ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONEXIONES DE MOMENTO USANDO PERFILES T SOLDADOS

Memoria para optar al título de Ingeniera Civil

Constanza Carolina Salas Quintanilla

Profesor Guía:
Ricardo Antonio Herrera Mardones

Contenidos

1. Motivación.
2. Objetivos generales y específicos.
3. Diseño de especímenes.
4. Instrumentación de ensayo.
5. Resultados experimentales.
6. Conclusiones.
7. Bibliografía.

Contenidos

Motivación

Terremoto de Northridge (1994) California, USA → SAC Steel Project: **Conexiones de momento** → FEMA 350 (2000): **Conexión DST** (Double Split T)

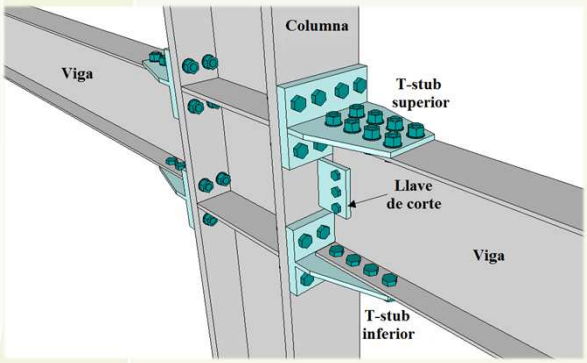
Falla frágiles en edificios de marco rígido

Recomendaciones de diseño sísmico para nuevos edificios de marco rígido

Motivación

Conexión DST

- Conexión de momento.
- *Apernada.*
- *"Full strength".*
- *Parcialmente restringida.*



FEMA 350

⬇

Investigación llevada a cabo con T-stubs **laminados**.

⬇

Perfiles T soldados

- ✓ Mayor disponibilidad.
- ✓ *Libertad de dimensionamiento.*

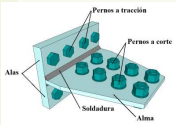
Motivación

Línea de Investigación

Chile

Perfiles T soldados ➡ Conexiones con perfiles T soldados

Desjouis, G.	(2006)	*Núñez, A.*	*(2016)*
Gómez, G.	*(2008)*	*Alarcón, C.*	*(2016)*
Aedo, G.	*(2009)*	*Salas, C.*	*(2016)*
Muñoz, L.	*(2012)*	*Arrau, J.C.*	*(2017)*
Bravo, M.	*(2013)*		



FONDECYT
Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico

PROYECTO N° 1140628

Objetivo General

Estudiar **conexiones de momento** viga-columna

- Perfiles T **soldados**
- Carga **cíclica**
- Metodología **experimental**

Objetivos Específicos

- **Diseñar** cuatro conexiones de momento con perfiles T soldados.
- Elaborar **planos de fabricación.**
- Determinar **propiedades del material** base.
- **Ensayar** especímenes.
- Evaluar **resistencia**, rigidez y comparar con valores predichos.
- Identificar **ventajas** y **desventajas.**
- Determinar el tipo de **marco rígido** para el cual califican.

Contenidos

1. Motivación.
2. Objetivos generales y específicos.
3. **Diseño de especímenes.**
4. Instrumentación de ensayo.
5. Resultados experimentales.
6. Conclusiones.
7. Bibliografía.

Diseño de especímenes

Espécimen	Característica	Descripción de la falla
SE-01	"Conexión débil"	Plastificación de las **alas de los T-stubs**.
SE-02	"Viga débil"	Formación de **rótulas plásticas en la viga**.
SE-03	"Zona panel débil"	Plastificación de la **zona panel**.
SE-04	"Falla balanceada"	Plastificación de la **zona panel** + formación de **rótulas plásticas en la viga**.

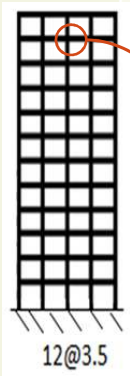
SE: "Sistema Estructural".

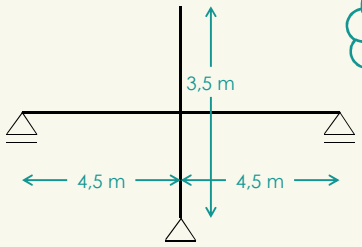
Diseño de especímenes

Dimensiones Preliminares

Alarcón (2016)

- Edificio de marco rígido
- Habitacional
- 12 pisos

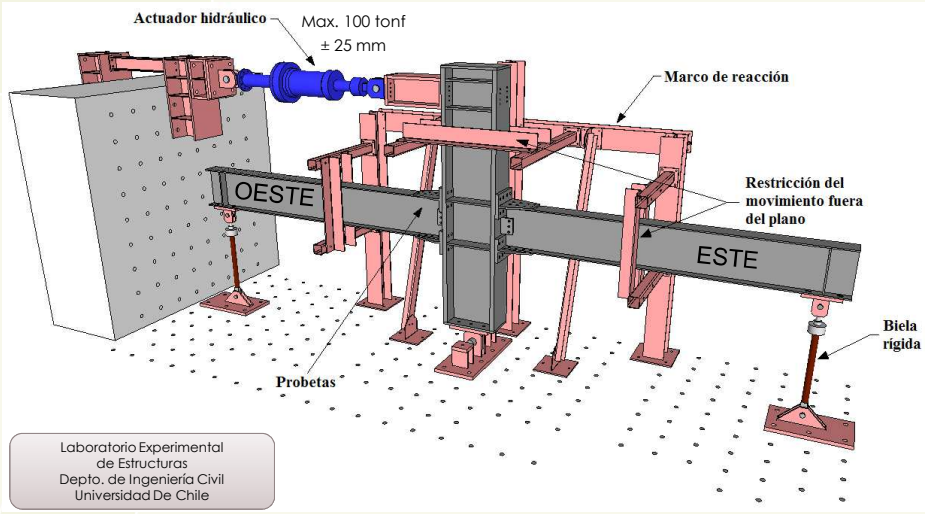




Columna
W36x194
(d_b=927 mm)

Vigas
W24x84
(d_b=612 mm)

Diseño de especímenes



Laboratorio Experimental de Estructuras
Depto. de Ingeniería Civil
Universidad De Chile

Diseño de especímenes

Especificaciones de diseño

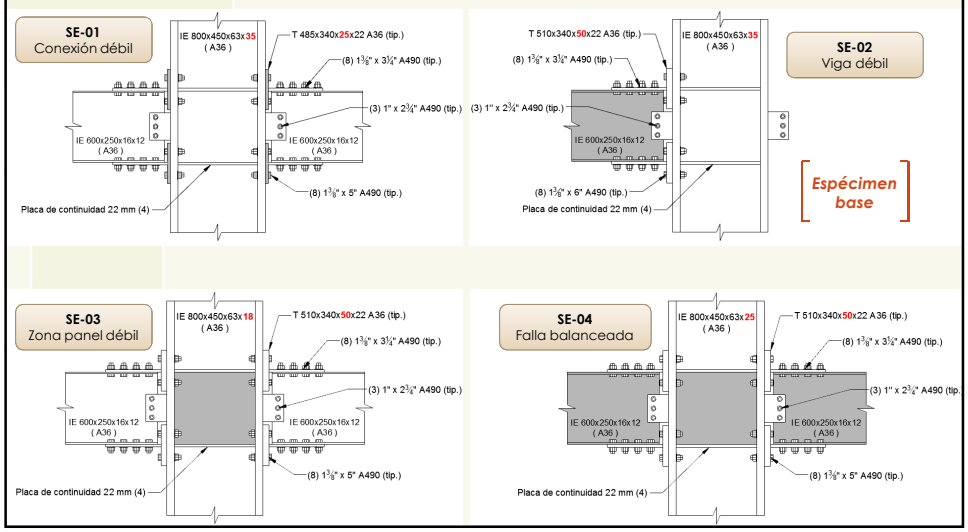
FEMA 350 (2000)
- Conexión DST
- Momento de fluencia en la viga

AISC 360 (2010)
- Diseño axial, corte y flexión
- Capítulo J: Pernos, soldaduras, atiesadores, zona panel

AISC 341 (2010)
- Diseño por capacidad
- Columna fuerte – viga débil

Diseño de especímenes

Detalle de conexiones



Contenidos

1. Motivación.
2. Objetivos generales y específicos.
3. Diseño de especímenes.
4. **Instrumentación de ensayo.**
5. Resultados experimentales.
6. Conclusiones.
7. Bibliografía.

