



Construcción de edificios de madera: Investigación experimental

Hernán Santa María

Lima, 31 de mayo, 2018

Centro UC
de Innovación
en Madera



CIGIDEN

Centro de Investigación
para la Gestión Integrada
del Riesgo de Desastres



CONTENIDO

- **Motivación**
- **Proyecto de investigación**
- **Brechas normativas**
- **Ensayos**
- **Modelación**

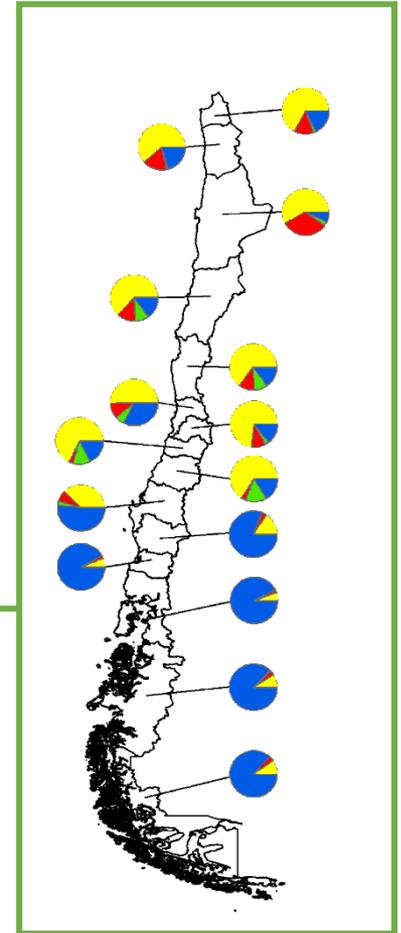


Residencias

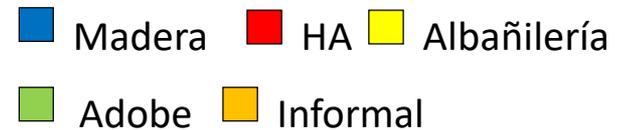
4,259,814 estructuras
99,5% son casas

5,297,622 viviendas
80% en casas

Madera:
32% de las casas
existentes
~0% edificios



Estructuras:



Santa María H, Hube M., Rivera F, Yépez.Estrada C, Valcárcel, J. (2017). “Development of national and local exposure models of residential structures for Chile,” *Natural Hazards*, 86, 55-79.

Rivera F, Santa María H, Hube M., Alvarez, J. (2015). “Development of an exposure model of residential structures for Chile,” 10th PCEE, Sydney, Australia.



- Oportunidad de construir edificios de departamentos.
- Chile es un país forestal.
- Este estudio surge como respuesta a 3 décadas de solicitud de la industria de la madera chilena.
- Existe poco conocimiento sobre las estructuras en madera en la comunidad ingenieril general.
- No existen herramientas ni métodos de diseño calibrados.
- No existe un soporte normativo suficiente para posicionar la madera como material de construcción para edificios de mediana altura.



PROYECTO NCH 433 MARCO Y PLATAFORMA

Evaluación y propuesta de modificación de normativa de diseño sísmico NCh433 para la construcción de una edificación de mediana altura en Chile con estructura en madera utilizando el sistema de marco y plataforma.

Proyecto **CORFO**





OBJETIVO:

Desarrollar y validar una propuesta de modificación de las normativas chilenas de diseño **estructural** en madera, que permita la construcción de edificaciones de **mediana altura** utilizando el sistema de marco y plataforma.



OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Definir las brechas normativas que dificultan que se construyan en Chile edificios de hasta 6 pisos en madera.
- Ensayar muros bajo condición de cargas axiales altas.
- Proponer modificaciones a la norma de diseño sísmico de edificios y a la norma de cálculo de construcciones en madera que permitan diseñar edificios de madera de altura media.
- Proponer soluciones de diseño para cumplir los requerimientos de resistencia y rigidez estructural, que permitan construir edificios de madera de hasta 6 pisos.



PARTICIPANTES

Ejecutores: Universidad Católica, Universidad del Bío – Bío

Mandante: MINVU

Financia: CORFO

Asesoría externa: Technical University Viena, University of Applied
Science Upper Austria

Empresas: Arauco, CMPC, Louisiana Pacific, Simpson Strong-Tie,
Pizarreño

Panel consultor experto: ACHISINA, Instituto de la Construcción,
Corma, DITEC-MINVU, profesionales destacados



SISTEMA MARCO-PLATAFORMA



<https://www.smithcarpentryllc.com/4690-e96d-1dec9a17a983/10677>

Pies derechos



<http://www.canadawood.or.kr/english/building/performance.php>



[gallery/8/8b098665-26f9-4800-df6c-0124198_o.jpg](#)



https://www.smithcarpentryllc.com/media/rokgallery/a/aa3bd7be-3f78-4b15-8e63-3a4b1a6aef81/DJI_0055.JPG

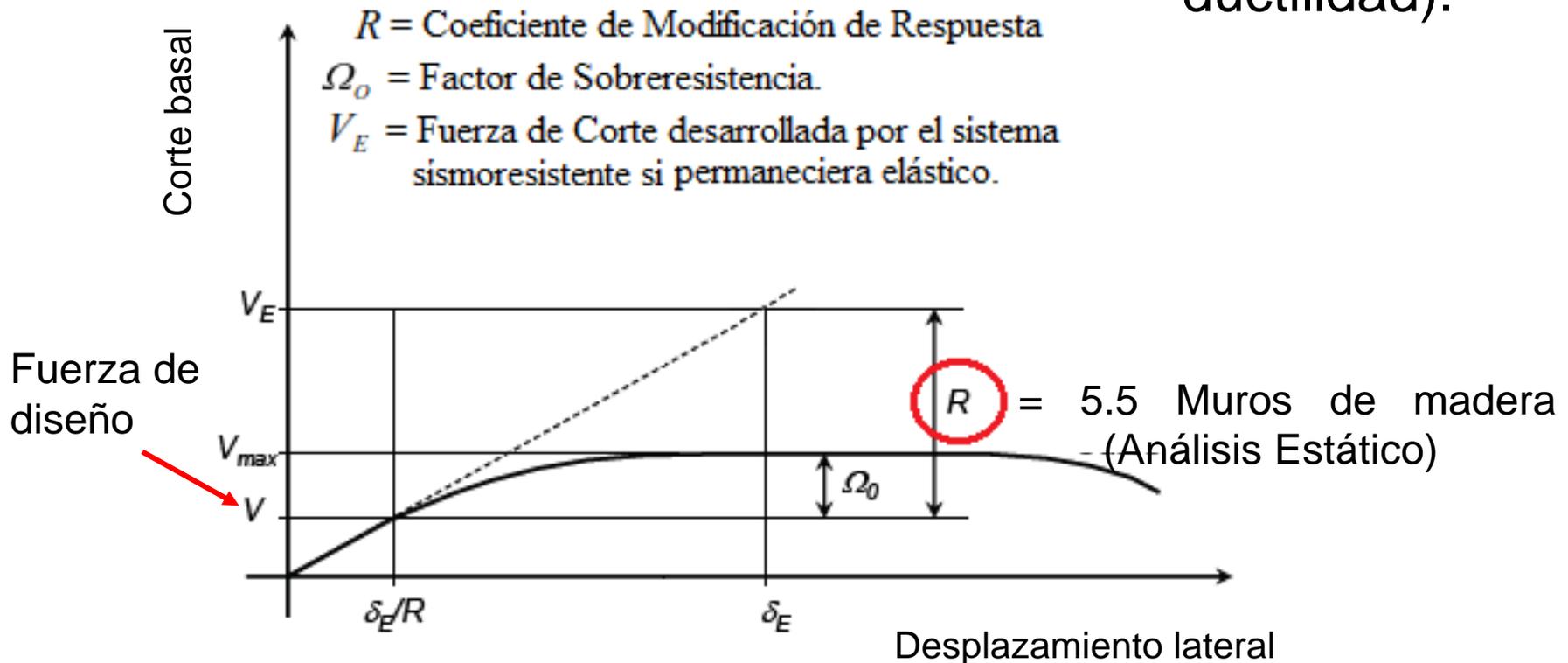


NCh433: Diseño sísmico de edificios

- Define:
 - Métodos de análisis: estático, dinámico
 - Las fuerzas de diseño: amenaza sísmica, tipo de suelo, materialidad, estructuración → resistencias requeridas
 - Desplazamiento relativo de piso → rigidez requerida

