hilos del perno y tuerca respectiva; para alcanzar la pretensión requerida manualmente.

8.3. Limitaciones

El estudio de los perfiles T-stub soldados se enmarca en la necesidad de precalificar una conexión DST, la cual consta de dos perfiles T-stub soldados y una placa de corte entre columna y alma de la viga. Esta investigación ha considerado tan solo una parte de la conexión, por lo tanto no se puede extrapolar este comportamiento directamente al desempeño global de una conexión viga - columna DST.

De acuerdo al desarrollo experimental considerado, no se evidenciaron posibles pandeos del alma de los perfiles en compresión. Sin embargo, teóricamente éste podría alcanzarse bajo ciertas condiciones y diseños que pueden ser considerados en el futuro.

No se estudió el comportamiento de los pernos sometidos a cizalle en el alma de los perfiles T. Ciertos pernos para los elementos con espesores de alma mayores presentaron una deformación transversal remanente evidente pero ésta no fue cuantificada. Éste corresponde a un potencial modo de falla, por tanto deberá considerarse en las futuras investigaciones.

Es importante consignar los demás parámetros que no fueron estudiados en la serie de perfiles TSM. El diámetro de los pernos, calidad del material base de las probetas, ancho de los perfiles y espesores de soldadura. Estos fueron considerados para el diseño pero no se pueden concluir mayores ideas respecto de ellos pues no son comparables entre las diversas probetas.

8.4. Futuras investigaciones

El mejoramiento del modelo de elementos finitos debe avanzar hacia la simplificación del mismo, de tal forma de obtener un modelo sencillo pero que sea capaz de dar cuenta del comportamiento de los perfiles y la conexión en su globalidad, como lo es el modelo de carga monotónica presentado en esta investigación. La disponibilidad cada vez mayor de mejores recursos computacionales no es de ninguna forma una causalidad directa de la necesidad de complejizar infinitamente los modelos de estudio. Un camino es la modelación de la conexión con barras y resortes.

Considerando la formalización definitiva de la precalificación de conexiones DST a partir de perfiles T-stub soldados, el paso siguiente en la línea de investigación sería realizar ensayos cíclicos a escala real que consideren la conexión completa: perfiles T soldados, placa de corte, viga y columna. Se podrá, entonces, comparar los futuros resultados con los modelos presentados en esta investigación, considerando la respuesta individual de los perfiles T-stub soldados y la construcción a partir de éstos de las curvas de momento - rotación del desempeño de la conexión completa.

Bibliografía

- AISC. 1992. *Load and Resistance Factor Design, 2nd ed.* Miami, Florida , USA: American Institute of Steel Construction.
- AISC. 2005a. *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings.* Chicago, Illinois, USA: American Institute of Steel Construction.
- AISC. 2005b. *Steel construction Manual.* American Institute of Steel Construction.
- AISC. 2010a. *Commentary on the specification for structural steel buildings.* Chicago, Illinois, USA: American Institute of Steel Construction.
- AISC. 2010b. *Specification for structural steel buildings.* Chicago, Illinois, USA: American Institute of Steel Construction.
- ANSI/AWS, D1.1. 2002. *Structural Welding Code Steel.* American Welding Society.
- ASTM, E8-04. 2004. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM, F. 2010. A325-10–Standard Specification for Structural Bolts. *Steel, Heat Treated*, **120**, 105.
- Eurocode. 1993. *Design Procedures to C-EC3 -Concise Eurocode 3 for the Design of Steel Buildings in the United Kingdom.* The Steel Construction Institute.
- FEMA 267A. 1997. Interim Guidelines - Advisory No. 1, FEMA. *Publication No. 267A, Federal Emergency Management Association, Washington DC.*
- FEMA 350. 2000. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. *Federal Emergency Management Agency Washington, DC.*
- Girão Coelho, A.M., Bijlaard, F.S.K., Gresnigt, N., & Simões da Silva, L. 2004. Experimental assessment of the behaviour of bolted T-stub connections made up of welded plates. *Journal of Constructional Steel Research*, **60**(2), 269–311.
- Herrera, R., Desjouis, G., Gomez, G., & Sarrazin, M. 2008. Behavior of welded T-stubs subjected to tensile loads. *In: 14 th World Conference on Earthquake Engineering: Innovation Practice Safety.* International Association for Earthquake Engineering.

- Herrera, R., Gomez, G., & Sarrazin, M. 2009. Design and behavior of welded T-stubs for DST connections. *Stessa, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-56326-0*.
- INDURA. 2007. *Manual de Soldadura en Línea*. [http : //www.indura.cl/file/file2182/manual20de/20soldadura/20indura/20/2007.pdf](http://www.indura.cl/file/file2182/manual20de/20soldadura/20indura/20/2007.pdf).
- INN. 1972. *NCh 200 Of.1972: Productos metálicos - Ensayo de tracción*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- Leon, R.T. 1997. *Seismic performance of bolted and riveted connections, Background Reports: Metallurgy, Fracture Mechanics, Welding, Moment Connections, and Frame Systems Behavior*. FEMA Publication No. 288, Federal Emergency Management Association, Washington DC, March.
- Piluso, V., Faella, C., & Rizzano, G. 2001a. Ultimate behavior of bolted T-stubs. I: Theoretical model. *Journal of Structural Engineering*, **127**, 686.
- Piluso, V., Faella, C., & Rizzano, G. 2001b. Ultimate behavior of bolted T-stubs. II: model validation. *Journal of Structural Engineering*, **127**, 694.
- Popov, E.P., & Bertero, V.V. 1973. Cyclic loading of steel beams and connections. *Journal of the Structural Division*, **99**(6), 1189–1204.
- Popov, E.P., Stephen, R.M., & University of California, Berkeley. Earthquake Engineering Research Center. 1972. *Cyclic loading of full-size steel connections*. American Iron and Steel Institute, Committee of Structural Steel Producers, Committee of Steel Plate Producers.
- RCSC. 2005. *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*. Chicago, Illinois, USA: Research Council On Structural Connections c/o American Institute Of Steel Construction.
- RILEM, R.D. 1990. Tension testing of metallic structural materials for determining stress-strain relations under monotonic and uniaxial tensile loading. *Materials and Structures*, **23**(1), 35–46.
- Soo Kim, T., & Kuwamura, H. 2007. Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear. *Thin-Walled Structures*, **45**(4), 407–421.
- Standard, A. A36/A36M-08. *Standard Specification for Carbon Structural Steel*.
- Swanson, JA. 2002. Ultimate strength prying models for bolted T-stub connections. *Engineering Journal*, **39**(3), 136–147.
- Swanson, J.A., & Leon, R.T. 2000. Bolted steel connections: tests on T-stub components. *Journal of Structural Engineering*, **126**, 50.
- Swanson, J.A., & Leon, R.T. 2001. Stiffness modeling of bolted T-stub connection components. *Journal of Structural Engineering*, **127**, 498.
- Timoshenko, S.P., & Gere, J.M. 1962. *Theory of elastic stability*. McGraw-Hill.
- Whitmore, R.E. 1950. *Experimental investigation of stresses in gusset plates*.

Apéndice A

Diseño de probetas TSM - FEMA 350

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

TSM-1

Capacidad de Carga 50 tonf

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa}$$

$$\text{tonf}_{\text{conv}} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_y := 313.42 \text{ MPa}$$

$$F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A325

$$F_{uexp} := 847.7 \text{ MPa}$$

$$F_{ub} := F_{uexp} \quad F_{ob} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

Dimensiones:

Independientes

$$\begin{aligned} t_{stem} &:= 4 \text{ mm} & w &:= 200 \text{ mm} & n &:= 4 & s_1 &:= 74 \text{ mm} & F_{ut} &:= F_u & F_{yt} &:= F_y \\ t_f &:= 12 \text{ mm} & h &:= 150 \text{ mm} & r &:= 3 \text{ mm} & s_2 &:= 32 \text{ mm} & & & & \\ d_{bt} &:= 1.27 \text{ cm} & q &:= 40 \text{ mm} & b_1 &:= 62 \text{ mm} & s_4 &:= 30 \text{ mm} & & & & \\ d_{ht} &:= 1.43 \text{ cm} & a &:= 40 \text{ mm} & b_2 &:= 76 \text{ mm} & & & & & & \end{aligned}$$

Dependientes

$$\begin{aligned} a' &:= a + \frac{d_{bt}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a & A_b &:= \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4} & s_3 &:= (n - 1) \cdot s_2 \\ b &:= \frac{h}{2} - a' - \frac{r - t_{stem}}{2} & q_t &:= 70 \text{ mm} & A_b &:= 1.267 \cdot \text{cm}^2 & N_{tb} &:= 2 \cdot n \\ b' &:= \frac{h}{2} - a - \frac{r - t_{stem}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a' & & & g_0 &:= q \\ i &:= 0..8 & j &:= 0..8 & q_t &:= 57.3 \text{ mm} & A_{beff} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}^2}{13} \right)^2 \\ Rn_1 &:= 0 & M_0 &:= 0 & & & & \end{aligned}$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$Rn_0 := w \cdot t_{stem} \cdot F_y$$

$$M_0 := 25.568 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$Rn_1 := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{yob}$$

$$M_1 := 52.561 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) < 15 \text{ in} \end{cases}$$

$$w_2 := \min \left(w, w_2 \right) = 150.851 \text{ mm}$$

$$\theta_{eff} = 15 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$$

$$w_2 := g_0 + 2 \cdot s_2 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 150.851 \text{ mm}$$

$$w_{n2} := \min(w, w_2) = 150.851 \text{ mm}$$

$$Rn_2 := F_{ut} \cdot [w_{n2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$M_2 := 22.25 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fractura Area Neta"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$$Rn_3 := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_{yT} \cdot (t_f)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$$

$$M_3 := 14.868 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{t4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_b + \frac{w \cdot \gamma \cdot t_f^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a + b'}$$

$$R_{t4} = 55.229 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{04} := \text{"Tension Pernos"}$$

5.- Bloque de Corte

Áreas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot [S_3 + S_4 - 3.5 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{in})] \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := [q - (d_{bt} + 0.125 \text{in})] \cdot t_{stem}$$

$$R_{n5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt} = 20.297 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt} = 23.836 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t5} := \min(R_{n5a}, R_{n5b})$$

$$R_{t5} = 20.297 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{05} := \text{"Bloque de Corte"}$$

6.- Aplastamiento

$$R_{n6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6b} := 2.4 \cdot d_{br} \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6} := 2 \cdot n \cdot \min(R_{n6a}, R_{n6b})$$

$$R_{t6} = 45.552 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{06} := \text{"Aplastamiento"}$$

7.- Delizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \cdot \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{t7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

$$R_{t7} = 17.212 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{07} := \text{"Deslizamiento Crítico"}$$

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \text{MPa} \quad F_{uw} := 529 \text{MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f = 12 \cdot \text{mm} \quad t_{stem} = 4 \cdot \text{mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 4 \cdot \text{mm}$$

$$L_w := 2w = 400 \cdot \text{mm} \quad L_{bm} := 2w = 400 \cdot \text{mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3 \text{mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6 \text{mm} \\ (5 \text{mm}) & \text{if } 6 \text{mm} < t_{min} \leq 13 \text{mm} \\ (6 \text{mm}) & \text{if } 13 \text{mm} < t_{min} \leq 19 \text{mm} \\ (8 \text{mm}) & \text{if } t_{min} > 19 \text{mm} \end{cases} \quad g_w = 3 \cdot \text{mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 1.2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 1.6 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 38.839 \cdot \text{tonf} \quad R_{n8b} = 44.835 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t8} := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

$$R_{t8} = 38.839 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{08} := \text{"Soldadura"}$$

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(Rn_i, \text{sort}(Rn))_{0, 0}$

$MF(O_i) := Mo_i$ $RN := \text{sort}(Rn)$

$MF =$		
"Rotula Plástica"	14.868	
"Deslizamiento Crítico"	17.212	
"Bloque de Corte"	20.297	
"Fractura Area Neta"	22.25	
"Fluencia Area Bruta"	25.568	· tonnef
"Soldadura"	38.839	
"Aplastamiento"	45.552	
"Corte de los Pernos"	52.561	
"Tension Pernos"	55.229	

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

TSM-2

Capacidad de Carga 50 tonf

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa} \quad \text{tonf} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_y := 313.42 \text{ MPa} \quad F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A325

$$F_{uexp} := 847.7 \text{ MPa} \quad F_{ub} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

$$F_{yob} := 749.9 \text{ MPa}$$

Dimensiones:

Independientes

$$\begin{aligned} l_{stem} &:= 4 \text{ mm} & w &:= 200 \text{ mm} & n &:= 4 & s_1 &:= 65 \text{ mm} & F_{uT} &:= F_u \\ t_f &:= 12 \text{ mm} & h &:= 150 \text{ mm} & r &:= 3 \text{ mm} & s_2 &:= 35 \text{ mm} & F_{yT} &:= F_y \\ d_{bt} &:= 1.27 \text{ cm} & q &:= 40 \text{ mm} & b_1 &:= 62 \text{ mm} & s_4 &:= 30 \text{ mm} & & \\ d_{bt} &:= 1.43 \text{ cm} & a &:= 40 \text{ mm} & b_2 &:= 76 \text{ mm} & & & & \end{aligned}$$

Dependientes

$$\begin{aligned} a' &:= a + \frac{d_{bt}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a & A_b &:= \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4} & s_3 &:= (n - 1) \cdot s_2 \\ b &:= \frac{h}{2} - a' - \frac{r - l_{stem}}{2} & q_t &:= 70 \text{ mm} & A_b &:= 1.267 \text{ cm}^2 & N_{tb} &:= 2 \cdot n \\ b' &:= \frac{h}{2} - a - \frac{r - l_{stem}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a' & & & g_o &:= q \\ i &:= 0..8 & q_t &:= 57.3 \text{ mm} & A_{beff} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2 \\ R_{n1} &:= 0 & & & M_{Oj} &:= 0 & & \end{aligned}$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$R_{n0} := w \cdot l_{stem} \cdot F_y$$

$$M_{Oj} := \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$R_{n1} := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{yob}$$

$$M_{Oj} := \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) > 30 \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) < 15 \\ \left[60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \right] \text{ deg} & \text{if } 15 \leq 60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \leq 30 \end{cases}$$

$$\theta_{eff} = 15 \text{ deg}$$

$$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$$

$$w_2 := g_b + 2 \cdot s_2 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 161.244 \text{ mm}$$

$$w_{n2} := \min(w, w_2) = 161.244 \text{ mm}$$

$$R_{n2} := F_{uT} \cdot [w_{n2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot l_{stem}$$

$$M_{Oj} := \text{"Fractura Area Neta"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apantalamiento

$$R_{n3} := \left(\frac{2 \cdot a' - d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_y \cdot (t_f)^2$$

$$R_{n3} := \frac{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}{4}$$

$$M_{Oj} := \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$Rn4 := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_b + \frac{w \cdot F_{YT} \cdot (t_f)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

$Rn4 = 55.279 \cdot \text{tonf}$

$M04 := \text{"Tension Pernos"}$

5.- Bloque de Corte

Áreas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot [S_3 + S_4 - 3.5 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := [a - (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$Rn5a := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt} = 22.315 \cdot \text{tonf}$$

$$Rn5b := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt} = 25.217 \cdot \text{tonf}$$

$$Rn5 := \min(Rn5a, Rn5b)$$

$Rn5 = 22.315 \cdot \text{tonf}$

$M05 := \text{"Bloque de Corte"}$

6.- Aplastamiento

$$Rn6a := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$Rn6b := 2.4 \cdot d_{br} \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$Rn6 := 2 \cdot n \cdot \min(Rn6a, Rn6b)$$

$Rn6 = 45.552 \cdot \text{tonf}$

$M06 := \text{"Aplastamiento"}$

7.- Deslizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \cdot \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$Rn7 := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

$Rn7 = 17.212 \cdot \text{tonf}$

$M07 := \text{"Deslizamiento Crítico"}$

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \text{ MPa} \quad F_{uw} := 529 \text{ MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f := 12 \text{ mm} \quad t_{stem} = 4 \text{ mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 4 \text{ mm}$$

$$L_w := 2w = 400 \text{ mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot w = 400 \text{ mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6 \text{ mm} \\ (5 \text{ mm}) & \text{if } 6 \text{ mm} < t_{min} \leq 13 \text{ mm} \\ (6 \text{ mm}) & \text{if } 13 \text{ mm} < t_{min} \leq 19 \text{ mm} \\ (8 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} > 19 \text{ mm} \end{cases} \quad g_w = 3 \text{ mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 1.2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 1.6 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 \cdot A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 \cdot A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 38.839 \cdot \text{tonf} \quad R_{n8b} = 44.835 \cdot \text{tonf}$$

$$Rn8 := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

$Rn8 = 38.839 \cdot \text{tonf}$

$M08 := \text{"Soldadura"}$

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(\text{RN}_i, \text{sort}(\text{RN}))_{0,0}$

$\text{MF}_{(O_i)} := \text{Mo}_i$ $\text{RN} := \text{sort}(\text{RN})$

MF =		· tonnef
"Roula Plástica"		14.868
"Deslizamiento Crítico"		17.212
"Bloque de Corte"		22.315
"Fractura Area Neta"		24.191
"Fluencia Area Bruta"		25.568
"Soldadura"		38.839
"Aplastamiento"		45.532
"Corte de los Pernos"		52.561
"Tension Pernos"		55.229

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

TSM-3

Capacidad de Carga 50 tonf

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa} \quad \text{tonf} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_u := 313.42 \text{ MPa} \quad F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A325

$$F_{uexp} := 847.7 \text{ MPa} \quad F_{ub} := F_{uexp} \quad F_{obj} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

Dimensiones:

Independientes

$$\begin{aligned} t_{stem} &:= 4 \text{ mm} & w &:= 200 \text{ mm} & n &:= 4 & s_1 &:= 56 \text{ mm} & F_{ult} &:= F_u \\ t_f &:= 12 \text{ mm} & h &:= 150 \text{ mm} & r &:= 3 \text{ mm} & s_2 &:= 38 \text{ mm} & F_{yT} &:= F_y \\ d_{bt} &:= 1.27 \text{ cm} & q &:= 40 \text{ mm} & b_1 &:= 62 \text{ mm} & s_4 &:= 30 \text{ mm} \\ d_{ht} &:= 1.43 \text{ cm} & a &:= 40 \text{ mm} & b_2 &:= 76 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dependientes

$$\begin{aligned} a' &:= a + \frac{d_{bt}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a & A_b &:= \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4} & s_3 &:= (n - 1) \cdot s_2 \\ b &:= \frac{h}{2} - a' - \frac{r - t_{stem}}{2} & q_t &:= 70 \text{ mm} & A_b &:= 1.267 \cdot \text{cm}^2 & N_{fb} &:= 2 \cdot n \\ b' &:= \frac{h}{2} - a - \frac{r - t_{stem}}{2} & q_t' &:= h - 2 \cdot a' & g_0 &:= q \\ i &:= 0..8 & j &:= 0..8 & A_{beff} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}^2}{13} \right)^2 \\ Rn_1 &:= 0 & M_0_1 &:= 0 \end{aligned}$$

Modos de Falla:

0- Fluencia área bruta:

$$Rn_0 := w \cdot t_{stem} \cdot F_y$$

$$M_0_0 := 25.568 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1- Corte de los pernos:

$$Rn_1 := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{yob}$$

$$M_0_1 := 52.561 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Corte de los Pernos"}$$

2- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) < 15 \text{ in} \end{cases}$$

$$\left[60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \right] \text{ deg if } 15 \text{ in} \leq 60 \cdot (t_{stem}) \leq 30 \text{ in}$$

$$\theta_{eff} = 15 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$$

$$w_2 := g_0 + 2 \cdot s_2 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 171.636 \text{ mm}$$

$$w_{n2} := \min(w, w_2) = 171.636 \text{ mm}$$

$$Rn_2 := F_{uT} \cdot [w_{n2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$M_0_2 := 26.132 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fractura Area Neta"}$$

3- Rótula plástica del ala por apantamiento

$$Rn_3 := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_{yT} \cdot (t_f)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$$

$$M_0_3 := 14.868 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{N4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_b + \frac{w \cdot F_{YT} \cdot (t_f)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

R_{N4} = 55.229-tonf

M_{O4} := "Tension Pernos"

5.- Bloque de Corte

Áreas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot [S_3 + S_4 - 3.5 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{in})] \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := [q - (d_{bt} + 0.125 \text{in})] \cdot t_{stem}$$

$$R_{N5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt} = 24.332 \text{-tonf}$$

$$R_{N5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt} = 26.598 \text{-tonf}$$

$$R_{N5} := \min(R_{N5a}, R_{N5b})$$

R_{N5} = 24.332-tonf

M_{O5} := "Bloque de Corte"

6.- Aplastamiento

$$R_{N6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{N6b} := 2.4 \cdot d_{br} \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{N6} := 2 \cdot \min(R_{N6a}, R_{N6b})$$

R_{N6} = 45.552-tonf

M_{O6} := "Aplastamiento"

7.- Deslizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{N7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

R_{N7} = 17.212-tonf

M_{O7} := "Deslizamiento Crítico"

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \text{MPa} \quad F_{uw} := 529 \text{MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_u T$$

$$t_f = 12 \text{-mm} \quad t_{stem} = 4 \text{-mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 4 \text{-mm}$$

$$L_w := 2w = 400 \text{-mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot w = 400 \text{-mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3 \text{mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6 \text{mm} \\ (5 \text{mm}) & \text{if } 6 \text{mm} < t_{min} \leq 13 \text{mm} \\ (6 \text{mm}) & \text{if } 13 \text{mm} < t_{min} \leq 19 \text{mm} \\ (8 \text{mm}) & \text{if } t_{min} > 19 \text{mm} \end{cases} \quad g_w = 3 \text{-mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 1.2 \times 10^3 \text{-mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 1.6 \times 10^3 \text{-mm}^2$$

$$R_{N8a} := 0.6 A_w \cdot F_{uw} \quad R_{N8b} := 0.6 A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{N8a} = 38.839 \text{-tonf} \quad R_{N8b} = 44.835 \text{-tonf}$$

$$R_{N8} := \min(R_{N8a}, R_{N8b})$$

R_{N8} = 38.839-tonf

M_{O8} := "Soldadura"

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(Rn_i, \text{sort}(Rn))_{0,0}$

$MF(O_i) := Mo_i \quad RN := \text{sort}(Rn)$

MF =		tonf
"Rotula Plástica"		14.868
"Deslizamiento Crítico"		17.212
"Bloque de Corte"		24.332
"Fluencia Area Bruta"		25.568
"Fractura Area Neta"		26.132
"Soldadura"		38.839
"Aplastamiento"		45.552
"Corte de los Pernos"		52.561
"Tension Pernos"		55.229

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

TSM-4

Capacidad de Carga 50 tonf

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa}$$

$$\frac{\text{tonf}}{3000000} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_y := 313.42 \text{ MPa}$$

$$F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A325

$$F_{uexp} := 847.7 \text{ MPa}$$

$$F_{yub} := F_{uexp}$$

$$F_{yob} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

Dimensiones:

Independientes

$$t_{stem} := 4 \text{ mm}$$

$$w := 200 \text{ mm}$$

$$n := 4$$

$$s_1 := 59 \text{ mm}$$

$$F_{ut} := F_u$$

$$t_f := 12 \text{ mm}$$

$$h := 150 \text{ mm}$$

$$r := 3 \text{ mm}$$

$$s_2 := 35 \text{ mm}$$

$$F_{yt} := F_y$$

$$d_{bt} := 1.27 \text{ cm}$$

$$q := 45 \text{ mm}$$

$$b_1 := 62 \text{ mm}$$

$$s_4 := 36 \text{ mm}$$

$$d_{ht} := 1.43 \text{ cm}$$

$$a := 37.5 \text{ mm}$$

$$b_2 := 76 \text{ mm}$$

Dependientes

$$a' := a + \frac{d_{bt}}{2}$$

$$q_t := h - 2 \cdot a$$

$$A_b := \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4}$$

$$b := \frac{h}{2} - a' - \frac{r}{2}$$

$$q_t' := h - 2 \cdot a'$$

$$A_{beff} := \frac{\pi}{4} \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2$$

$$b' := \frac{h}{2} - a - \frac{r}{2}$$

$$i := 0..8$$

$$s_3 := (n - 1) \cdot s_2$$

$$j := 0..8$$

$$N_{bt} := 2 \cdot n$$

$$R_{n1} := 0$$

$$g_o := q$$

$$M_{o1} := 0$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$R_{t0} := w \cdot t_{stem} \cdot F_y$$

$$M_{o0} := 25.568 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{o0} := \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$R_{n1} := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{yob}$$

$$M_{o1} := 52.561 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{o1} := \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) > 30 \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) < 15 \end{cases}$$

$$\left[60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \right] \text{ deg if } 15 \leq 60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \leq 30$$

$$\theta_{eff} = 15 \text{ deg}$$

$$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$$

$$w_2 := g_o + 2.88 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 166.244 \text{ mm}$$

$$w_{n2} := \min(w, w_2) = 166.244 \text{ mm}$$

$$R_{n2} := F_{ut} \left[w_{n2} - 2 \cdot \left(d_{bt} + 0.125 \text{ in} \right) \right] \cdot t_{stem}$$

$$M_{o2} := 25.125 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{o2} := \text{"Fractura Area Neta"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$$R_{n3} := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_{yt} \cdot (t_f)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$$

$$M_{o3} := 14.679 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{o3} := \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{n4} := 2 \cdot n \cdot \left[(F_{ub}) \cdot A_b + \frac{w \cdot F_{YT} \cdot (t_r)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

$R_{n4} = 53.87 \cdot \text{tonf}$

$M_{04} := \text{"Tension Pernos"}$

5.- Bloque de Corte

Áreas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot [S_3 + S_4 - 3.5 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := [q - (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$R_{n5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt} = 24.594 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt} = 27.071 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n5} := \min(R_{n5a}, R_{n5b})$$

$R_{n5} = 24.594 \cdot \text{tonf}$

$M_{05} := \text{"Bloque de Corte"}$

6.- Aplastamiento

$$R_{n6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6b} := 2.4 \cdot d_{br} \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6} := 2 \cdot n \cdot \min(R_{n6a}, R_{n6b})$$

$R_{n6} = 45.552 \cdot \text{tonf}$

$M_{06} := \text{"Aplastamiento"}$

7.- Deslizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \cdot \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{n7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

$R_{n7} = 17.212 \cdot \text{tonf}$

$M_{07} := \text{"Deslizamiento Crítico"}$

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \text{ MPa} \quad F_{uw} := 529 \text{ MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f = 12 \text{ mm} \quad t_{stem} = 4 \text{ mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 4 \text{ mm}$$

$$L_w := 2w = 400 \text{ mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot w = 400 \text{ mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6 \text{ mm} \\ (5 \text{ mm}) & \text{if } 6 \text{ mm} < t_{min} \leq 13 \text{ mm} \\ (6 \text{ mm}) & \text{if } 13 \text{ mm} < t_{min} \leq 19 \text{ mm} \\ (8 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} > 19 \text{ mm} \end{cases} \quad g_w = 3 \text{ mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 1.2 \times 10^3 \text{ mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 1.6 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 38.839 \cdot \text{tonf} \quad R_{n8b} = 44.835 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n8} := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

$R_{n8} = 38.839 \cdot \text{tonf}$

$M_{08} := \text{"Soldadura"}$

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(RN_i, \text{sort}(RN))_{0,0}$

$MF_{(O_i)} := M_{O_i}$ $RN := \text{sort}(RN)$

$MF =$	"Rótula Plástica"	14,679	-tonnef
	"Deslizamiento Crítico"	17,212	
	"Bloque de Corte"	24,594	
	"Fractura Area Neta"	25,125	
	"Fluencia Area Bruta"	25,568	
	"Soldadura"	38,839	
	"Aplastamiento"	45,552	
	"Corte de los Pernos"	52,561	
	"Tension Pernos"	53,87	

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

TSM-5

Capacidad de Carga 50 tonf

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa}$$

$$G_{\text{concreto}} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_y := 313.42 \text{ MPa}$$

$$F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A325

$$F_{uexp} := 847.7 \text{ MPa}$$

$$F_{ub} := F_{uexp}$$

$$F_{yob} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

Dimensiones :

Independientes

$$t_{stem} := 4 \text{ mm}$$

$$w := 200 \text{ mm}$$

$$s_1 := 59 \text{ mm}$$

$$F_{ut} := F_u$$

$$t_f := 12 \text{ mm}$$

$$h := 150 \text{ mm}$$

$$r := 3 \text{ mm}$$

$$s_2 := 35 \text{ mm}$$

$$F_{yt} := F_y$$

$$d_{bt} := 1.27 \text{ cm}$$

$$q := 45 \text{ mm}$$

$$b_1 := 62 \text{ mm}$$

$$s_4 := 36 \text{ mm}$$

$$d_{bt} := 1.43 \text{ cm}$$

$$a := 37.5 \text{ mm}$$

$$b_2 := 76 \text{ mm}$$

Dependientes

$$a' := a + \frac{d_{bt}}{2}$$

$$q_t := h - 2 \cdot a$$

$$A_b := \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4}$$

$$b := \frac{h}{2} - a' - \frac{r}{2}$$

$$q_t := h - 2 \cdot a'$$

$$A_{beff} := \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2$$

$$b' := \frac{h}{2} - a - \frac{r}{2}$$

$$s_3 := (n - 1) \cdot s_2$$

$$N_{fb} := 2 \cdot n$$

$$i := 0..8$$

$$j := 0..8$$

$$M_{oy} := 0$$

$$Rn_1 := 0$$

$$G_0 := q$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$Rn_0 := w \cdot t_{stem} \cdot F_y$$

$$M_{Oy} := \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$Rn_1 := 2 \cdot n \cdot A_{beff} \cdot F_{yob}$$

$$M_{O1} := \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) < 15 \text{ in} \end{cases}$$

$$\left[60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \right] \text{ deg if } 15 \text{ in} \leq 60 \cdot (t_{stem}) \leq 30 \text{ in}$$

$$\theta_{eff} = 15 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$$

$$w_2 := G_0 + 2 \cdot s_3 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 166.244 \text{ mm}$$

$$w_{n2} := \min(w, w_2) = 166.244 \text{ mm}$$

$$Rn_2 := F_{ut} \cdot [w_{n2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$M_{O2} := \text{"Fractura Area Neta"}$$

$$Rn_3 := 25.125 \cdot (n \cdot t_{stem})$$

$$M_{O3} := \text{"Rótula Plástica"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$$Rn_3 := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_{yt} \cdot (t_f)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$$

$$M_{O3} := \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{n4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_{beff} + \frac{w \cdot F_y \cdot t^2 (t)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

R_{n4} = 40.529-tonf

M₀₄ := "Tension Pernos"

5.- Bloque de Corte

Areas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot (S_3 + S_4 - 3.5 \cdot db_f) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := (q - db_f) \cdot t_{stem}$$

$$R_{n5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt}$$

$$R_{n5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt}$$

$$R_{n5} := \min(R_{n5a}, R_{n5b})$$

R_{n5} = 27.665-tonf

M₀₅ := "Bloque de Corte"

6.- Aplastamiento

$$R_{n6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6b} := 2.4 \cdot db_f \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6} := 2 \cdot n \cdot \min(R_{n6a}, R_{n6b})$$

R_{n6} = 45.552-tonf

M₀₆ := "Aplastamiento"

7.- Delizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \text{ tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{n7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

R_{n7} = 17.212-tonf

M₀₇ := "Deslizamiento Crítico"

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \text{ MPa} \quad F_{uw} := 529 \text{ MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_u T$$

$$t_f = 12 \text{ mm} \quad t_{stem} = 4 \text{ mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 4 \text{ mm}$$

$$L_w = 2w = 400 \text{ mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot w = 400 \text{ mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6 \text{ mm} \\ (5 \text{ mm}) & \text{if } 6 \text{ mm} < t_{min} \leq 13 \text{ mm} \\ (6 \text{ mm}) & \text{if } 13 \text{ mm} < t_{min} \leq 19 \text{ mm} \\ (8 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} > 19 \text{ mm} \end{cases} \quad g_w = 3 \text{ mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 1.2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 1.6 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 38.839 \text{ tonf} \quad R_{n8b} = 44.835 \text{ tonf}$$

$$R_{n8} := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

R_{n8} = 38.839-tonf

M₀₈ := "Soldadura"

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(\text{RN}_i, \text{sort}(\text{RN}))_{0,0}$

$\text{MF}_{(O_i)} := \text{Mo}_i$ $\text{RN} := \text{sort}(\text{RN})$

$\text{MF} =$	"Rotula Plástica"	14.679
	"Deslizamiento Crítico"	17.212
	"Fractura Area Neta"	25.125
	"Fluencia Area Bruta"	25.568
	"Bloque de Corte"	27.665
	"Corte de los Pernos"	37.985
	"Soldadura"	38.839
	"Tensión Pernos"	40.529
	"Aplastamiento"	45.532

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

TSM6

Capacidad de Carga 50 tonf

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa}$$

$$\text{tonf}_{\text{conv}} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_y := 313.42 \text{ MPa} \quad F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A490

$$F_{uexp} := 1040 \text{ MPa}$$

$$F_{ub} := F_{uexp} \quad F_{ob} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

Dimensiones:

Independientes

$$\begin{aligned} l_{stem} &:= 8 \text{ mm} & w &:= 200 \text{ mm} & n &:= 4 & s_1 &:= 59 \text{ mm} & F_{ut} &:= F_u \\ t_f &:= 10 \text{ mm} & h &:= 150 \text{ mm} & r &:= 3 \text{ mm} & s_2 &:= 35 \text{ mm} & F_{yt} &:= F_y \\ d_{bt} &:= 1.27 \text{ cm} & q &:= 45 \text{ mm} & b_1 &:= 62 \text{ mm} & s_4 &:= 36 \text{ mm} \\ d_{ht} &:= 1.43 \text{ cm} & a &:= 30 \text{ mm} & b_2 &:= 76 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dependientes

$$\begin{aligned} a' &:= a + \frac{d_{bt}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a & A_b &:= \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4} & s_3 &:= (n - 1) \cdot s_2 \\ b &:= \frac{h}{2} - a' - \frac{r - l_{stem}}{2} & q_t &:= 90 \text{ mm} & A_b &:= 1.267 \cdot \text{cm}^2 & N_{fb} &:= 2 \cdot n \\ b' &:= \frac{h}{2} - a - \frac{r - l_{stem}}{2} & q'_t &:= h - 2 \cdot a' & & & g_0 &:= q \\ i &:= 0..8 & j &:= 0..8 & q'_t &:= 77.3 \text{ mm} & A_{beff} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2 \\ Rn_1 &:= 0 & Mo_1 &:= 0 \end{aligned}$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$Rn_0 := w \cdot l_{stem} \cdot F_y$$

$$Mo_0 := 51.136 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$Rn_1 := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{yob}$$

$$Mo_1 := 64.484 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (l_{stem}) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (l_{stem}) < 15 \text{ in} \end{cases}$$

$$w_2 := \min \left(w, w_2 \right) = 166.244 \text{ mm}$$

$$Rn_2 := F_{ut} \cdot [w_2 - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot l_{stem}$$

$$Mo_2 := 50.75 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fractura Area Neta"}$$

$$w_2 := g_0 + 2 \cdot s_3 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 166.244 \text{ mm}$$

$$w_{n2} := \min(w, w_2) = 166.244 \text{ mm}$$

$$Rn_2 := F_{ut} \cdot [w_{n2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot l_{stem}$$

$$Mo_2 := 50.75 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fractura Area Neta"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$$Rn_3 := \left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_{yt} \cdot \left(\frac{t_f}{4} \right)^2$$

$$Mo_3 := 7.608 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{t4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_{beff} + \frac{w \cdot F_y \Gamma \cdot (t_f)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