Instrumentación de ensayo

¿Qué se desea medir?

- Curvas **P-Δ**
- Curvas **M-θ**
- Curvas **V-γ**

Desplazamiento entre piso y en apoyos → LVDTs

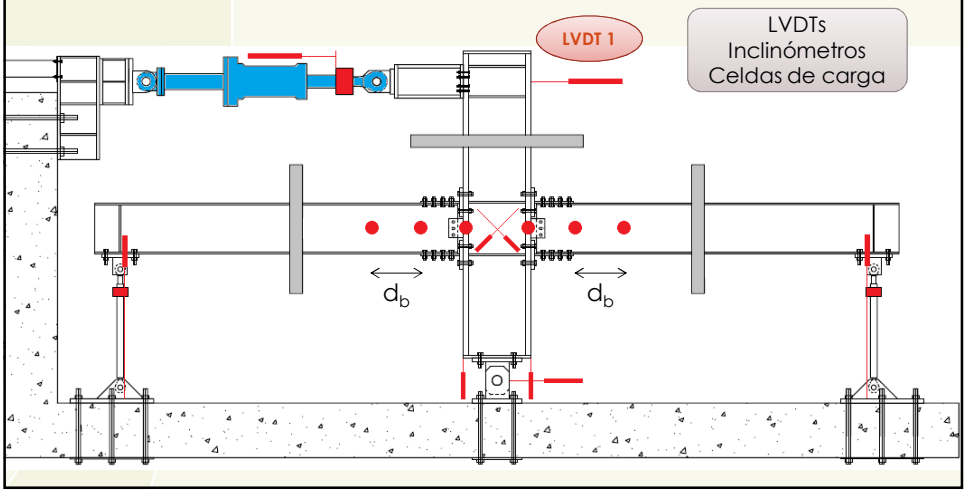
Deformación de la zona panel → LVDTs

Rotación total en la viga y conexión → Inclinómetros

Fuerza aplicada por actuador → Celdas de carga

Reacción en apoyo de vigas → Celdas de carga

Instrumentación de ensayo



Contenidos

1. Motivación.
2. Objetivos generales y específicos.
3. Diseño de especímenes.
4. Instrumentación de ensayo.
5. **Resultados experimentales.**
6. Conclusiones.
7. Bibliografía.

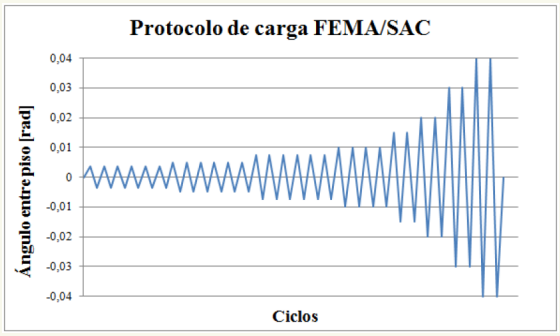
SE-01
SE-02**a**
SE-02**b**

Resultados Experimentales

Protocolo de carga

- FEMA 350 (2000) – Sec. 3.9.1
- AISC 341 (2010) – Sec. K2

θ entre piso [rad]	N° de ciclos	Desplazamiento entre piso [mm]
0,00375	6	13,4
0,005	6	17,8
0,0075	6	26,7
0,01	4	35,6
0,015	2	53,4
0,02	2	71,2
0,03	2	106,8
0,04	2	142,4
0,05	2	178,0



Resultados Experimentales

AISC 341 (2010)

- Capítulo E: Sistemas de **marco rígido**
- Sección E3: Marco rígido especial (**SMF**)

6b. Beam-to-Column Connections

Beam-to-column connections used in the *seismic force resisting system* (SFRS) shall satisfy the following requirements:

(1) The connection shall be capable of accommodating a story drift angle of at least 0.04 rad.

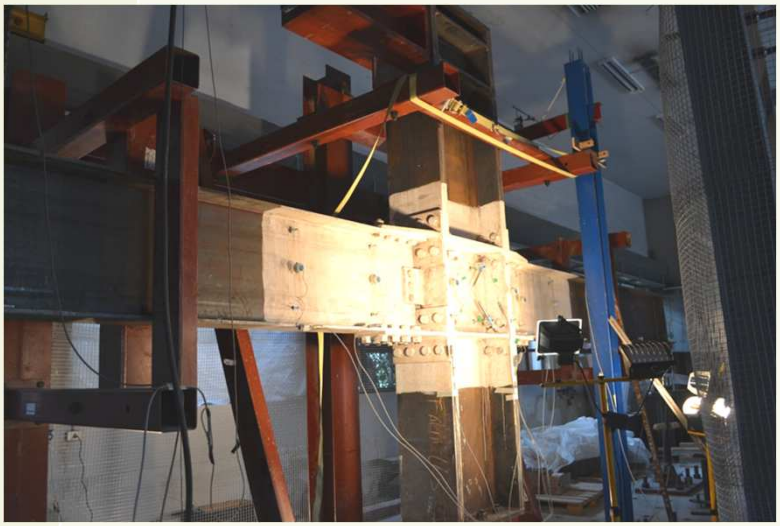
(2) The *measured flexural resistance* of the connection, determined at the column face, shall equal at least $0.80M_p$ of the connected beam at a story drift angle of 0.04 rad.

Resultados Experimentales

ENSAYO
SE-01
"Conexión débil"

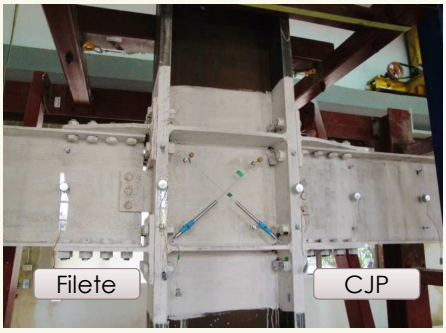
Resultados Experimentales

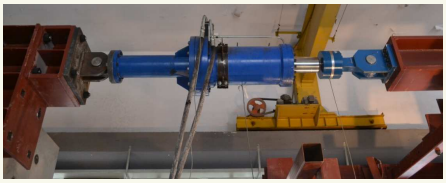
SE-01: "Conexión débil"