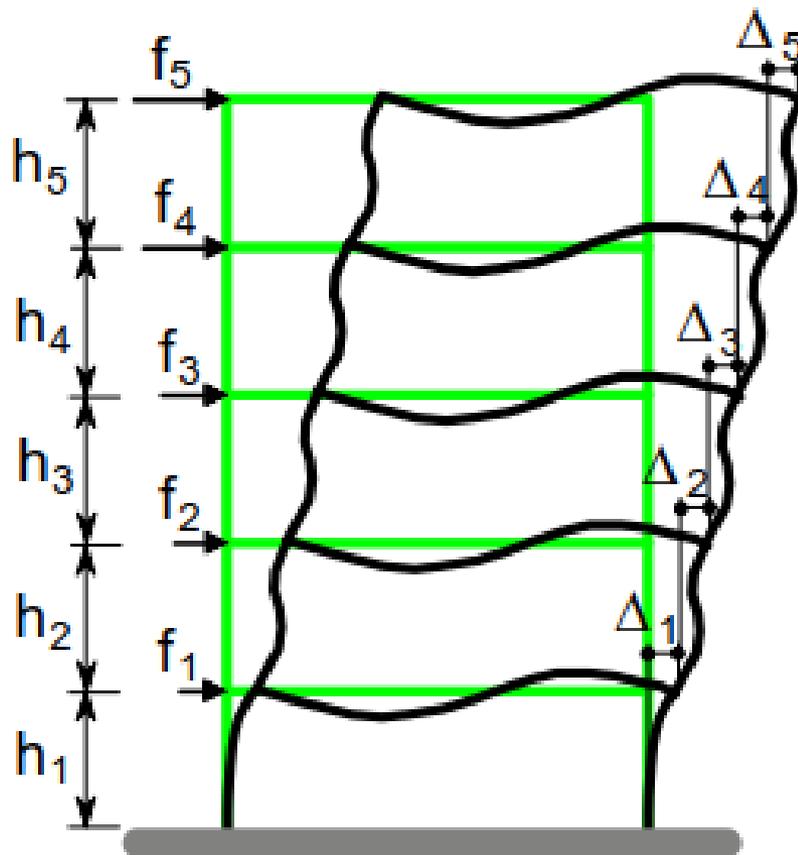
NCh433: Diseño sísmico de edificios

R = Factor de Modificación de Respuesta (resistencia, ductilidad).



NCh433: Diseño sísmico de edificios

Δ = Máximo desplazamiento admisible de entrepiso (rigidez)



Valor actual en Norma
NCh-433:

$$\Delta = 0.002 h$$



NCh1198: Madera – Construcción en madera - Cálculo

- Para diseñar elementos y conexiones.
- Madera aserrada, madera laminada, postes de madera.
- No hay referencias al diseño de marco-plataforma.
- **No hay referencias al diseño de muros estructurales de madera.**



BRECHAS NORMATIVAS

- **NCh433**
 - Evaluar el factor de reducción R usando un método racional.
 - Definir un límite del desplazamiento relativo entre pisos > 0.002 solo para estructuras de muros de madera en marco-plataforma.
- **NCh1198**
 - Definir requisitos de diseño para muros de madera.
 - Requisitos para conectores, incluidos anclajes.
 - Proponer métodos de análisis.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Escuela de Ingeniería

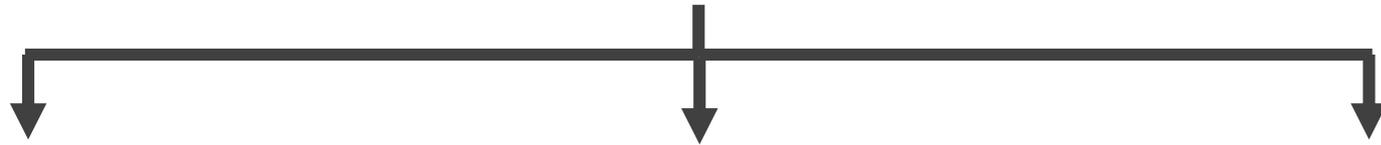
Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica

Centro UC
de Innovación
en Madera

Investigación con una fuerte componente experimental y numérica

EXPERIMENTOS

Para obtener Información del sistema estructural



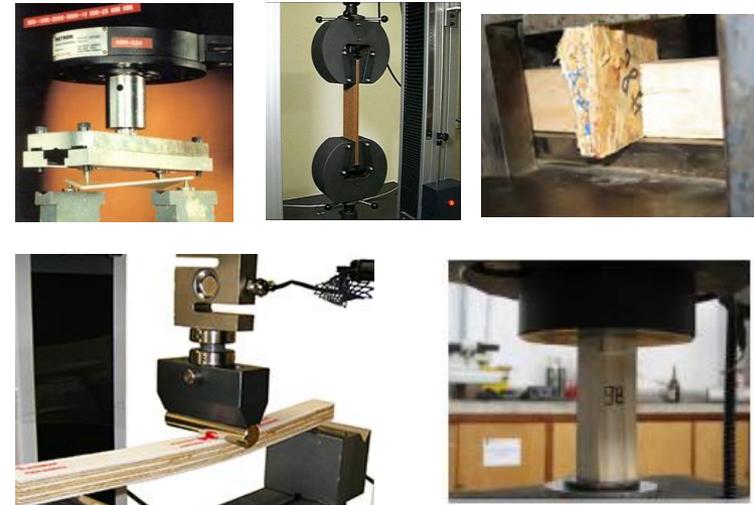
Ensayos Muros



Ensayos Conexiones



Ensayos Madera y Tableros

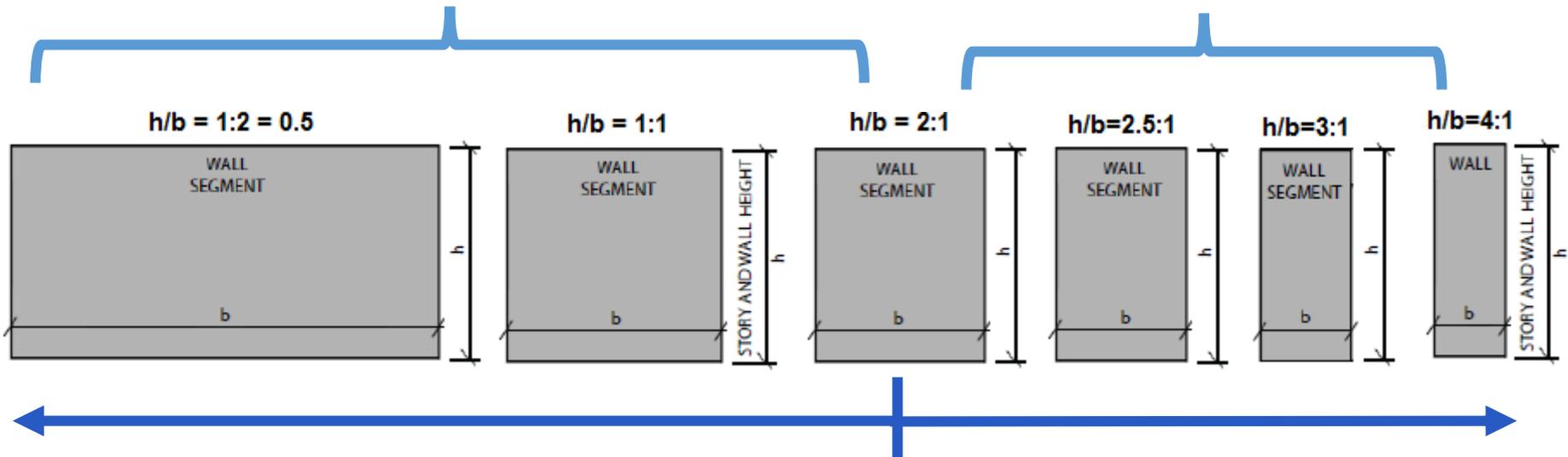




MUROS RELACIONES DE ASPECTO:

Predominan las deformaciones por Corte (respuesta más predecible)

Deformaciones por Flexión/Corte



Resistencia y Rigidez
proporcional a la longitud

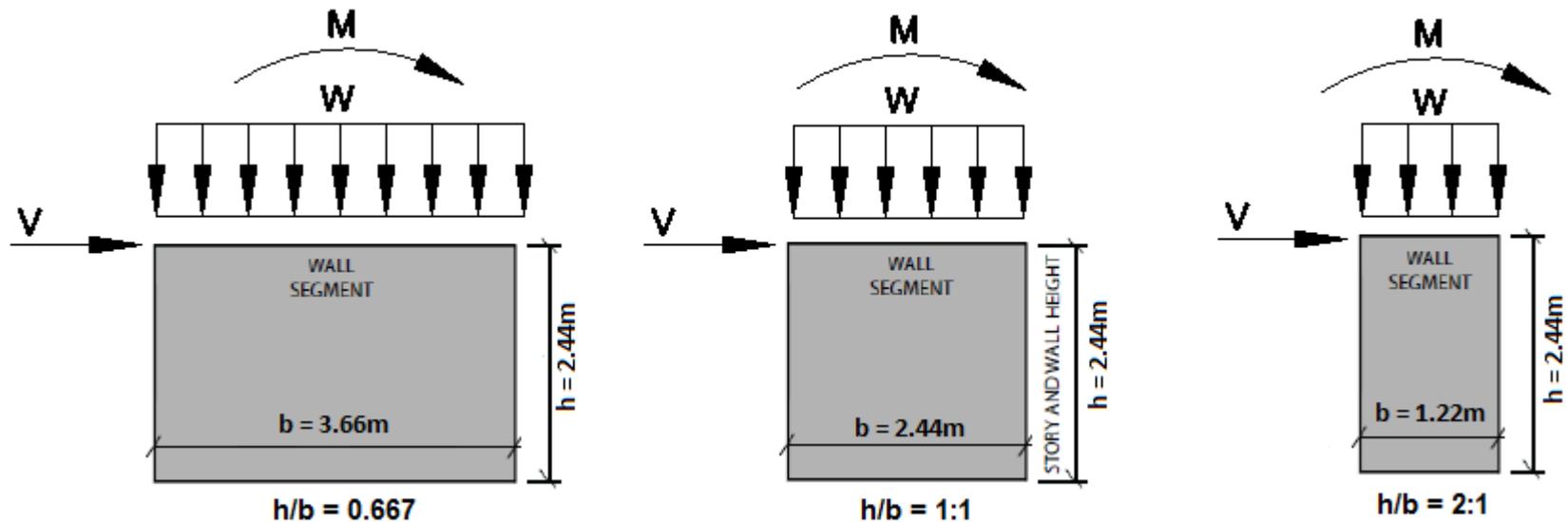
Resistencia y Rigidez NO
proporcional a la longitud

Ensayos Muros: Diferentes relaciones de forma.