$R_{t4} = 37.482 \cdot \text{tonf}$

$M_{04} := \text{"Tension Pernos"}$

5.- Bloque de Corte

Areas de Interés:

$$A_{gv} := 2(S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2[S_3 + S_4 - 3.5(d_{ht} + 0.125in)] \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := [q - (d_{ht} + 0.125in)] \cdot t_{stem}$$

$$R_{t5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt} = 49.188 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt} = 54.143 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t5} := \min(R_{t5a}, R_{t5b})$$

$R_{t5} = 49.188 \cdot \text{tonf}$

$M_{05} := \text{"Bloque de Corte"}$

6.- Aplastamiento

$$R_{t6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6b} := 2.4 \cdot d_{gr} \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6} := 2 \cdot \min(R_{t6a}, R_{t6b})$$

$R_{t6} = 91.104 \cdot \text{tonf}$

$M_{06} := \text{"Aplastamiento"}$

7.- Deslizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \cdot \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{t7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

$R_{t7} = 17.212 \cdot \text{tonf}$

$M_{07} := \text{"Deslizamiento Crítico"}$

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \cdot \text{MPa} \quad F_{uw} := 529 \cdot \text{MPa}$$

Material Base:

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f := 10 \cdot \text{mm} \quad t_{stem} = 8 \cdot \text{mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 8 \cdot \text{mm}$$

$$L_w := 2W = 400 \cdot \text{mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot W = 400 \cdot \text{mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3\text{mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6\text{mm} \\ (5\text{mm}) & \text{if } 6\text{mm} < t_{min} \leq 13\text{mm} \\ (6\text{mm}) & \text{if } 13\text{mm} < t_{min} \leq 19\text{mm} \\ (8\text{mm}) & \text{if } t_{min} > 19\text{mm} \end{cases} \quad g_w = 5 \cdot \text{mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 3.2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$R_{t8a} := 0.6 \cdot A_w \cdot F_{uw} \quad R_{t8b} := 0.6 \cdot A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{t8a} = 64.732 \cdot \text{tonf} \quad R_{t8b} = 89.67 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t8} := \min(R_{t8a}, R_{t8b})$$

$R_{t8} = 64.732 \cdot \text{tonf}$

$M_{08} := \text{"Soldadura"}$

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(RN_i, \text{sort}(RN))_{0,0}$

$MF_{(O_i)} := Mo_i \quad RN := \text{sort}(RN)$

MF =		
"Rotula Plástica"	7.608	-tonnef
"Deslizamiento Crítico"	17.212	
"Tension Pernos"	37.482	
"Bloque de Corte"	49.188	
"Fractura Area Neta"	50.25	
"Fluencia Area Bruta"	51.136	
"Corte de los Pernos"	64.484	
"Soldadura"	64.732	
"Aplastamiento"	91.104	

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

Capacidad de Carga 50 tonf

TSM-7

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa} \quad \text{tonf} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_y := 313.42 \text{ MPa} \quad F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A490

$$F_{y,b} := 896.318 \text{ MPa} \quad F_{u,b} := 1040 \text{ MPa}$$

$$F_{y,b} := F_{u,exp} \quad F_{y,b} := 0.6 \cdot F_{u,exp}$$

Dimensiones :

Independientes

$$\begin{aligned} l_{stem} &:= 8 \text{ mm} & w &:= 200 \text{ mm} & n &:= 4 & s_1 &:= 59 \text{ mm} & F_{uT} &:= F_u \\ l_f &:= 10 \text{ mm} & h &:= 150 \text{ mm} & r &:= 3 \text{ mm} & s_2 &:= 35 \text{ mm} & F_{yT} &:= F_y \\ d_{bt} &:= 1.27 \text{ cm} & q &:= 45 \text{ mm} & b_1 &:= 62 \text{ mm} & s_4 &:= 36 \text{ mm} & & \\ d_{bt} &:= 1.43 \text{ cm} & a &:= 40 \text{ mm} & b_2 &:= 76 \text{ mm} & & & & \end{aligned}$$

Dependientes

$$\begin{aligned} a' &:= a + \frac{d_{bt}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a & A_b &:= \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4} & s_3 &:= (n - 1) \cdot s_2 \\ b &:= \frac{h}{2} - a' - \frac{r - l_{stem}}{2} & q_t &:= 70 \cdot \text{mm} & A_b &:= 1.267 \cdot \text{cm}^2 & N_b &:= 2 \cdot n \\ b' &:= \frac{h}{2} - a - \frac{r - l_{stem}}{2} & q_t' &:= h - 2 \cdot a' & & & g_o &:= q \\ i &:= 0.8 & j &:= 0.8 & A_{beff} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2 \\ R_{ty} &:= 0 & M_{Oy} &:= 0 & & & & \end{aligned}$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$R_{t0} := w \cdot l_{stem} \cdot F_y$$

$$M_{Oy} := \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$R_{n1} := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{y,b}$$

$$M_{Oy} := \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) < 15 \text{ in} \end{cases}$$

$$\left[60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \right] \text{ deg if } 15 \text{ in} \leq 60 \cdot \left(\frac{l_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \leq 30 \text{ in}$$

$$\theta_{eff} = 18.898 \text{ deg}$$

$$w_2 := g_o + 2s_2 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 116.889 \text{ mm}$$

$$w_{n2} := \min(w, w_2) = 116.889 \text{ mm}$$

$$R_{t2} := F_{uT} \cdot [w_{n2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot l_{stem} = 31.81 \cdot \text{tonf}$$

$$M_{Oy} := \text{"Fractura Area Neta"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$$R_{t3} := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_y \cdot \left(\frac{t_f}{4} \right)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$$

$$M_{Oy} := \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{t4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_{beff} + \frac{w \cdot F_y \Gamma \cdot (t_f)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

$R_{t4} := 46.745 \cdot \text{tonf}$

$M_{04} := \text{"Tension Pernos"}$

5.- Bloque de Corte

Areas de Interés:

$$A_{gv} := 2(S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2[S_3 + S_4 - 3.5(d_{ht} + 0.125in)] \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := [q - (d_{ht} + 0.125in)] \cdot t_{stem}$$

$$R_{t5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt} = 49.188 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt} = 54.143 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t5} := \min(R_{t5a}, R_{t5b})$$

$R_{t5} := 49.188 \cdot \text{tonf}$

$M_{05} := \text{"Bloque de Corte"}$

6.- Aplastamiento

$$R_{t6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6b} := 2.4 \cdot d_{gr} \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6} := 2 \cdot \min(R_{t6a}, R_{t6b})$$

$R_{t6} := 91.104 \cdot \text{tonf}$

$M_{06} := \text{"Aplastamiento"}$

7.- Deslizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \cdot \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{t7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

$R_{t7} := 17.212 \cdot \text{tonf}$

$M_{07} := \text{"Deslizamiento Crítico"}$

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \cdot \text{MPa} \quad F_{uw} := 529 \cdot \text{MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f := 10 \cdot \text{mm} \quad t_{stem} = 8 \cdot \text{mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 8 \cdot \text{mm}$$

$$L_w := 2W = 400 \cdot \text{mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot W = 400 \cdot \text{mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3\text{mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6\text{mm} \\ (5\text{mm}) & \text{if } 6\text{mm} < t_{min} \leq 13\text{mm} \\ (6\text{mm}) & \text{if } 13\text{mm} < t_{min} \leq 19\text{mm} \\ (8\text{mm}) & \text{if } t_{min} > 19\text{mm} \end{cases} \quad g_w = 5 \cdot \text{mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 3.2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 \cdot A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 \cdot A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 64.732 \cdot \text{tonf} \quad R_{n8b} = 89.67 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t8} := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

$R_{t8} = 64.732 \cdot \text{tonf}$

$M_{08} := \text{"Soldadura"}$

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(Rn_i, \text{sort}(Rn))_0, 0$

$MF_{(O_i)} := Mo_i \quad RN := \text{sort}(Rn)$

MF =		9.719	·tonf
"Rotura Plástica"		17.212	
"Deslizamiento Crítico"		31.81	
"Fractura Área Neta"		46.745	
"Tensión Pernos"		49.188	
"Bloque de Corte"		51.136	
"Fluencia Área Bruta"		64.484	
"Corte de los Pernos"		64.732	
"Soldadura"		91.104	
"Aplastamiento"			

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

TSM-8

Capacidad de Carga 50 tonf

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa} \quad \text{tonf} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_u := 313.42 \text{ MPa} \quad F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A325

$$F_{y,p} := 749.9 \text{ MPa} \quad F_{uexp} := 847.7 \text{ MPa} \quad F_{ub} := F_{uexp} \quad F_{ob} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

Dimensiones:

Independientes

$$\begin{aligned} t_{stem} &:= 6 \text{ mm} & w &:= 200 \text{ mm} & n &:= 4 & s_1 &:= 59 \text{ mm} & F_{uT} &:= F_u \\ t_f &:= 12 \text{ mm} & h &:= 150 \text{ mm} & r &:= 3 \text{ mm} & s_2 &:= 35 \text{ mm} & F_{yT} &:= F_y \\ d_{bt} &:= 1.27 \text{ cm} & q &:= 45 \text{ mm} & b_1 &:= 62 \text{ mm} & s_4 &:= 36 \text{ mm} & & \\ d_{bt} &:= 1.43 \text{ cm} & a &:= 37.5 \text{ mm} & b_2 &:= 76 \text{ mm} & & & & \end{aligned}$$

Dependientes

$$\begin{aligned} a' &:= a + \frac{d_{bt}}{2} & q_t &:= h - 2 \cdot a & A_b &:= \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4} & s_3 &:= (n-1) \cdot s_2 \\ b &:= \frac{h}{2} - a' - \frac{r - t_{stem}}{2} & q_t &:= 75 \text{ mm} & A_b &:= 1.267 \cdot \text{cm}^2 & N_{fb} &:= 2 \cdot n \\ b' &:= \frac{h}{2} - a - \frac{r - t_{stem}}{2} & q'_t &:= h - 2 \cdot a' & & & g_0 &:= q \\ i &:= 0..8 & q'_t &:= 62.3 \text{ mm} & A_{beff} &:= \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2 & & \\ Rn_1 &:= 0 & j &:= 0..8 & & & & \\ M_o_1 &:= 0 & & & & & & \end{aligned}$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$Rn_0 := w \cdot t_{stem} \cdot F_y$$

$$M_o_0 := 38.352 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$Rn_1 := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{y,p}$$

$$M_o_1 := 52.561 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) < 15 \text{ in} \\ \left[60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \right] \text{ deg} & \text{if } 15 \text{ in} \leq 60 \cdot (t_{stem}) \leq 30 \text{ in} \end{cases}$$

$$\theta_{eff} = 15 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$$

$$w_2 := g_0 + 2 \cdot s_2 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 166.244 \text{ mm}$$

$$w_{n,2} := \min(w, w_2) = 166.244 \text{ mm}$$

$$Rn_2 := F_{uT} \cdot [w_{n,2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$M_o_2 := 37.688 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fractura Area Neta"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$$Rn_3 := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_{yT} \cdot (t_f)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$$

$$M_o_3 := 13.441 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{t4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_b + \frac{w \cdot F_y \Gamma^2 (t_r)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

$R_{t4} := 51.919 \cdot \text{tonf}$

$M_{O4} := \text{"Tension Pernos"}$

5.- Bloque de Corte

Areas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot (S_3 + S_4 - 3.5 \cdot db_f) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := (q - db_f) \cdot t_{stem}$$

$$R_{n5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt}$$

$$R_{n5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt}$$

$$R_{t5} := \min(R_{n5a}, R_{n5b})$$

$R_{t5} = 41.497 \cdot \text{tonf}$

$M_{O5} := \text{"Bloque de Corte"}$

6.- Aplastamiento

$$R_{n6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6b} := 2.4 \cdot db_f \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6} := 2 \cdot n \cdot \min(R_{n6a}, R_{n6b})$$

$R_{t6} = 68.328 \cdot \text{tonf}$

$M_{O6} := \text{"Aplastamiento"}$

7.- Delizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \cdot \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{t7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

$R_{t7} = 17.212 \cdot \text{tonf}$

$M_{O7} := \text{"Deslizamiento Crítico"}$

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Double - J - groove weld
 Tipo Electrodo: ER-60S-6

$$F_{yw} := 330 \text{MPa} \quad F_{uw} := 413 \text{MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f := 12 \text{mm} \quad t_{stem} = 6 \text{mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 6 \text{mm}$$

$$L_w := 2w = 400 \text{mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot w = 400 \text{mm}$$

$$S_1 := 3 \text{mm}$$

$$S_2 := S_1$$

$$g_w := S_1 + S_2$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 2.4 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 2.4 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 60.645 \cdot \text{tonf} \quad R_{n8b} = 67.252 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t8} := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

$R_{t8} = 60.645 \cdot \text{tonf}$

$M_{O8} := \text{"Soldadura"}$

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(Rn_i, \text{sort}(Rn))_{0, 0}$

$MF_{(O_i)} := Mo_i \quad RN := \text{sort}(Rn)$

MF =	
"Rotura Plástica"	13.441
"Deslizamiento Crítico"	17.212
"Fractura Area Neta"	37.688
"Fluencia Area Bruta"	38.352
"Bloque de Corte"	41.497
"Tensión Pernos"	51.919
"Corte de los Pernos"	52.561
"Soldadura"	60.645
"Aplastamiento"	68.328

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

Capacidad de Carga 50 tonf **TSM-9**

Materiales

Módulo de Young:

$$E := 189.67 \text{ GPa} \quad \text{tonf} := 1000 \text{ kgf}$$

Perfil T - Acero A36

$$F_u := 313.42 \text{ MPa} \quad F_u := 458 \text{ MPa}$$

Perno 1/2" - Acero A325

$$F_{y,p} := 749.9 \text{ MPa} \quad F_{u,p} := 847.7 \text{ MPa}$$

$$F_{ub} := F_{uexp} \quad F_{yb} := 0.6 \cdot F_{uexp}$$

Dimensiones:

Independientes

$$t_{stem} := 5 \text{ mm} \quad w := 200 \text{ mm} \quad n := 4 \quad s_1 := 59 \text{ mm} \quad F_{uT} := F_u$$

$$t_f := 12 \text{ mm} \quad h := 150 \text{ mm} \quad r := 3 \text{ mm} \quad s_2 := 35 \text{ mm} \quad F_{yT} := F_y$$

$$d_{bt} := 1.27 \text{ cm} \quad q := 45 \text{ mm} \quad b_1 := 62 \text{ mm}$$

$$d_{ht} := 1.43 \text{ cm} \quad a := 37.5 \text{ mm} \quad b_2 := 76 \text{ mm}$$

Dependientes

$$a' := a + \frac{d_{bt}}{2} \quad q_t := h - 2 \cdot a \quad A_b := \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4} \quad s_3 := (n - 1) \cdot s_2$$

$$b := \frac{h}{2} - a' - \frac{r - t_{stem}}{2} \quad q_t := 75 \text{ mm} \quad A_b := 1.267 \cdot \text{cm}^2 \quad N_{tb} := 2 \cdot n$$

$$b' := \frac{h}{2} - a - \frac{r - t_{stem}}{2} \quad q'_t := h - 2 \cdot a' \quad g_0 := q$$

$$i := 0..8 \quad j := 0..8 \quad A_{beff} := \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2$$

$$Rn_1 := 0 \quad Mo_1 := 0$$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$$Rn_0 := w \cdot t_{stem} \cdot F_y$$

$$Mo_0 := 31.96 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fluencia Area Bruta"}$$

1.- Corte de los pernos:

$$Rn_1 := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{y,p}$$

$$Mo_1 := 52.561 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Corte de los Pernos"}$$

2.- Fractura área neta:

$$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) < 15 \text{ in} \end{cases}$$

$$w_2 := \left[60 \cdot \left(\frac{t_{stem}}{1 \text{ in}} \right) \right] \text{ deg} \quad \text{if } 15 \text{ in} \leq 60 \cdot (t_{stem}) \leq 30 \text{ in}$$

$$\theta_{eff} = 15 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$$

$$w_2 := g_0 + 2.85 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 166.244 \text{ mm}$$

$$w_{n,2} := \min(w, w_2) = 166.244 \text{ mm}$$

$$Rn_2 := F_{uT} \cdot [w_{n,2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$$

$$Mo_2 := 31.406 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Fractura Area Neta"}$$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$$Rn_3 := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_{yT} \cdot (t_f)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$$

$$Mo_3 := 13.632 \cdot \text{tonf} \quad \text{"Rótula Plástica"}$$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{t4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_b + \frac{w \cdot F_y \Gamma (t)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

Rt4 = 52.235 tonf

M04 := "Tension Pernos"

5.- Bloque de Corte

Areas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot (S_3 + S_4 - 3.5 \cdot db_f) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := (q - db_f) \cdot t_{stem}$$

$$R_{n5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt}$$

$$R_{n5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt}$$

$$R_{t5} := \min(R_{n5a}, R_{n5b})$$

Rt5 = 34.581 tonf

M05 := "Bloque de Corte"

6.- Aplastamiento

$$R_{n6a} := 1.2 \cdot S_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6b} := 2.4 \cdot d_p \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6} := 2 \cdot n \cdot \min(R_{n6a}, R_{n6b})$$

Rt6 = 56.94 tonf

M06 := "Aplastamiento"

7.- Delizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \text{ tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{t7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

Rt7 = 17.212 tonf

M07 := "Deslizamiento Crítico"

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-60S-6 (Indura 60 S-6)

$$F_{yw} := 330 \text{ MPa} \quad F_{uw} := 413 \text{ MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f := 12 \text{ mm} \quad t_{stem} = 5 \text{ mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 5 \text{ mm}$$

$$L_w := 2w = 400 \text{ mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot w = 400 \text{ mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6 \text{ mm} \\ (5 \text{ mm}) & \text{if } 6 \text{ mm} < t_{min} \leq 13 \text{ mm} \\ (6 \text{ mm}) & \text{if } 13 \text{ mm} < t_{min} \leq 19 \text{ mm} \\ (8 \text{ mm}) & \text{if } t_{min} > 19 \text{ mm} \end{cases} \quad g_w = 3 \text{ mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 1.2 \times 10^3 \text{ mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 2 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 30.322 \text{ tonf} \quad R_{n8b} = 56.044 \text{ tonf}$$

$$R_{t8} := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

Rt8 = 30.322 tonf

M08 := "Soldadura"

$O_1 := 0$

$O_i := \text{match}(Rn_i, \text{sort}(Rn))_{0,0}$

$MF_{(O_i)} := M_{O_i}$ $RN := \text{sort}(Rn)$

$MF =$		
"Rotura Plástica"	13.632	.tonf
"Deslizamiento Crítico"	17.212	
"Soldadura"	30.322	
"Fractura Area Neta"	31.406	
"Fluencia Area Bruta"	31.96	
"Bloque de Corte"	34.581	
"Tension Pernos"	52.235	
"Corte de los Pernos"	52.561	
"Aplastamiento"	56.94	

Trabajo de Tesis - Segunda Parte
Diseño de Probetas

Capacidad de Carga 50 tonf **TSM10**

Materiales

Módulo de Young:
 $E := 189.67 \text{ GPa}$
 $\frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} := 1000 \text{ kgf}$

Perfil T - Acero A36
 $F_y := 313.42 \text{ MPa}$ $F_u := 458 \text{ MPa}$

Perno 1/2" - Acero A325
 $F_{uexp} := 847.7 \text{ MPa}$ $F_{ub} := 0.6 \cdot F_{uexp}$

Dimensiones:

Independientes

$t_{stem} := 4 \text{ mm}$ $w := 200 \text{ mm}$ $n := 4$ $s_1 := 46 \text{ mm}$ $F_{uf} := F_u$
 $t_f := 12 \text{ mm}$ $h := 150 \text{ mm}$ $r := 3 \text{ mm}$ $s_2 := 38 \text{ mm}$ $F_{yf} := F_y$
 $d_{bt} := 1.27 \text{ cm}$ $q := 40 \text{ mm}$ $b_1 := 62 \text{ mm}$ $s_4 := 40 \text{ mm}$
 $d_{ft} := 1.43 \text{ cm}$ $a := 40 \text{ mm}$ $b_2 := 76 \text{ mm}$

Dependientes

$a' := a + \frac{d_{bt}}{2}$ $q_t := h - 2 \cdot a$ $A_b := \pi \cdot \frac{d_{bt}^2}{4}$ $s_3 := (n - 1) \cdot s_2$
 $b := \frac{h}{2} - a' - \frac{r - t_{stem}}{2}$ $q_t = 70 \text{ mm}$ $A_b = 1.267 \cdot \text{cm}^2$ $N_{tb} := 2 \cdot n$
 $b' := \frac{h}{2} - a - \frac{r - t_{stem}}{2}$ $q'_t := h - 2 \cdot a'$ $g_0 := q$
 $i := 0..8$ $j := 0..8$ $q'_t = 57.3 \text{ mm}$ $A_{beff} := \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_{bt} - \frac{0.9743 \text{ in}}{13} \right)^2$
 $R_{0j} := 0$ $M_{0j} := 0$

Modos de Falla:

0.- Fluencia área bruta:

$R_{f0} := w \cdot t_{stem} \cdot F_y$

$M_{0j} := \text{"Fluencia Area Bruta"}$

1.- Corte de los pernos:

$R_{n1} := 2 \cdot n \cdot A_b \cdot F_{yb}$

$M_{0j} := \text{"Corte de los Pernos"}$

2.- Fractura área neta:

$\theta_{eff} := \begin{cases} 30 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) > 30 \text{ in} \\ 15 \text{ deg} & \text{if } 60 \cdot (t_{stem}) < 15 \text{ in} \\ \left[\frac{t_{stem}}{60} \cdot \frac{1 \text{ in}}{1 \text{ in}} \right] \text{ deg} & \text{if } 15 \text{ in} \leq 60 \cdot (t_{stem}) \leq 30 \text{ in} \end{cases}$

$\theta_{eff} = 15 \text{ deg}$

$\theta_{eff} := 30 \text{ deg}$

$w_2 := g_0 + 2 \cdot s_3 \cdot \tan(\theta_{eff}) = 171.636 \text{ mm}$

$w_{n2} := \min(w, w_2) = 171.636 \text{ mm}$

$R_{n2} := F_{uT} \cdot [w_{n2} - 2 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{ in})] \cdot t_{stem}$

$M_{0j} := \text{"Fractura Area Neta"}$

3.- Rótula plástica del ala por apalancamiento

$R_{n3} := \frac{\left(2 \cdot a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) \cdot w \cdot F_y \cdot (t_f)^2}{4 \cdot a' \cdot b' - d_{bt} \cdot (b' + a')}$

$M_{0j} := \text{"Rótula Plástica"}$

4.- Rotura por tensión de los pernos (considera prying action)

$$R_{t4} := 2 \cdot n \cdot \left[F_{ub} \cdot A_b + \frac{w \cdot F_y \Gamma^2 (t)^2}{16 \cdot a'} \right] \cdot \frac{a'}{a' + b'}$$

$R_{t4} = 55.229 \cdot \text{tonf}$

$M_{t4} := \text{"Tension Pernos"}$

5.- Bloque de Corte

Áreas de Interés:

$$A_{gv} := 2 \cdot (s_3 + s_4) \cdot t_{stem}$$

$$A_{nv} := 2 \cdot \left[s_3 + s_4 - 3.5 \cdot (d_{bt} + 0.125 \text{in}) \right] \cdot t_{stem}$$

$$A_{nt} := \left[q - (d_{bt} + 0.125 \text{in}) \right] \cdot t_{stem}$$

$$R_{n5a} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + F_u \cdot A_{nt} = 26.574 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{n5b} := 0.6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + F_u \cdot A_{nt} = 28.132 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t5} := \min(R_{n5a}, R_{n5b})$$

$R_{t5} = 26.574 \cdot \text{tonf}$

$M_{t5} := \text{"Bloque de Corte"}$

6.- Aplastamiento

$$R_{n6a} := 1.2 \cdot s_4 \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{n6b} := 2.4 \cdot d_{br} \cdot t_{stem} \cdot F_u$$

$$R_{t6} := 2 \cdot n \cdot \min(R_{n6a}, R_{n6b})$$

$R_{t6} = 45.552 \cdot \text{tonf}$

$M_{t6} := \text{"Aplastamiento"}$

7.- Delizamiento Crítico

$$\mu := 0.35$$

$$D_u := 1.13$$

$$h_{sc} := 1$$

$$T_b := 5.44 \cdot \text{tonf}$$

$$N_s := 1$$

$$R_{t7} := 2 \cdot n \cdot \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

$R_{t7} = 17.212 \cdot \text{tonf}$

$M_{t7} := \text{"Deslizamiento Crítico"}$

8.- Soldadura

Tipo Soldadura: Filete

Tipo Electrodo: ER-70S-6 (Indura 70 S-6)

$$F_{yw} := 429 \text{MPa} \quad F_{uw} := 529 \text{MPa}$$

Material Base

$$F_{bm} := F_{uT}$$

$$t_f = 12 \text{mm} \quad t_{stem} = 4 \text{mm} \quad t_{min} := \min(t_f, t_{stem}) = 4 \text{mm}$$

$$L_w := 2w = 400 \text{mm} \quad L_{bm} := 2 \cdot w = 400 \text{mm}$$

$$g_w := \begin{cases} (3 \text{mm}) & \text{if } t_{min} \leq 6 \text{mm} \\ (5 \text{mm}) & \text{if } 6 \text{mm} < t_{min} \leq 13 \text{mm} \\ (6 \text{mm}) & \text{if } 13 \text{mm} < t_{min} \leq 19 \text{mm} \\ (8 \text{mm}) & \text{if } t_{min} > 19 \text{mm} \end{cases} \quad g_w = 3 \text{mm}$$

$$A_w := g_w \cdot L_w = 1.2 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{bm} := t_{min} \cdot L_{bm} = 1.6 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$R_{n8a} := 0.6 \cdot A_w \cdot F_{uw} \quad R_{n8b} := 0.6 \cdot A_{bm} \cdot F_{bm}$$

$$R_{n8a} = 38.839 \cdot \text{tonf} \quad R_{n8b} = 44.835 \cdot \text{tonf}$$

$$R_{t8} := \min(R_{n8a}, R_{n8b})$$

$R_{t8} = 38.839 \cdot \text{tonf}$

$M_{t8} := \text{"Soldadura"}$

$O_i := 0$

$O_i := \text{match}(Rn_i, \text{sort}(Rn))_{0, 0}$

$MF_{(O_i)} := Mo_i \quad RN := \text{sort}(Rn)$

MF =		tonf
"Rotura Plástica"		14.868
"Deslizamiento Crítico"		17.212
"Fluencia Area Bruta"		25.568
"Fractura Area Neta"		26.132
"Bloque de Corte"		26.574
"Soldadura"		38.839
"Aplastamiento"		45.552
"Corte de los Pernos"		52.561
"Tension Pernos"		55.229

Apéndice B

Resultados experimentales serie TSM

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

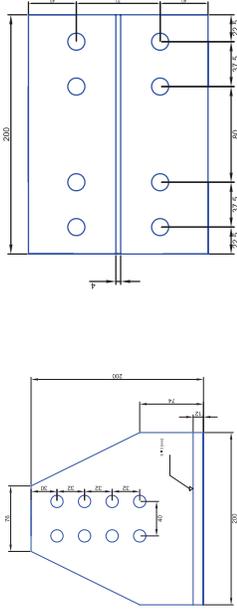


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño [in]	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción			Compresión			Deslizamiento		
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]			
1	6	8.288	-3.881	-4.794	-5.380	-4.794	-3.655	-4.902	-5.229	
2	7.893	-3.869	-7.343	-5.053	-3.634	-5.089	-4.981			
3	8.222	-3.878	-6.744	-4.940	-3.627	-5.089	-4.981			
4	7.879	-3.891	-5.475	-4.847	-3.646	-5.006	-5.014			
5	7.852	-3.886	-5.782	-4.850	-3.639	-5.014	-5.014			
6	8.382	-3.828	-5.773	-4.846	-3.552	-5.014	-5.014			
7	10.183	-3.675	-5.867	-4.833	-3.333	-5.019	-5.087			
8	8.746	-3.754	-5.947	-4.844	-3.449	-5.087	-5.087			
9	8.841	-3.753	-6.145	-4.890	-3.459	-5.087	-5.087			
10	7.818	-3.808	-6.077	-4.890	-3.529	-4.986	-5.089			
11	7.882	-3.797	-5.637	-4.822	-3.509	-4.986	-5.089			
12	9.286	-3.710	-6.015	-4.859	-3.400	-5.089	-5.089			
13	11.169	-3.515	-6.816	-4.868	-3.122	-5.062	-5.068			
14	11.847	-3.401	-6.831	-4.873	-2.972	-5.068	-5.077			
15	11.916	-3.410	-6.769	-4.879	-2.974	-5.077	-5.077			
16	11.187	-3.464	-8.152	-5.111	-3.052	-5.001	-5.001			
17	10.475	-3.490	-6.734	-4.884	-3.104	-5.062	-5.062			
18	10.219	-3.524	-7.244	-4.945	-3.147	-5.150	-5.147			
19	4	14.152	-3.225	-7.513	-4.934	-2.712	-5.147			
20	14.015	-3.195	-5.259	-4.543	-2.681	-4.599	-4.599			
21	11.832	-3.193	-7.883	-4.943	-2.699	-5.162	-5.162			
22	14.316	-3.144	-7.256	-4.860	-2.619	-5.051	-5.051			
23	2	19.602	-2.048	-10.005	-4.497	-1.505	-5.048	-5.048		
24	20.553	-1.323	-10.130	-4.062	-0.979	-4.919	-4.919			
25	1.5	23.336	2.359	-9.526	-0.631	0.019	-4.629	-4.629		
26	21.797	3.145			0.052					

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf] 23.336
	Deformación máxima	[mm] 4.728
	Deformación mínima	[mm] -4.794
	Rango de deformación	[mm] 9.522
	Rigidez inicial	[tonf/mm] 14.968
	Rigidez plástica	[tonf/mm] 0.817
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm] 122.389
	Fuerza acumulada	[tonf] 1583.153
	Def. plástica acumulada	[mm] 87.581
	Energía disipada	[tonf-mm] 331.865

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

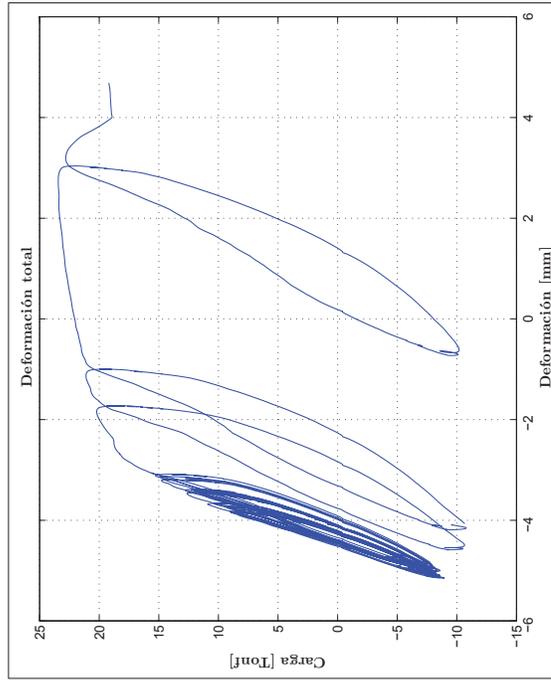


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSMI-1

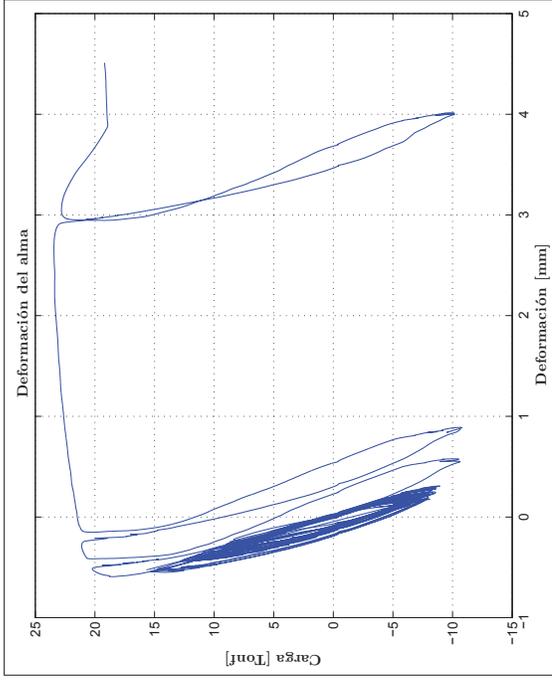


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSMI-1

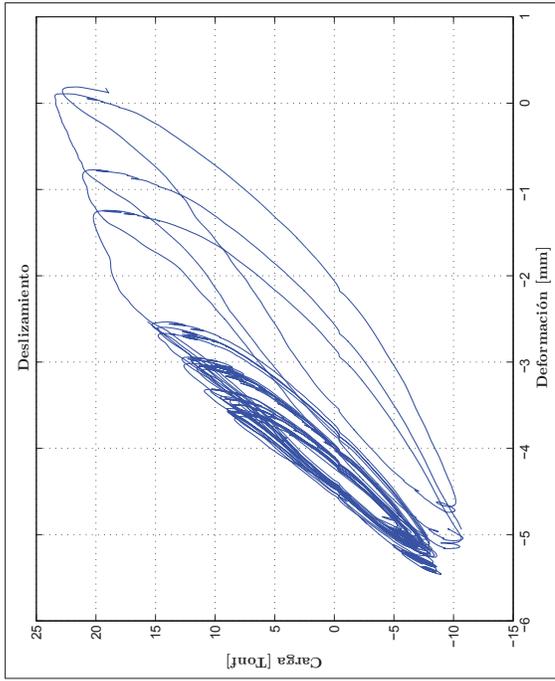


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSMI-1

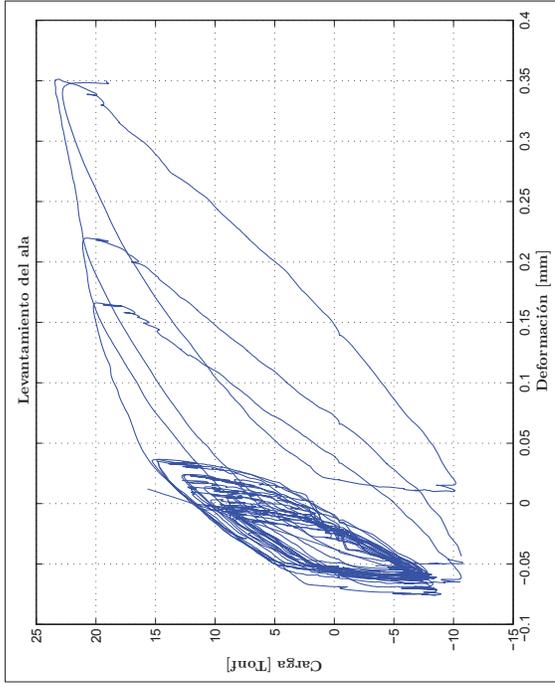


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSMI-1

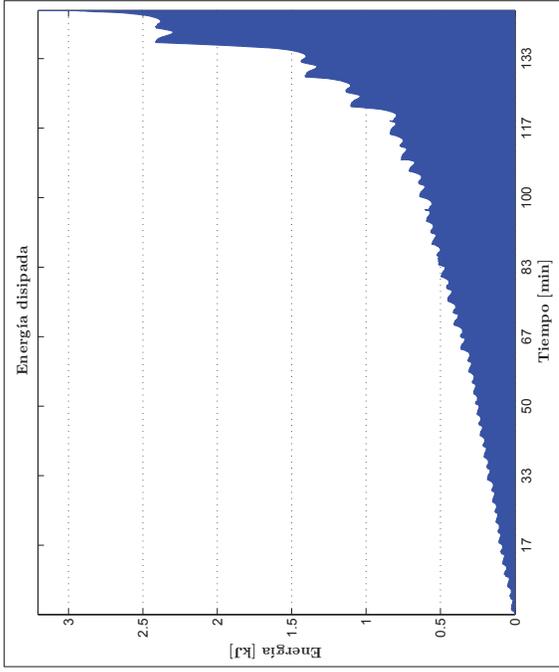


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM1-L

• FOTOGRAFÍAS

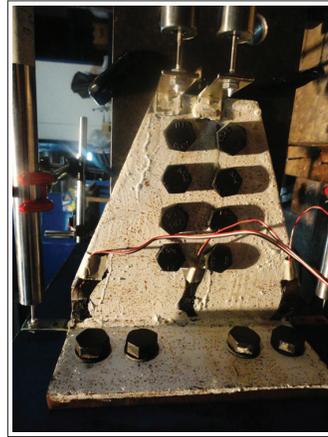


Figura 11: Fotografía del ensayo

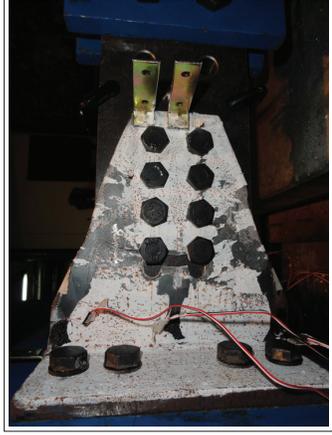


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• **GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN**