Resultados Experimentales

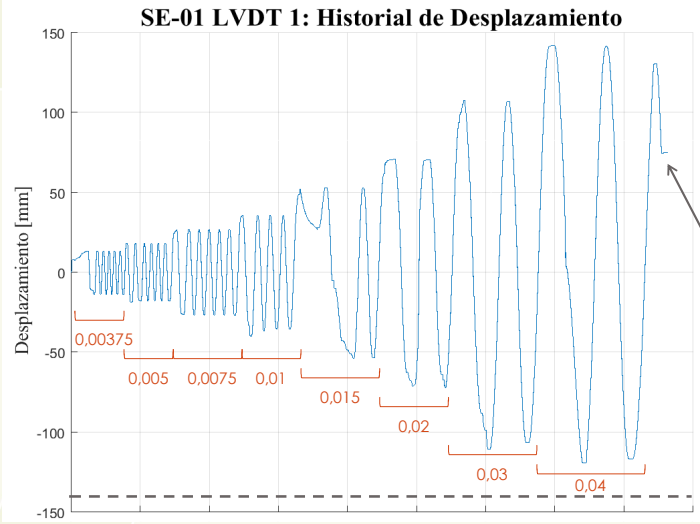
SE-01: "Conexión débil"





Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"



Duración : **8 horas**

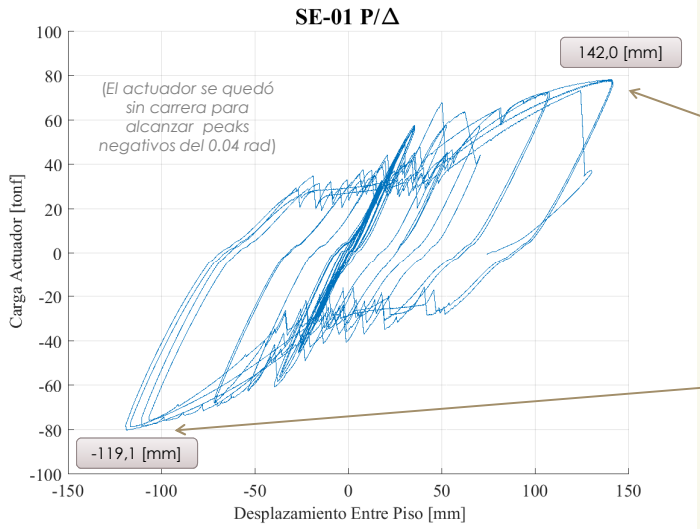
Tasa de muestreo : **40 datos/s**

Deformación remanente:

75 mm

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"



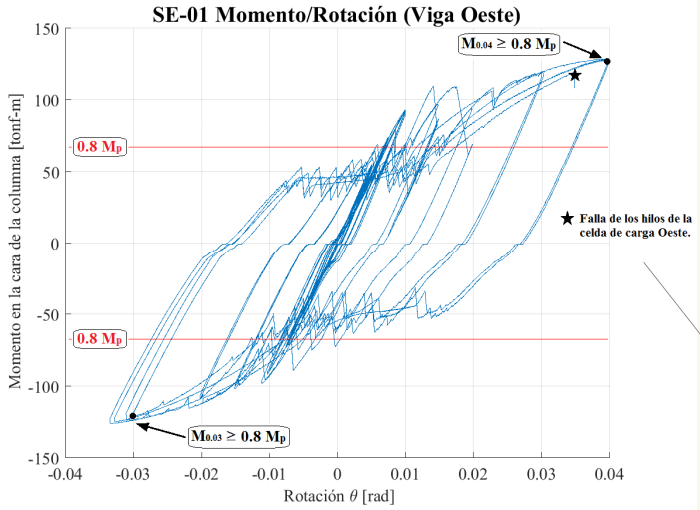
78,3 [ton]

Fuerza máxima aplicada

80,2 [ton]

Resultados Experimentales

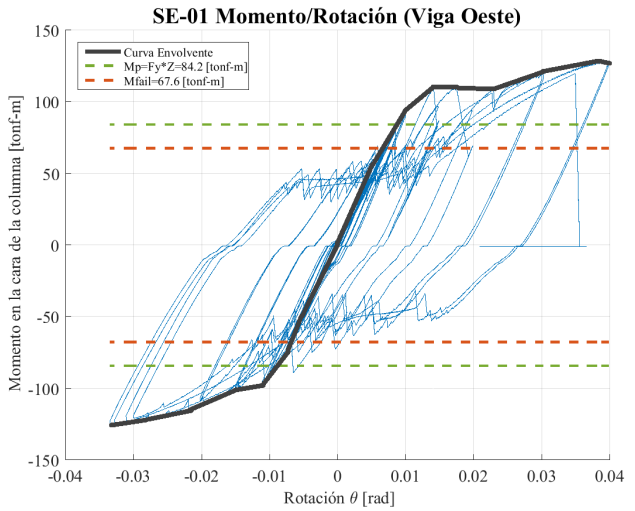
SE-01: "Conexión débil"



No hay degradación de resistencia

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"



Mfail
FEMA 350

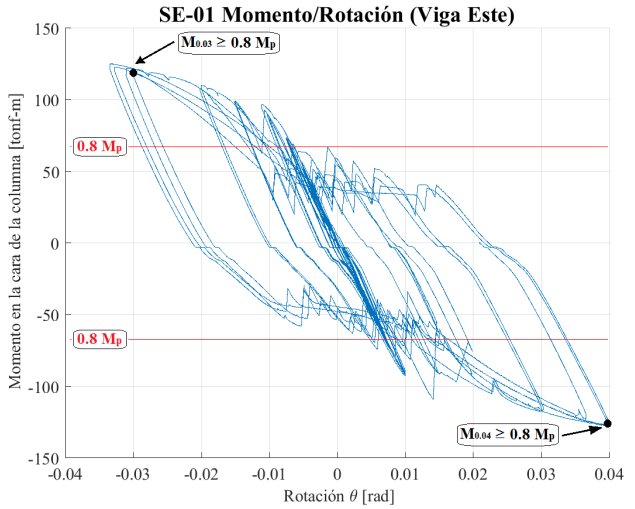
Inicio de plastificación de alas de T-stubs

Mfail teórico	Mfail experimental
[ton · m]	[ton · m]
67,6	89,3

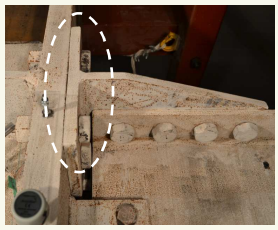
$$\frac{\text{Exp.}}{\text{Teo.}} = 1{,}32$$

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"



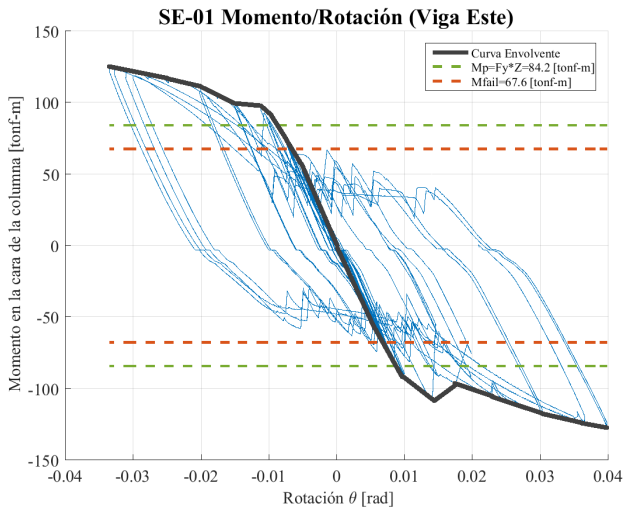
No hay degradación de resistencia



Primera deformación visible en θ = 0,02 rad

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"