Ensayos Muros: - Corte Monotónico

- Corte Cíclico

- Corte Cíclico + Carga Axial + Momento Volcante



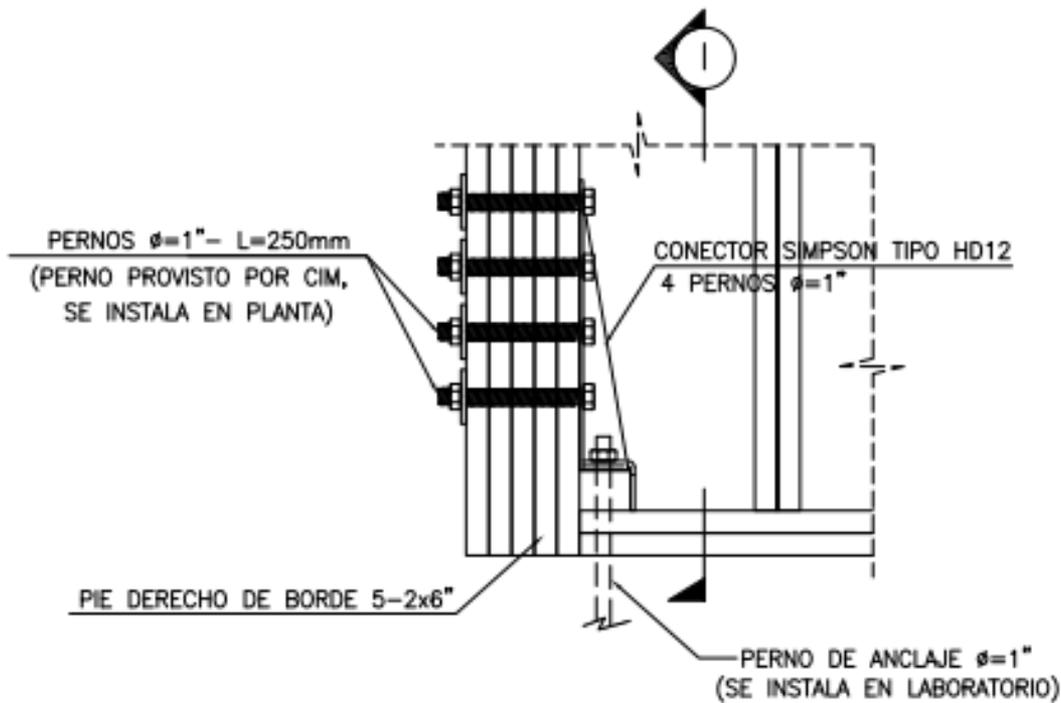


MATRIZ DE ENSAYOS

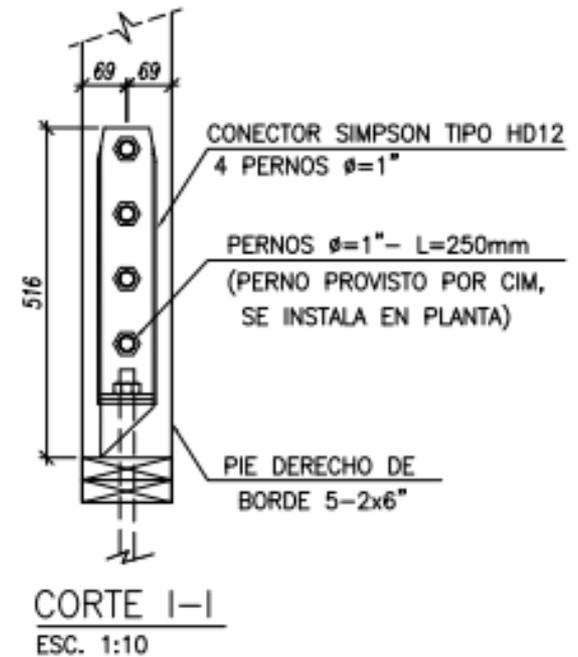
TAMAÑO DE PROBETA (mm)	TABLERO ESTRUCTURAL OSB	ESPACIAMIENTO DE CLAVADO (⌀3mm, L = 65mm)	CANT. ENSAYOS CORTE CÍCLICO:	CANT. ENSAYOS CORTE CÍCLICO + CARGA AXIAL + MOMENTO DE VUELCO	TOTAL
2400x2440	e = 11mm	CLAVOS @100mm	2	2	4
		CLAVOS @50mm	2	1	3
1200x2440	e = 11mm	CLAVOS @100mm	2	2	4
		CLAVOS @50mm	2	1	3
3600x2440	e = 11mm	CLAVOS @100mm	2	2	4
(2400+1200)x2440	e = 11mm	CLAVOS @100mm	2	0	2
				SUBTOTAL	20

TAMAÑO DE PROBETA (mm)	TABLERO ESTRUCTURAL OSB	ESPACIAMIENTO DE CLAVADO (⌀3mm, L = 65mm)	CANT. ENSAYOS CORTE MONOTÓNICO
2400x2400	e = 11mm	CLAVOS @100mm	2
		CLAVOS @50mm	1
1200x2400	e = 11mm	CLAVOS @100mm	2
		CLAVOS @50mm	1
SUBTOTAL			6

Anclajes



DETALLE 4
 DETALLE DE INSTALACIÓN DE
 DISPOSITIVO HOLDDOWN TIPO HD12
 ESC. 1:10





ANCLAJES



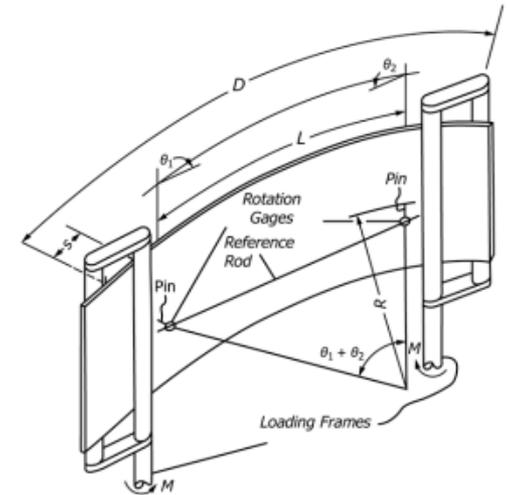
CARACTERIZACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS OSB:



ASTM – D1037



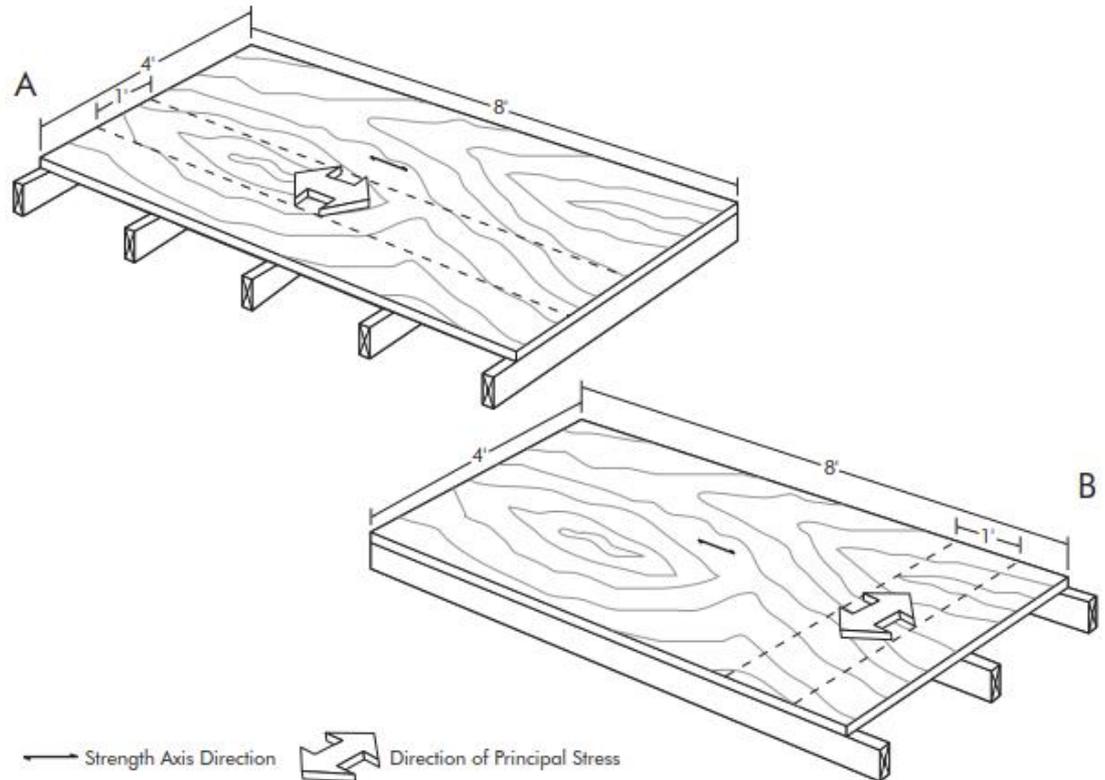
ASTM – D3043



Módulo de corte G del OSB.

Ensayos realizados en American Plywood Association:

Panel Number	Panel Thickness (mm)	Gv·tv, lbf/in. of panel depth	
		Along ¹	Across ¹
1	11.9	90,077	64,429
2	12.5	93,991	73,538
3	12.2	78,563	81,000
4	11.8	89,151	92,257
5	11.1	90,912	93,082
6	11.3	79,884	75,381
7	11.4	81,980	66,254
8	10.9	78,710	64,192
9	10.5	72,190	77,820
10	11.4	75,521	53,328
11	10.6	76,606	99,309
12	10.9	82,123	98,372
13	12.8	78,330	83,479
14	11.3	82,015	78,778
15	11.3	89,281	79,036
16	11.1	80,513	95,905
17	12.4	87,413	74,348
18	11.3	81,852	80,858
19	11.1	84,648	83,803
20	11.8	83,682	76,570
Statistics:			
Min	10.5	72,190	53,328
Max	12.8	93,991	99,309
Mean	11.5	82,872	79,587
Std Dev	0.617	5,743	12,175
COV (%)	5.4	6.9	15.3
Allowable Design		82,872	79,587
P.D.S.		83,500	83,500
% Dif.		0.76%	4.92%
		81,230	2.80%



¹Along and across refer to panel direction relative to the strength axis.