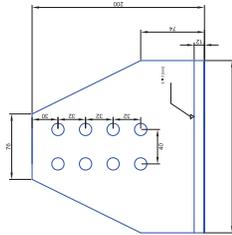


Figura 1: Vista frontal del alma

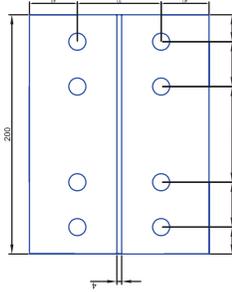


Figura 2: Vista frontal del ala

• **PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES**

Componente	Tamaño [in]	Calidad		Fluencia		Rotura	
		Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]		
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37	
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11	
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79	
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79	

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

• **PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL**

Paso de carga	Nº ciclos	Tracción			Compresión			Deslizamiento		
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	
1	6	10.515	0.320	-1.416	-4.801	-0.054	0.177	-0.035	-0.095	
2	10.415	0.283	-4.143	-0.150	0.158	-0.087	-0.107	-0.100		
3	10.765	0.291	-4.143	-0.150	0.158	-0.087	-0.107	-0.100		
4	11.034	0.295	-4.834	-0.176	-0.028	-0.100	-0.100	-0.100		
5	0.459	-0.031	-4.834	-0.176	-0.028	-0.100	-0.100	-0.100		
6	10.979	0.293	-3.282	-0.125	0.155	-0.074	-0.099	-0.095		
7	9.312	0.257	-4.529	-0.169	0.153	-0.099	-0.095	-0.095		
8	10.412	0.276	-4.233	-0.162	0.326	-0.095	-0.095	-0.095		
9	14.236	0.508	-6.711	-0.201	0.340	-0.077	-0.153	-0.153		
10	14.552	0.515	-8.681	-0.335	0.341	-0.077	-0.153	-0.153		
11	14.521	0.494	-6.778	-0.234	0.337	-0.088	-0.091	-0.091		
12	14.376	0.485	-7.129	-0.242	0.326	-0.091	-0.060	-0.060		
13	13.916	0.464	-7.453	-0.245	0.623	-0.086	-0.086	-0.086		
14	14.788	0.503	-8.022	-0.132	0.697	0.053	0.114	0.114		
15	17.858	0.848	-8.371	-0.068	0.745	0.114	0.152	0.152		
16	18.184	0.953	-8.376	-0.017	0.772	0.152	0.198	0.198		
17	18.305	1.028	-8.199	0.045	0.783	0.198	0.255	0.255		
18	18.267	1.072	-7.437	0.126	0.815	0.255	0.241	0.241		
19	18.098	1.089	-8.355	0.100	1.397	0.241	0.568	0.568		
20	18.297	1.144	-8.628	0.922	1.500	0.568	0.677	0.677		
21	19.905	2.232	-8.533	1.398	1.489	0.677	0.653	0.653		
22	20.439	2.765	-8.934	1.426	1.608	0.653	0.698	0.698		
23	2	20.144	2.988	-8.806	1.477	1.608	0.652	0.652		
24	19.976	2.955	-9.176	2.089	1.895	0.698	0.698	0.698		
25	2	20.965	3.620	-9.376	3.393	0.727	0.510	0.510		
26	2	21.912	5.204	-9.376	3.347	1.944	0.351	0.351		
27	2	1.827	3.793	-9.376	3.347	1.944	0.351	0.351		
28	23.048	8.439	-9.376	3.347	1.944	0.351	0.351	0.351		

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf] 23.048
	Deformación máxima	[mm] 9.816
	Deformación mínima	[mm] -0.054
	Rango de deformación	[mm] 9.870
	Rigidez inicial	[tonf/mm] 31.907
	Rigidez plástica	[tonf/mm] 0.923
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm] 66.314
	Fuerza acumulada	[tonf] 1677.495
	Def. plástica acumulada	[mm] 50.007
	Energía disipada	[tonf-mm] 379.253

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

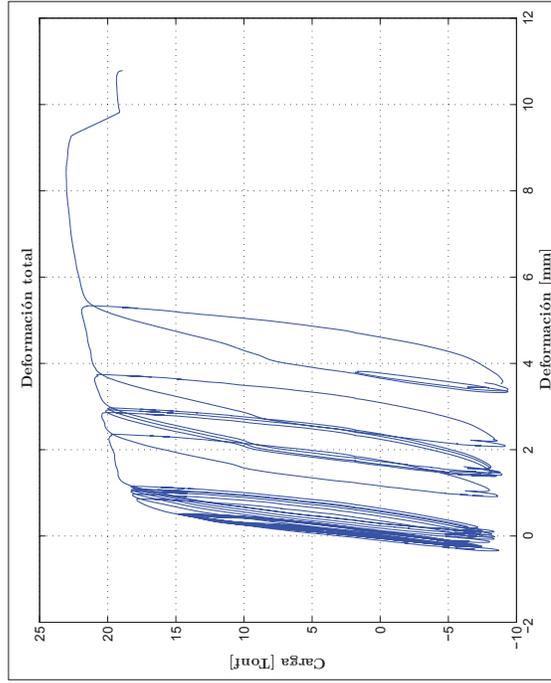


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSMI-2

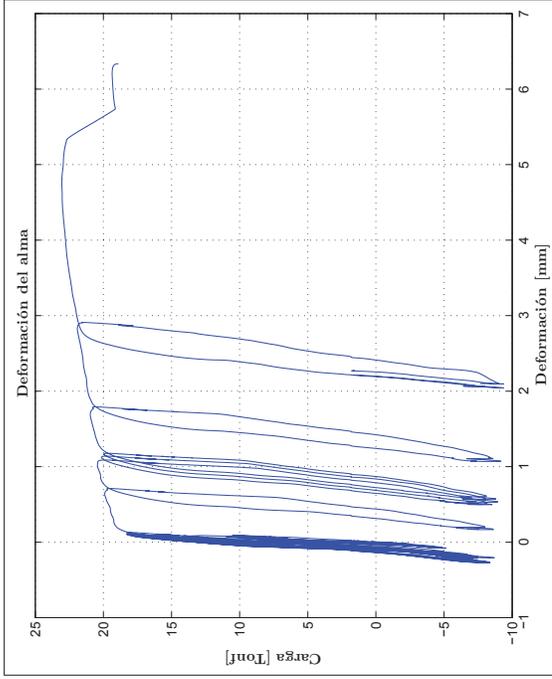


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSMI-2

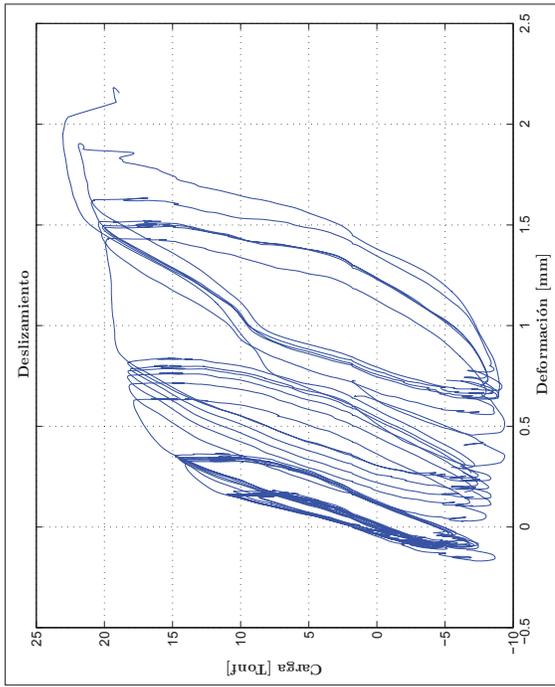


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSMI-2

5

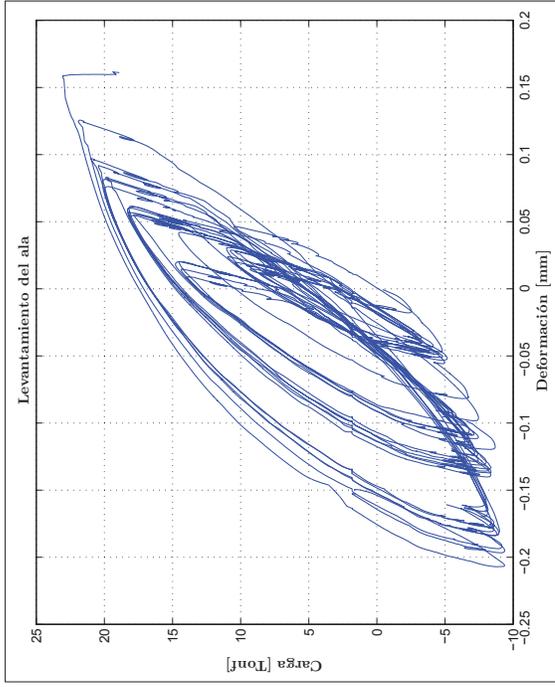


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSMI-2

6

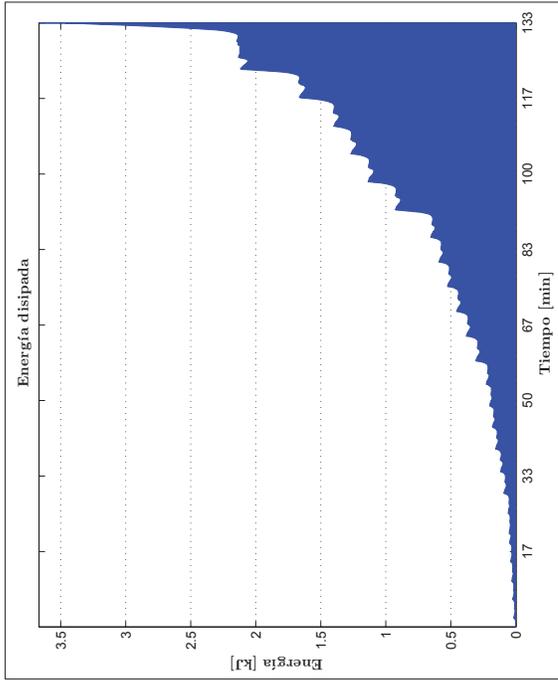


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM1-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

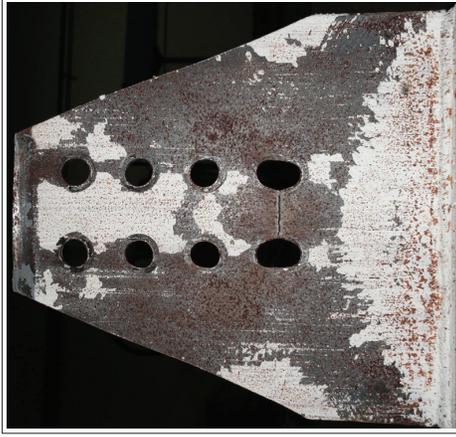


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

TSM2 - 1

22 de julio de 2012

RESUMEN RESULTADOS EXPERIMENTALES

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

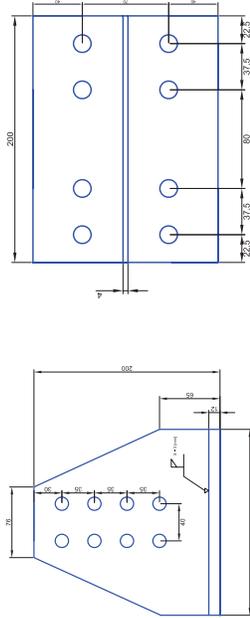


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño [in]	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción			Compresión			Deslizamiento		
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	
1	6	12.223	0.964	-0.029	-0.007	1.058	-0.003			
2		4.452	0.539	-0.675	-0.313	0.659	-0.382			
3		4.782	0.555	-4.723	-0.172	0.674	-0.181			
4		5.109	0.532	-6.996	-0.504	0.681	-0.624			
5		5.875	0.618	-7.487	-0.591	0.792	-0.739			
6		4.426	0.369	-9.586	-0.962	0.528	-1.180			
7	6	6.682	0.501	-6.287	-0.580	0.673	-0.689			
8		6.454	0.503	-6.575	-0.532	0.678	-0.626			
9		6.806	0.493	-4.357	-0.286	0.667	-0.292			
10		6.558	0.521	-4.137	-0.285	0.699	-0.292			
11		6.593	0.505	-4.101	-0.261	0.685	-0.256			
12		6.122	0.497	-4.873	-0.352	0.680	-0.387			
13	6	19.913	2.463	-4.737	-0.334	2.612	-0.361			
14		20.167	2.901	-7.927	0.531	2.954	0.152			
15		19.699	3.129	-7.839	0.723	3.134	0.241			
16		20.218	3.272	-8.780	0.674	3.236	0.109			
17		20.338	3.437	-8.076	0.945	3.329	0.380			
18		20.389	3.546	-8.022	1.049	3.379	0.404			
19	4	22.607	4.814	-7.822	1.227	3.931	0.543			
20		22.264	5.327	-9.413	2.140	4.061	0.446			
21		22.821	5.717	-9.671	2.220	4.185	0.272			
22		22.218	5.977	-9.467	2.559	4.248	0.317			
23	1	24.570	8.480	-9.651	2.663	4.755	0.272			

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf] 24.570
	Deformación máxima	[mm] 8.761
	Deformación mínima	[mm] -0.007
	Rango de deformación	[mm] 8.768
	Rigidez inicial	[tonf/mm] 14.016
	Rigidez plástica	[tonf/mm] 0.930
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm] 106.487
	Fuerza acumulada	[tonf] 1449.591
	Def. plástica acumulada	[mm] 77.383
	Energía disipada	[tonf-mm] 411.748

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

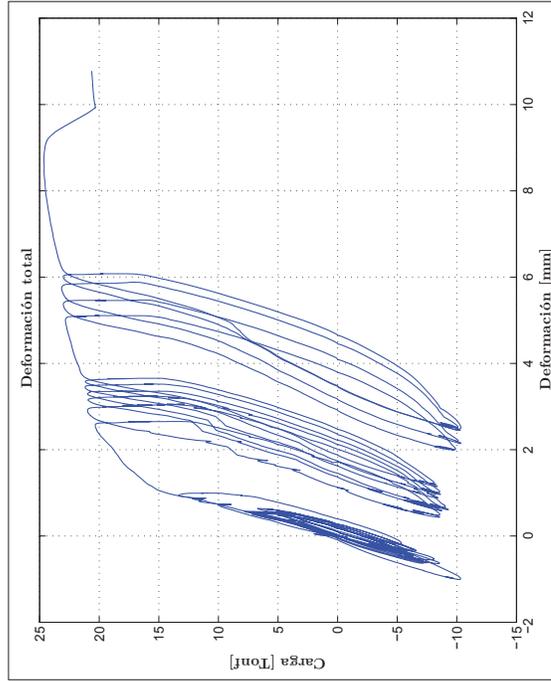


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM2-1

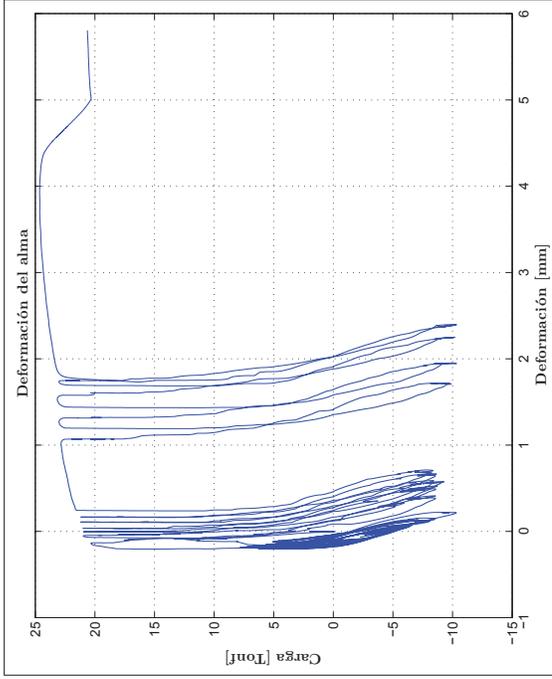


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM2-1

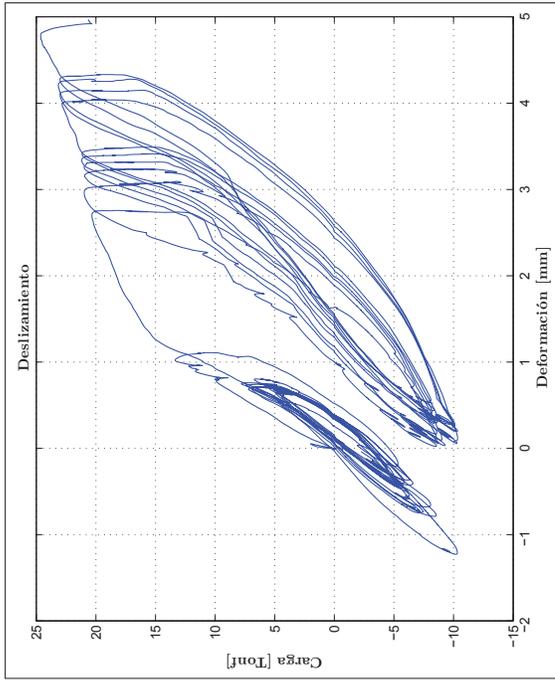


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM2-1

5

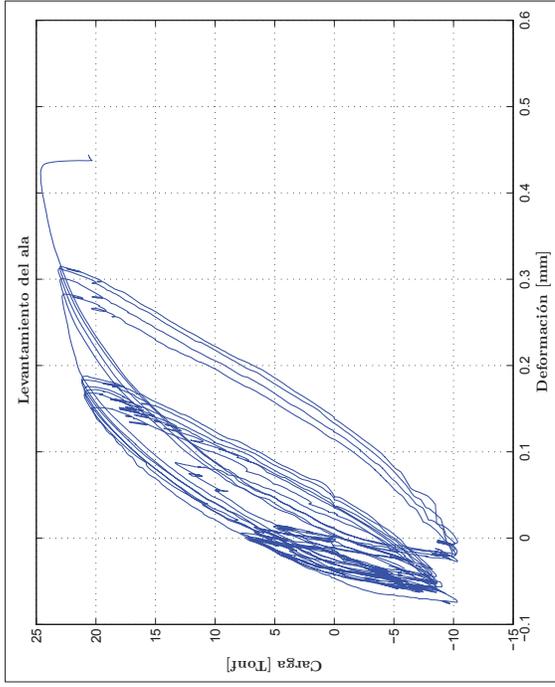


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM2-1

6

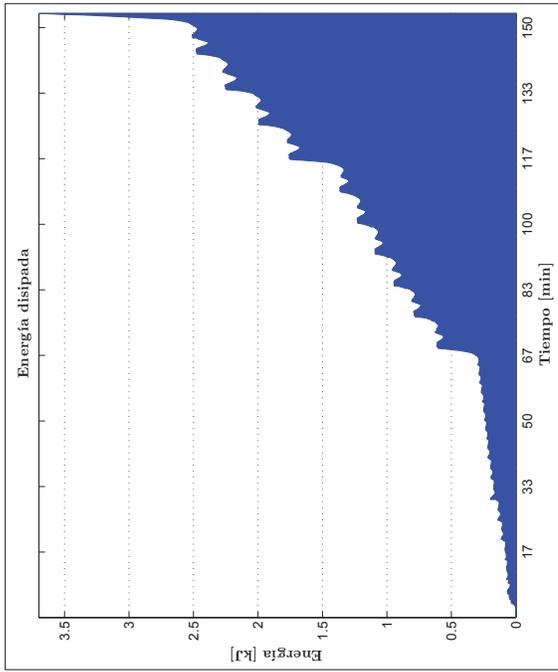


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM2-1

• FOTOGRAFÍAS

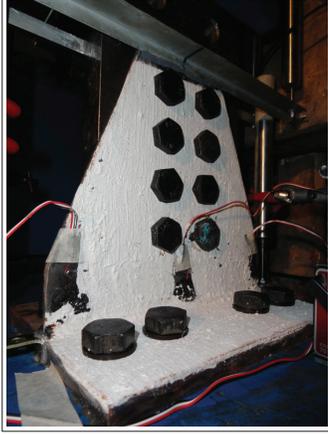


Figura 11: Fotografía del ensayo

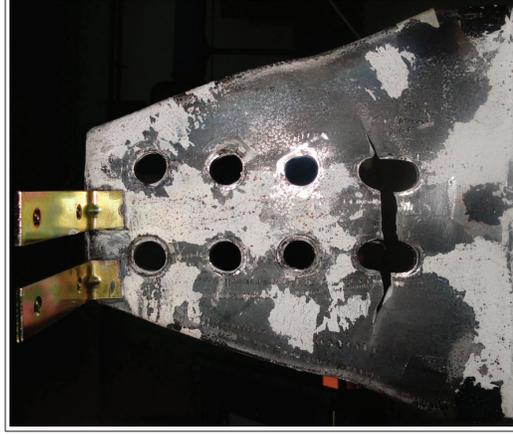


Figura 12: Fotografía del ensayo

• **GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN**

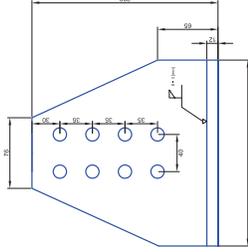


Figura 1: Vista frontal del alma

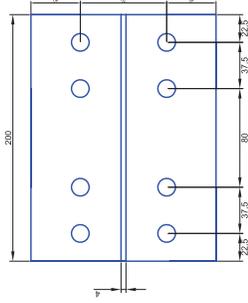


Figura 2: Vista frontal del ala

• **PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES**

Componente	Tamaño	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

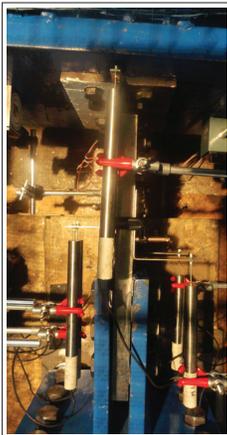


Figura 13: Fotografía del ensayo



Figura 14: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	8.994	0.327	-3.537	-0.137	0.188	-0.084
2		9.621	0.343	-4.721	-0.193	0.199	-0.119
3		9.512	0.327	-3.900	-0.160	0.193	-0.102
4		9.493	0.326	-3.862	-0.161	0.193	-0.102
5		9.734	0.334	-3.903	-0.164	0.196	-0.103
6		9.378	0.320	-4.285	-0.178	0.188	-0.114
7	6	11.824	0.425	-5.276	-0.220	0.259	-0.140
8		12.617	0.460	-4.997	-0.203	0.282	-0.132
9		12.818	0.471	-5.039	-0.205	0.287	-0.130
10		12.625	0.468	-4.900	-0.193	0.286	-0.118
11		12.122	0.449	-4.735	-0.190	0.277	-0.123
12		13.189	0.490	-4.975	-0.198	0.301	-0.125
13	6	15.847	0.657	-6.380	-0.230	0.415	-0.146
14		16.112	0.691	-6.398	-0.202	0.450	-0.123
15		15.715	0.682	-6.652	-0.215	0.446	-0.131
16		16.216	0.717	-6.267	-0.186	0.476	-0.108
17		15.388	0.685	-6.393	-0.184	0.460	-0.100
18		15.904	0.711	-6.179	-0.145	0.477	-0.060
19	4	19.470	1.105	-7.824	-0.060	0.756	0.033
20		19.884	1.261	-8.080	0.031	0.845	0.088
21		20.209	1.373	-8.271	0.087	0.908	0.119
22		20.057	1.423	-7.964	0.153	0.944	0.154
23	2	21.975	1.967	-8.925	0.433	1.188	0.207
24		22.195	2.192	-8.882	0.566	1.283	0.225
25	2	23.467	2.984	-9.981	-0.136	1.484	-1.043
26		24.228	3.802	-9.114	0.415	1.638	-1.197
27	1.5	25.120	5.028	-9.841	1.170	1.798	-1.344
28		26.162	7.275			2.187	

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción [tonf]	26.102	
	Deformación máxima [mm]	8.971	
	Deformación mínima [mm]	-0.137	
	Rango de deformación [mm]	9.108	
Propiedades energía disipada	Rigidez inicial [tonf/mm]	27.033	
	Rigidez plástica [tonf/mm]	0.794	
	Def. acumulada [mm]	79.327	
	Fuerza acumulada [tonf]	1016.284	
	Def. plástica acumulada [mm]	57.388	
	Energía disipada [tonf·mm]	426.622	

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

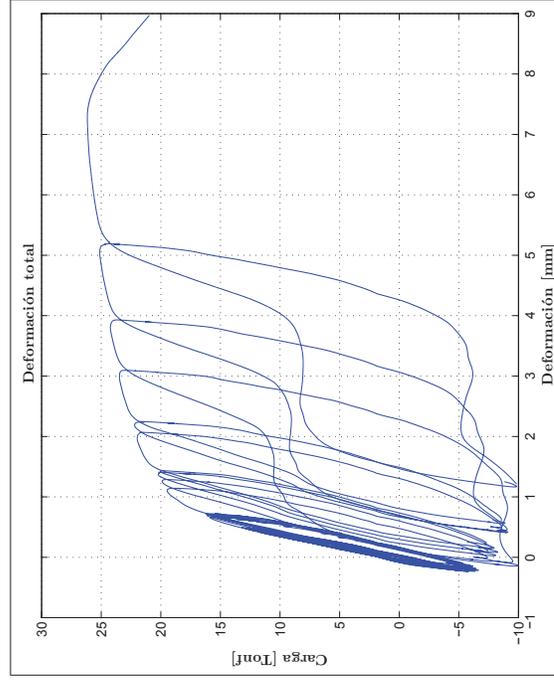


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM2-2

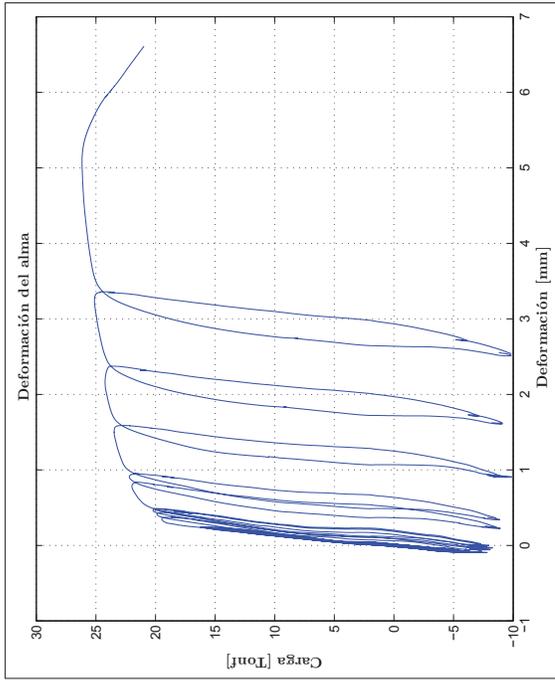


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM2-2

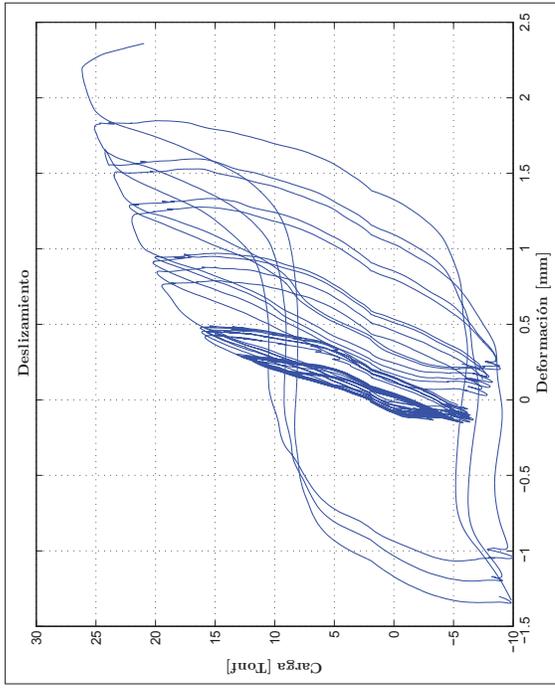


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM2-2

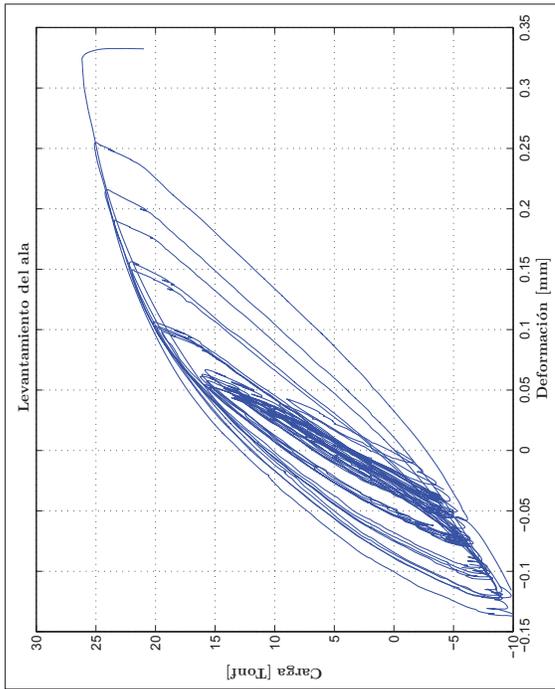


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM2-2

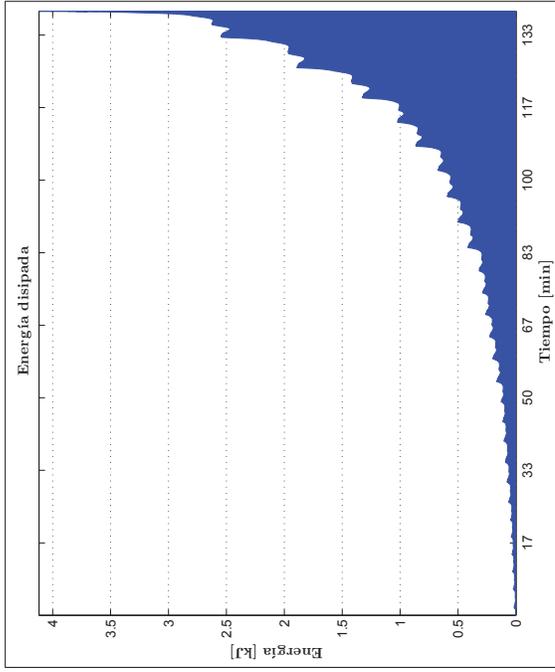


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM2-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo



Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo



Figura 14: Fotografía del ensayo

TSM3 - 1

27 de julio de 2012

RESUMEN RESULTADOS EXPERIMENTALES

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

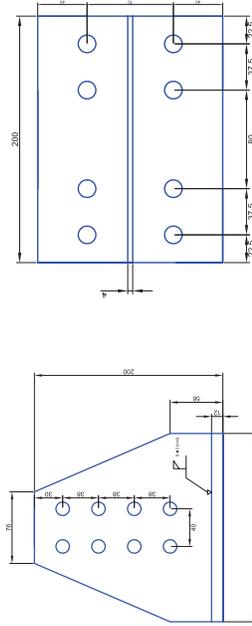


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño [in]	Calidad	Fuerza		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	Nº ciclos	Tracción			Compresión			Deslizamiento		
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	
1	6	9.093	0.868	-0.367	-3.772	-0.367	1.091	-0.655	-0.702	
2	8.983	1.006	-0.336	-3.540	-0.336	1.172	-0.702	-0.823		
3	8.974	1.088	-0.346	-3.934	-0.346	1.181	-0.860	-0.912		
4	9.745	1.171	-0.304	-3.665	-0.304	1.177	-0.912	-0.900		
5	8.505	1.210	-0.282	-3.636	-0.282	1.138	-0.912	-0.900		
6	9.431	1.232	-0.221	-3.644	-0.221	1.091	-0.900	-0.900		
7	12.511	1.632	-0.797	-5.567	-0.797	1.280	-1.745	-2.224		
8	12.568	1.737	-1.052	-5.786	-1.052	1.081	-2.224	-2.531		
9	13.141	1.786	-1.100	-5.575	-1.100	0.833	-2.531	-2.684		
10	13.106	1.852	-1.131	-5.358	-1.131	0.660	-2.684	-2.976		
11	12.863	1.918	-1.211	-5.937	-1.211	0.545	-2.976	-3.102		
12	12.744	1.922	-1.207	-5.721	-1.207	0.370	-3.102	-3.608		
13	15.878	2.102	-1.432	-7.039	-1.432	0.419	-3.608	-3.817		
14	16.158	2.263	-1.542	-7.278	-1.542	0.442	-3.817	-3.859		
15	16.915	2.354	-1.513	-7.014	-1.513	0.471	-3.859	-3.859		

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf]
	Deformación máxima	[mm]
	Deformación mínima	[mm]
	Rango de deformación	[mm]
	Rigidez inicial	[tonf/mm]
	Rigidez plástica	[tonf/mm]
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm]
	Fuerza acumulada	[tonf]
	Def. plástica acumulada	[mm]
	Energía disipada	[tonf-mm]
		16.915
		2.500
		-0.367
		2.867
		10.416
		-
		88.796
		1032.018
		92.240
		191.875