Mfail
FEMA 350

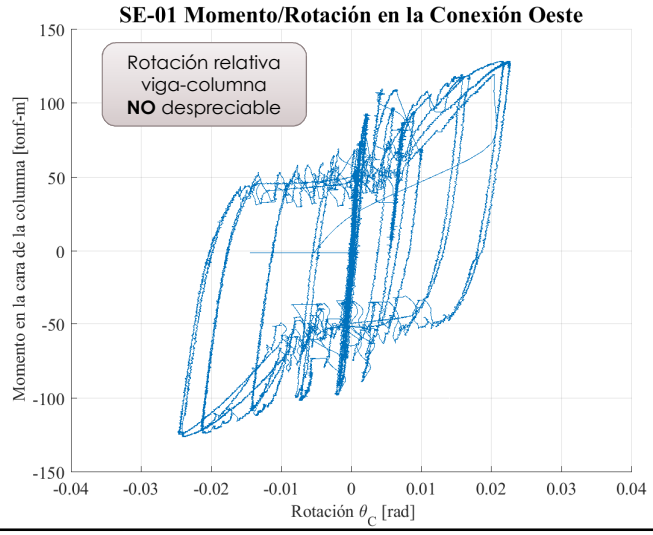
Inicio de plastificación de alas de T-stubs

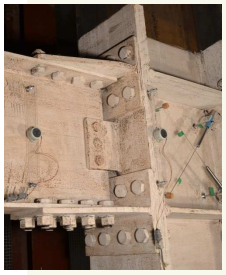
Mfail teórico	Mfail experimental
[ton · m]	[ton · m]
67,6	89,3

$$\frac{\text{Exp.}}{\text{Teo.}} = \mathbf{1{,}32}$$

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"



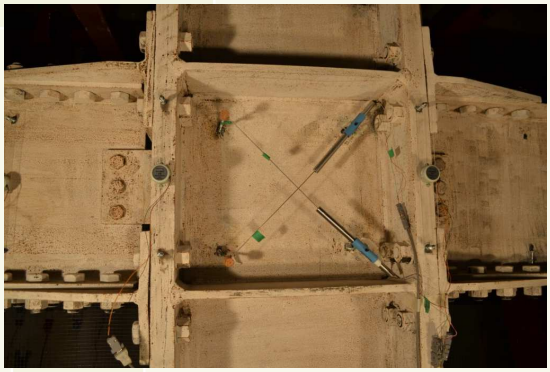


(*) Inclinómetros de la viga ESTE se desprendieron en θ = 0,014 [rad]

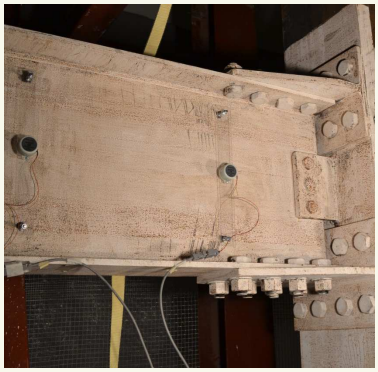
Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"

θ = **0,03** rad



*Efecto de apalancamiento en T superior-este y T inferior-oeste (θ = **0,03** [rad])*



*Inicio de fluencia en las vigas (θ = **0,03** [rad])*

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"

Viga ESTE adelante y atrás (Post-ensayo)

Viga OESTE (Post-ensayo)

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"

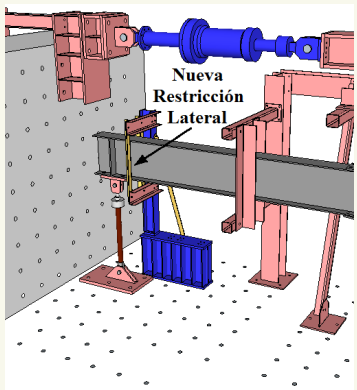
T-stub inferior oeste (Post-ensayo)

T-stub inferior este (Post-ensayo)

Resultados Experimentales

SE-01: "Conexión débil"

Volcamiento notorio (θ=0,04 [rad])



Resultados Experimentales

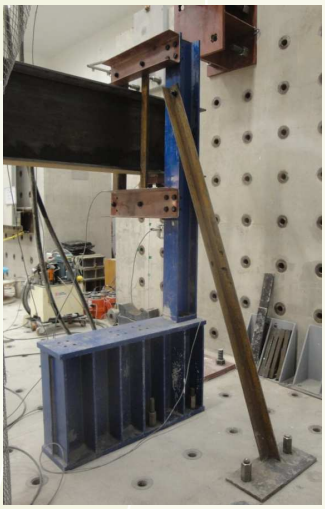
ENSAYO
SE-02(a)
"Viga débil"

Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"

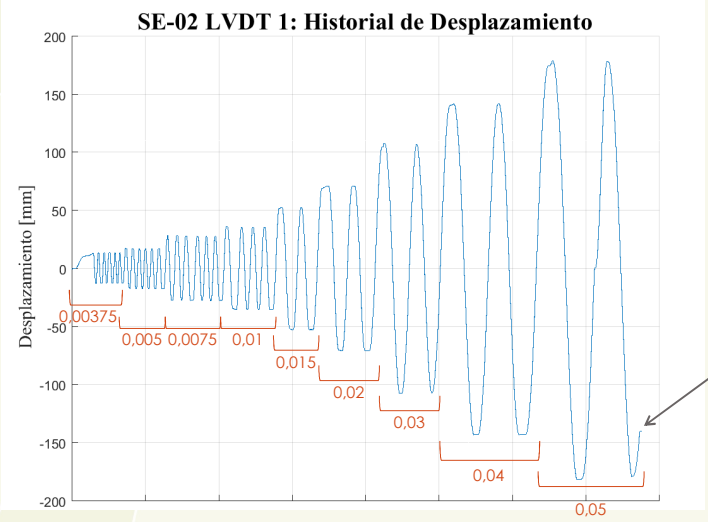
Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"



Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"



Duración : **6 horas**

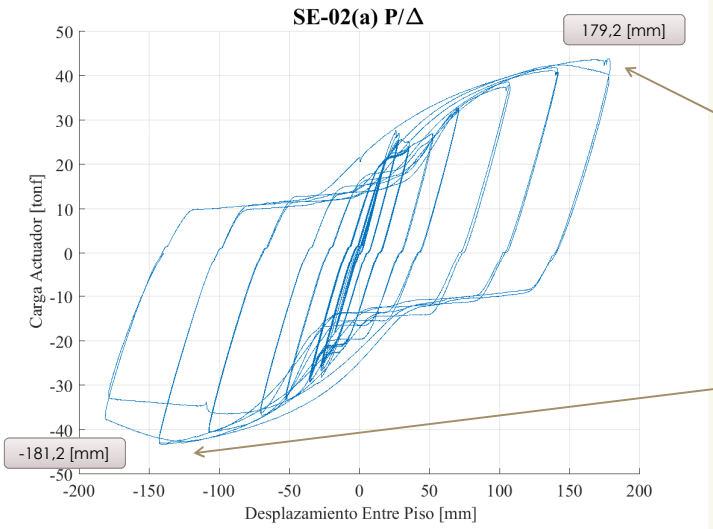
Tasa de muestreo : **40 datos/s**

Deformación remanente:

140 mm

Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"