CONEXIÓN CLAVADA MADERA – OSB. Universidad del Bío - Bío



- Los Tableros de OSB LP (e = 11.1mm).
- Pino Radiata Grado MGP10 Arauco
- Escuadría 2" x 6" (35x138mm)
- Clavos helicoidales 3x70mm.



CONEXIÓN CLAVADA MADERA - OSB:

DIRECCIÓN PARALELA A
LA FIBRA DE MADERA

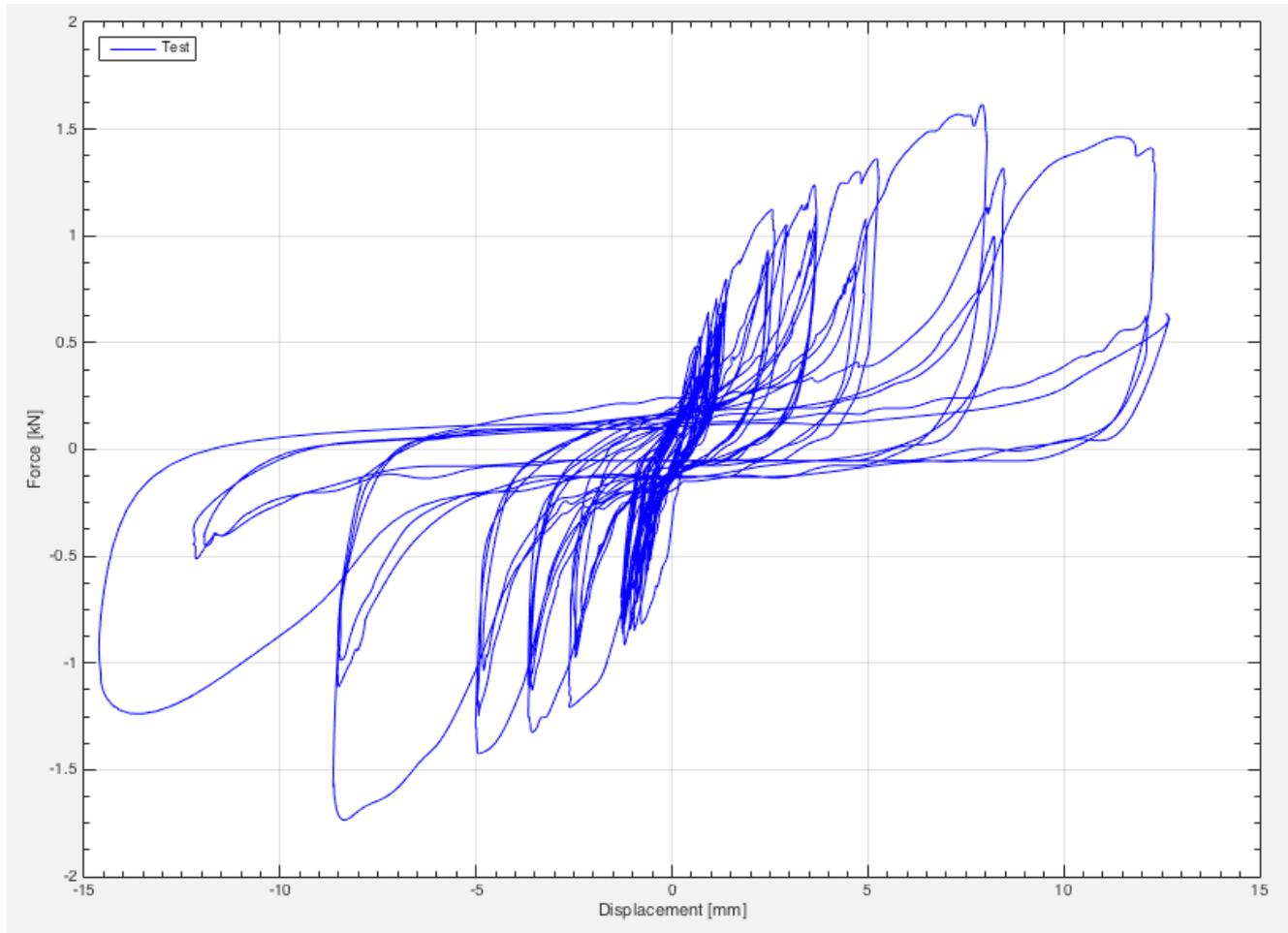


DIRECCIÓN PARALELA A
LA FIBRA DE MADERA





CONEXIÓN CLAVADA MADERA – OSB. Histéresis



CONEXIÓN CLAVADA MADERA - OSB: *MODOS DE FALLA*