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

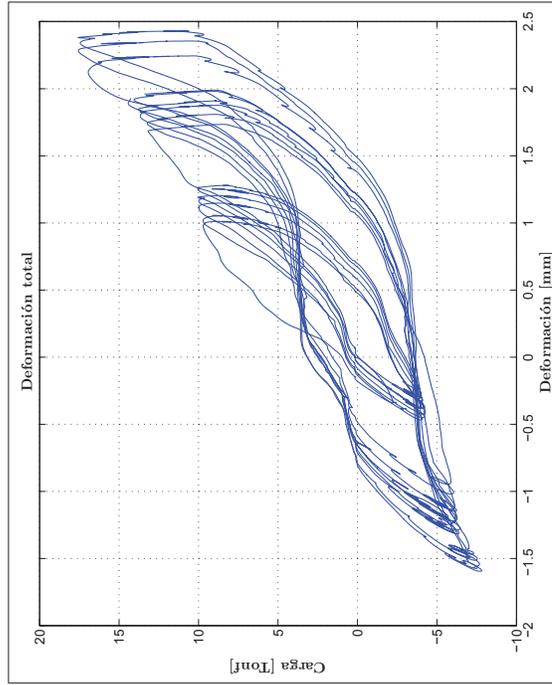


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM3-1

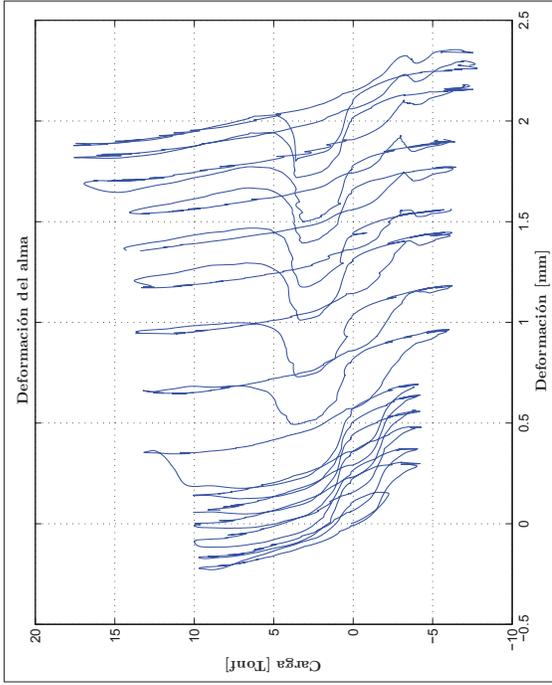


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM3-1

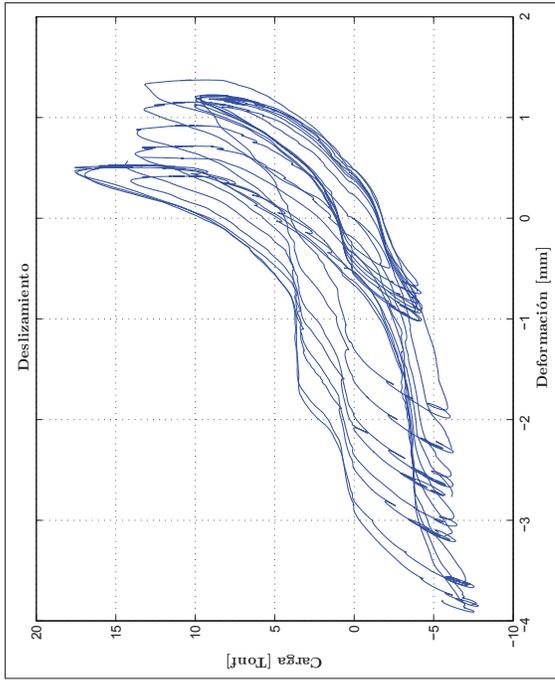


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM3-1

5

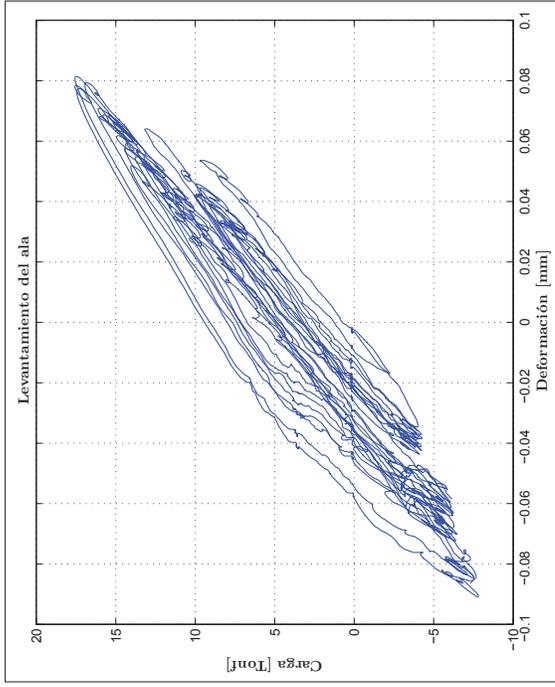


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM3-1

6

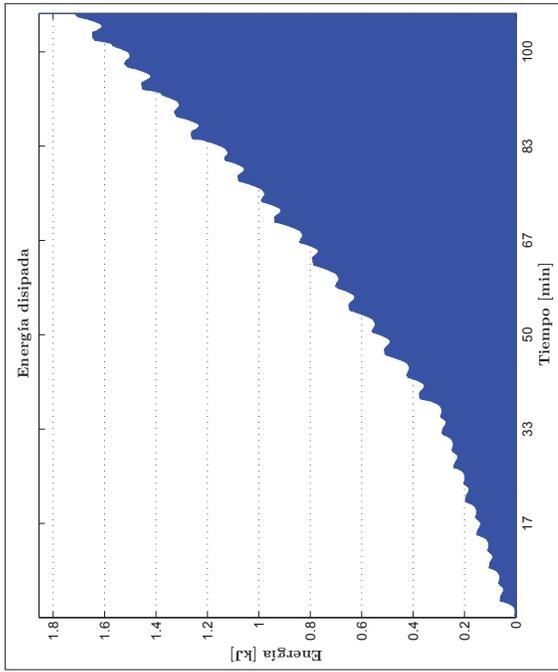


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM3-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

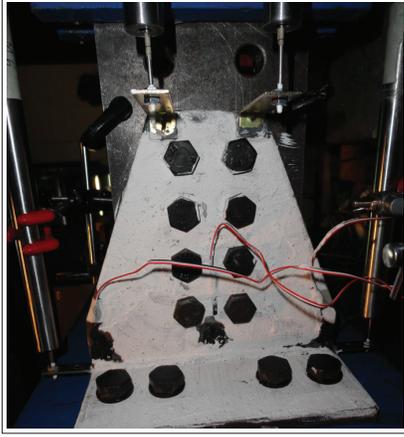


Figura 12: Fotografía del ensayo

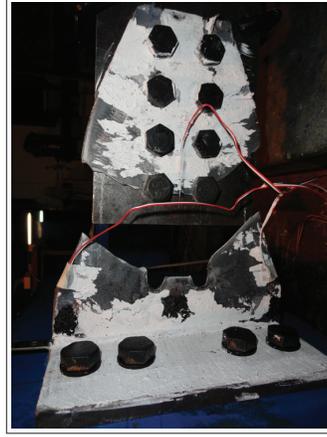


Figura 13: Fotografía del ensayo

• **GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN**

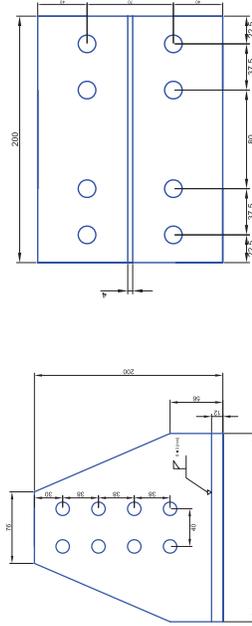


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• **PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES**

Componente	Tamaño [in]	Calidad	Fuerza		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

• **PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL**

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	5.653	0.158	-7.393	-0.264	0.068	-0.167
2	8.894	0.290	-7.211	-0.208	0.152	-0.120	
3	6.330	0.202	-7.108	-0.201	0.127	-0.115	
4	6.839	0.216	-7.173	-0.201	0.132	-0.115	
5	6.077	0.180	-7.263	-0.204	0.118	-0.116	
6	5.806	0.180	-7.705	-0.220	0.114	-0.125	
7	6	9.465	0.303	-8.344	-0.238	0.166	-0.136
8	9.213	0.294	-8.504	-0.241	0.165	-0.134	
9	9.203	0.291	-8.212	-0.233	0.166	-0.131	
10	9.149	0.289	-8.188	-0.235	0.168	-0.134	
11	8.949	0.282	-8.120	-0.233	0.165	-0.130	
12	8.840	0.279	-7.895	-0.228	0.166	-0.130	
13	6	11.889	0.425	-9.756	-0.239	0.243	-0.108
14	12.045	0.437	-10.119	-0.249	0.264	-0.103	
15	12.579	0.464	-9.725	-0.212	0.283	-0.076	
16	12.299	0.465	-9.832	-0.208	0.294	-0.069	
17	12.062	0.459	-10.428	-0.231	0.296	-0.079	
18	12.063	0.458	-10.619	-0.238	0.299	-0.079	
19	4	14.858	0.654	-10.680	-0.142	0.426	0.024
20	15.706	0.816	-11.697	-0.062	0.582	0.140	
21	15.754	0.881	-11.314	0.008	0.659	0.199	
22	15.185	0.886	-11.024	0.048	0.677	0.228	
23	2	18.323	1.279	-13.152	0.214	0.972	0.431
24	19.161	1.439	-13.485	0.326	1.122	0.524	
25	20.785	2.150	-14.740	0.824	1.428	0.647	
26	20.896	2.423	-14.728	0.981	1.368	0.675	
27	2	21.634	3.069	-15.181	1.304	1.457	0.677
28	2	21.418	3.357	-14.906	1.464	1.483	0.384
29	2	22.166	4.258	-16.434	0.912	1.570	-0.840
30	2	22.865	5.394	-17.036	1.614	1.658	-1.074
31	1	23.244	6.688	-	-	1.731	-

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf]
	Deformación máxima	[mm]
	Deformación mínima	[mm]
	Rango de deformación	[mm]
	Rigidez inicial	[tonf/mm]
	Rigidez plástica	[tonf/mm]
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm]
	Fuerza acumulada	[tonf]
	Def. plástica acumulada	[mm]
	Energía disipada	[tonf-mm]
		23.244
		7.802
		-0.264
		8.066
		30.887
		0.817
		73.958
		1758.300
		57.216
		454.423

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

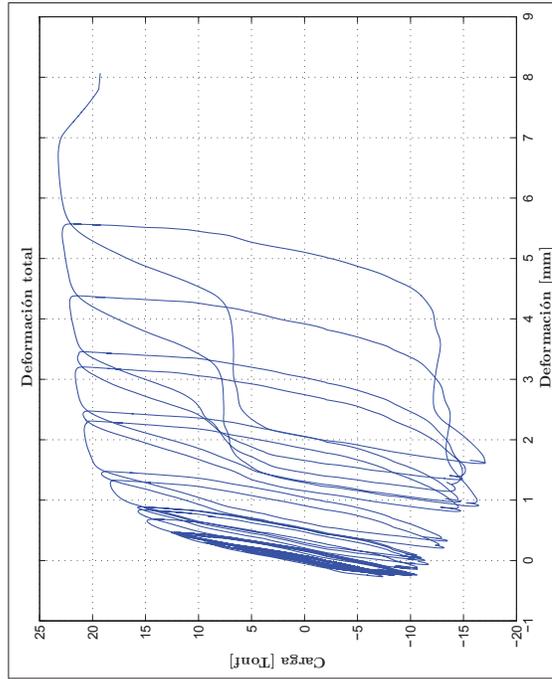


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM3-2

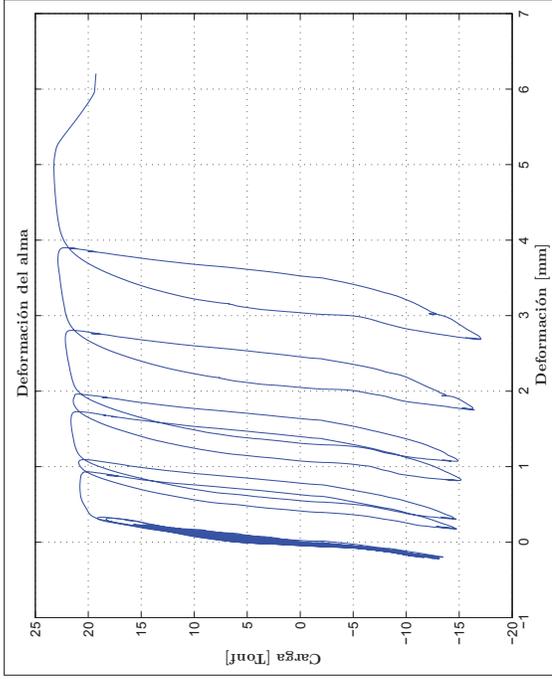


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM3-2

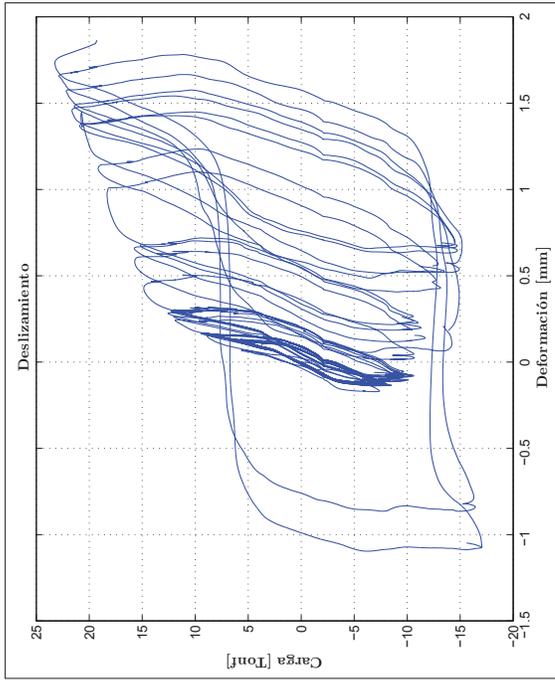


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM3-2

5

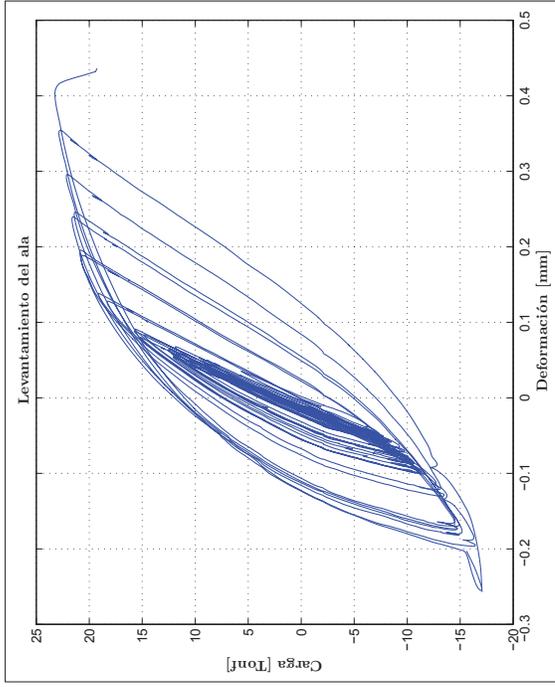


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM3-2

6

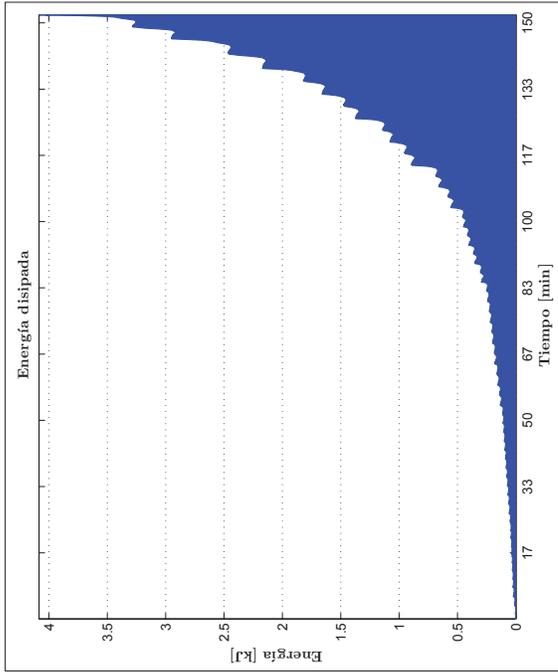


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM3-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

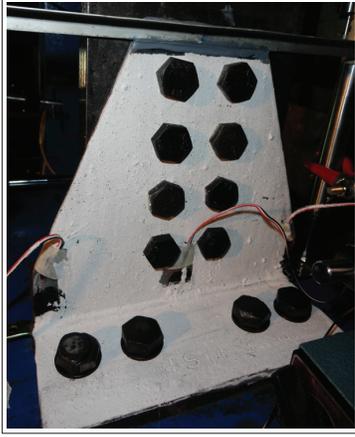


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

TSM4 - 1

8 de agosto de 2012

RESUMEN RESULTADOS EXPERIMENTALES

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

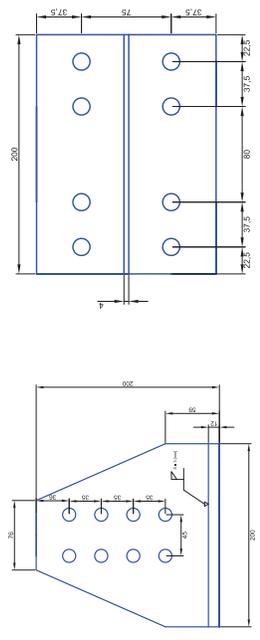


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles



Figura 14: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	7.114	0.181	-1.560	-0.043	0.041	-0.020
2		6.931	0.156	-8.270	-0.320	0.029	-0.219
3		7.234	0.165	-8.506	-0.335	0.038	-0.266
4		7.036	0.172	-8.575	-0.334	0.044	-0.264
5		7.115	0.169	-9.117	-0.366	0.048	-0.296
6		7.360	0.174	-8.798	-0.350	0.049	-0.281
7	6	10.703	0.289	-8.966	-0.357	0.121	-0.285
8		9.822	0.276	-9.280	-0.350	0.134	-0.268
9		9.379	0.257	-9.151	-0.344	0.123	-0.259
10		9.179	0.252	-9.748	-0.379	0.128	-0.294
11		8.840	0.249	-9.422	-0.361	0.129	-0.274
12		9.096	0.251	-9.044	-0.340	0.132	-0.253
13	6	12.678	0.390	-9.079	-0.338	0.236	-0.250
14		10.339	0.346	-10.316	-0.354	0.243	-0.247
15		10.754	0.358	-10.917	-0.404	0.253	-0.297
16		11.055	0.367	-10.641	-0.393	0.263	-0.282
17		10.630	0.357	-10.538	-0.379	0.266	-0.265
18		10.582	0.361	-11.194	-0.419	0.278	-0.302
19	4	14.469	0.546	-10.796	-0.395	0.397	-0.282
20		13.427	0.555	-11.292	-0.343	0.420	-0.212
21		12.505	0.530	-11.235	-0.327	0.411	-0.194
22		12.705	0.541	-11.358	-0.334	0.425	-0.199
23	2	16.619	0.788	-11.085	-0.306	0.615	-0.172
24		14.641	0.744	-11.610	-0.227	0.606	-0.088
25	2	19.382	1.215	-11.766	-0.240	0.962	-0.095
26		16.717	1.170	-12.806	-0.071	0.997	0.054
27	2	20.101	1.695	-12.857	-0.082	1.365	0.049
28		18.659	1.730	-12.648	0.334	1.357	0.303
29	2	20.589	2.604	-12.874	0.334	1.460	0.283
30		20.902	2.992	-13.840	0.729	1.481	-0.088
31	2	21.574	3.746	-13.636	0.604	1.599	-0.487
32		22.126	4.904	-14.314	0.187	1.777	-1.470

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción [tonf]	22.126	
	Deformación máxima [mm]	8.054	
	Deformación mínima [mm]	-0.043	
	Rango de deformación [mm]	8.097	
	Rigidez inicial [tonf/mm]	38.656	
	Rigidez plástica [tonf/mm]	0.886	
Propiedades energía disipada	Def. acumulada [mm]	78.543	
	Fuerza acumulada [tonf]	1825.258	
	Def. plástica acumulada [mm]	62.000	
	Energía disipada [tonf-mm]	385.311	

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

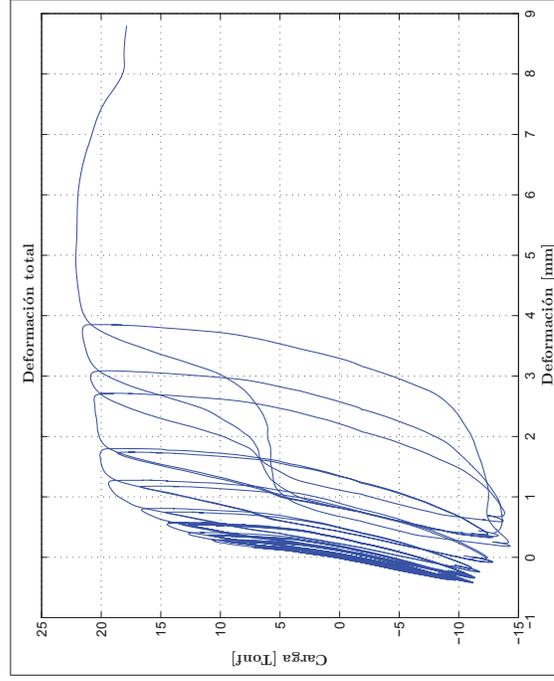


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM4-1

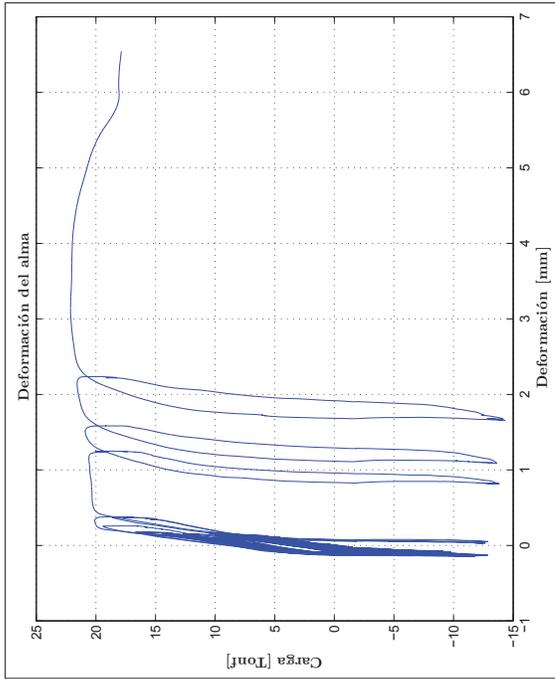


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM4-1

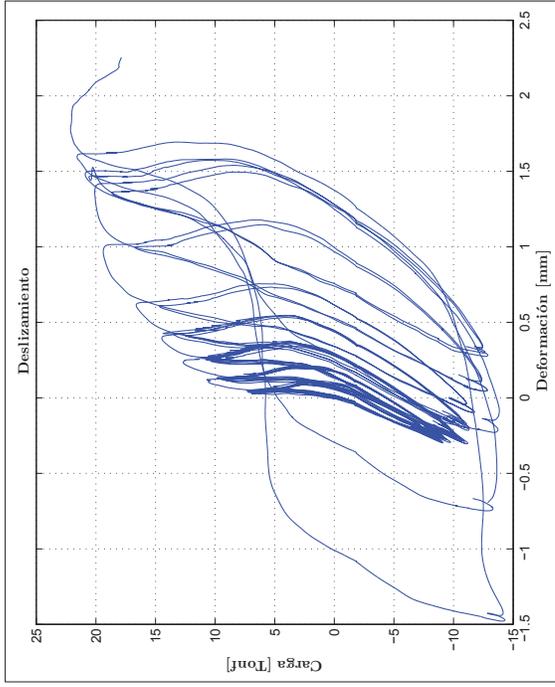


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM4-1

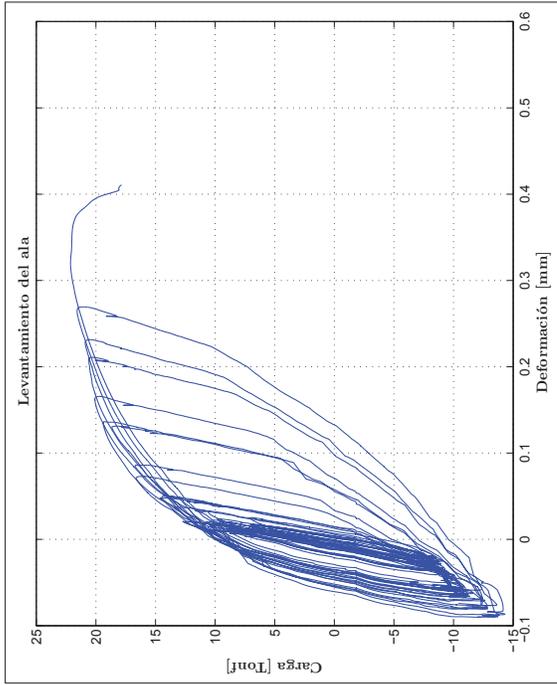


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM4-1

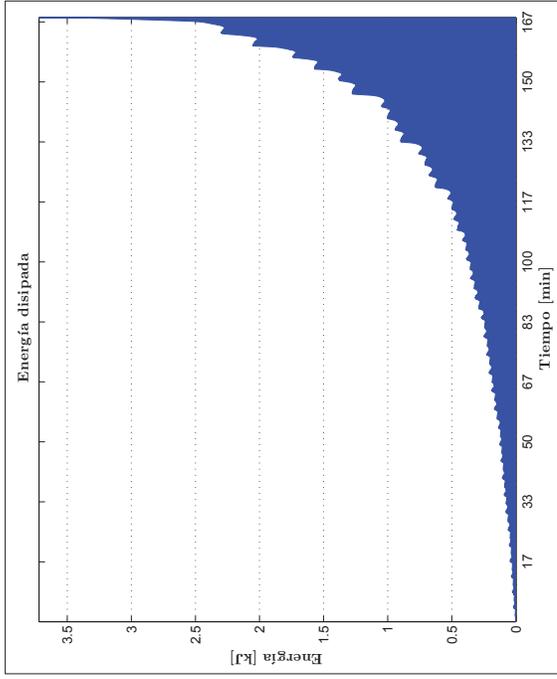


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM4-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

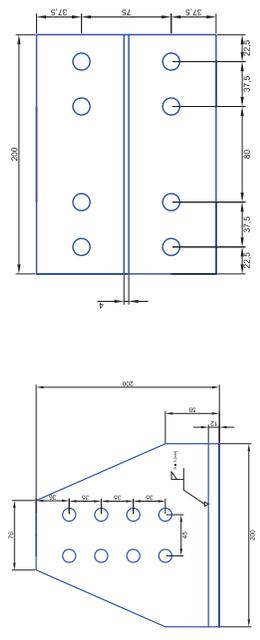


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	459.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

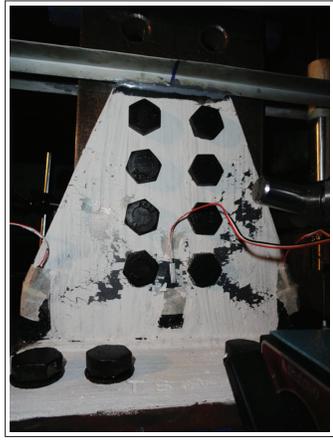


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	6.624	0.247	-5.796	-0.265	0.067	-0.189
2		6.983	0.221	-6.275	-0.288	0.044	-0.235
3		7.103	0.216	-6.425	-0.295	0.040	-0.247
4		7.122	0.214	-6.571	-0.306	0.040	-0.250
5		7.006	0.205	-6.334	-0.299	0.036	-0.249
6		7.394	0.218	-9.997	-0.548	0.041	-0.365
7	6	10.425	0.294	-6.066	-0.361	0.101	-0.274
8		10.837	0.308	-6.679	-0.371	0.106	-0.282
9		11.766	0.360	-6.906	-0.368	0.137	-0.270
10		10.635	0.319	-7.299	-0.389	0.118	-0.288
11		11.091	0.331	-6.860	-0.360	0.123	-0.271
12		10.739	0.321	-6.663	-0.365	0.116	-0.274
13	6	10.849	0.325	-7.054	-0.364	0.119	-0.275
14		10.823	0.324	-6.730	-0.354	0.120	-0.269
15		13.762	0.470	-8.511	-0.417	0.229	-0.283
16		14.074	0.507	-8.877	-0.422	0.264	-0.282
17		12.880	0.442	-8.825	-0.400	0.213	-0.277
18		13.813	0.487	-9.099	-0.402	0.247	-0.273
19	4	13.534	0.471	-8.652	-0.383	0.236	-0.260
20		13.980	0.488	-9.213	-0.393	0.249	-0.265
21		17.680	0.775	-9.865	-0.314	0.488	-0.155
22		17.307	0.787	-10.190	-0.289	0.496	-0.124
23	2	17.367	0.802	-9.833	-0.236	0.513	-0.077
24		17.073	0.794	-10.101	-0.237	0.509	-0.070
25	2	19.933	1.055	-11.359	-0.194	0.711	-0.003
26		19.801	1.131	-11.407	-0.152	0.777	0.035
27	2	21.420	1.512	-12.095	0.018	1.010	0.131
28		21.771	1.766	-11.962	0.246	1.133	0.217
29	2	22.625	2.482	-13.307	0.270	1.340	-0.098
30		22.783	2.824	-13.362	0.529	1.442	-0.036
31	2	23.395	3.409	-13.563	0.986	1.530	-0.043
32		24.118	4.451	-13.083	1.989	1.670	0.044
33	1.5	25.124	6.040	-13.079	3.241	1.822	-0.054
34		25.599	7.892			2.049	

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción [tonf]	25.599	
	Deformación máxima [mm]	9.284	
	Deformación mínima [mm]	-0.265	
	Rango de deformación [mm]	9.549	
	Rigidez inicial [tonf/mm]	24.269	
	Rigidez plástica [tonf/mm]	0.575	
Propiedades energía disipada	Def. acumulada [mm]	91.896	
	Fuerza acumulada [tonf]	1927.062	
	Def. plástica acumulada [mm]	72.077	
	Energía disipada [tonf-mm]	559.053	

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

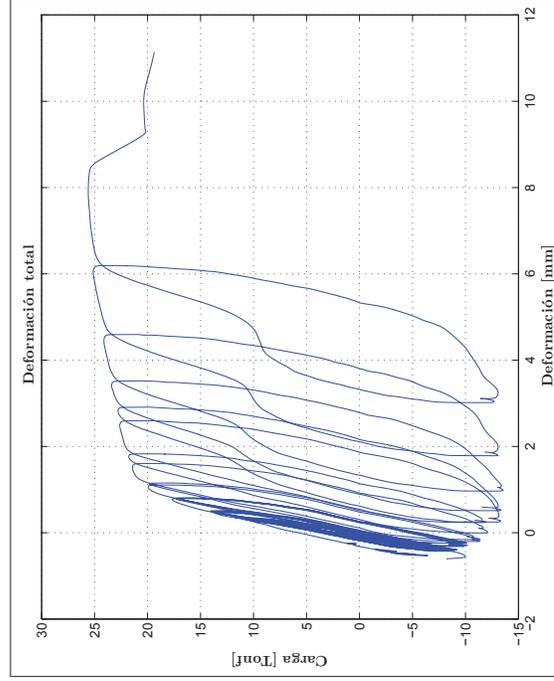


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM4-2

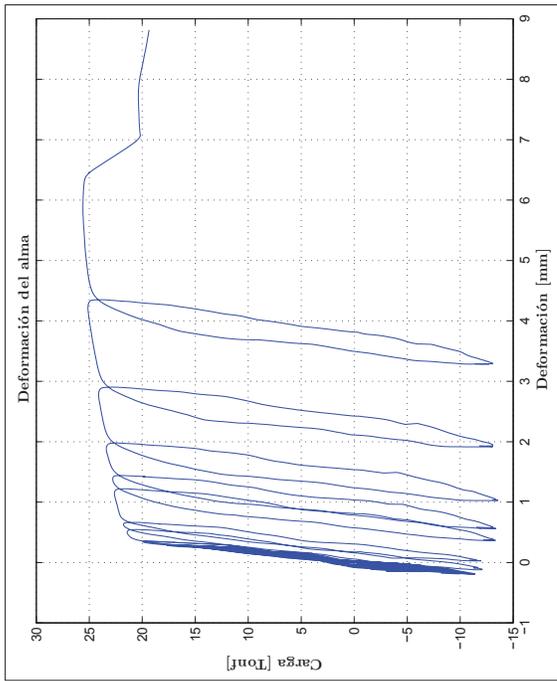


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM4-2

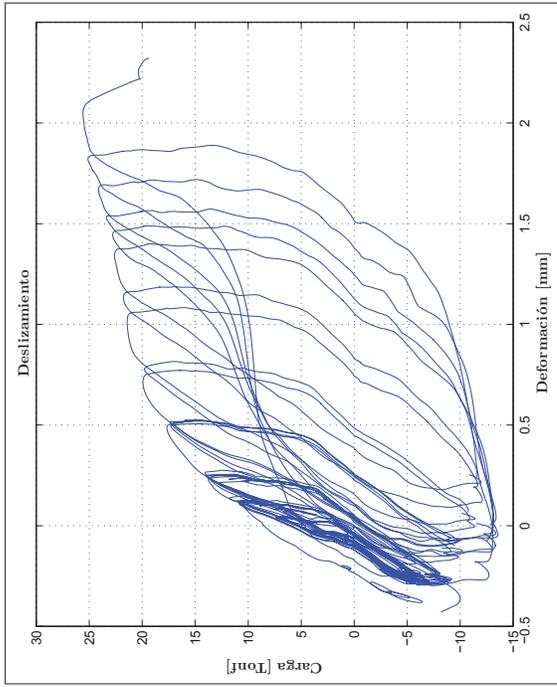


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM4-2

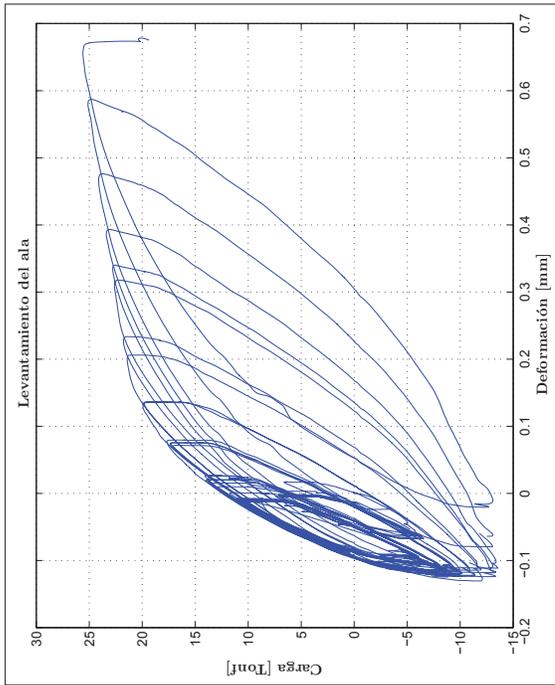


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM4-2

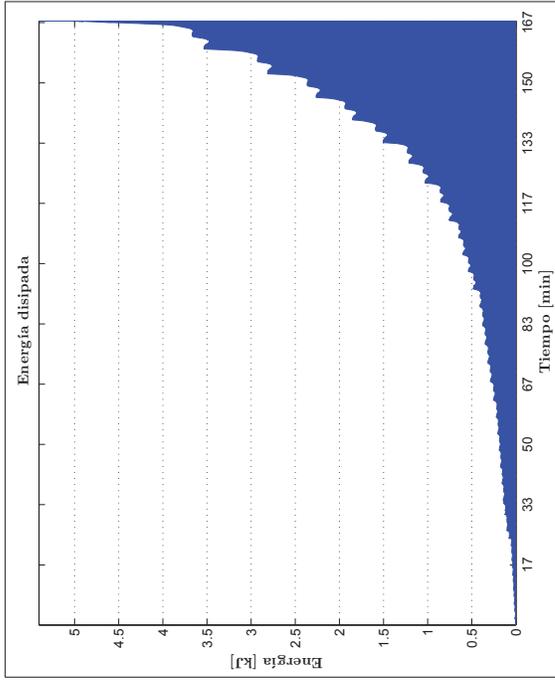


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM4-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