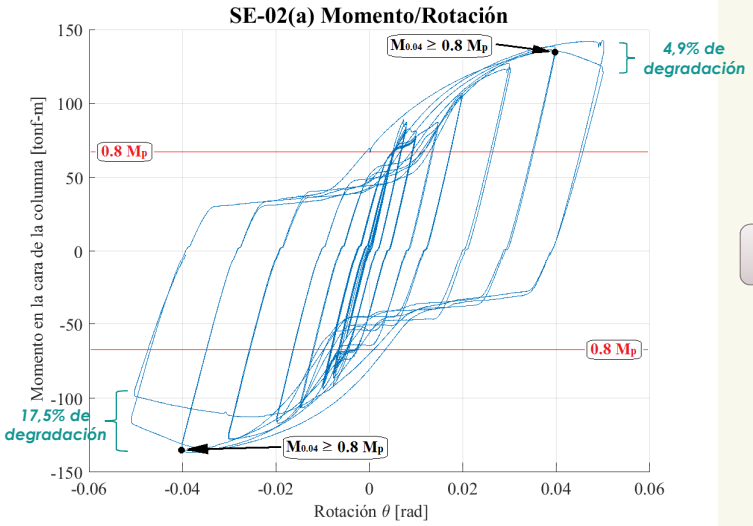
43,9 [ton]

Fuerza máxima aplicada

43,3 [ton]

Resultados Experimentales

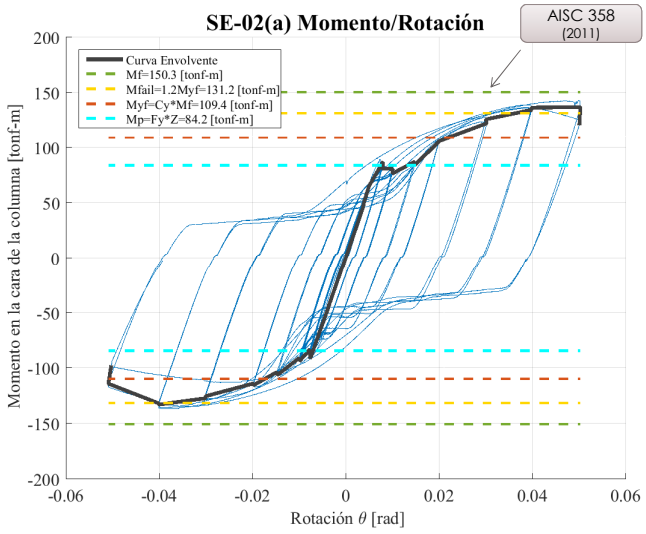
SE-02(a): "Viga débil"



SMF ✓

Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"



Mfail
FEMA 350

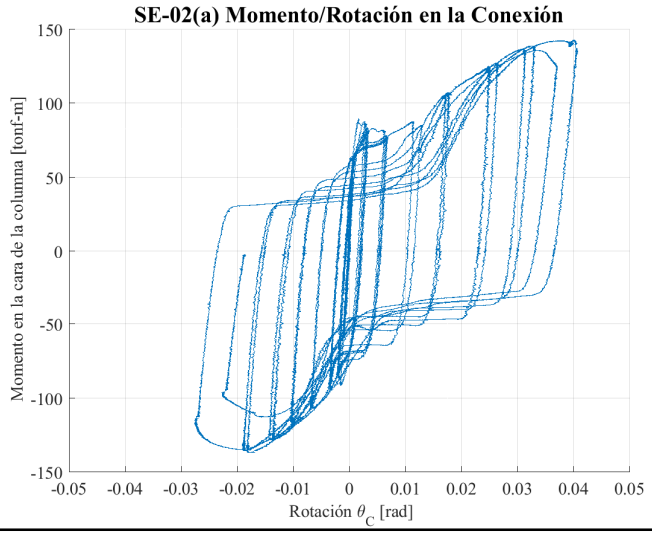
1,2 veces el momento de fluencia de la viga

Mfail teórico	Mfail experimental
[ton · m]	[ton · m]
131,2	139,9

$\frac{\text{Exp.}}{\text{Teo.}} = 1{,}07$

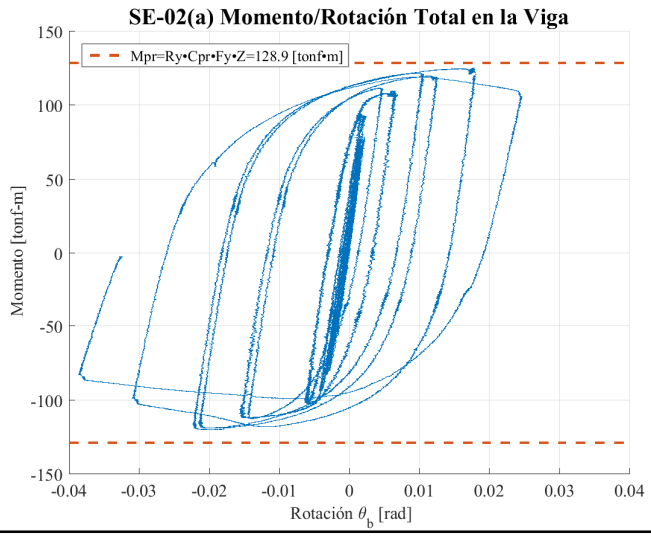
Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"



Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"



Ry = 1,3
Cpr = 1,2
Fy/Fy_nom = 1,13

Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"

θ = **0,02** y **0,03** rad

Inicio de fluencia en ala de viga
*(θ = **0,02** [rad] - ciclo 1)*

Inicio de fluencia en alas y alma de viga
*(θ = **0,03** [rad] - ciclo 2)*

Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"

θ = **0,04** rad

Inicio de pandeo local en alas de viga
*(θ = **0,04** [rad] - ciclo 2)*

Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"

θ = **0,05** rad

Pandeo local en alas y alma de viga
*(θ = **0,05** [rad] - ciclo 1)*

Resultados Experimentales

SE-02(a): "Viga débil"

θ = **0,05** rad

Rótula plástica
*(θ = **0,05** [rad] - ciclo 2)*

Resultados Experimentales

ENSAYO
SE-02(b)
"Viga débil"

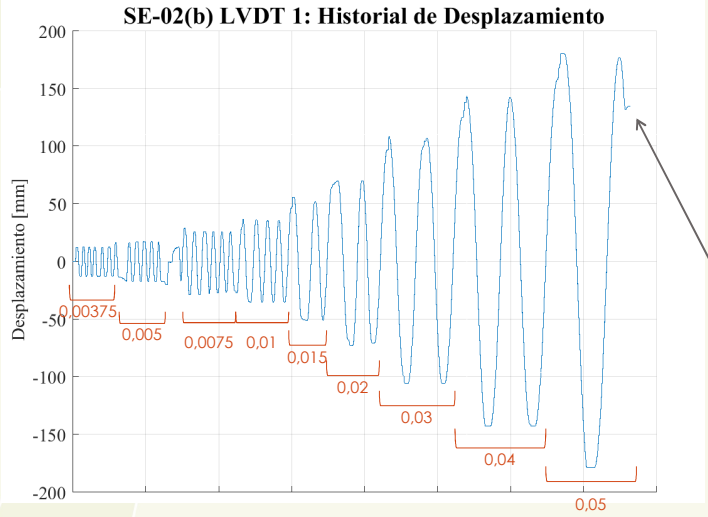
Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

Filete

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"



Duración : **6 horas**

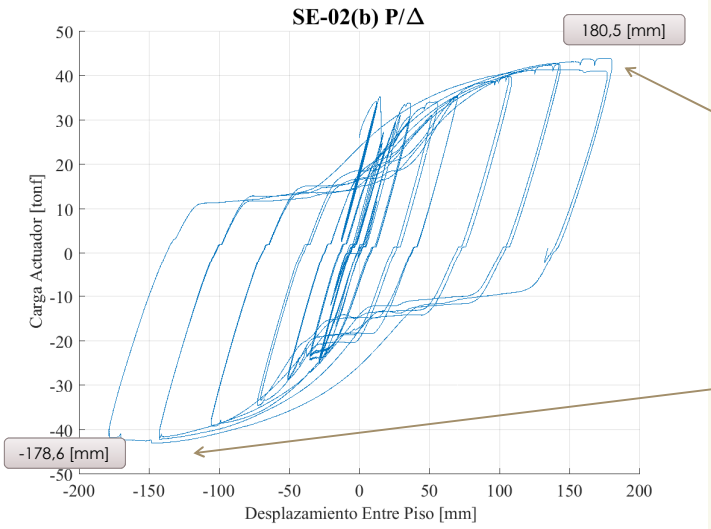
Tasa de muestreo : **40 datos/s**

Deformación remanente:

135 mm

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"



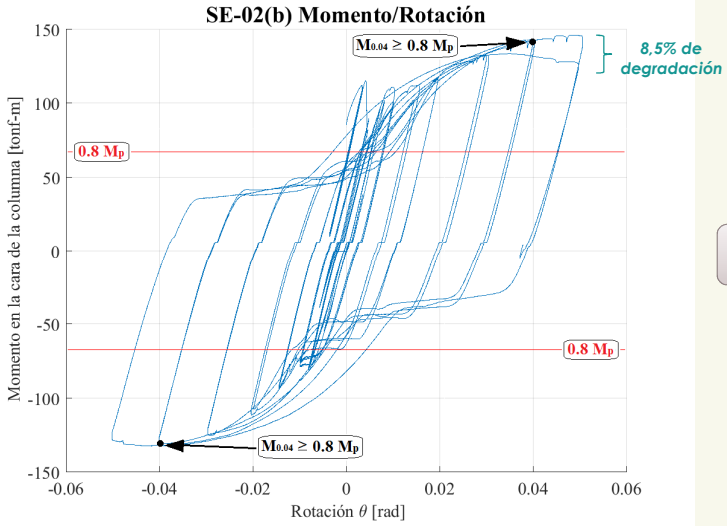
44 [ton]

Fuerza máxima aplicada

43,0 [ton]

Resultados Experimentales

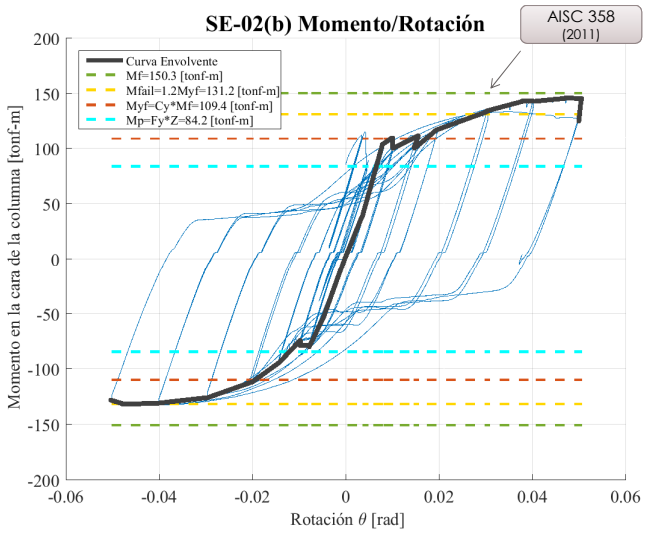
SE-02(b): "Viga débil"



SMF ✓

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"



Mfail FEMA 350

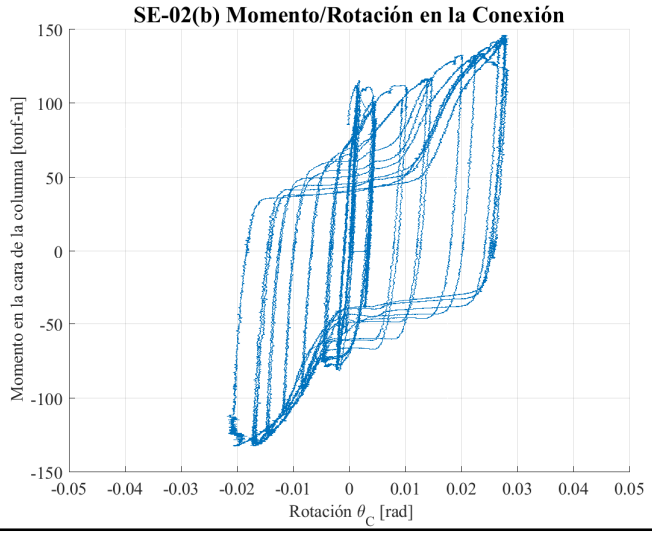
1,2 veces el momento de fluencia de la viga

Mfail teórico	Mfail experimental
[ton · m]	[ton · m]
131,2	139,4

$\frac{\text{Exp.}}{\text{Teo.}} = \mathbf{1{,}06}$

Resultados Experimentales

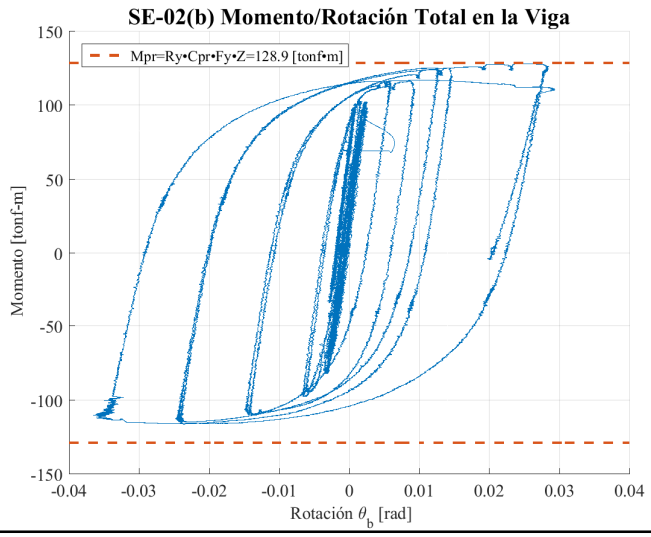
SE-02(b): "Viga débil"



θ = **0,03** rad

Resultados Experimentales

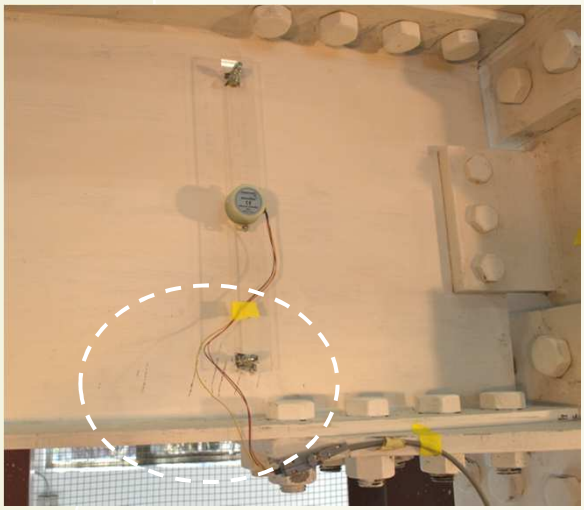
SE-02(b): "Viga débil"