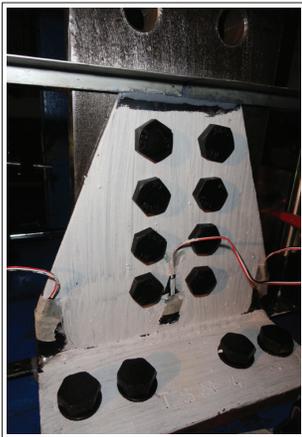


Figura 12: Fotografía del ensayo

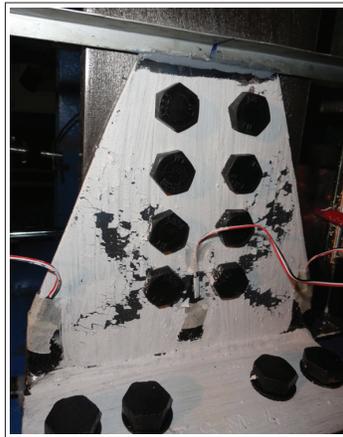


Figura 13: Fotografía del ensayo

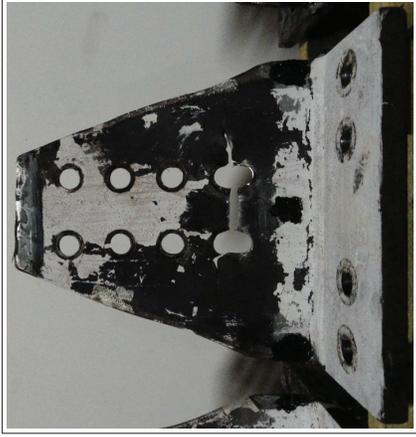


Figura 14: Fotografía del ensayo

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf]
	Deformación máxima	[mm]
	Deformación mínima	[mm]
	Rango de deformación	[mm]
	Rigidez inicial	[tonf/mm]
	Rigidez plástica	[tonf/mm]
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm]
	Fuerza acumulada	[tonf]
	Def. plástica acumulada	[mm]
	Energía disipada	[tonf-mm]
		31.982
		8.687
		-0.075
		8.762
		44.903
		0.965
		73.225
		2212.145
		63.825
		574.658

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

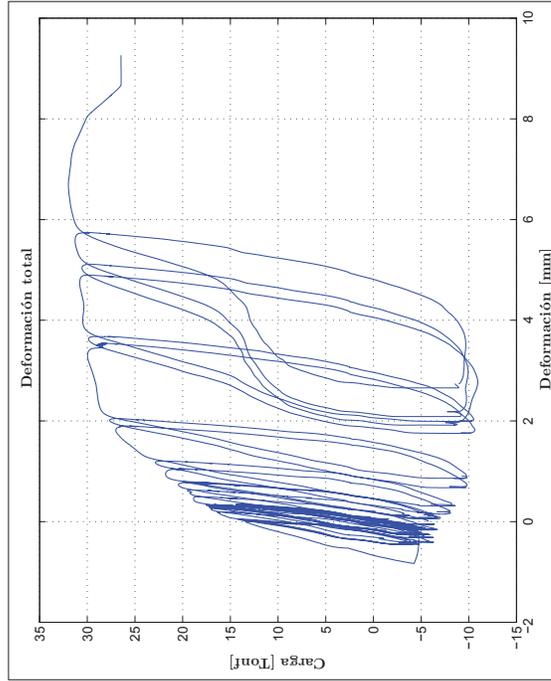


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM5-1

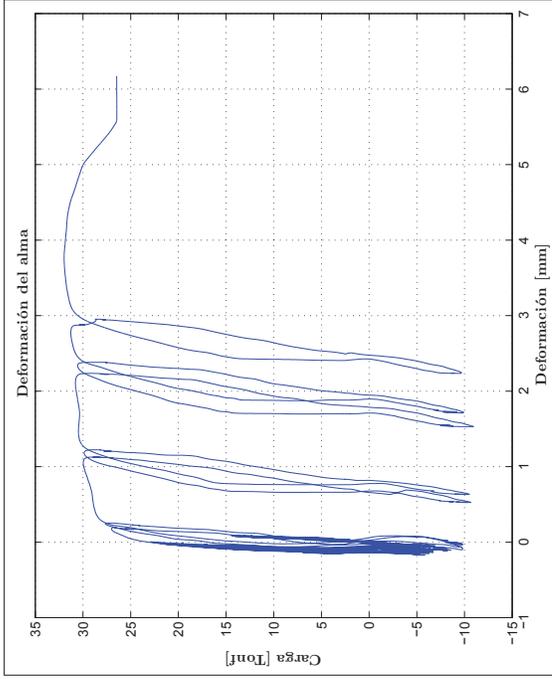


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM5-1

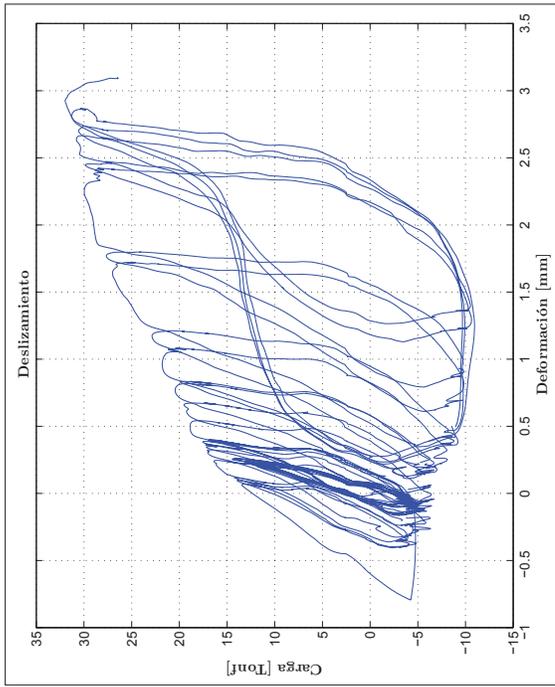


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM5-1

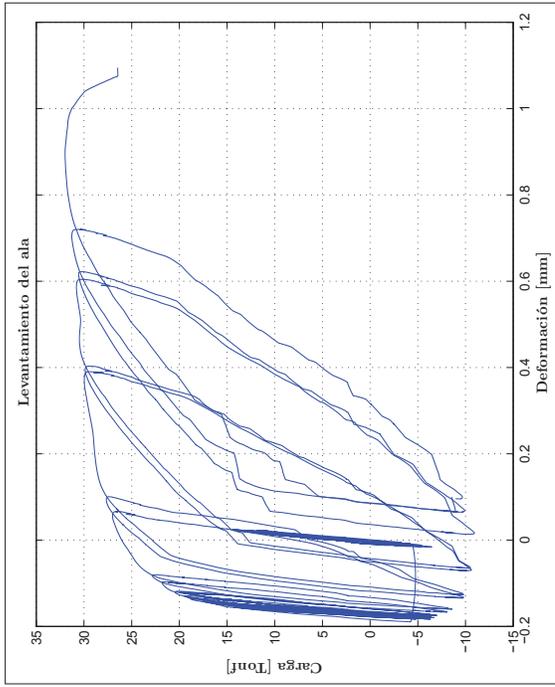


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM5-1

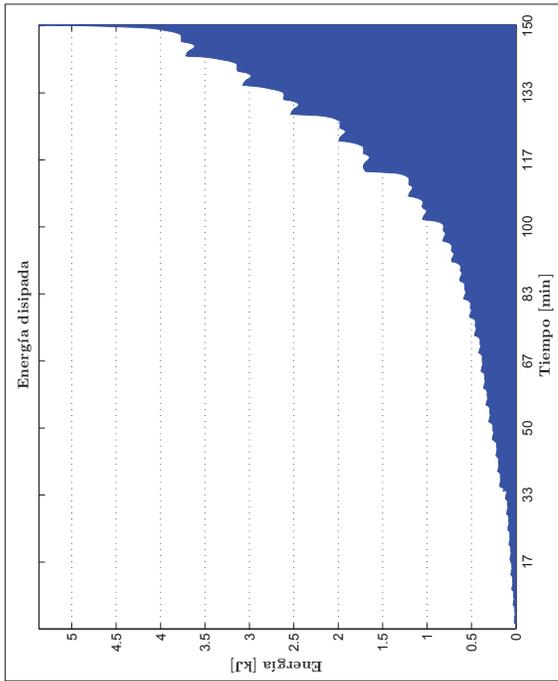


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM5-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo



Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf]
	Deformación máxima	[mm]
	Deformación mínima	[mm]
	Rango de deformación	[mm]
	Rigidez inicial	[tonf/mm]
	Rigidez plástica	[tonf/mm]
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm]
	Fuerza acumulada	[tonf]
	Def. plástica acumulada	[mm]
	Energía disipada	[tonf-mm]
		32.590
		10.190
		-0.114
		10.304
		33.697
		0.964
		97.025
		2930.822
		79.949
		697.899

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

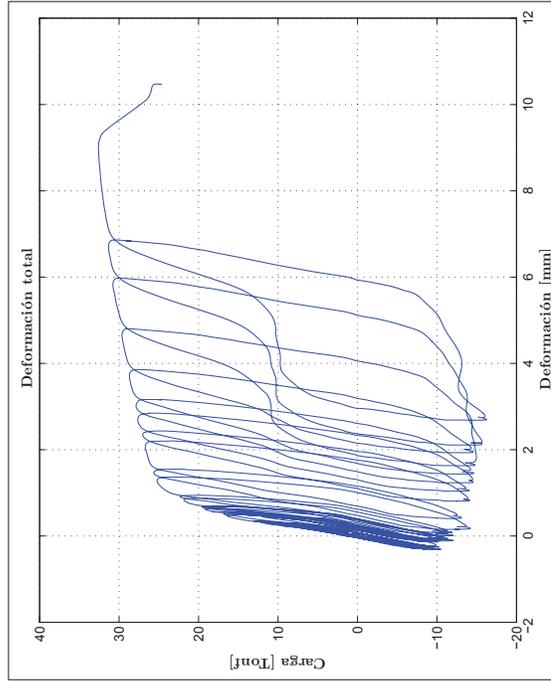


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM5-2

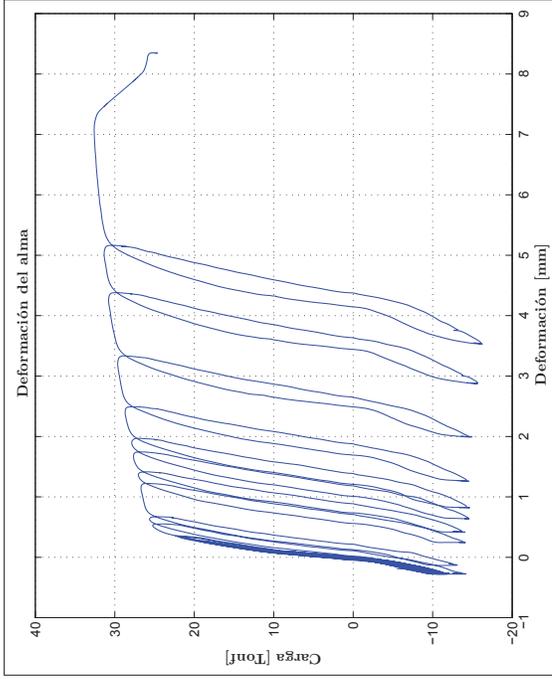


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM5-2

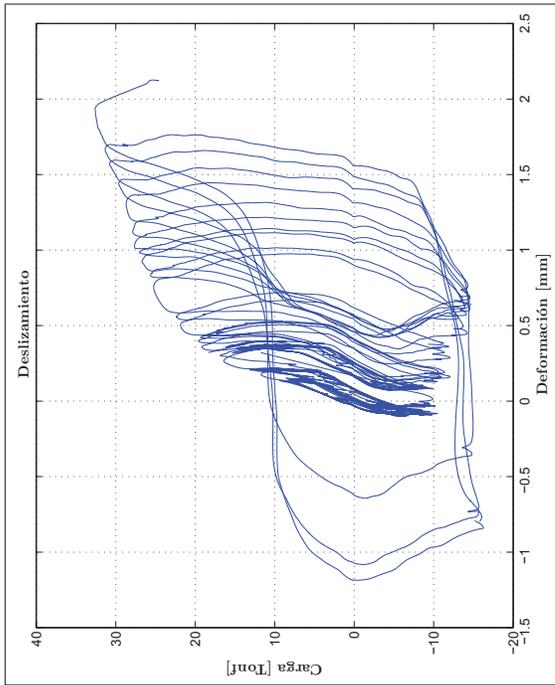


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM5-2

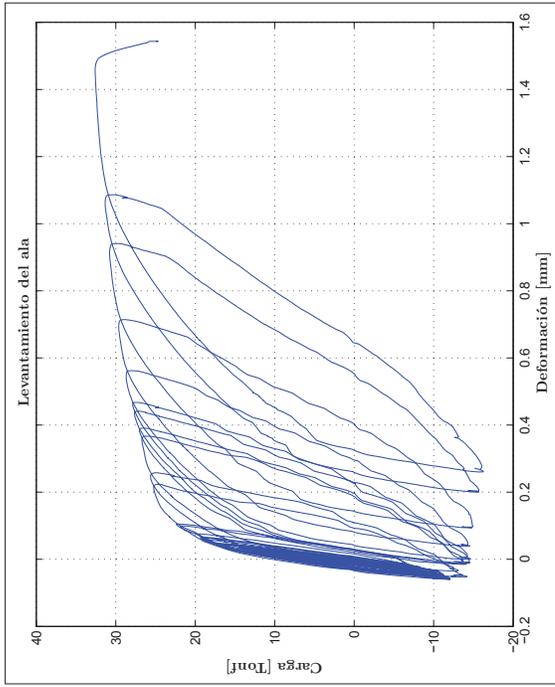


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM5-2

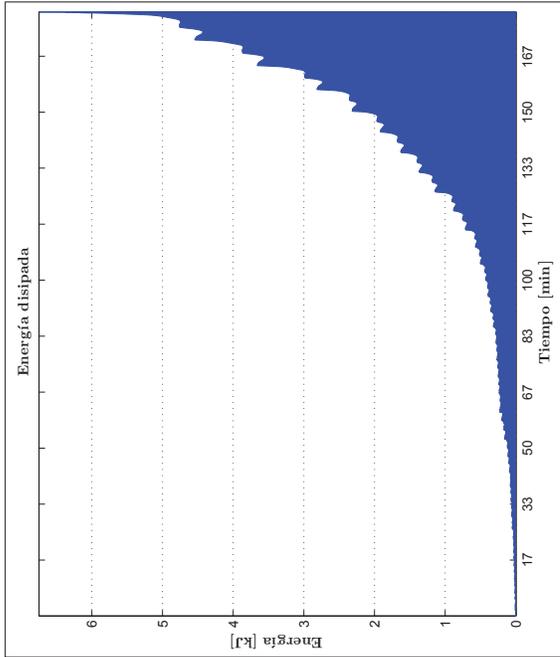


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM5-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

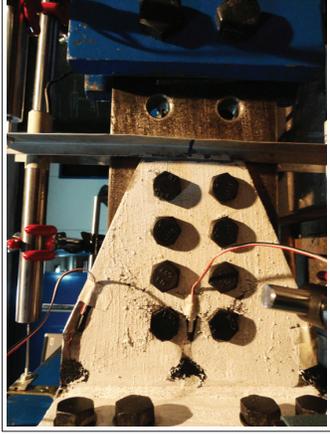


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• **GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN**

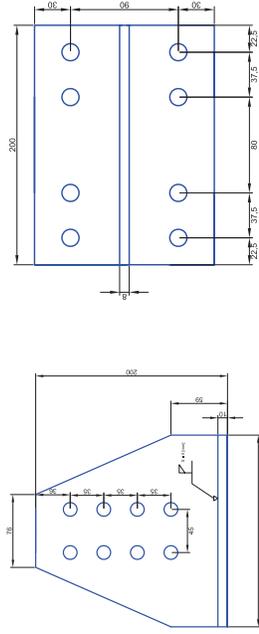


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• **PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES**

Componente	Tamaño	Cantidad	Calidad	Fluencia		Rotura	
				Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	376.47	470	501.96	
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11	
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A400	655 - 720	402.34	790 - 860	663.79	
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79	

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

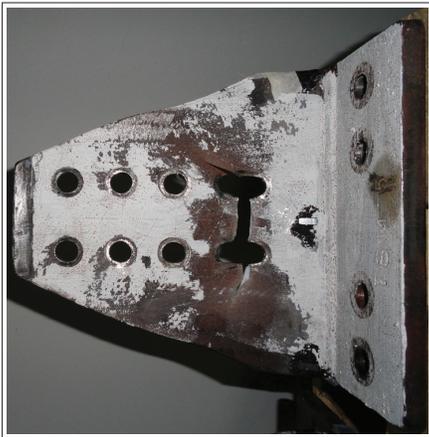


Figura 14: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	7.649	0.164	-1.816	-0.016	0.098	-0.010
2		9.067	0.144	-5.747	-0.133	0.066	-0.066
3		9.639	0.129	-6.384	-0.188	0.046	-0.095
4		9.883	0.106	-6.913	-0.217	0.020	-0.093
5		10.598	0.136	-6.280	-0.221	0.044	-0.137
6		10.955	0.111	-6.465	-0.226	0.017	-0.136
7	6	13.500	0.243	-7.018	-0.243	0.139	-0.140
8		13.671	0.243	-8.276	-0.281	0.143	-0.156
9		13.500	0.233	-8.617	-0.316	0.136	-0.197
10		13.436	0.229	-8.069	-0.313	0.133	-0.212
11		12.961	0.209	-7.914	-0.317	0.113	-0.228
12		12.632	0.196	-8.229	-0.326	0.099	-0.236
13	6	18.430	0.440	-8.411	-0.341	0.332	-0.241
14		18.634	0.408	-9.842	-0.413	0.306	-0.261
15		19.083	0.399	-10.748	-0.507	0.302	-0.326
16		18.759	0.342	-11.048	-0.590	0.253	-0.391
17		18.709	0.306	-11.018	-0.618	0.220	-0.443
18		19.177	0.315	-11.012	-0.638	0.229	-0.461
19	4	25.750	0.968	-10.990	-0.634	0.822	-0.463
20		25.554	1.036	-11.689	-0.746	0.909	-0.557
21		26.088	1.194	-12.006	-1.091	1.063	-0.892
22		25.646	1.180	-11.923	-1.296	1.055	-1.109
23	2	32.826	2.028	-12.090	-1.414	1.531	-1.220
24		34.094	2.263	-18.318	-2.374	1.605	-2.213
25	2	37.606	3.102	-18.596	-2.490	1.826	-2.380
26		38.288	3.316	-21.458	-2.684	1.796	-2.641
27	1	41.899	4.957	-23.501	-2.829	2.094	-2.779
28		43.879	6.446	-23.561	-2.606	2.354	-2.923
29	2	48.782	11.786	-25.204	-2.439	2.560	-2.957

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf]	48.782
	Deformación máxima	[mm]	12.630
	Deformación mínima	[mm]	-0.016
	Rango de deformación	[mm]	12.646
	Rigidez inicial	[tonf/mm]	52.359
	Rigidez plástica	[tonf/mm]	1.250
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm]	136.449
	Fuerza acumulada	[tonf]	2285.653
	Def. plástica acumulada	[mm]	118.434
	Energía disipada	[tonf-mm]	1423.436

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

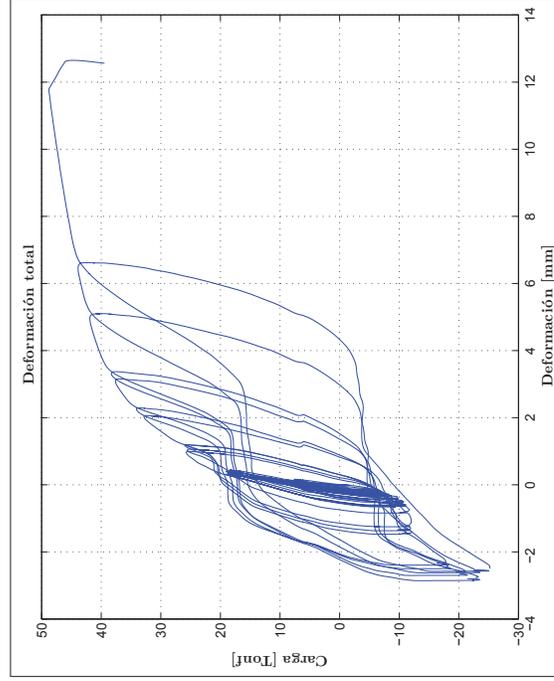


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM6-1

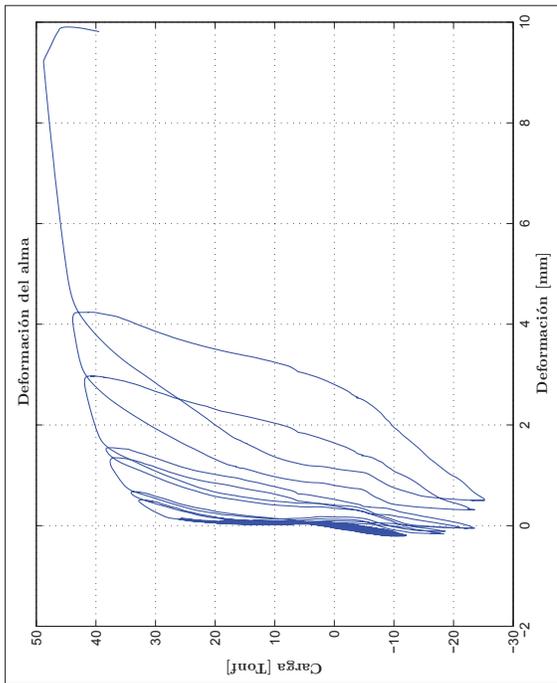


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM6-1

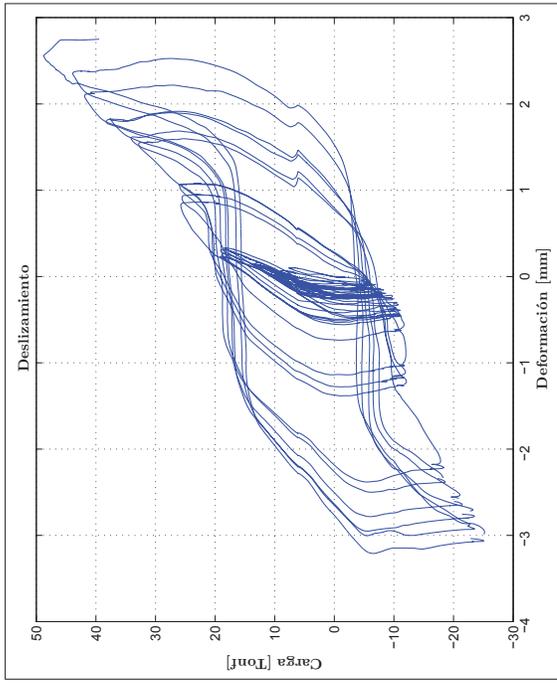


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM6-1

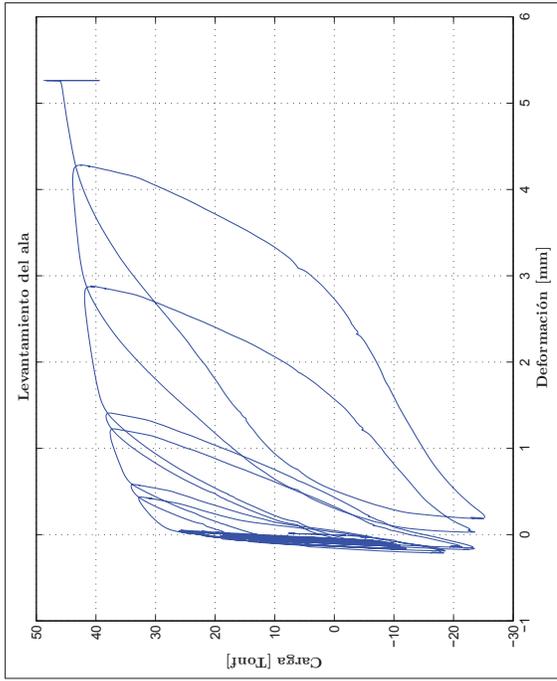


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM6-1

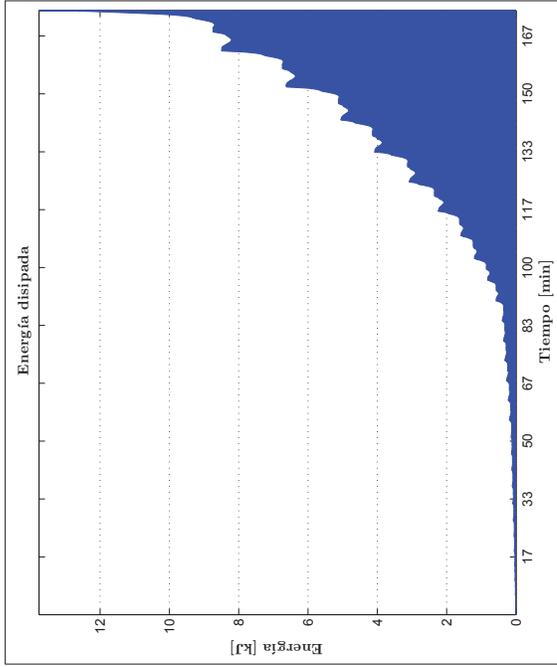


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM6-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

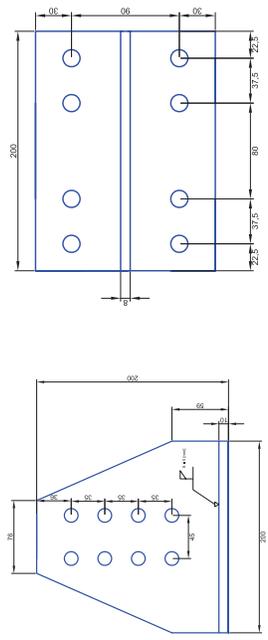


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño	Cantidad	Calidad	Fluencia		Rotura	
				Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	376.47	470	501.96	
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11	
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A400	655 - 720	402.34	790 - 860	663.79	
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79	

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

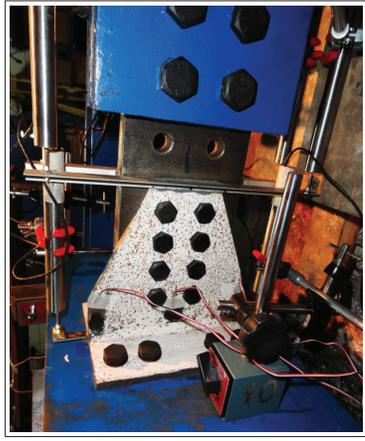


Figura 12: Fotografía del ensayo

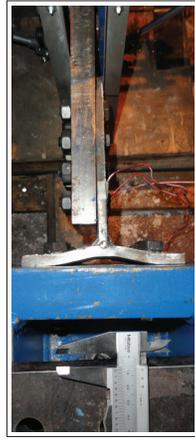


Figura 13: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	6.703	0.208	-5.495	-0.157	0.174	-0.064
2		6.790	0.206	-6.412	-0.183	0.173	-0.076
3		7.257	0.216	-5.761	-0.170	0.182	-0.073
4		6.698	0.195	-6.572	-0.194	0.162	-0.081
5		6.394	0.183	-6.176	-0.184	0.150	-0.073
6		9.593	0.286	-6.344	-0.191	0.235	-0.075
7	6	9.730	0.290	-5.890	-0.179	0.238	-0.070
8		9.519	0.285	-5.696	-0.176	0.234	-0.069
9		9.929	0.294	-6.193	-0.191	0.242	-0.076
10		9.381	0.282	-6.443	-0.194	0.233	-0.076
11		9.788	0.291	-6.234	-0.191	0.240	-0.074
12		13.120	0.386	-6.125	-0.195	0.289	-0.075
13	6	13.437	0.399	-6.660	-0.195	0.294	-0.072
14		13.604	0.400	-7.318	-0.215	0.295	-0.081
15		12.949	0.386	-5.674	-0.175	0.291	-0.062
16		13.471	0.398	-7.416	-0.217	0.296	-0.078
17		13.660	0.402	-7.051	-0.214	0.296	-0.078
18		18.934	0.563	-7.356	-0.215	0.328	-0.076
19	4	19.301	0.594	-9.410	-0.227	0.338	-0.041
20		19.231	0.596	-10.391	-0.242	0.341	-0.050
21		19.202	0.600	-9.774	-0.220	0.343	-0.048
22		22.961	0.761	-9.737	-0.220	0.375	-0.049
23	2	23.058	0.783	-12.876	-0.293	0.386	-0.052
24		26.087	1.010	-12.725	-0.283	0.387	-0.044
25	2	26.816	1.137	-13.513	-0.309	0.426	-0.086
26		30.228	1.745	-12.964	-0.193	0.489	-0.010
27	2	30.567	1.889	-12.831	-0.021	0.551	0.066
28		33.125	2.628	-13.677	-0.109	0.627	-0.013
29	2	33.597	2.879	-13.531	0.161	0.700	0.036
30		35.937	4.187	-13.283	0.291	0.893	0.056
31	2	36.260	4.602	-12.614	1.170	0.975	0.126
32		38.880	6.864	-12.972	1.229	1.150	-0.067
33	2	39.813	8.003	-18.690	-0.006	1.330	-1.995
34		43.853	14.155	-15.275	1.569	1.789	-1.862

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf]	43.853
	Deformación máxima	[mm]	12.970
	Deformación mínima	[mm]	-0.157
	Rango de deformación	[mm]	13.127
	Rigidez inicial	[tonf/mm]	33.490
	Rigidez plástica	[tonf/mm]	0.917
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm]	115.292
	Fuerza acumulada	[tonf]	2287.453
	Def. plástica acumulada	[mm]	93.818
	Energía disipada	[tonf-mm]	1074.665

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

Modo de falla: Fractura de pernos a tracción

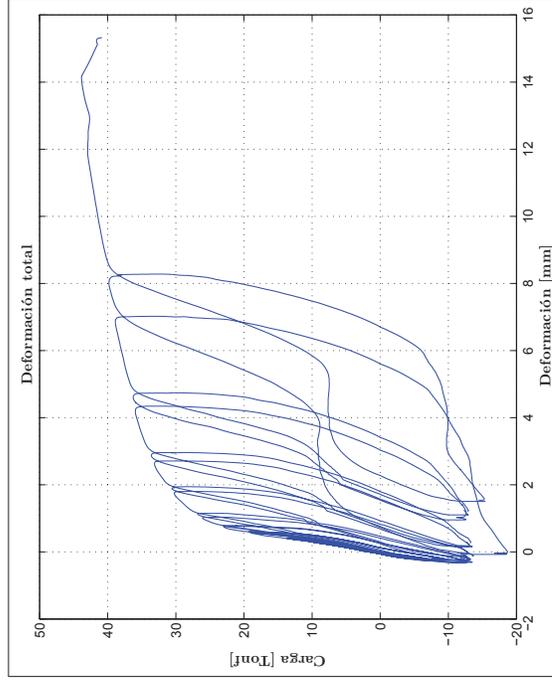


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM6-2

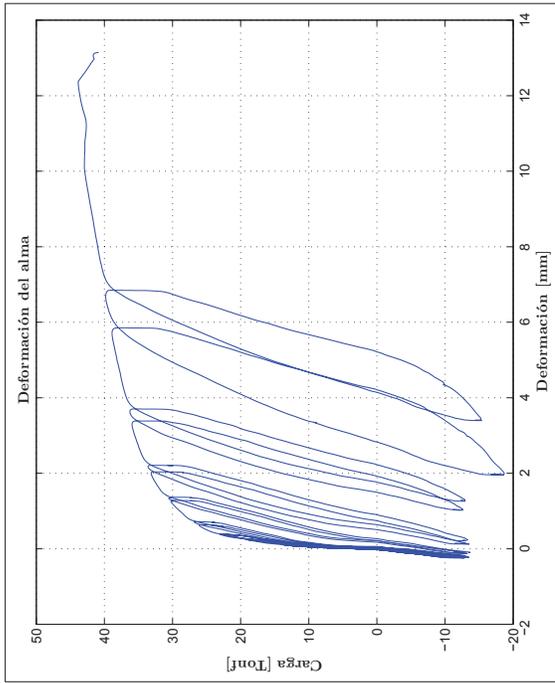


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM6-2

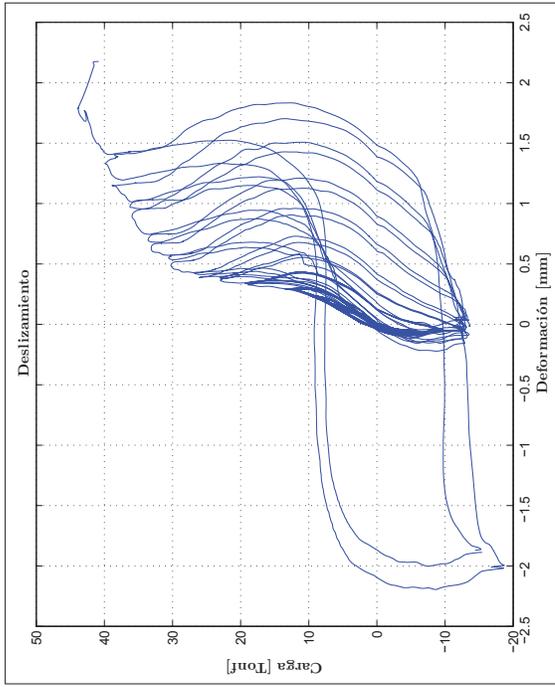


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM6-2

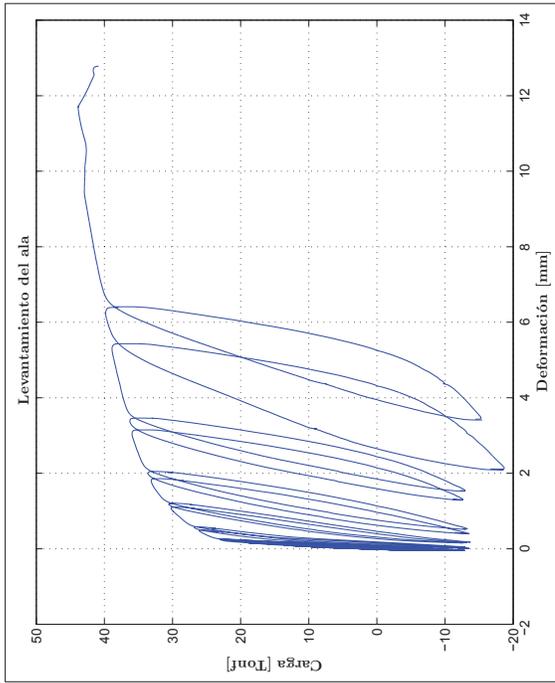


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM6-2

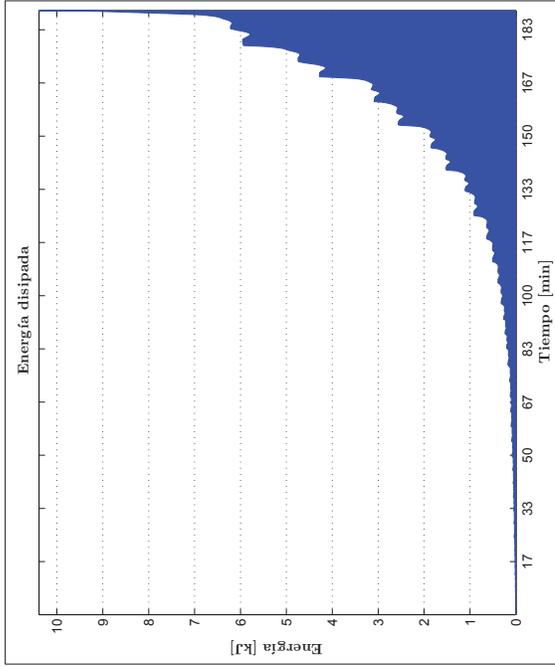


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM6-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