$R_y = 1{,}3$
$C_{pr} = 1{,}2$
$F_y/F_{y\_nom} = 1{,}13$

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"



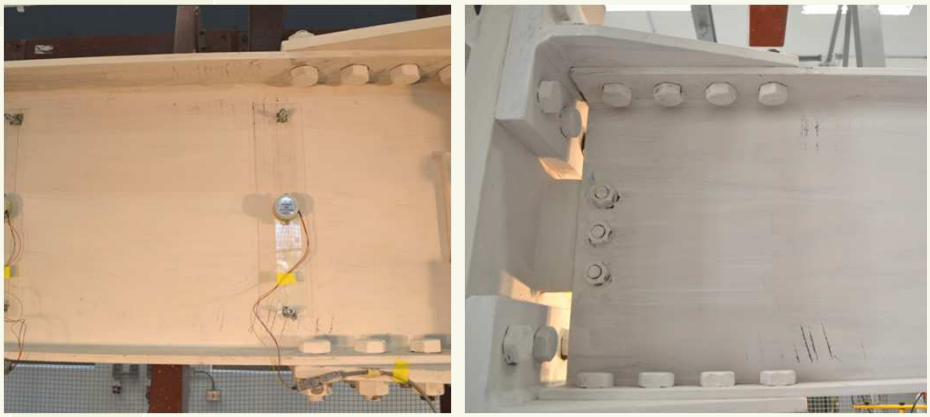
θ = ***0,005*** *[rad]*

Manifestaciones prematuras de deformación

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

θ = **0,02** rad

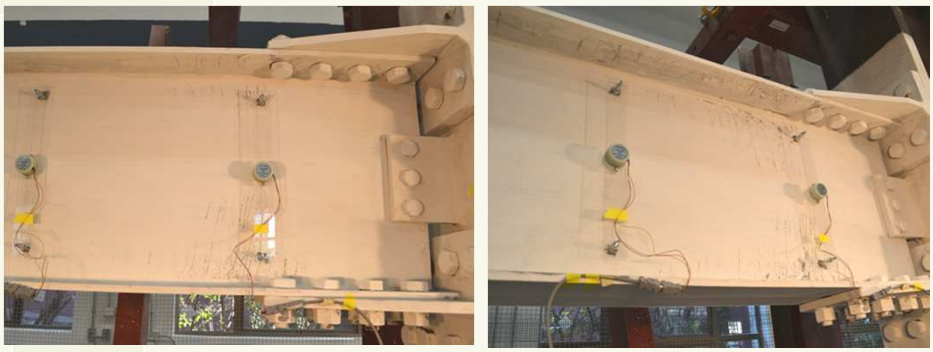


*Estado de viga para θ = **0,02** [rad]*

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

θ = **0,03** rad

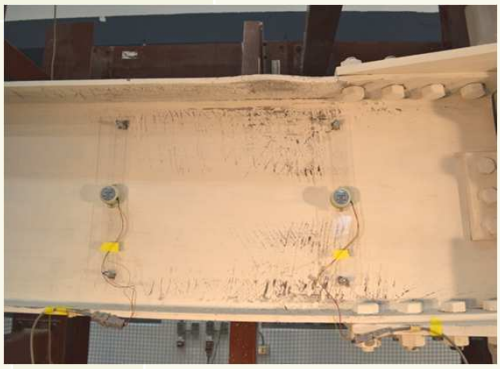


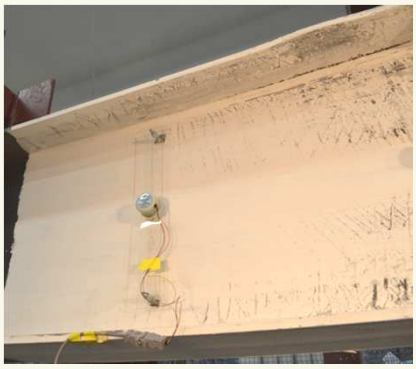
*Estado de viga para θ = **0,03** [rad]*

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

θ = **0,04** rad



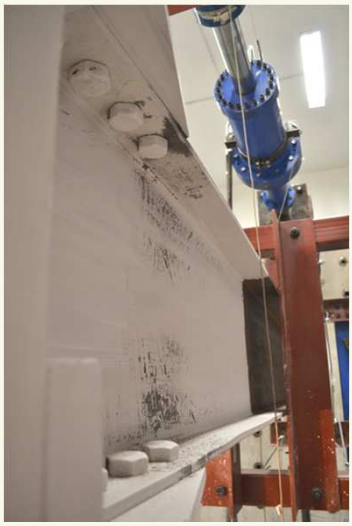


*Inicio de pandeo local en alas de viga para θ = **0,04** [rad]*

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

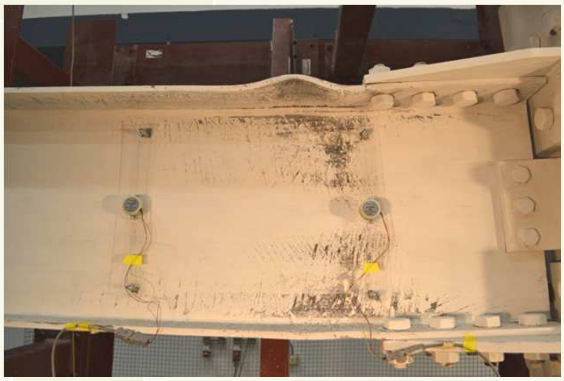
θ = **0,04** rad



Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

θ = **0,05** rad

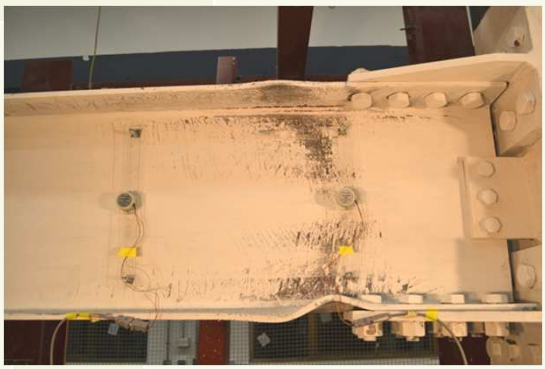


*Pandeo local en alas y alma de viga para θ = **0,05** [rad] – **ciclo 1***

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

θ = **0,05** rad



*Deformación en la viga para θ = **0,05** [rad] – **ciclo 2***

Resultados Experimentales

SE-02(b): "Viga débil"

θ = **0,05** rad → *¡Falla!*

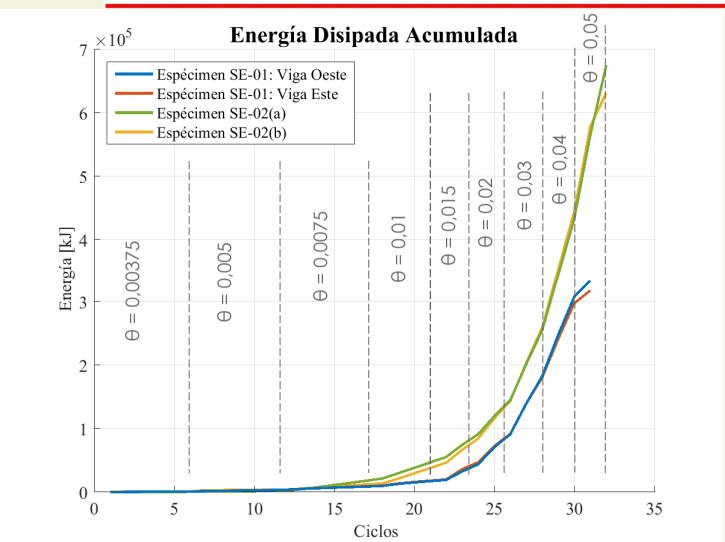
Inicio de fractura del área neta de la viga en ala superior de la viga
*θ = **0,05** [rad] – **ciclo 2***