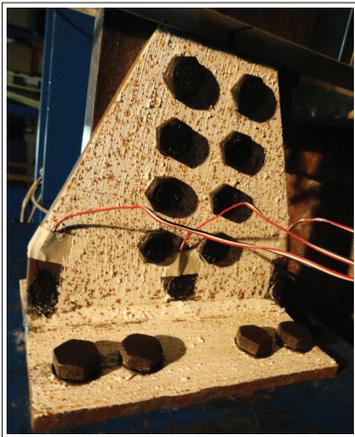


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo



Figura 14: Fotografía del ensayo

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf] 48.369
	Deformación máxima	[mm] 11.580
	Deformación mínima	[mm] -0.196
	Rango de deformación	[mm] 11.776
	Rigidez inicial	[tonf/mm] 43.168
	Rigidez plástica	[tonf/mm] 1.078
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm] 126.570
	Fuerza acumulada	[tonf] 2575.709
	Def. plástica acumulada	[mm] 105.280
	Energía disipada	[tonf-mm] 1370.210

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura del área neta

• GRÁFICOS

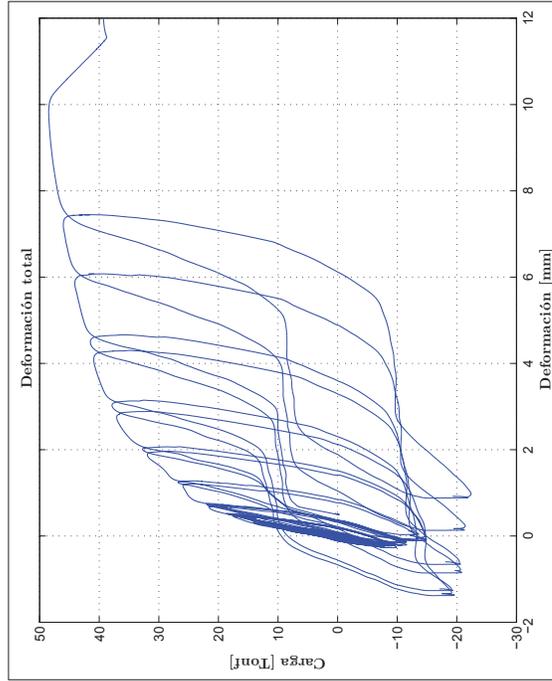


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM7-1

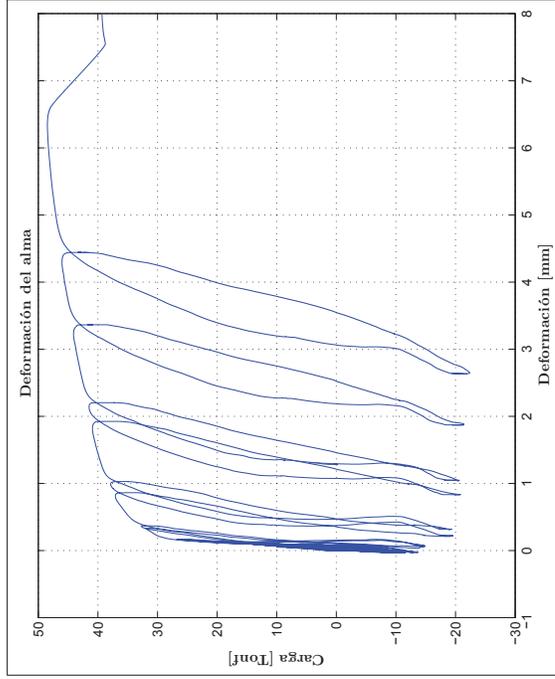


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM7-1

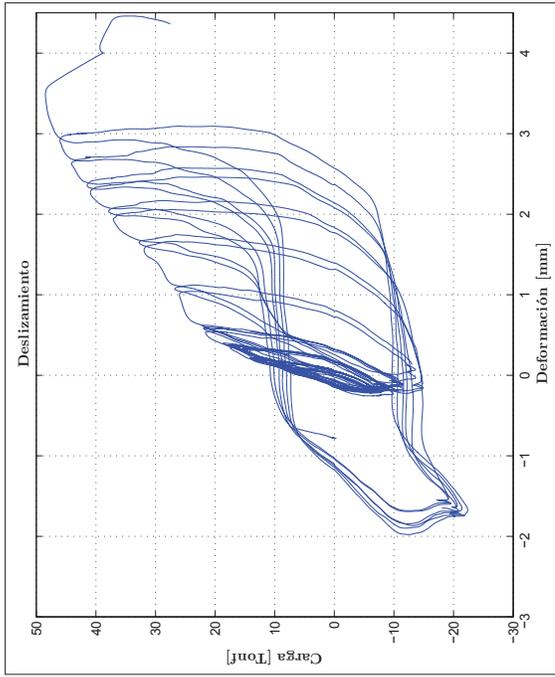


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM7-1

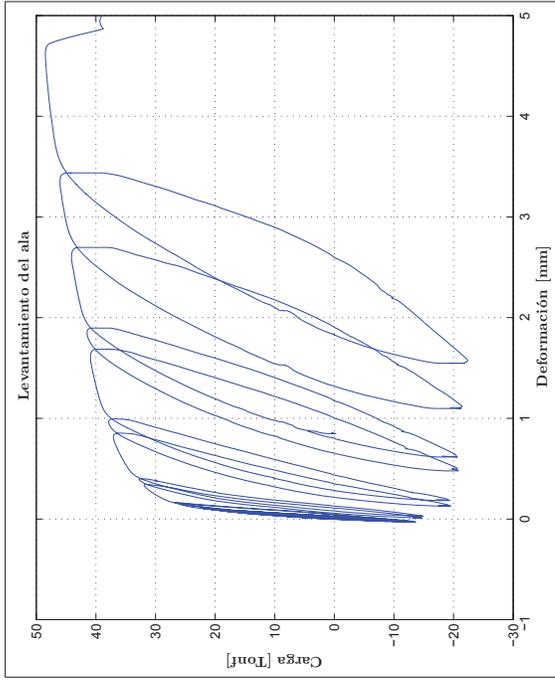


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM7-1

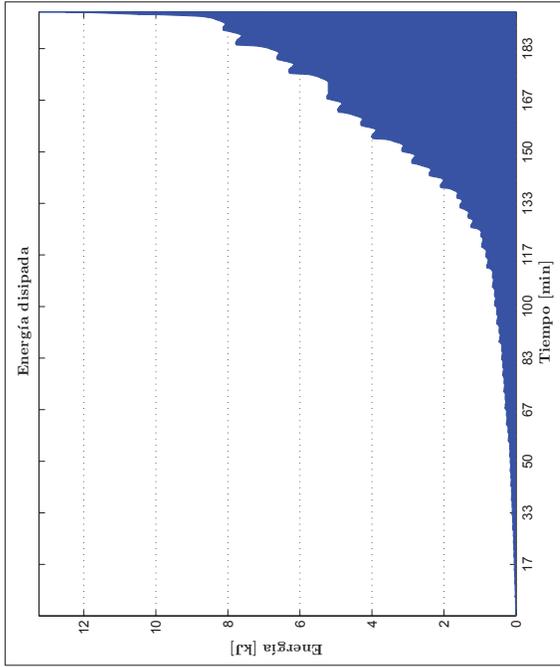


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM7-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo



Figura 12: Fotografía del ensayo

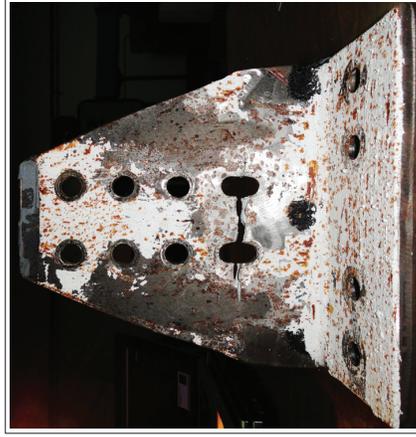


Figura 13: Fotografía del ensayo

TSM7 - 2
8 de octubre de 2012

RESUMEN
RESULTADOS
EXPERIMENTALES

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

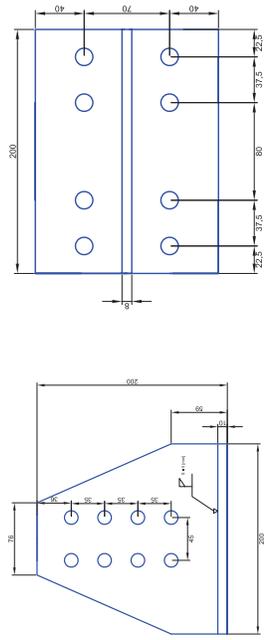


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	376.47	470	501.96
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A490	655 - 720	402.34	790 - 860	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

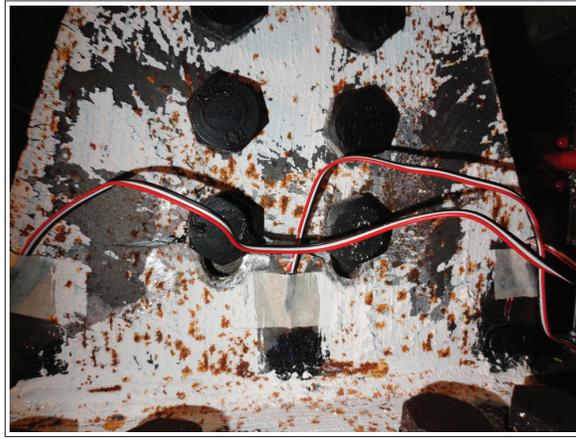


Figura 14: Fotografía del ensayo



Figura 15: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	8.362	0.141	-5.801	-0.134	0.091	-0.046
2		9.054	0.168	-5.455	-0.167	0.114	-0.082
3		8.666	0.135	-5.082	-0.175	0.104	-0.086
4		8.724	0.154	-5.271	-0.169	0.103	-0.085
5		8.837	0.157	-5.902	-0.183	0.106	-0.091
6		11.704	0.228	-6.160	-0.190	0.159	-0.095
7	6	12.354	0.245	-7.759	-0.227	0.174	-0.098
8		12.127	0.238	-7.240	-0.213	0.170	-0.094
9		12.429	0.241	-7.142	-0.213	0.173	-0.093
10		12.533	0.241	-7.940	-0.227	0.175	-0.094
11		12.489	0.239	-8.458	-0.239	0.173	-0.098
12		16.897	0.415	-7.969	-0.237	0.298	-0.101
13	6	17.411	0.435	-9.313	-0.193	0.310	-0.023
14		17.728	0.440	-9.146	-0.181	0.308	-0.010
15		17.909	0.439	-9.275	-0.204	0.301	-0.019
16		17.950	0.437	-10.124	-0.204	0.301	-0.025
17		17.519	0.428	-9.097	-0.198	0.300	-0.029
18		20.994	0.581	-9.111	-0.192	0.399	-0.024
19	4	21.744	0.619	-10.508	-0.180	0.424	0.016
20		22.351	0.653	-10.508	-0.153	0.444	0.046
21		22.546	0.664	-10.345	-0.142	0.454	0.058
22		27.025	0.942	-10.345	-0.128	0.648	0.069
23	2	27.418	0.981	-13.134	-0.138	0.693	0.157
24		32.970	1.422	-13.507	-0.119	0.925	0.175
25	2	34.059	1.644	-16.844	-2.409	1.103	-2.064
26		36.673	2.225	-17.597	-2.454	1.398	-2.084
27	2	38.912	3.031	-19.856	-2.363	1.656	-2.069
28		40.989	3.796	-21.878	-2.217	1.853	-2.192
29	2	42.888	4.719	-21.552	-1.666	2.035	-2.040
30		44.971	5.911	-23.294	-1.294	2.305	-2.146
31	2	46.857	7.170	-27.210	-1.128	2.554	-2.619
32		48.977	9.127	-25.826	-0.175	2.935	-2.788
33	1	53.800	14.139	-27.520	0.773	3.687	-2.986

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf]	[mm]
	Deformación máxima	[mm]	53.800
	Deformación mínima	[mm]	16.530
	Rango de deformación	[mm]	-0.134
	Rigidez inicial	[tonf/mm]	16.664
	Rigidez plástica	[tonf/mm]	51.525
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm]	1.772
	Fuerza acumulada	[tonf]	160.258
	Def. plástica acumulada	[mm]	2731.228
	Energía disipada	[tonf·mm]	136.231
		[tonf·mm]	1729.346

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

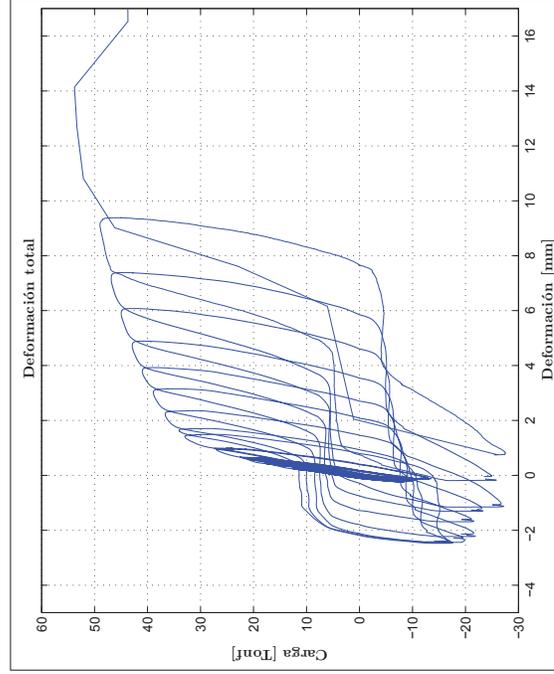


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM7-2

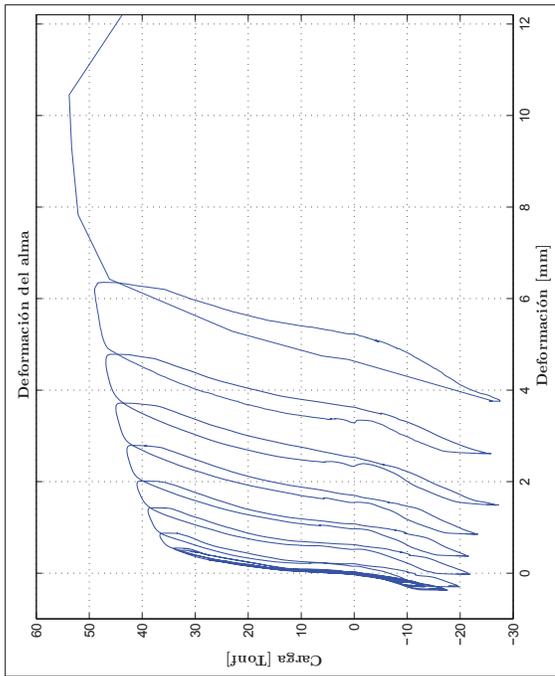


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM7-2

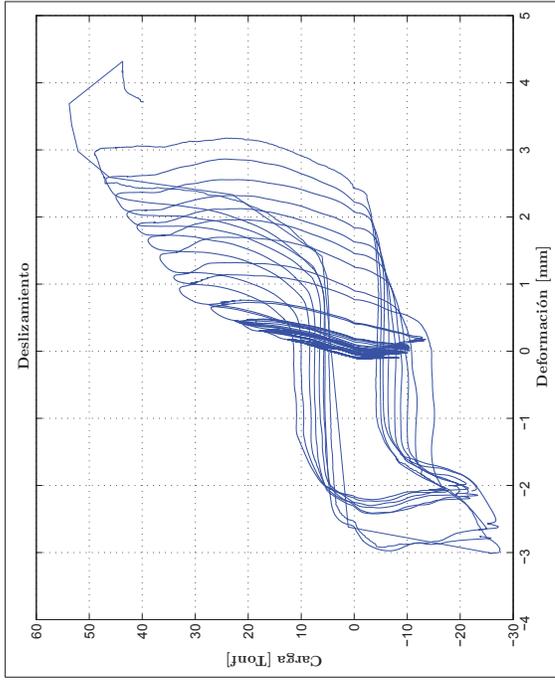


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM7-2

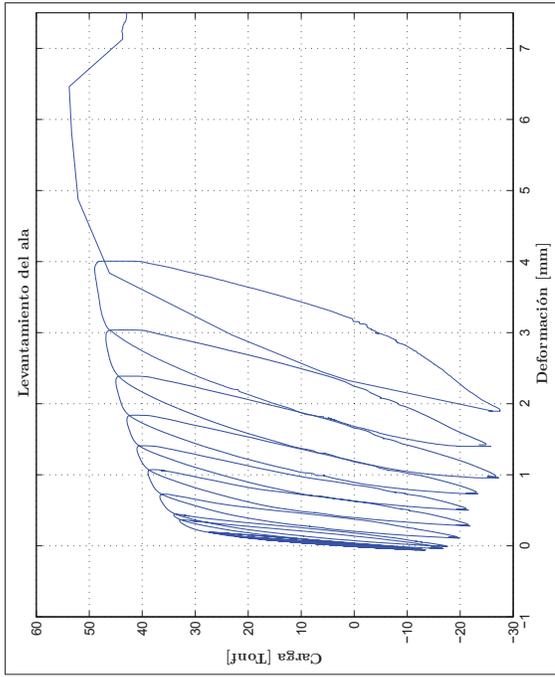


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM7-2

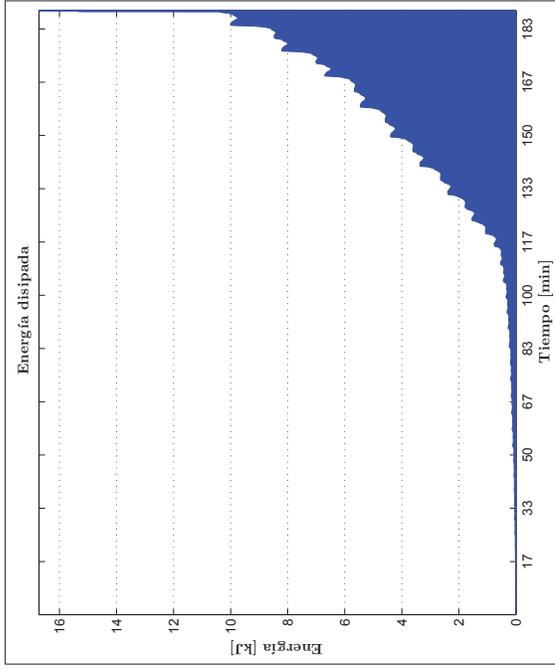


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM7-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo



Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

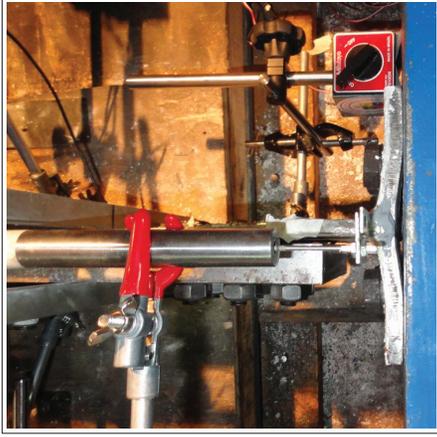


Figura 14: Fotografía del ensayo

• **GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN**

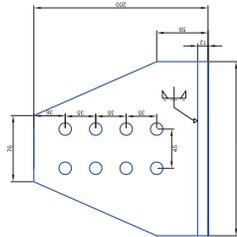


Figura 1: Vista frontal del alma

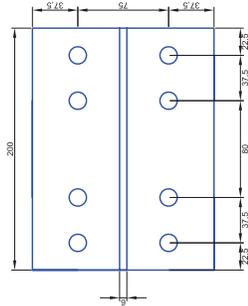


Figura 2: Vista frontal del ala

• **PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES**

Componente	Tamaño [in]	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	294.31	470	400.67
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

• **PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL**

Paso de carga	N° ciclos	Tracción			Compresión			Deslizamiento		
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	
1	6	15.439	0.473	-2.275	-0.016	0.341	0.007			
2		0.550	0.026	-0.031	0.027	0.027	0.031			
3		15.571	0.469	-0.934	0.005	0.337	0.011			
4		0.846	0.018	-0.143	0.020	0.016	0.023			
5		15.924	0.480	-1.095	0.002	0.341	0.009			
6		15.439	0.468	-2.396	-0.031	0.336	-0.015			
7	6	16.003	0.491	-1.130	-0.005	0.349	-0.001			
8		0.766	0.014	-0.137	0.018	0.010	0.019			
9		15.620	0.476	-1.083	-0.002	0.341	0.003			
10		19.514	0.616	-1.118	-0.004	0.450	0.001			
11		19.933	0.632	-2.364	-0.024	0.462	-0.013			
12		19.943	0.632	-2.435	-0.013	0.462	0.000			
13	6	0.266	0.016	-0.816	0.022	0.012	0.026			
14		19.542	0.626	-1.585	0.005	0.461	0.011			
15		19.557	0.622	-2.485	-0.014	0.460	0.000			
16		0.134	0.041	-0.056	0.042	0.085	0.036			
17		20.578	0.645	-1.247	0.011	0.473	0.016			
18		0.381	0.026	-0.208	0.033	0.022	0.031			
19	4	24.006	0.909	-1.992	-0.010	0.731	-0.003			
20		24.603	0.931	-4.892	-0.005	0.753	0.007			
21		25.211	0.964	-4.610	0.079	0.786	0.103			
22		24.738	0.965	-4.544	0.120	0.794	0.160			
23	2	24.946	0.972	-5.601	0.086	0.805	0.143			
24		25.643	0.987	-4.698	0.120	0.817	0.158			
25	2	28.377	1.308	-4.803	0.112	1.109	0.152			
26		28.900	1.467	-6.464	0.280	1.276	0.370			
27	2	29.042	1.642	-13.448	-0.067	1.553	-0.486			
28		29.454	1.675	-6.485	0.339	1.567	0.374			
29	2	33.038	2.074	-6.344	0.413	1.866	0.455			
30		33.710	2.200	-7.878	0.558	2.067	0.657			
31	2	36.677	2.868	-7.553	0.654	2.375	0.749			
32		37.127	3.108	-9.096	0.752	2.385	0.592			
33	2	39.541	4.525	-9.149	0.926	2.690	0.642			
34		39.808	4.978	-11.803	0.366	2.810	-0.742			
35	2	41.502	6.486	-12.036	0.402	3.044	-0.974			
36		43.606	9.473	-13.301	1.096	3.227	-1.207			

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción	[tonf] 43.006
	Deformación máxima	[mm] 12.470
	Deformación mínima	[mm] -0.016
	Rango de deformación	[mm] 12.486
	Rigidez inicial	[tonf/mm] 36.237
	Rigidez plástica	[tonf/mm] 1.040
Propiedades energía disipada	Def. acumulada	[mm] 97.891
	Fuerza acumulada	[tonf] 2196.091
	Def. plástica acumulada	[mm] 79.657
	Energía disipada	[tonf-mm] 947.786

Figura 5: Resumen de resultados

Modo de falla: Fractura de pernos a tracción

• GRÁFICOS

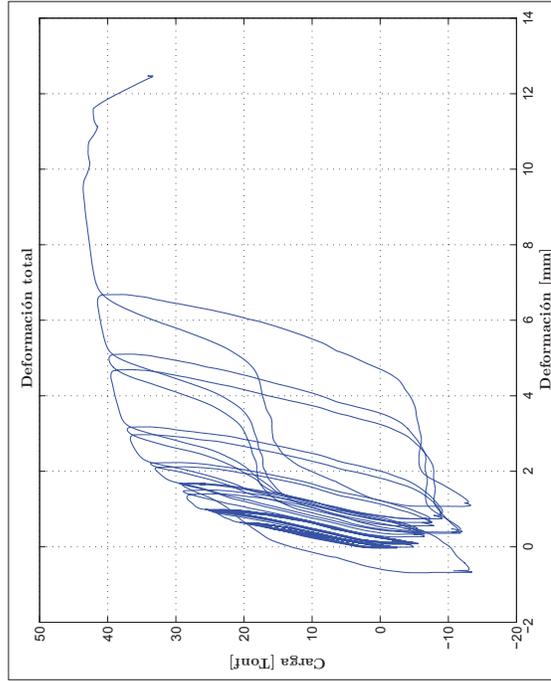


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM&S-1

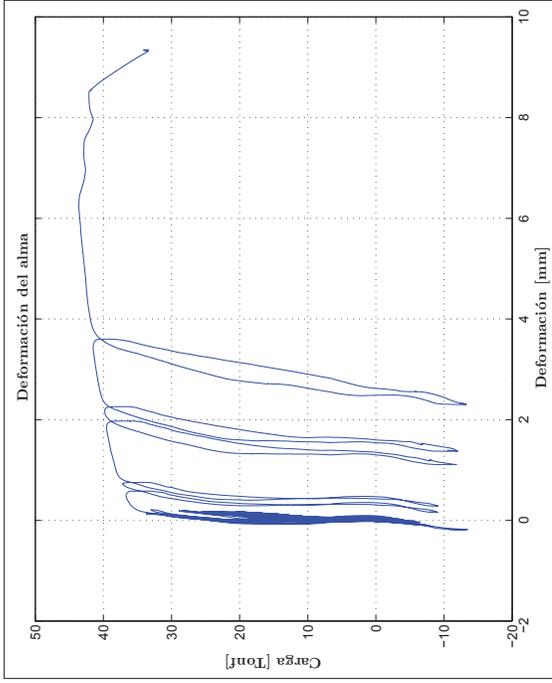


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM&S-1

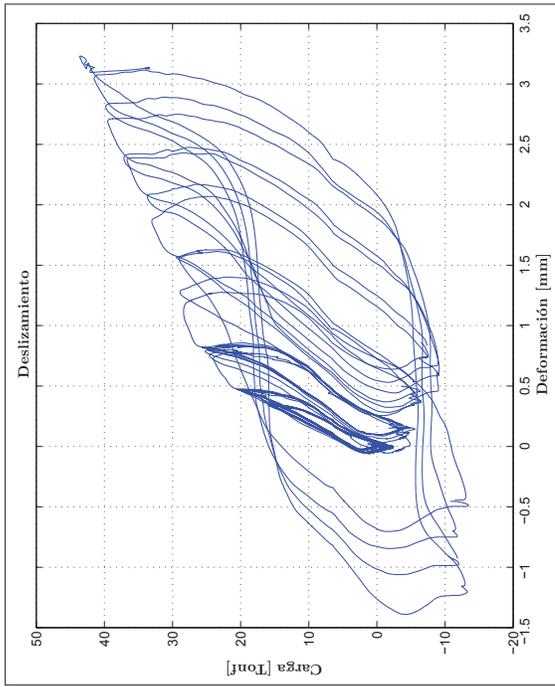


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM8-1

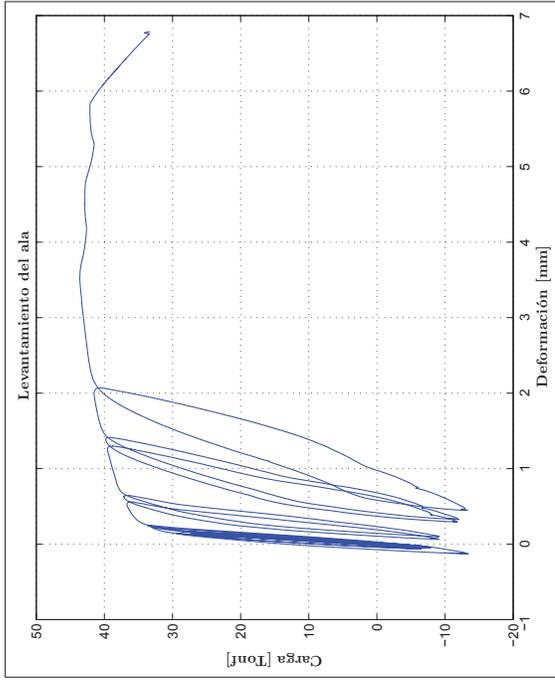


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM8-1

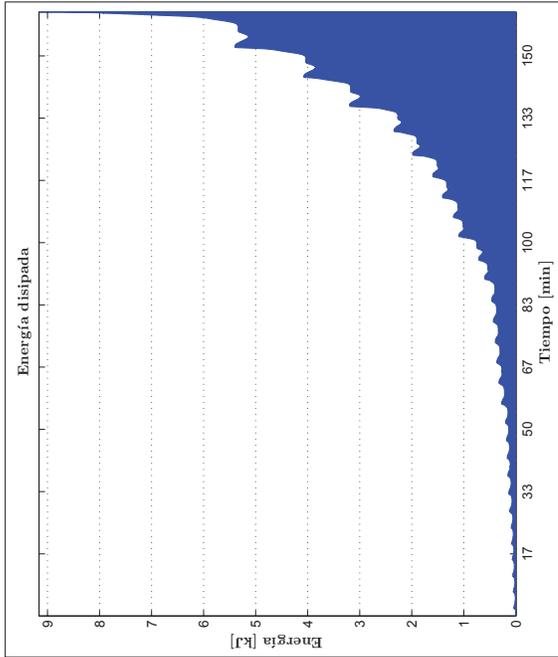


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM8-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

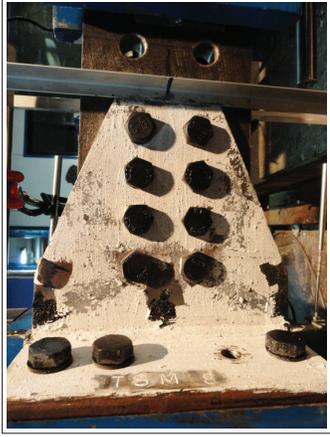


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

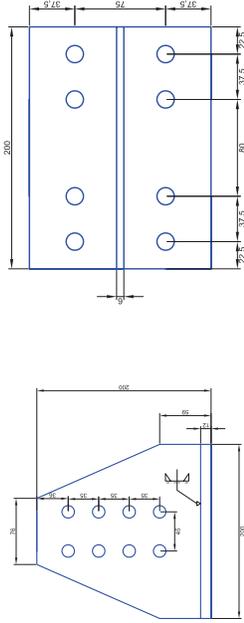


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño	Cantidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	294.31	470	400.67
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 3.7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles



Figura 14: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	10.137	0.236	-5.333	-0.206	0.108	-0.151
2		9.924	0.231	-5.534	-0.217	0.104	-0.156
3		9.231	0.214	-5.057	-0.221	0.096	-0.159
4		9.386	0.214	-6.175	-0.228	0.095	-0.150
5		9.550	0.215	-5.138	-0.212	0.093	-0.154
6		13.469	0.304	-6.841	-0.239	0.116	-0.146
7	6	13.796	0.316	-6.584	-0.235	0.119	-0.147
8		14.351	0.329	-6.738	-0.227	0.126	-0.140
9		14.302	0.336	-6.655	-0.224	0.133	-0.142
10		14.143	0.334	-6.997	-0.233	0.133	-0.140
11		14.655	0.339	-7.148	-0.240	0.131	-0.141
12		20.234	0.643	-7.792	-0.021	0.318	0.092
13	6	19.884	0.675	-7.644	0.007	0.361	0.117
14		20.103	0.684	-10.003	-0.114	0.368	0.054
15		20.215	0.686	-10.468	-0.130	0.370	0.055
16		20.256	0.693	-10.074	-0.103	0.379	0.078
17		20.580	0.704	-10.614	-0.118	0.388	0.077
18		24.141	0.981	-12.951	-0.095	0.545	0.184
19	4	25.272	1.112	-14.013	-0.102	0.661	0.179
20		25.870	1.175	-13.674	-0.072	0.710	0.160
21		25.035	1.171	-12.774	0.077	0.730	0.290
22		30.086	1.825	-15.112	-0.046	1.031	0.065
23	2	30.535	2.083	-14.868	-0.198	1.126	-0.195
24		32.851	3.250	-18.607	-0.341	1.430	-0.828
25	2	35.024	5.201	-18.516	0.656	1.999	-0.882
26		35.927	7.868	-19.089	2.210	2.821	-0.172
27	1	36.159	8.738	-0.339	12.960	2.905	6.541

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción [tonf]		36.159
	Deformación máxima [mm]		8.738
	Deformación mínima [mm]		-0.206
	Rango de deformación [mm]		8.944
Propiedades energía disipada	Rigidez inicial [tonf/mm]		34.967
	Rigidez plástica [tonf/mm]		0.862
	Def. acumulada [mm]		88.126
	Fuerza acumulada [tonf]		2110.920
	Def. plástica acumulada [mm]		79.163
	Energía disipada [tonf-mm]		754.280

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

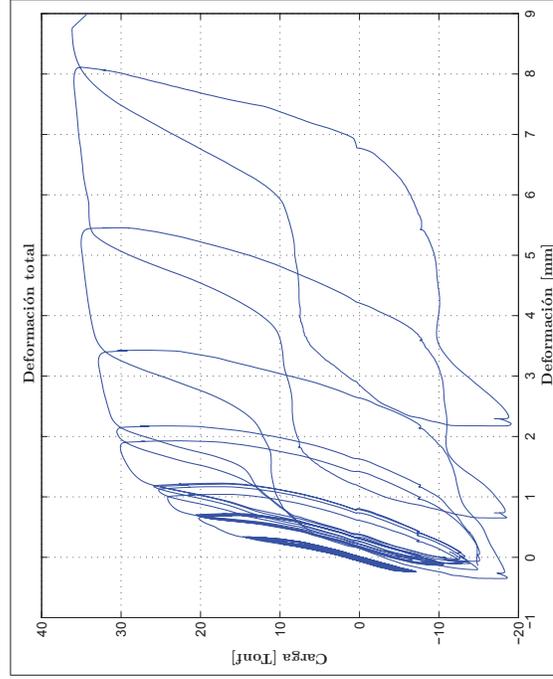


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM8-2

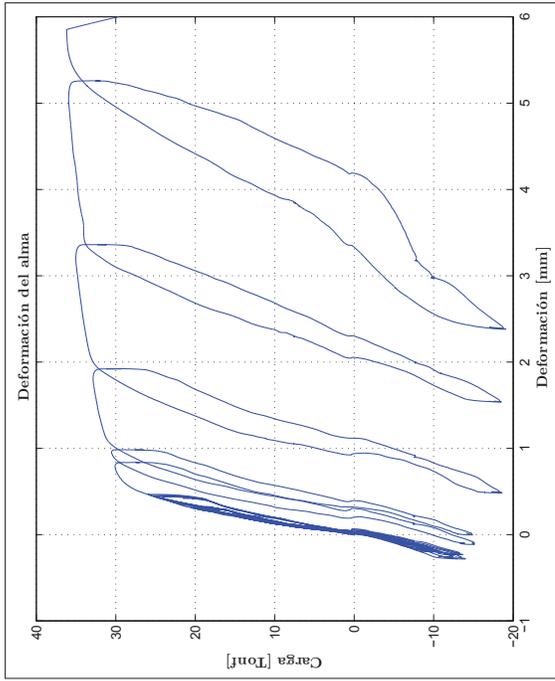


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM8-2

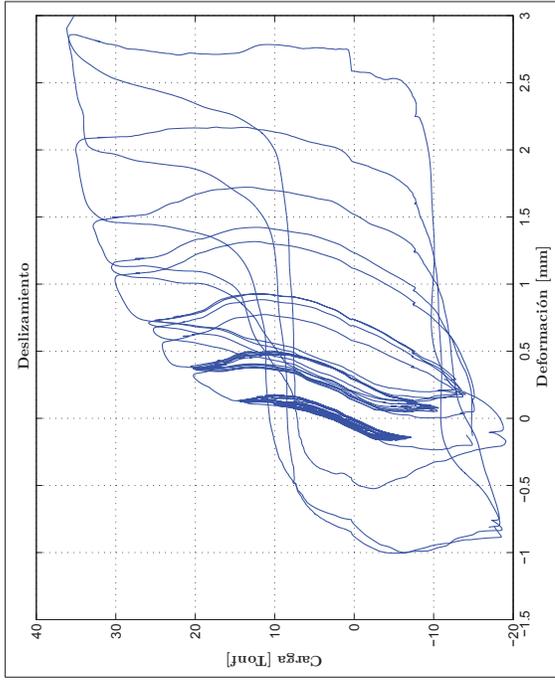


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM8-2

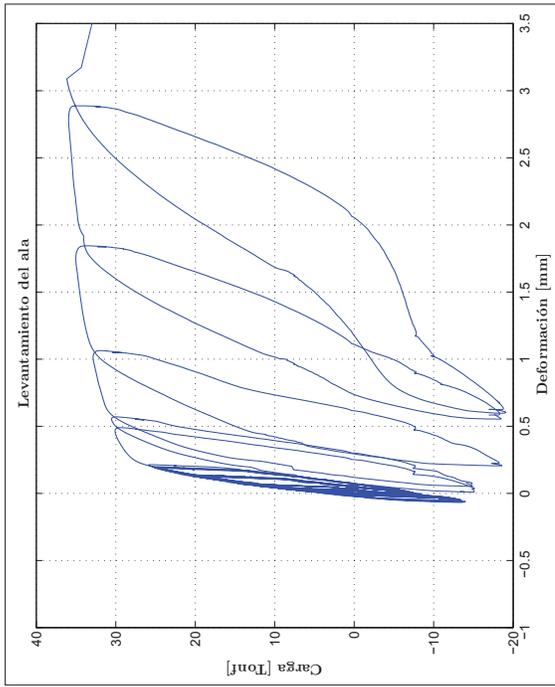


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM8-2

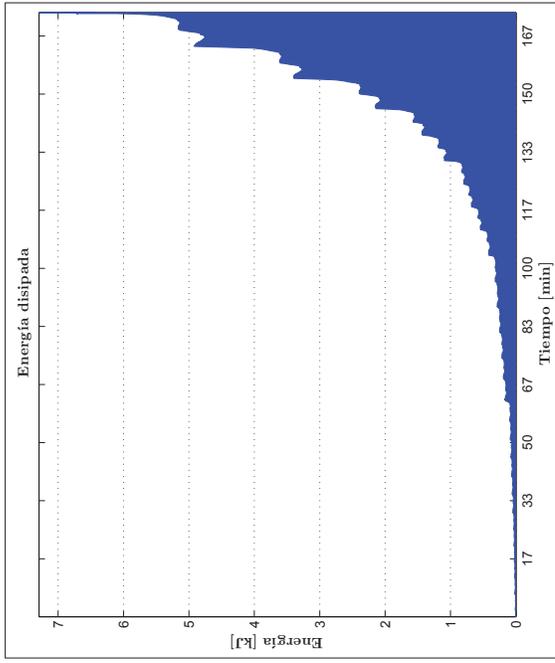


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM8-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

TSM9 - 1

4 de agosto de 2012

RESUMEN RESULTADOS EXPERIMENTALES

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

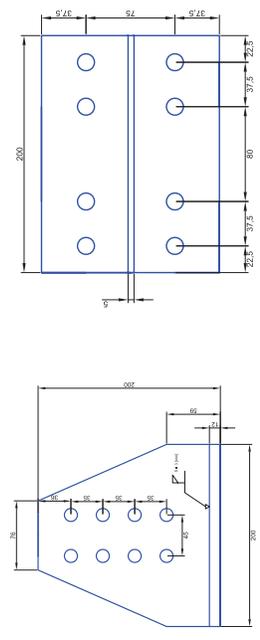


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	377.07	470	477.64
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles

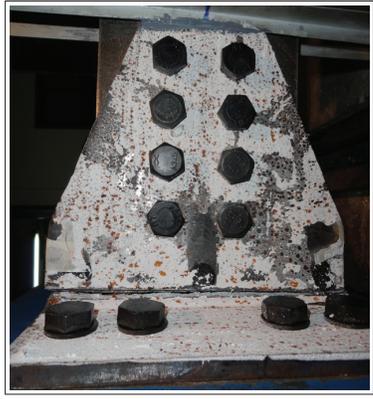


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	10.024	0.249	-6.055	-0.173	0.149	-0.075
2	10	10.074	0.245	-6.602	-0.202	0.145	-0.094
3	10	10.318	0.248	-6.371	-0.200	0.146	-0.095
4	9	9.969	0.236	-6.941	-0.218	0.142	-0.107
5	9	9.708	0.226	-6.661	-0.210	0.132	-0.101
6	14	14.126	0.381	-8.808	-0.291	0.231	-0.158
7	6	14.517	0.398	-8.642	-0.277	0.248	-0.147
8	14	14.940	0.418	-8.482	-0.267	0.260	-0.142
9	14	14.601	0.409	-8.483	-0.265	0.260	-0.139
10	14	14.923	0.419	-8.496	-0.270	0.264	-0.147
11	11	14.434	0.405	-8.268	-0.272	0.258	-0.149
12	18	18.206	0.610	-8.830	-0.274	0.400	-0.144
13	6	18.766	0.676	-10.316	-0.251	0.465	-0.105
14	19	19.349	0.720	-10.146	-0.222	0.505	-0.098
15	18	18.821	0.717	-10.132	-0.197	0.512	-0.070
16	18	18.595	0.706	-10.690	-0.205	0.504	-0.080
17	18	18.822	0.716	-10.512	-0.207	0.511	-0.078
18	22	22.894	1.032	-10.053	-0.204	0.742	-0.095
19	4	23.545	1.138	-12.560	-0.211	0.840	-0.065
20	23	23.664	1.190	-12.828	-0.188	0.892	-0.050
21	23	23.979	1.240	-12.910	-0.172	0.929	-0.036
22	27	27.271	2.297	-12.886	-0.138	1.441	-0.016
23	2	27.717	2.545	-14.225	0.367	1.553	0.122
24	29	29.846	4.021	-14.382	0.578	1.846	0.171
25	2	29.779	4.374	-15.065	0.796	1.880	-0.662
26	30	30.719	5.569	-15.490	0.245	2.212	-1.475
27	0.5	31.032	6.519	-16.524	0.862	2.327	-1.765

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción [tonf]	[mm]	31.032
	Deformación máxima [mm]	[tonf]	8.272
	Deformación mínima [mm]	[mm]	-0.173
	Rango de deformación [mm]	[mm]	8.445
	Rigidez inicial [tonf/mm]	[tonf/mm]	38.084
	Rigidez plástica [tonf/mm]	[mm]	0.919
Propiedades energía disipada	Def. acumulada [mm]	[tonf]	82.340
	Fuerza acumulada [mm]	[tonf]	1906.918
	Def. plástica acumulada [tonf-mm]	[mm]	64.223
	Energía disipada [tonf-mm]	[tonf-mm]	579.426

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

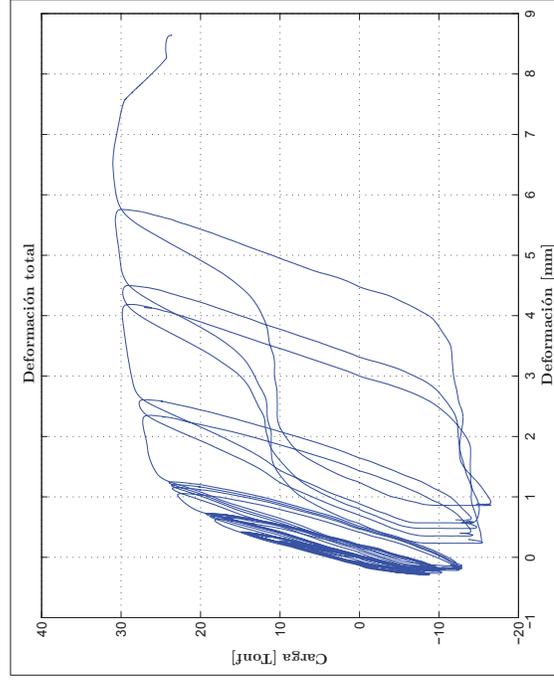


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM9-1

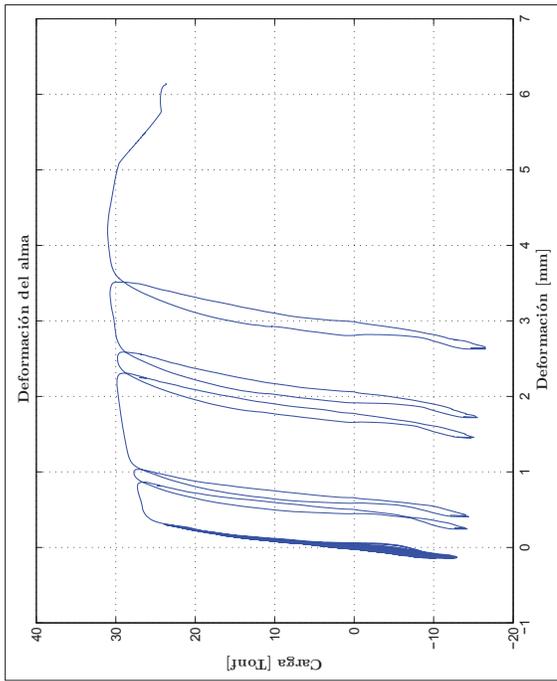


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM9-1

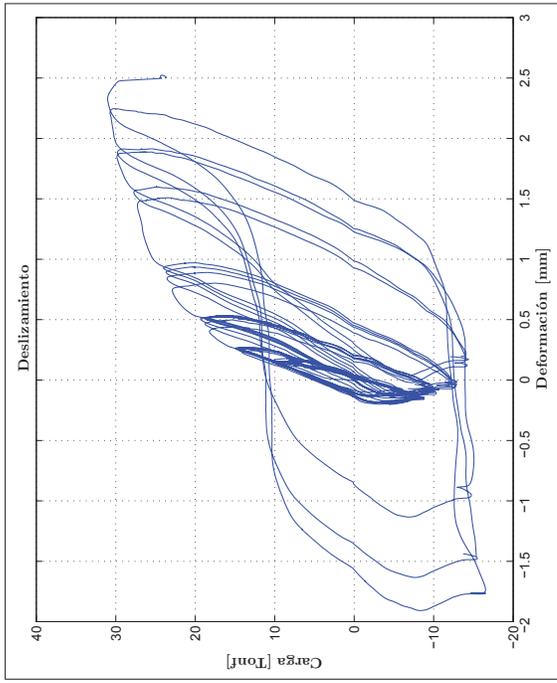


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM9-1

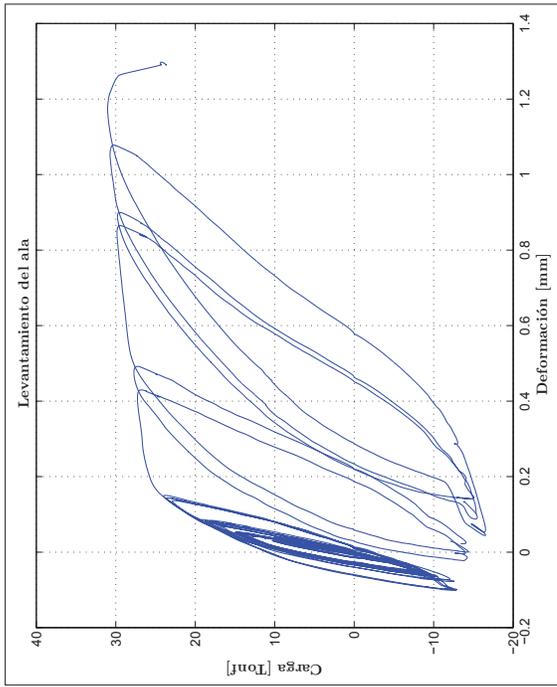


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM0-1

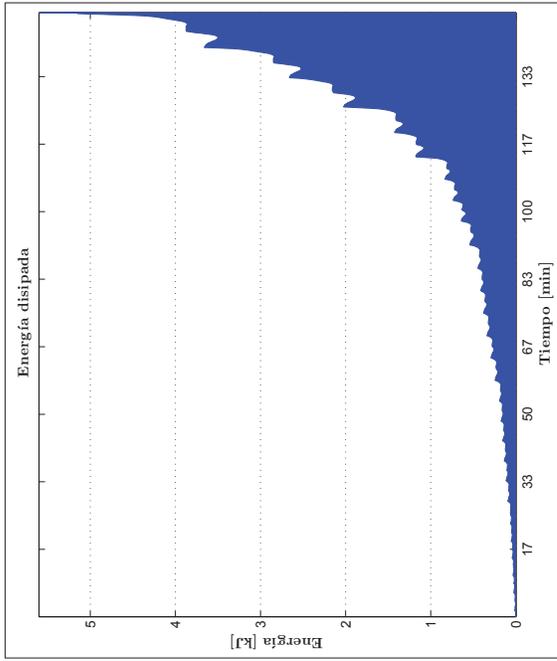


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM0-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

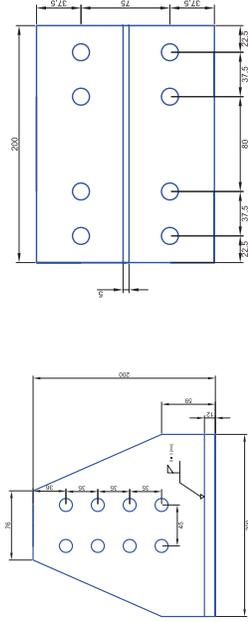


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	377.07	470	477.64
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles



Figura 12: Fotografía del ensayo

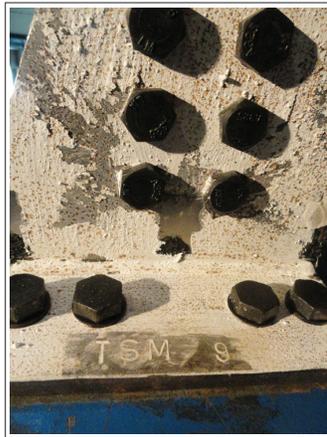


Figura 13: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	8.860	0.226	-8.263	-0.298	0.095	-0.024
2		8.904	0.232	-8.177	-0.296	0.099	-0.020
3		8.653	0.225	-8.269	-0.293	0.096	-0.011
4		8.703	0.228	-8.052	0.033	0.100	0.036
5		0.013	0.032	-8.534	-0.312	0.036	-0.028
6		8.471	0.219	-8.175	-0.292	0.094	-0.019
7	6	8.514	0.219	-10.069	-0.360	0.095	-0.013
8		11.783	0.513	-9.918	-0.150	0.353	0.196
9		12.262	0.555	-8.333	-0.089	0.391	0.176
10		12.108	0.561	-8.713	-0.036	0.399	0.209
11		11.825	0.554	-8.189	-0.056	0.397	0.186
12		12.328	0.573	-8.453	-0.017	0.412	0.215
13	6	12.383	0.584	-8.362	-0.044	0.423	0.210
14		0.333	0.139	-0.236	0.140	0.184	0.185
15		14.748	1.280	-8.713	0.571	1.087	0.803
16		14.939	1.351	-9.819	0.529	1.154	0.803
17		14.800	1.375	-8.075	0.652	1.177	0.871
18		14.805	1.382	-9.194	0.599	1.183	0.844
19	4	15.147	1.409	-9.092	0.643	1.206	0.884
20		14.879	1.413	-9.745	0.616	1.219	0.876
21		17.777	2.201	-11.161	1.091	1.945	1.415
22		19.556	2.407	-11.428	1.255	2.110	1.568
23	2	19.772	2.475	-11.223	1.281	2.164	1.593
24		20.097	2.521	-11.532	1.349	2.204	1.668
25	2	21.838	2.703	-12.720	1.242	2.317	1.578
26		22.306	2.835	-11.786	1.435	2.427	1.719
27	2	23.824	3.088	-13.090	1.387	2.571	1.660
28		24.618	3.359	-13.134	1.478	2.730	1.611
29	2	25.974	3.985	-14.735	0.639	2.991	0.491
30		26.850	4.510	-15.723	0.833	3.158	0.470
31	2	27.906	5.288	-16.477	1.342	3.358	0.561
32		29.326	6.735	-15.904	2.570	3.666	0.688
33	1.5	29.928	7.646	-17.180	3.190	3.888	0.844
34		29.424	8.520			4.125	

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades	Propiedades fuerza/deformación		Propiedades		Máximos	
	[tonf]	[mm]	[tonf]	[mm]	[tonf]	[mm]
Fuerza de tracción					29.424	
Deformación máxima					11.040	
Deformación mínima					-0.298	
Rango de deformación					11.338	
Rigidez inicial					32.693	
Rigidez plástica					1.200	
Def. acumulada					107.868	
Fuerza acumulada					2353.671	
Def. plástica acumulada					86.407	
Energía disipada					743.612	

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

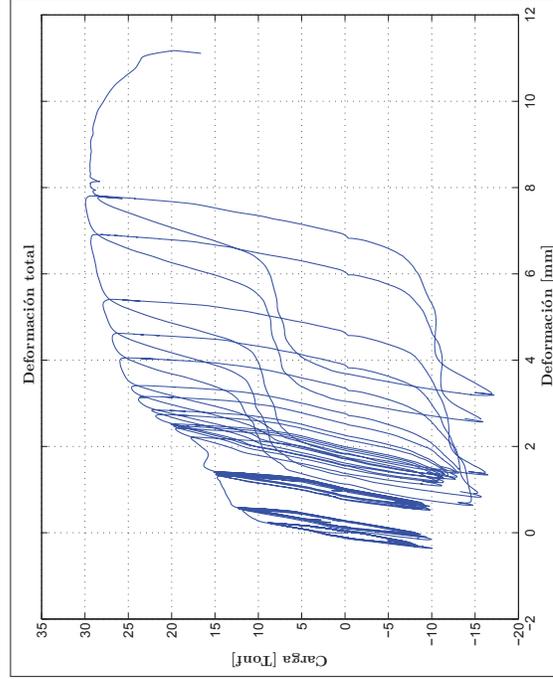


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM9-2

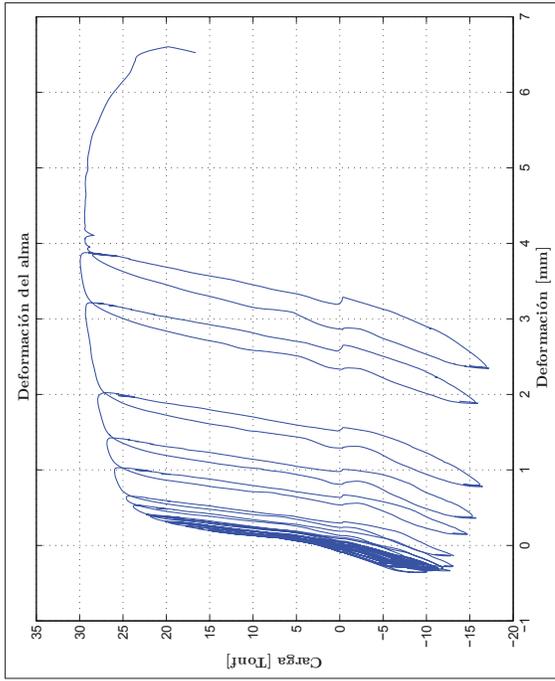


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM9-2

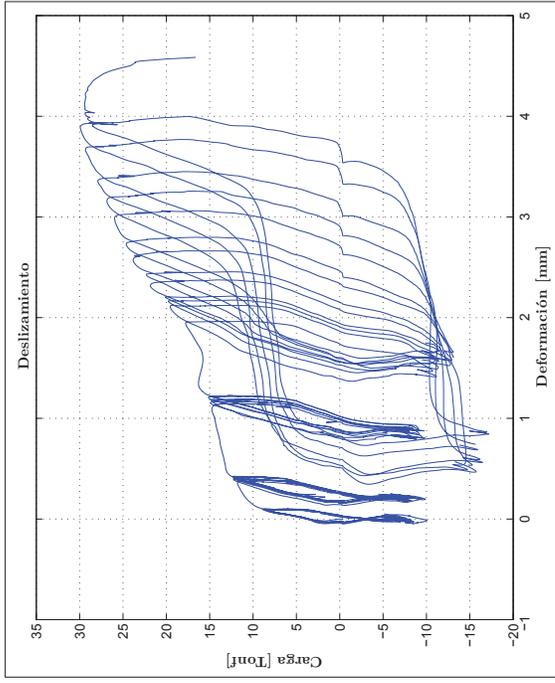


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM9-2

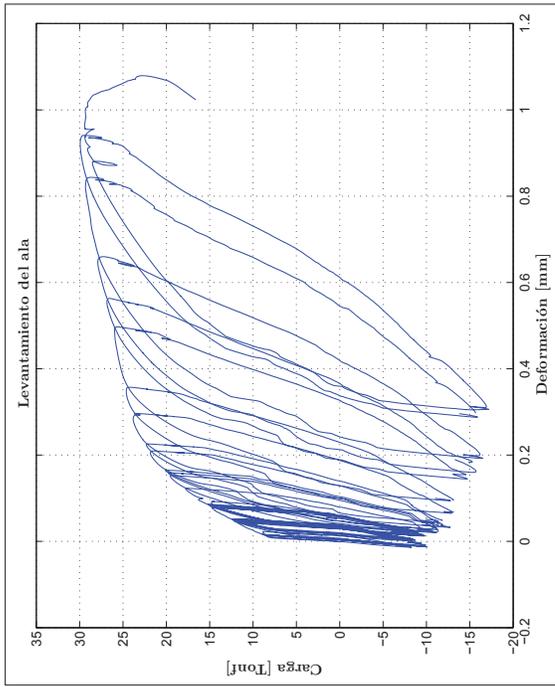


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM9-2

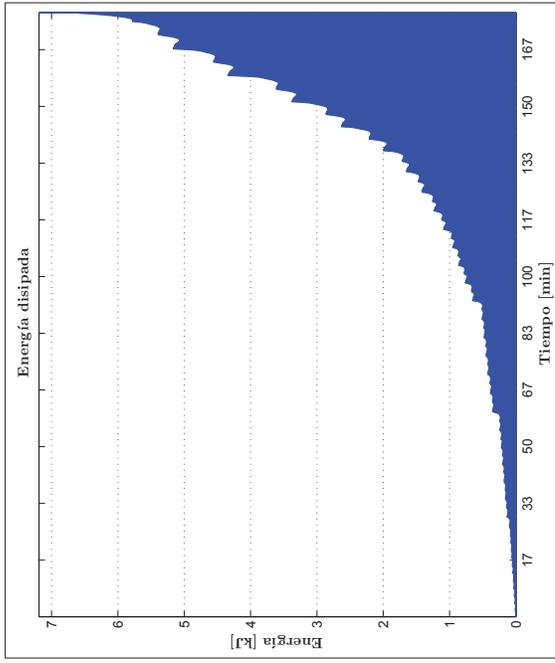


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM9-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

• **GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN**

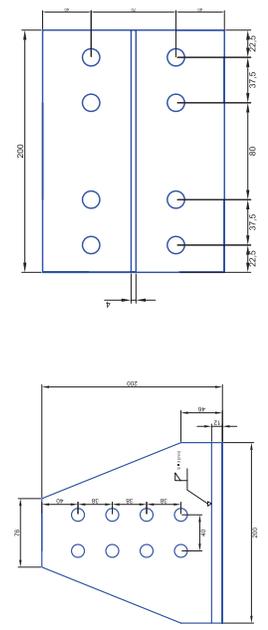


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• **PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES**

Componente	Tamaño	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	450.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 2-7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles



Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	10.294	0.263	-4.956	-0.169	0.110	-0.088
2	10.116	0.259	-4.742	-0.147	0.109	-0.070	
3	10.214	0.262	-4.865	-0.150	0.110	-0.066	
4	10.404	0.263	-5.343	-0.166	0.107	-0.080	
5	10.613	0.267	-5.486	-0.169	0.110	-0.077	
6	13.822	0.370	-8.104	-0.309	0.174	-0.160	
7	14.036	0.391	-7.311	-0.255	0.189	-0.118	
8	13.699	0.386	-6.799	-0.213	0.188	-0.083	
9	13.724	0.389	-7.022	-0.216	0.191	-0.082	
10	13.552	0.387	-7.377	-0.236	0.189	-0.098	
11	13.680	0.389	-6.993	-0.211	0.193	-0.074	
12	17.152	0.556	-6.971	-0.212	0.278	-0.077	
13	17.792	0.614	-8.999	-0.265	0.325	-0.080	
14	17.221	0.601	-8.414	-0.218	0.328	-0.042	
15	17.486	0.623	-8.700	-0.216	0.347	-0.037	
16	17.714	0.641	-8.993	-0.216	0.361	-0.027	
17	17.684	0.649	-8.862	-0.193	0.370	-0.003	
18	21.435	0.907	-8.868	-0.182	0.496	0.005	
19	4	22.194	1.028	-10.275	-0.156	0.562	0.037
20	22.533	1.119	-10.764	-0.102	0.616	0.071	
21	22.599	1.184	-10.774	-0.040	0.648	0.104	
22	24.870	2.281	-11.588	-0.045	0.936	0.092	
23	2	24.918	2.595	-12.250	0.785	0.988	0.112
24	26.426	4.263	-10.517	1.312	1.285	0.345	
25	2	26.337	4.685	-13.075	2.164	1.368	0.001
26	26.904	6.207	-13.799	2.401	1.648	-0.032	
27	0.5	26.098	6.641	-14.797	3.342	1.718	-0.408

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades		Máximos	
Propiedades fuerza/deformación	Fuerza de tracción [tonf]	26.904	
	Deformación máxima [mm]	7.334	
	Deformación mínima [mm]	-0.169	
	Rango de deformación [mm]	7.503	
	Rigidez inicial [tonf/mm]	35.339	
	Rigidez plástica [tonf/mm]	0.942	
Propiedades energía disipada	Def. acumulada [mm]	71.518	
	Fuerza acumulada [tonf]	1853.409	
	Def. plástica acumulada [mm]	63.154	
	Energía disipada [tonf-mm]	502.030	

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

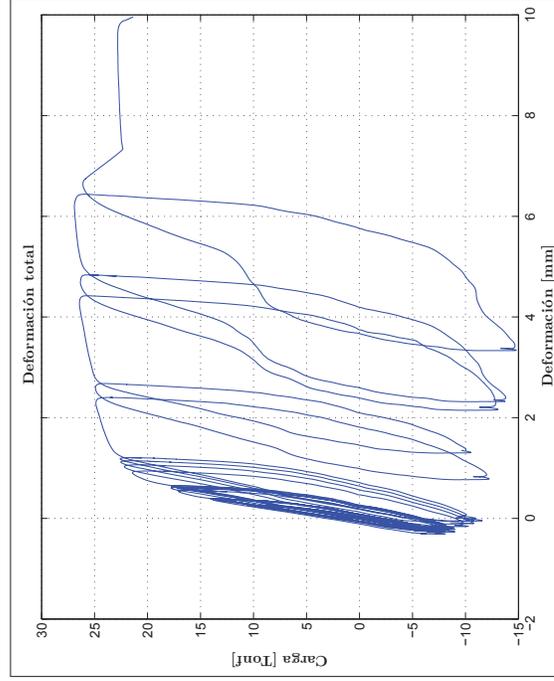


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM10-1

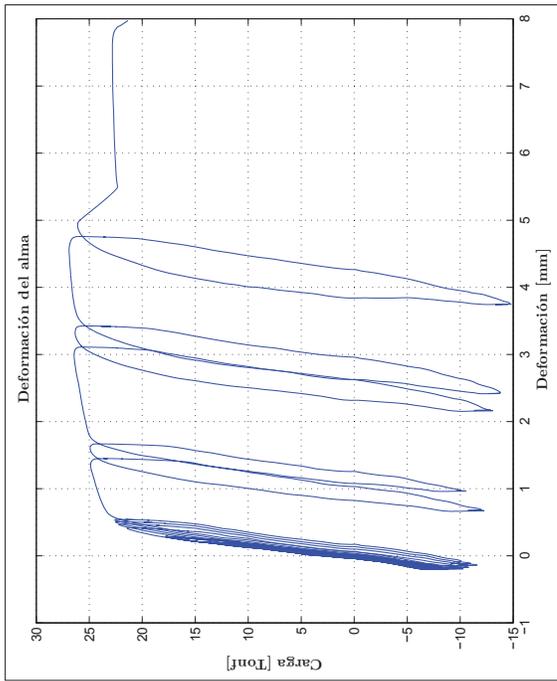


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM10-1

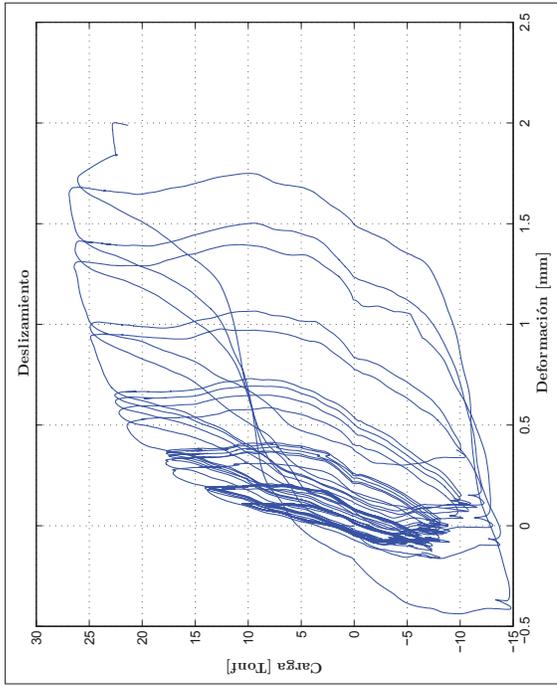


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM10-1

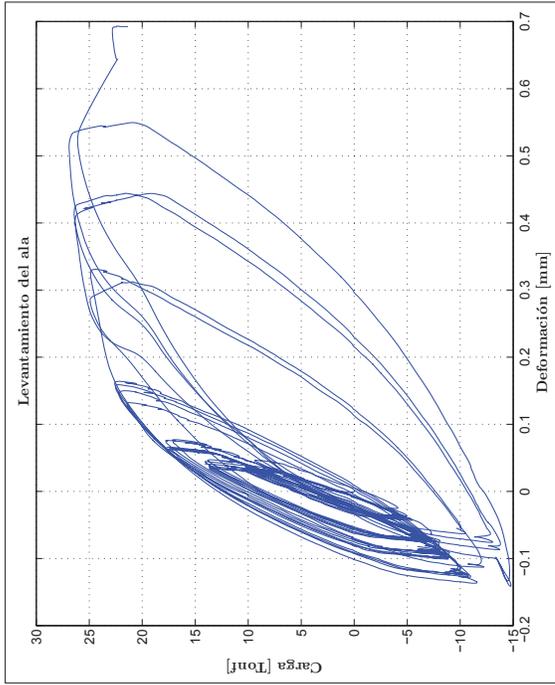


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM10-1

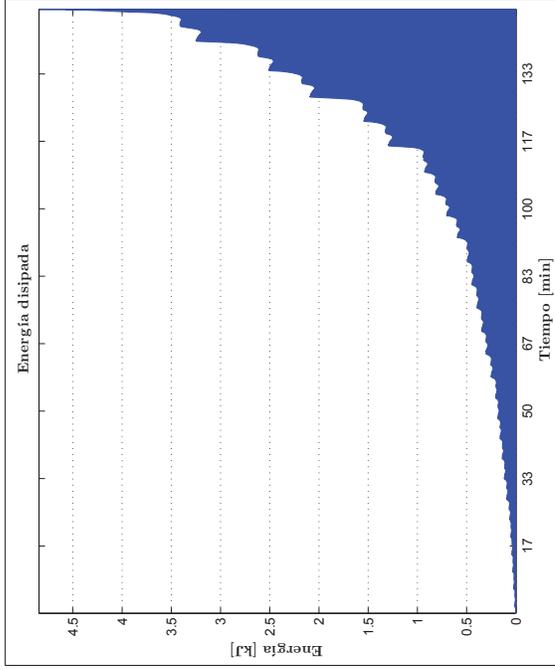


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM10-1

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

• GEOMETRÍA DE LA CONEXIÓN

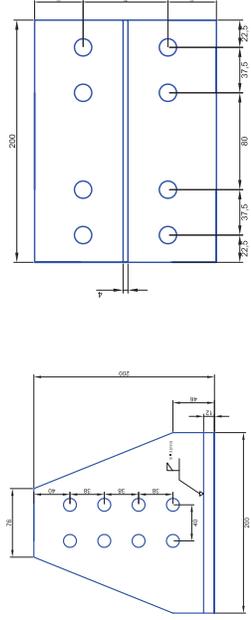


Figura 1: Vista frontal del alma

Figura 2: Vista frontal del ala

• PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETALLES

Componente	Tamaño [in]	Calidad	Fluencia		Rotura	
			Nominal [MPa]	Experimental [MPa]	Nominal [MPa]	Experimental [MPa]
Alma perfil T	7.87 x 7.87	ASTM A36	320	327.52	470	450.37
Ala perfil T	5.90 x 7.87	ASTM A36	320	320.79	470	477.11
Pernos a tracción	1/2 x 3.7/8"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79
Pernos a cizalle	1/2 x 2"	ASTM A325	-	402.34	680	663.79

Figura 3: Propiedades mecánicas y detalles



Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

• PROTOCOLO DE CARGA Y RESPUESTA EXPERIMENTAL

Paso de carga	N° ciclos	Tracción		Compresión		Deslizamiento	
		Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Carga [Tonf]	Deformación [mm]	Deformación [mm]	Deformación [mm]
1	6	8.719	0.289	-5.659	-0.150	0.184	-0.016
2		8.496	0.261	-5.817	-0.156	0.159	-0.024
3		9.312	0.288	-6.342	-0.167	0.174	-0.015
4		8.980	0.275	-5.975	-0.158	0.167	-0.022
5		8.721	0.263	-6.031	-0.160	0.159	-0.018
6		8.669	0.261	-5.864	-0.154	0.157	-0.019
7	6	12.459	0.430	-8.164	-0.181	0.269	0.046
8		12.403	0.428	-7.800	-0.162	0.277	0.051
9		12.839	0.445	-8.183	-0.163	0.288	0.065
10		12.578	0.434	-7.360	-0.144	0.281	0.054
11		12.900	0.447	-7.933	-0.149	0.291	0.071
12		12.917	0.447	-7.302	-0.134	0.292	0.052
13	6	16.725	0.629	-9.452	-0.151	0.402	0.143
14		16.395	0.638	-9.188	-0.123	0.424	0.135
15		17.909	0.705	-9.701	-0.101	0.466	0.181
16		16.851	0.683	-9.814	-0.096	0.466	0.188
17		17.098	0.694	-9.819	-0.082	0.475	0.205
18		16.496	0.673	-10.236	-0.099	0.466	0.198
19	4	20.880	0.917	-11.867	-0.037	0.566	0.308
20		21.470	1.006	-11.737	0.058	0.614	0.366
21		21.611	1.084	-11.605	0.142	0.646	0.414
22		20.983	1.091	-11.731	0.140	0.657	0.416
23	2	23.820	1.988	-12.791	0.854	0.830	0.582
24		23.599	2.157	-13.142	0.997	0.832	0.615
25	2	24.998	3.338	-13.589	1.984	0.995	0.750
26		25.708	4.461	-14.433	2.826	1.143	0.764
27	2	26.008	5.575	-14.817	4.005	1.258	0.943
28		24.941	5.910			1.223	