Resultados Experimentales

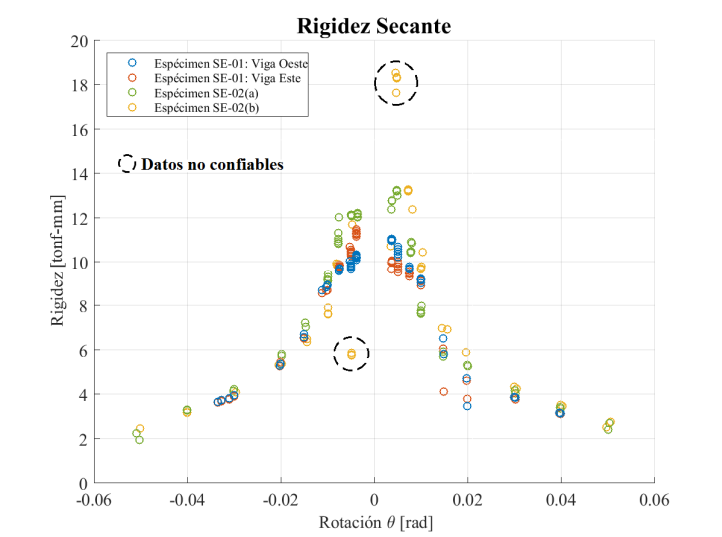
Energía Disipada Acumulada

Rigidez Secante

Resultados Experimentales



Resultados Experimentales



Resultados Experimentales

Soldadura

Resultados Experimentales

Soldaduras en perfiles T
sin daño visible

Contenidos

1. Motivación.
2. Objetivos generales y específicos.
3. Diseño de especímenes.
4. Instrumentación de ensayo.
5. Resultados experimentales.
6. **Conclusiones.**
7. **Bibliografía.**

Conclusiones

- *Diseño*
  - Se logró de manera satisfactoria, pues en los ensayos **controló** el estado límite predicho.
  - **Diferencias de criterio** para la capacidad de la viga entre FEMA ($1{,}2 \cdot M_{yf}$) y AISC (M_f) → M_f más conservador.
  - Se prescindió la aplicación de **carga axial** en la columna, pues la fuerza que se debía aplicar según diseño de Alarcón (2016) no superaría en más de un 3% a la capacidad a compresión de la columna.
- *Planos de fabricación*
  - **Buena confección**, pues especímenes fueron fabricados correctamente.
  - Etapa decisiva en el dimensionamiento final.
  - Importante **verificar** espesores disponibles en el mercado.

Conclusiones

- *Propiedades del material base*
  - Determinadas con éxito mediante ensayos.
  - ASTM **A36** Tensión de fluencia = 1,13 · $F_{y\,min}$
    Resistencia a tracción = 1,12 · $F_{u\,min}$
  - ASTM **A490** Tensión de fluencia = 1,22 · $F_{y\,min}$
    Resistencia a tracción = 1,20 · $F_{u\,min}$
- *Etapa experimental*
  - Es importante revisar piezas al momento del despacho: verificar que cumplan con dimensiones, posición de perforaciones y calce entre ellas → Evita demoras en caso de rectificaciones.

Conclusiones

- *Resultados de ensayos*
  - Especímenes ensayados **respondieron según lo pronosticado** por el diseño a partir de FEMA y de AISC, en cuanto al estado límite que predominó.
  - Los tres especímenes **cumplieron con los requerimientos para SMF** según AISC 341, pues fueron capaces de sostener una deformación angular entre piso de 0,04 rad, alcanzando una capacidad a flexión significativamente mayor que 0,8 · M_p.
  - Diseñar la conexión para que controle la formación de **rótulas plásticas** en las vigas garantiza una **mayor disipación de energía** que cuando controla la plastificación en alas de T-stubs.

Conclusiones

- *Ventajas de conexión DST con perfiles T soldados*
  - Perfiles soldados → mayor libertad para escoger espesores de plancha de un perfil que los laminados.
  - Montaje no requiere soldadura en terreno.
  - Aleja la ocurrencia de rótulas plásticas de la columna, por lo tanto, no compromete la estabilidad de piso.
  - Ningún tipo de soldadura empleado en la fabricación de los T-stubs presentó daño visible alguno.
- *Desventajas de conexión DST con perfiles T soldados*
  - Rotación relativa entre vigas y columnas conectadas no es despreciable → se debe incluir en modelos.

Conclusiones

- *Recomendaciones para futuras investigaciones*
  - Utilizar equipos en buen estado durante ensayos.
  - Mejorar la forma de fijación de los sensores para evitar pérdidas de datos experimentales.
  - Evaluar el desempeño de esta conexión con la columna sometida a carga axial significativa.
  - Implementar otras fuentes de análisis: fotogrametría o *strain gages* para analizar en detalle la respuesta de cada elemento.

Se marca un precedente sobre ensayos de conexiones de acero a esta escala en Chile

Bibliografía

1. AISC, 360-10. 2010a. Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.
2. AISC, 341-10. 2010b. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.
3. AISC, 358-10. 2011. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.
4. Alarcón, C. "Estudio numérico de conexiones DBT (Double Built-Up Tee) para Marcos de Momento Sismo Resistentes" Tesis para optar al Título de Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2016 (en preparación).
5. ASTM, A36/A36M-08. 2008. Standard Specification for Carbon Structural Steel. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
6. ASTM, A490M-10. 2010. Standard Specification for Carbon High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints (Metric). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
7. ASTM, E8/E8M-15a. 2015. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
8. Bravo, M. "Estudio analítico experimental de perfiles T soldados sometidos a carga cíclica" Tesis para optar al Título de Magíster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2013.
9. Desjouis, G. "Estudio analítico de conexiones de momento viga-columna usando perfiles T soldados" Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2006.

Bibliografía

10. FEMA, 350. 2000. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA.
11. Girão Coelho A., Biljaard F. Gresnigt N., and Simoes Da Silva L. 2004. Experimental assessment of the behavior of bolted T-stub connections made up of welded plates. Journal of Constructional Steel Research 60: 269-311.
12. Herrera, R.A., Gomez, G., and Sarrazin, M. 2009. Design and behavior of welded T-stubs for DST connections. Proceedings of the 6th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Philadelphia, Pennsylvania.
13. Núñez, A. "Diseño, fabricación y montaje de una instalación experimental para el ensayo de conexiones" Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2016.
14. Piluso V., Faella C., and Rizzano G. 2001b. Ultimate Behaviour of Bolted T-Stubs. II: Model Validation. Journal of Structural Engineering 127(6): 694-704.
15. RCSC. 2014. Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts. Research Council On Structural Connections, Chicago, IL, USA.
16. Smallidge, J. "Behavior of Bolted Beam-to-Column T-Stub Connections Under Cyclic Loading" Thesis to obtain the Degree Master of Science in Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.
17. Swanson, J.A., and Leon, R.T. 2000. Bolted Steel Connections: Tests On T-Stub Components. Journal of Structural Engineering 126(1): 50-56.
18. Tamboli, A.R. 2010. Handbook of Structural Steel Connection Design and Details. 2nd Edition. New York, NY: McGraw Hill.