Figura 4: Protocolo de ensayo y respuesta experimental

• RESUMEN DE RESULTADOS

Propiedades	Propiedades fuerza/deformación		Propiedades		Máximos	
	[Tonf]	[mm]	[Tonf]	[mm]	[Tonf]	[mm]
Fuerza de tracción						
Deformación máxima						
Deformación mínima						
Rango de deformación						
Rigidez inicial						
Rigidez plástica						
Def. acumulada						
Fuerza acumulada						
Def. plástica acumulada						
Energía disipada						
Energía disipada						

Figura 5: Resumen de resultados

• GRÁFICOS

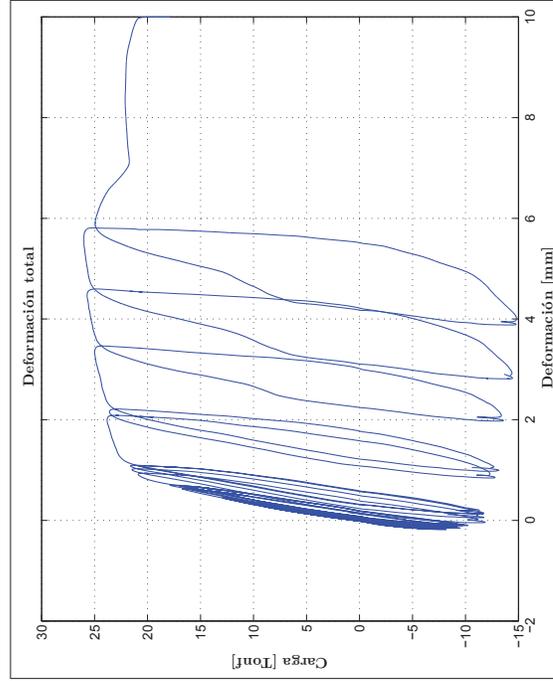


Figura 6: Deformación total - ensayo experimental TSM10-2

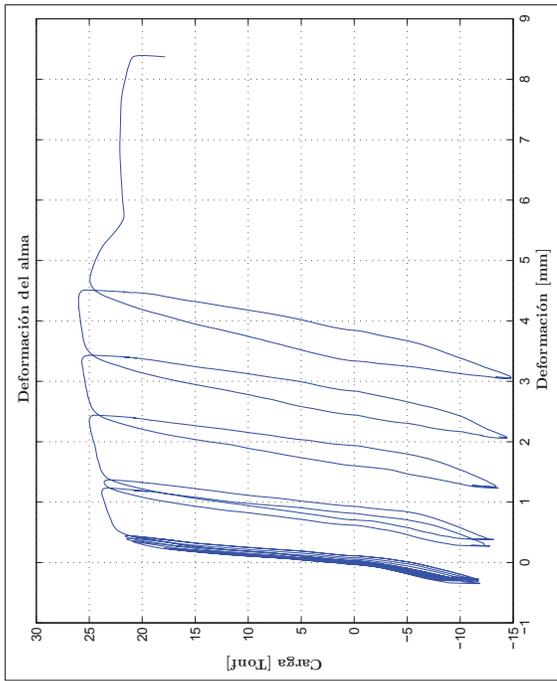


Figura 7: Deformación del alma - ensayo experimental TSM10-2

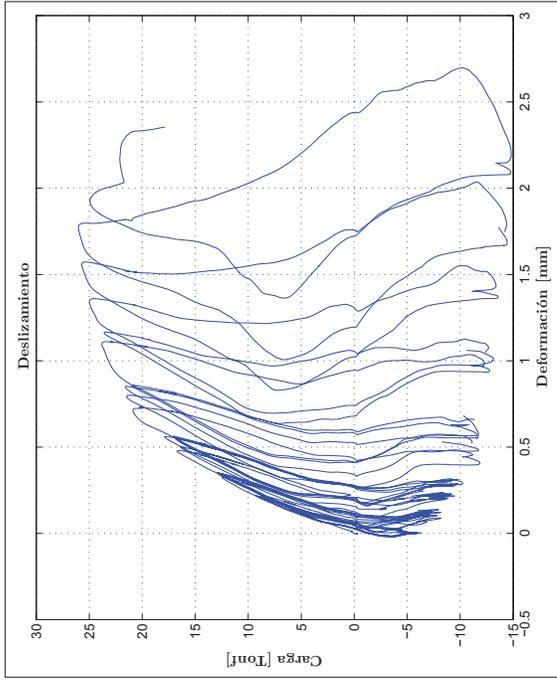


Figura 8: Deslizamiento - ensayo experimental TSM10-2

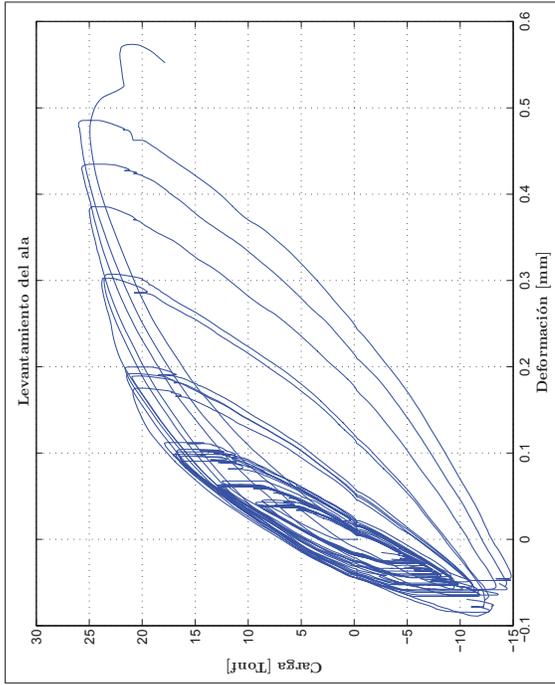


Figura 9: Levantamiento del ala - ensayo experimental TSM10-2

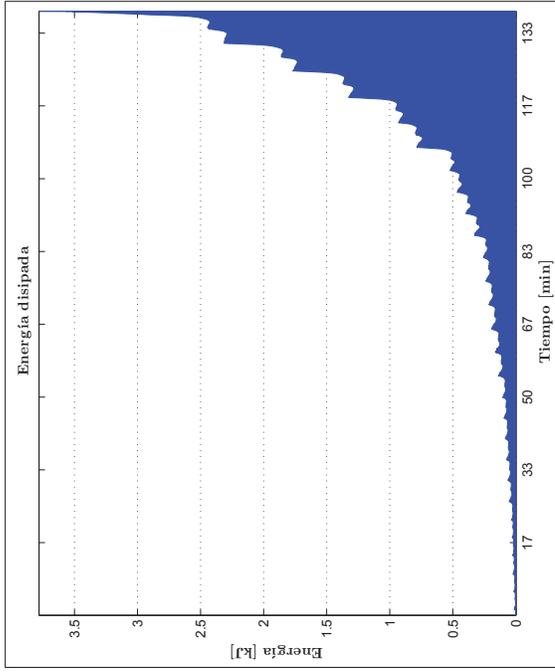


Figura 10: Energía disipada - ensayo experimental TSM10-2

• FOTOGRAFÍAS



Figura 11: Fotografía del ensayo

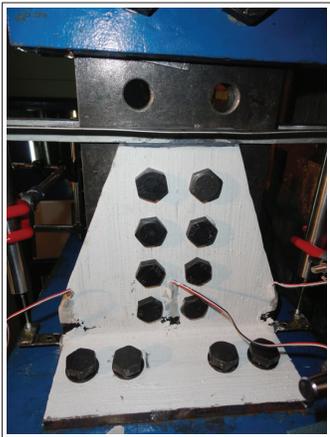


Figura 12: Fotografía del ensayo



Figura 13: Fotografía del ensayo

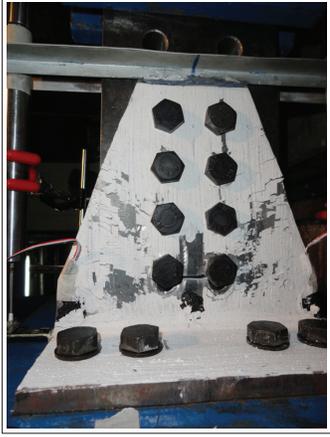


Figura 14: Fotografía del ensayo

Apéndice C

Inspección de probetas serie TSM

INSPECCIÓN DE PROBETAS

Estudio analítico-experimental de perfiles T-stub sometidos a carga cíclica
4 de Julio de 2011

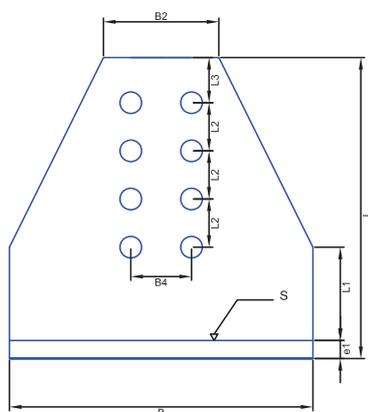


Figura 1: Alma - Serie TSM

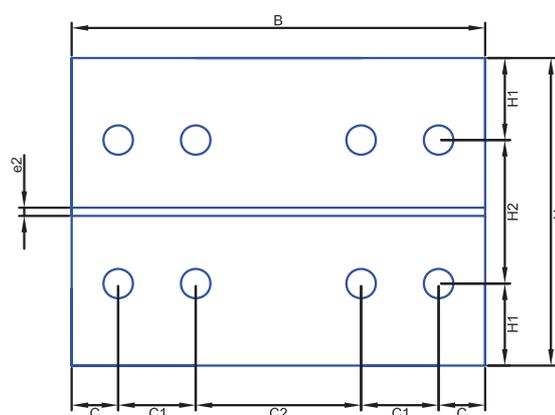


Figura 2: Ala - Serie TSM

TSM1 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	62	32	30	150	40	70
Real	12.3	4.15	199	77	40	22	37.5	81	200		32.5	30	149	40	70

Inspección Visual

El tramo final del alma no se encuentra horizontal, por lo tanto se genera una pequeña diferencia (1 mm) en la alineación de los orificios. El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo. Se observa correcta verticalidad del alma y horizontalidad del ala. Presenta unas pequeñas imperfecciones en las líneas diagonales, las cuales se muestran en las fotografías.

Cordón de soldadura

Se aprecia bastante bien materializada, sin irregularidades y con un espesor de filete más cercano a los 4 [mm]. Presenta un pequeño pinchazo sobre un potencial poro, sin embargo está bien materializado. Se observa un leve adelgazamiento de la soldadura en los extremos. No presenta poros ni socavaciones del material base.

Strain gauges

Prueba de lectura considerando el perfil frontal respecto de la colocación de los *strain gauges*

Izquierdo Centro Derecha
Lectura óptima Lectura óptima Lectura óptima

TSM1 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	62	32	30	150	40	70
Real	12.3	4.05	199.5	77	39	22.5	38	80	201		31.5	29.5	149	40	70

Inspección Visual

El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo. Igual que en la probeta TSM1-1. Presenta algunas muescas de material en el ala, pero lejos de las zonas de carga. Se observa un pequeño adelgazamiento del alma en la zona diagonal. En la zona final del alma se observa un adelgazamiento más considerable del espesor de $1[mm^2]$ aprox.

Cordón de soldadura

Se aprecia bastante bien materializada. En uno de los costados se observa un adelgazamiento del cordón bastante considerable, esto producto de una evidente desbastación con galleta. El espesor de filete más cercano a los $4[mm]$. No presenta poros ni socavaciones del material base.

TSM2 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	53	35	30	150	40	70
Real	12.15	4	200	76	41	22.5	38	80	203		35	30	150	40	70

Inspección Visual

Se aprecia una correcta confección, con el alma vertical y el ala horizontal. Se observa una pequeña muesca en una de las esquinas del ala, el cual es irrelevante para el estudio. El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo. Se observa una pequeña imperfección sobre una de las diagonales de borde del alma.

Cordón de soldadura

Bien materializado. Presenta un espesor de filete más cercano a los $4[mm]$. Se observa un leve adelgazamiento del filete en los extremos. No presenta poros. Presenta una leve socavación del alma en uno de los extremos del cordón de soldadura.

TSM2 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	53	35	30	150	40	70
Real	12.2	4	200	76	41	21.5	38	80.5	200.1		35	29.5	149	40	71

Inspección Visual

Se aprecia una correcta confección. Alma vertical y ala horizontal. El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo. Se aprecian unas leves imperfecciones en la diagonal del borde del alma, además de una exagerada desbastación en la misma zona. Las dos líneas de orificios del alma no están perfectamente simétricos.

Cordón de soldadura

Se observa una correcta materialización. El espesor es más cercano a los 4[mm]. En un mismo extremo del cordón de soldadura se aprecia un engrosamiento del filete y por el anverso una leve socavación. No presenta poros.

TSM3 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	44	38	30	150	40	70
Real	12.1	4	199	75.5	40	22.5	37	80	201		37.5	29.5	150	41	70

Inspección Visual

Se aprecia una leve no horizontalidad del tramo final del alma. El alma se observa vertical y el ala completamente horizontal. La zona central se encuentra desbastada, quedando expuesto el material base pero sin un cambio importante del espesor del alma. El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo. La parte superior del alma presenta una leve imperfección.

Cordón de soldadura

Correcta materialización del cordón, con un leve engrosamiento del espesor en los extremos. No presenta poros. Se aprecia una leve socavación del alma en uno de los extremos.

TSM3 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	44	38	30	150	40	70
Real	12.2	4	200	77.5	40	22.5	38	80	201		38	30.5	150	40	70

Inspección Visual

Existe una leve asimetría del alma respecto del ala y su eje central. Alma vertical y ala horizontal. Presenta una excesiva desbastación del alma en uno de los bordes diagonales. El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo.

Cordón de soldadura

Presenta un adelgazamiento leve del filete en los extremos del cordón. Bien materializada. No presenta poros ni socavaciones del material base.

TSM4 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12.1	4	199.5	77	46	22	37.5	81	201		36	35	150	38	75.5

Inspección Visual

Se observa una leve concavidad del ala respecto del alma, lo cual genera un levantamiento de 1[mm] aprox. en cualquiera de sus extremos. Presenta una desbastación masiva en la zona central del alma, la cual podría generar un adelgazamiento del material. Presenta una leve imperfección en la vecindad del último orificio del alma. Presenta una leve imperfección por desbastación en una de las diagonales del borde del alma. El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo.

Cordón de soldadura

Se observa una correcta materialización del cordón de soldadura. Presentan un leve adelgazamiento en las zonas extremas. No presenta poros ni socavación del material base.

TSM4 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12.3	4	200	76	45	22.5	37.5	80	200		36	36.5	150	37.5	76

Inspección Visual

El tramo final del alma no está correctamente horizontal, lo cual genera una pequeña diferencia de 1[mm] aprox. en la distancia entre los dos últimos orificios y el borde. Se observa una desbastación exagerada del alma en una zona concentrada entre los 4 últimos orificios del alma. La parte basal del ala presenta una protuberancia de material en una de las esquinas, se prevé una fácil remoción. El corte diagonal de los costados no llega hasta la última línea de orificios, sino que más abajo.

Cordón de soldadura

Correcta confección de la soldadura, presenta un engrosamiento de unos de sus filetes en el extremo. No presenta poros ni socavación de material base.

TSM5 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12.15	5.15	200	74.5	46	22.5	37.5	80	200		35	36.5	149	37	75

Inspección Visual

El ala presenta concavidad, generando un alzamiento remanente de $1,5[mm]$ aprox. de uno de sus bordes respecto del otro. Se aprecia una torsión leve del alma a pesar de la verticalidad que presenta. Presenta una leve imperfección en el borde último del alma.

Cordón de soldadura

Se aprecia bien materializado. Presenta un espesor constante. No se observan poros y aparece una leve socavación del material base del alma en uno de los extremos del cordón.

TSM5 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12.15	5.1	200	74	46	22.5	37.5	80	201		36	36	150	37.5	75

Inspección Visual

Presenta una correcta materialización. Alma vertical y ala horizontal. No presenta imperfecciones.

Cordón de soldadura

Correcta materialización. Espesor constante de los filetes. En un mismo borde presenta un leve engrosamiento del filete y por el anverso un poro evidente que permite ver el material base.

TSM6- 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	10	8	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	30	90
Real	10.2	8.1	199	76	46	22.5	37.5	80	201		35	34.5	149.5	29.5	90

Inspección Visual

Presenta una leve concavidad del ala, la cual genera un levantamiento remanente de $1[mm]$ de un borde respecto del otro. Presenta una leve imperfección en uno de los bordes diagonales del alma. Alma vertical.

Cordón de soldadura

Correcta materialización. Espesor constante de los filetes. En un mismo borde presenta un leve engrosamiento del filete y por el anverso un poro pequeño.

TSM6 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	10	8	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	30	90
Real	10.2	8	200	76	46.5	22.5	37.0	80	201		36	32.5	149.5	30	91

Inspección Visual

Presenta una leve concavidad del ala, la cual genera un levantamiento remanente de 1,5[mm] de un borde respecto del otro. Pequeñas imperfecciones en el ala pero que resultan irrelevantes para el estudio. Aparece una pequeña imperfección por desbastación en la vecindad del último orificio del alma. Alma vertical

Cordón de soldadura

Cordón bien materializado, de espesor constante. En uno de los extremos, por ambos lados de este aparece una leve socavación del alma.

TSM7 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	10	8	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	40	70
Real	10.1	8.2	200	77	45	22.5	37.5	80	200		36	35	150	40	70

Inspección Visual

Leve concavidad del ala que genera un levantamiento permanente de 1[mm] aprox. de un borde respecto del otro. Muy pequeñas imperfecciones producto de la desbastación en los bordes diagonales del alma. Alma vertical.

Cordón de soldadura

Soldadura bien materializada, con un leve adelgazamiento del filete en uno de los bordes y un engrosamiento en otro. Se aprecia una pequeña protuberancia de material en uno de los extremos. Se observa una pequeña socavación del alma en uno de los bordes. No presenta poros.

TSM7 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	10	8	200	76	45	22.5	37.5	80	200	49	35	36	150	40	70
Real	10.2	8.2	200	76	45	22.5	37.5	80	200		35	35	150	40	70

Inspección Visual

Bien materializada. No presenta imperfecciones imperfecciones. Alma vertical. Concavidad del ala que genera un levantamiento permanente de 2[mm] aprox. de un borde respecto del otro. Se aprecia un pequeño adelgazamiento del alma por desbastación en el extremo superior.

Cordón de soldadura

Bien materializada, espesor constante, se observa un leve adelgazamiento en los extremos y una leve socavación del alma y ala en uno de los bordes.

TSM8 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	6	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12	6.3	200	76	45	22.5	37.5	79	200		35	35.5	149	37.5	74

Inspección Visual

Se observa verticalidad del alma. El ala presenta un mayor concavidad respecto de las demás probetas. Se genera un levantamiento de $4[mm]$ aprox. de un borde respecto del otro. Presenta una leve desbastación en los bordes diagonales del alma, pero lejos de las zonas de carga. Uno de los bordes del ala está cóncavo, probablemente porque se reutilizó algún material y no se rectificó este borde, sin embargo cumple con las dimensiones y en general presenta una correcta materialización.

Cordón de soldadura

El cordón de soldadura nominal corresponde a una de penetración completa. Esta al menos se ve correctamente uniforme, muy similar a un filete de soldadura. No es posible apreciar que existiese una correcta materialización de la penetración completa. Sin embargo, el ala de estas configuraciones es la que presenta mayor concavidad, presumiblemente producto de la mayor exposición al calor necesario para materializar la penetración completa. No presenta poros ni socavaciones del material base.

TSM8 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	6	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12	6.3	200	76	45	22.5	37.5	80	200		36	36	150	37	75.5

Inspección Visual

Se observa verticalidad del alma. El ala presenta un mayor concavidad respecto de las demás probetas. Se genera un levantamiento de $4[mm]$ aprox. de un borde respecto del otro. Presenta una desbastación en los bordes diagonales del alma, pero lejos de las zonas de carga. Uno de los bordes del ala está cóncavo, probablemente porque se reutilizó algún material y no se rectificó este borde, sin embargo cumple con las dimensiones y en general presenta una correcta materialización.

Cordón de soldadura

El cordón de soldadura nominal corresponde a una de penetración completa. Esta al menos se ve correctamente uniforme, muy similar a un filete de soldadura. No es posible apreciar que existiese una correcta materialización de la penetración completa. Sin embargo, el ala de estas configuraciones es la que presenta mayor concavidad, presumiblemente producto de la mayor exposición al calor necesario para materializar la penetración completa. No presenta poros ni socavaciones del material base.

TSM9 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12.1	5	200	76	45	22.5	37.5	81	200		36	35.5	149	37.5	75

Inspección Visual

Se aprecia verticalidad del ala y horizontalidad del alma. Presenta en general un correcta materialización.

Cordón de soldadura

Se aprecia una correcta ejecución de la soldadura, con algunos adelgazamientos en los extremos y un pequeño poro superficial. Presenta espesor uniforme y no se aprecian socavaciones del material base.

TSM9 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	5	200	76	45	22.5	37.5	80	200	47	35	36	150	37.5	75
Real	12	5	198	76	45	22.5	37.5	80	202		36	36	151	37.5	75

Inspección Visual

Se aprecia una correcta ejecución en general. El ala se presenta vertical y el ala con una leve concavidad de 1[mm] aprox, de levantamiento remanente de un borde respecto del otro.

Cordón de soldadura

Correcta materialización del filete, de espesor constante y leves adelgazamientos en los bordes. Se aprecia además un leve ensanchamiento en un borde anverso. Se observa una leve imperfección parecida a un poro y no presenta socavaciones del material base.

TSM10 - 1

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	34	38	40	150	40	70
Real	12.1	4.1	199	76	41	22.5	37.5	79	202		38	42	150	40	70

Inspección Visual

Presenta una desbastación focalizada en uno de los bordes diagonales del alma. Alma vertical y ala con leve concavidad de 1[mm] de levantamiento remanente de un borde respecto del otro.

Cordón de soldadura

El filete por unos de los lados no llega correctamente hasta el borde de la probeta. No presenta poros ni socavaciones del material base.

TSM10 - 2

Tabla

Probeta	e1	e2	B	B2	B4	C	C1	C2	L	L1	L2	L3	H	H1	H2
Nominal	12	4	200	76	40	22.5	37.5	80	200	34	38	40	150	40	70
Real	12.1	4	200	77	41	22.5	37.5	79	200		38	40.5	150	40	70

Inspección Visual

Presenta desbastación excesiva en uno de los bordes diagonales del alma y en particular una zona específica muy delgada de 3,5[mm] aprox. El resto de la probeta no presenta imperfecciones.

Cordón de soldadura

Uno de los filetes no está correctamente terminado y presenta un vacío de material en el borde. El anverso de ese mismo extremo presenta un adelgazamiento del cordón. El resto está uniforme y correctamente materializado. No presenta poros ni socavaciones del material base.

Apéndice D

Certificados de calidad



PERNOS IRUA

Stgo, 05 Agosto de 2011

CERTIFICADO DE CALIDAD

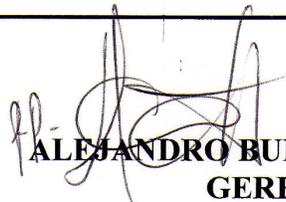
Sres.: **RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES**
At. Sr. Miguel Ángel Bravo

IND. DE PERNOS IRUA LTDA., RUT: 77.355.430-7 CERTIFICA QUE LOS PERNOS ENTREGADOS CON LA FACTURA N° **161051** CON FECHA 13 DE JULIO DEL 2011 CORRESPONDE A:

- 11 P. HEX ASTM A-325 3/4x7.3/4
- 138 P. HEX ASTM A-325 1/2x2.7/8
- 7 P. HEX ASTM A-325 1x4.1/4
- 172 P. HEX ASTM A-325 1/2x2
- 27 P. HEX ASTM A-325 3/4x3.3/4
- 18 P. HEX ASTM A-325 3/4x4
- 9 P. HEX ASTM A-325 3/4x5.1/2

ANALISIS QUIMICO				
C	MN	Si	P	S
0,43-0,5	0,6-0,9	0,25-0,35	0,04	0,05
ACERO AL CARBONO				
SAE 1045				
Acero de mediano carbono. Apto para fabricaciones de exigencias moderadas. Buenas características de forja, alta dureza por temple al agua y soldable.				
DUREZA BRINELL				
170 - 200				
RESISTENCIA A TRACCIÓN (Kg/mm2)				
68				

ATTE.


ALEJANDRO BUNSTER DE IRUARRIZAGA
GERENTE GENERAL

PERNOS IRUA.....MÁS QUE UNA SOLUCIÓN



PERNOS IRUA

Stgo, 5 de Agosto 2011

CERTIFICADO DE CALIDAD

Sres.: **RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES**

At. Sr. Miguel Ángel Bravo.

IND. DE PERNOS IRUA LTDA., RUT: 77.355.430-7 CERTIFICA QUE LOS PERNOS ENTREGADOS CON LA FACTURA N° **161051** CON FECHA 13 DE JULIO DEL 2011 CORRESPONDE A:

- **36 P. HEX. ASTM A 490 1/2x2.7/8"**

MATERIAL: 42 CrMo

COMPOSICION QUIMICA:

C	Mn	Si	P	S
0,41	0,67	0,2	0,01	0,011

PROPIEDADES MECANICAS:

TRACCION(N/mm2)	FLUENCIA(N/mm2)	ELONGACION %	RED. AREA %	DUREZA(HRc)
860-790	720-655	18	59	31

ATTE.

ALEJANDRO BUNSTER DE IRUARRIZAGA
GERENTE GENERAL

PERNOS IRUA.....MÁS QUE UNA SOLUCIÓN

**HSL Plancha Estructural de Alta Resistencia y Soldabilidad Garantizada.
Acero de Alto Límite de Fluencia.**



Descripción : Color: Blanco.

Este tipo de material posee una composición química balanceada (microaleado) que permite alcanzar una alta resistencia a la tracción y fluencia, mediante temple y revenido. Además se puede alcanzar una buena soldabilidad, propiedades de oxicorte, conformado y resistencia a la corrosión atmosférica. Este material es obtenido a partir de un cuidado y complejo proceso de laminación controlada, el cuál le brinda un alto grado de uniformidad, tanto en propiedades mecánicas (bajo nivel de inclusiones no metálicas) y de conformado.

Norma(s):

ASTM : Tipo A514 – A517.

Composición Química (% en peso):

C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	V	B (ppm)	Nb	Ni	CE
0.18 máx.	0.60/ 1.20	0.15/ 0.35	0.030 máx.	0.025 máx.	0.60 máx.	0.50 máx.	0.10 máx.	60 máx.	0.080 máx.	0.2 máx.	≤ 0,40

* Para espesores (e) entre 6 y 75 mm.

Propiedades Mecánicas:

√ Dureza (HB)	:	250 – 270.
√ Resistencia a la Tracción (MPa)	:	700 - 930 min. (80 - 95 Kg./ mm ²).
√ Límite de Fluencia (MPa)	:	700 mín. (e menor que 50 mm.) 680 mín. (e mayor que 50 mm.).
√ Relación (Fluencia /Tracción)	:	> 0,90.
√ Resistencia al Impacto (Joule)	:	40 (- 20 °C , e mayor que 32 mm.) (1) .
√ Alargamiento (%)	:	17 - 25 dependiendo del espesor.
√ Características de Doblado	:	2.0*e / 180° (e menores que 32 mm.) (1) 2.5*e / 180° (e mayores que 32 mm.).

Otras Propiedades:

- √ Buen nivel de mecanizado.
- √ Debido a los bajos contenidos de carbono y a la adecuada combinación de elementos de aleación, este material posee una soldabilidad garantizada.
- √ Puede ser oxicortado sin precalentamiento y puede doblarse dentro de los límites considerados altos para este tipo de aceros.
- √ Excelente combinación de resistencia a la tracción y fluencia.
- √ Buena resistencia a la corrosión atmosférica debido a la presencia en este acero de elementos tales como: Cromo, Níquel y Cobre.

Usos :

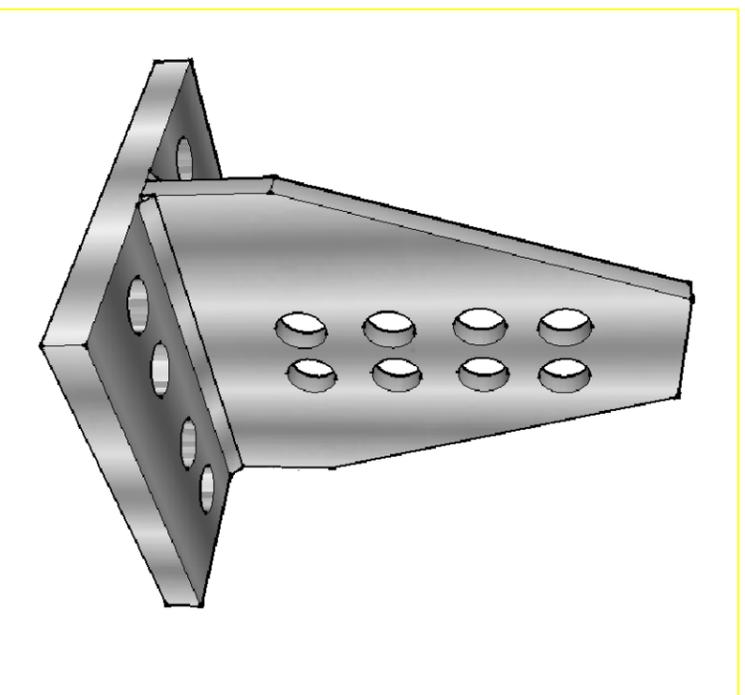
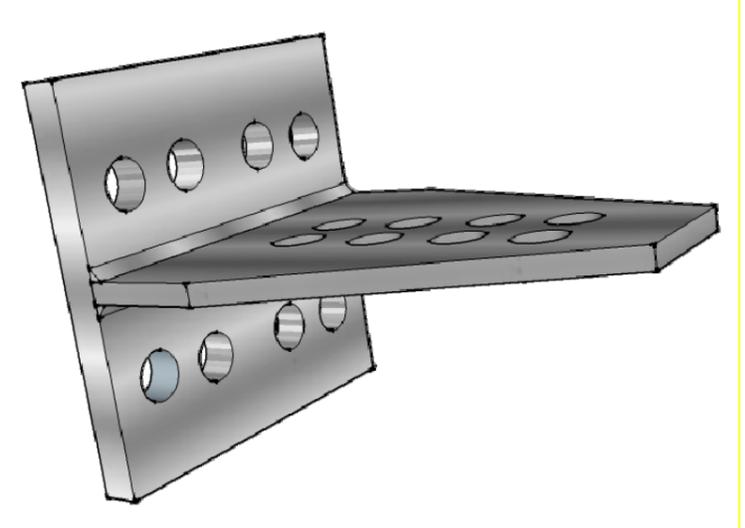
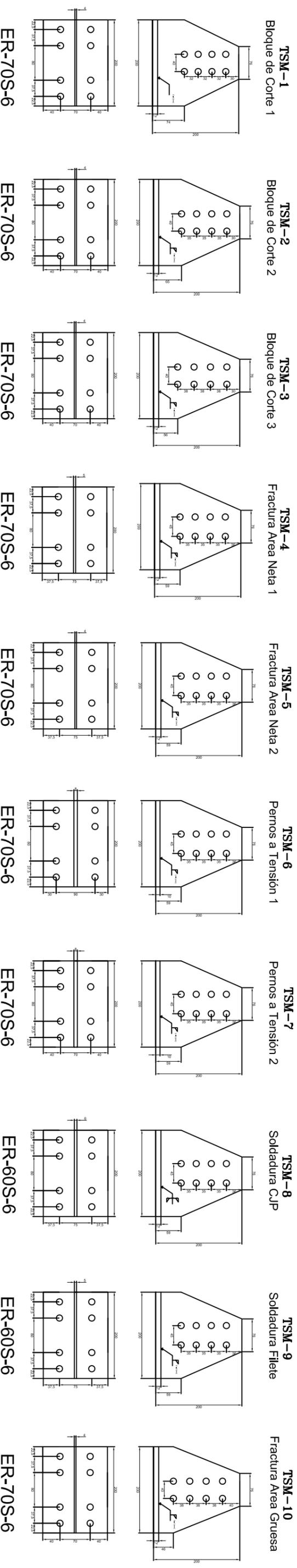
- Fabricaciones y reparaciones de chasis, puentes de grúas, componentes estructurales de camiones mineros y maquinarias de movimiento de tierras, para solicitaciones de altas exigencias.

(1) Longitudinal.

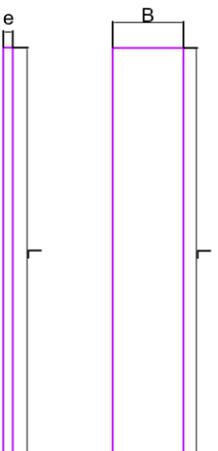
Apéndice E

Planos

Diseño Probetas ASTM A-36



Probetas en láminas



PROBETA	e	L	B	DIRECCION DE LAMINACION	CANTIDAD
1-4	4	350	60	TRANSVERSAL	1
2-4	4	350	60	LONGITUDINAL	1
1-5	5	350	60	TRANSVERSAL	1
2-5	5	350	60	LONGITUDINAL	1
1-8	6	350	60	TRANSVERSAL	1
2-8	6	350	60	LONGITUDINAL	1
1-12	8	350	60	TRANSVERSAL	1
2-12	8	350	60	LONGITUDINAL	1
1-14	10	350	60	TRANSVERSAL	1
2-14	10	350	60	LONGITUDINAL	1
2-14	12	350	60	TRANSVERSAL	1
2-14	12	350	60	LONGITUDINAL	1

NOTAS:

- Todas las dimensiones son en [mm]
- Todos los orificios son de 14.3 [mm] de diámetro para pernos de 1/2"
- Electrodo de soldadura 1 (Indura 70 S-6) - MIG
- Electrodo de soldadura 2 (Indura 60 S-6) - MIG
- Acero base A-36
- Fabricar:
 - 2 Probetas por cada modelo TSM - 20 en Total
 - 12 Probetas en lámina en Total (detalle en cuadro)

Universidad de Chile Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil		Proyecto: M.B.H Revisó: M.B.H Dibujó: M.B.H		Nº PLANO: Nº 1
TITULO DE TÍTULO: ENSAYO ANALITICO-EXPERIMENTAL DE PERFILES T SOLDADOS SOMETIDOS A CARGA CICLICA		Proyecto: M.B.H Revisó: M.B.H Dibujó: M.B.H		Fecha: Mayo 2010
CONTINUIDAD: Plano de fabricación Perfiles Soldados T		Proyecto: M.B.H Revisó: M.B.H Dibujó: M.B.H		Fecha: Mayo 2010
Autor: Miguel Angel Bravo Haro Profesor: Ricardo Herrera		Proyecto: M.B.H Revisó: M.B.H Dibujó: M.B.H		Fecha: Mayo 2010