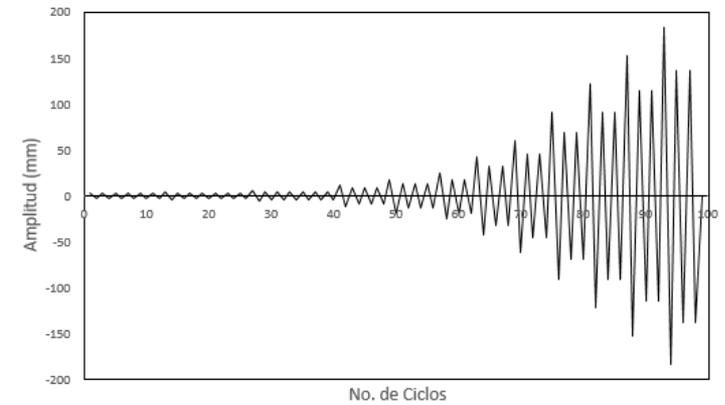


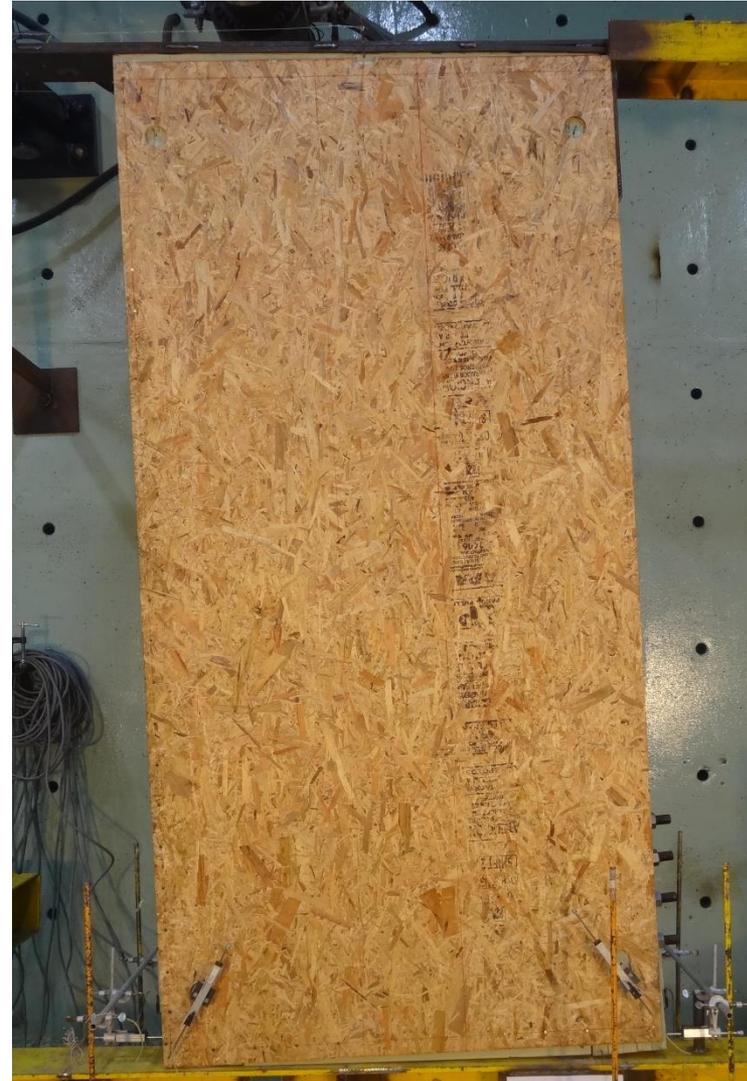
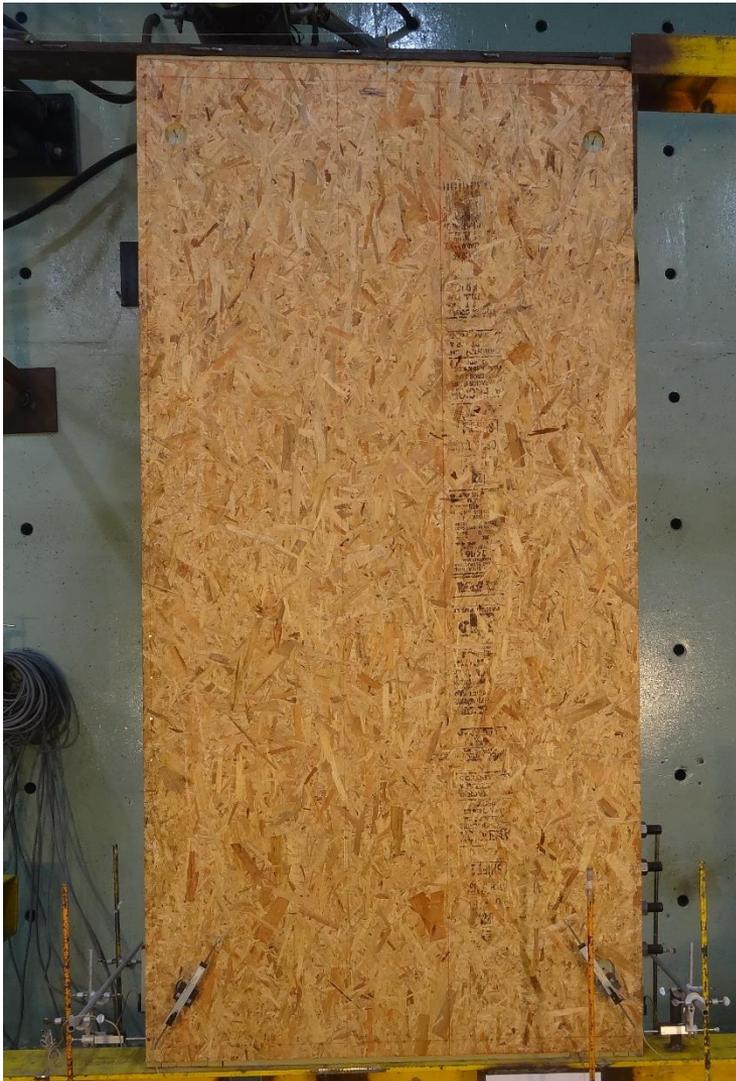
Muro y losa de reacción





PROTOCOLO ENSAYO CÍCLICO CUREE (ASTM E2126 - METHOD C)











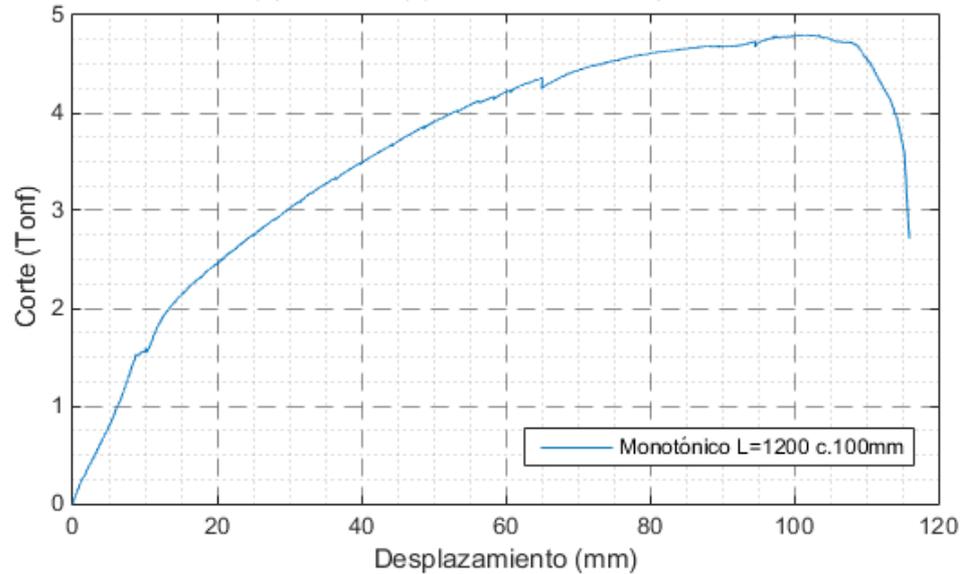
MODOS DE FALLA: MADERA / CLAVO / OSB





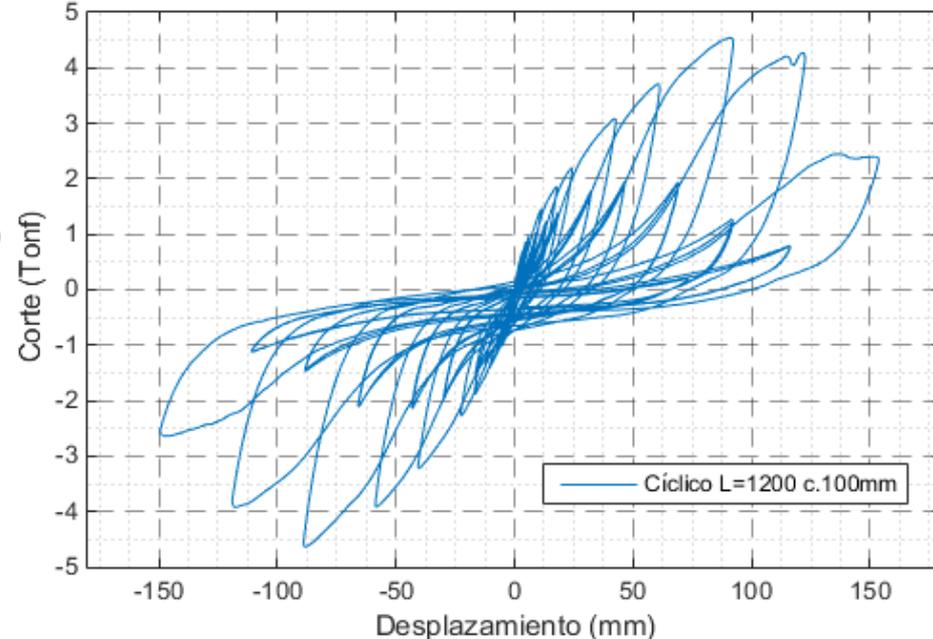
ENSAYO MONOTÓNICO:

CURVA DE CORTE LATERAL VS. DRIFT



ENSAYO CÍCLICO:

CURVA DE CORTE LATERAL VS. DESPL. GLOBAL



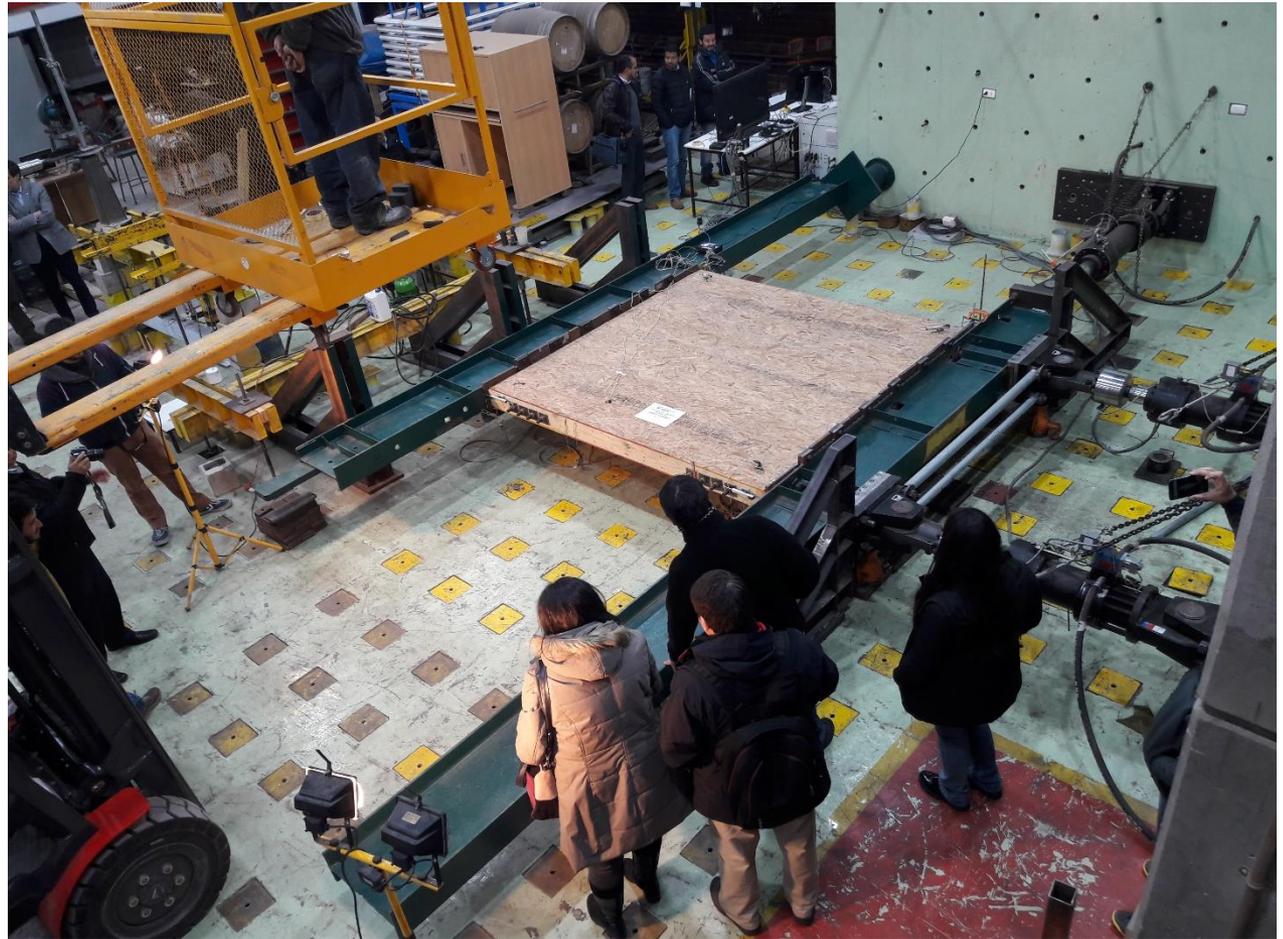


MONTAJE ENSAYO CON CARGA AXIAL

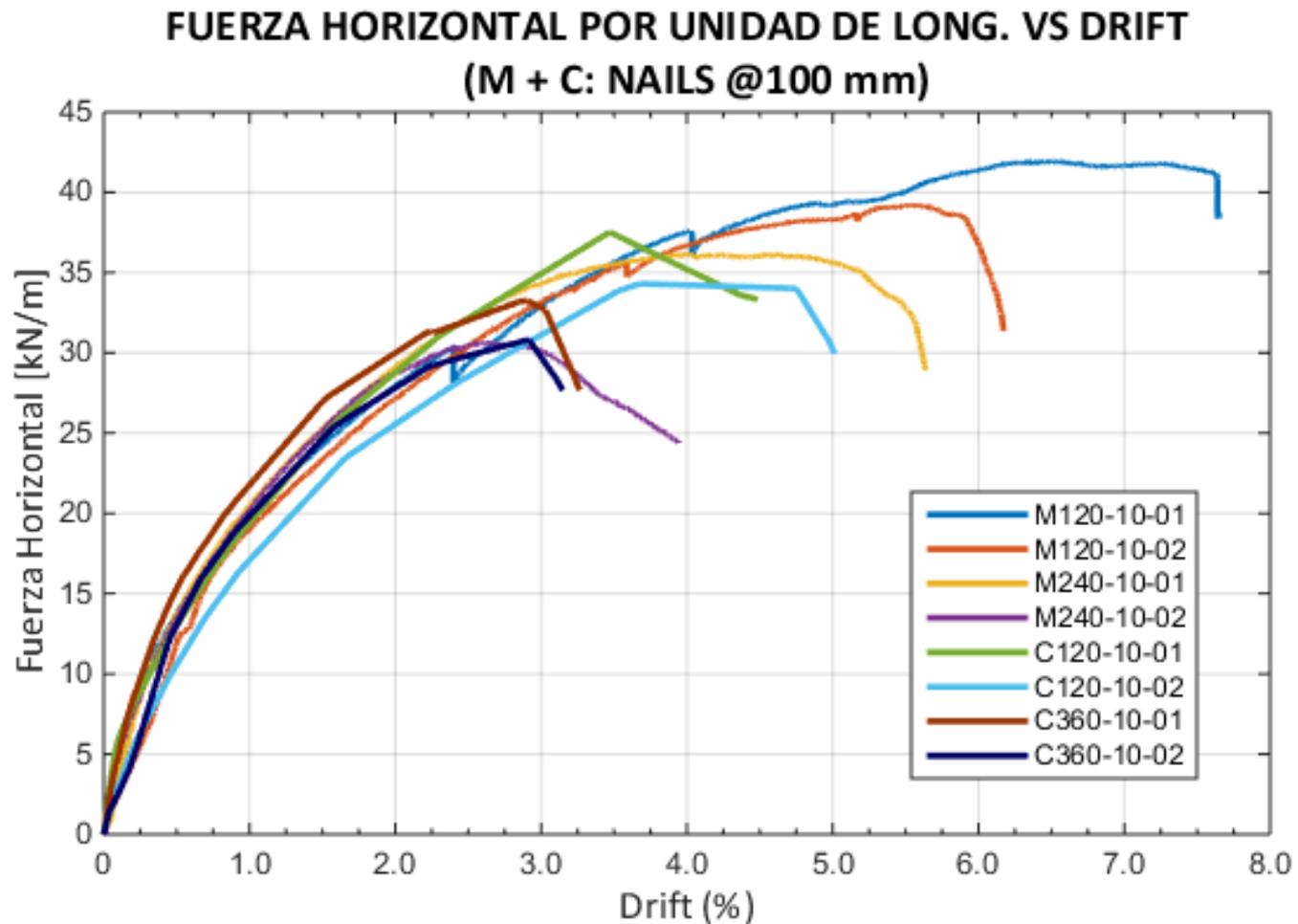




MONTAJE ENSAYO CON CARGA AXIAL

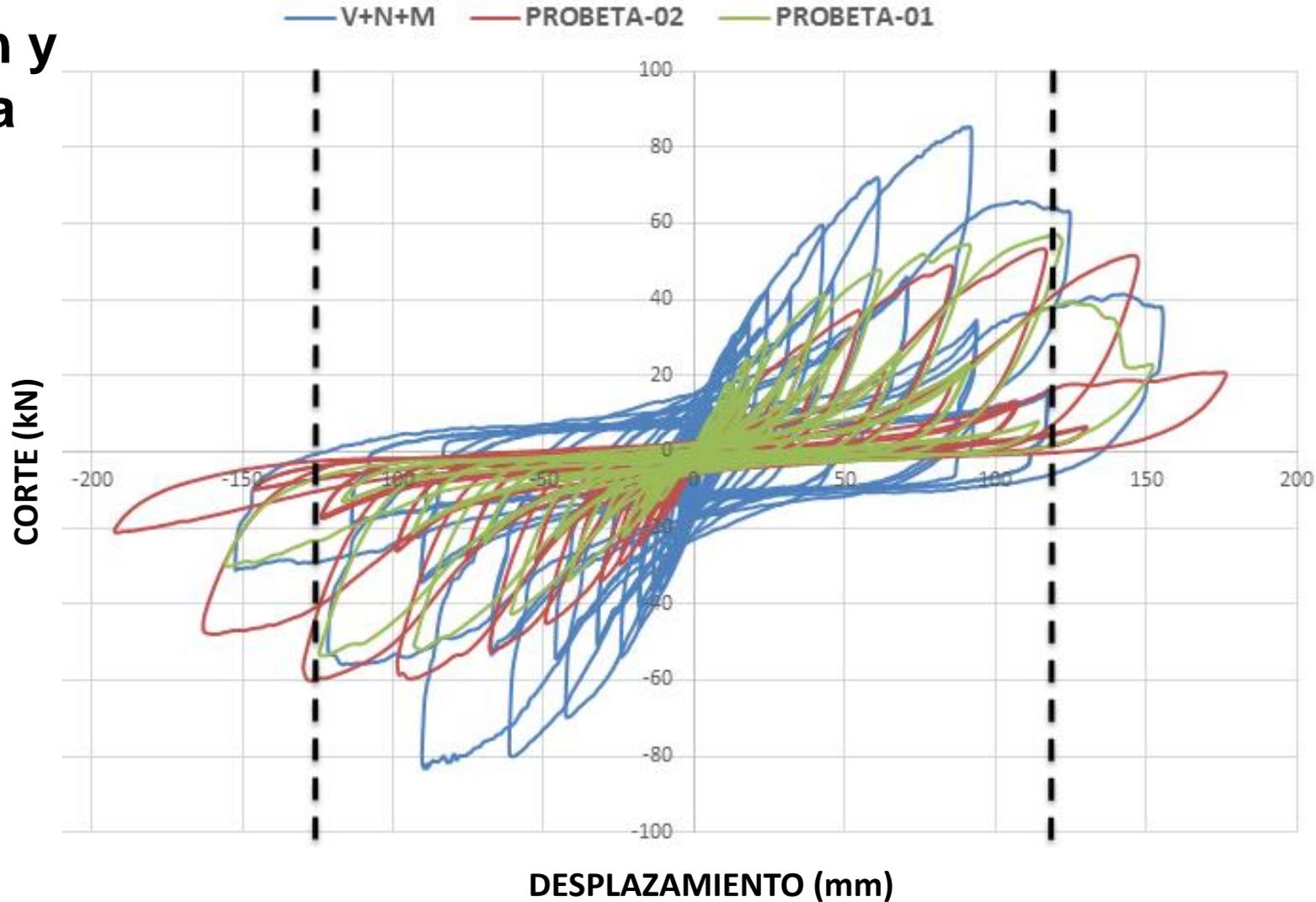


Comparación de respuestas para clavos a 100 mm

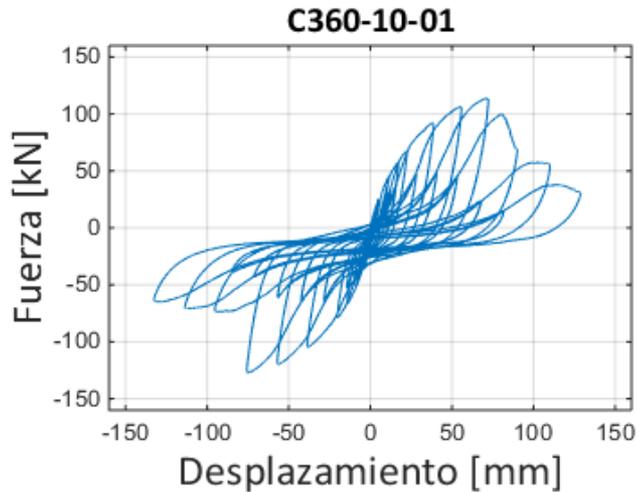




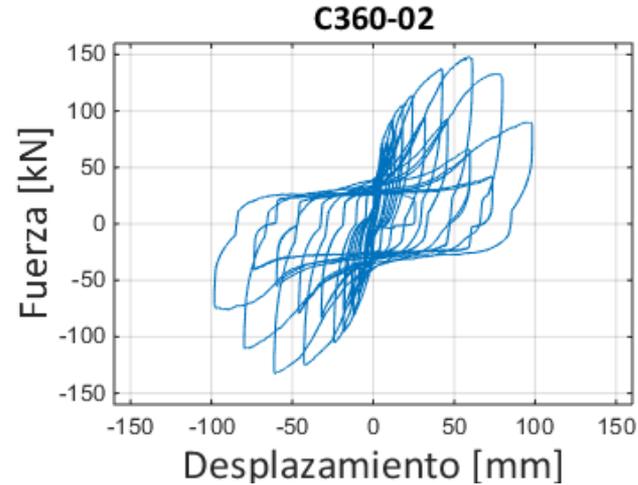
Muros Sin y Con carga vertical



Resistencia de muros bajo cargas cíclicas



Curva de muros sin
carga axial



Curva de muro con
carga axial

Muros de 3,6 m de
longitud con
espaciamiento de
clavos de 100 mm



Resistencia de muros bajo cargas cíclicas

Clavos a 100 mm	v (kN/m) Experimental
C120-10-01	37,8
C120-10-02	36,3
C240-10-01	31,3
C240-10-02	32,3
C360-10-01	35,3
C360-10-02	31,8
Promedio	34,1
Desv est	2,7
CV	0,08

$$v \text{ SDPWS} = 20,4 \text{ kN/m}$$

$$v \text{ Exp/SDPWS} = 1,67$$

Clavos a 50 mm	v (kN/m) Experimental
C120-05-01	46,9
C120-05-02	47,3
C240-05-01	35,8
C240-05-02	38,5
Promedio	42,1
Desv est	5,8
CV	0,14

$$v \text{ SDPWS} = 34,1 \text{ kN/m}$$

$$v \text{ Exp/SDPWS} = 1,23$$



Resistencia de muros bajo cargas cíclicas

Con carga caxial

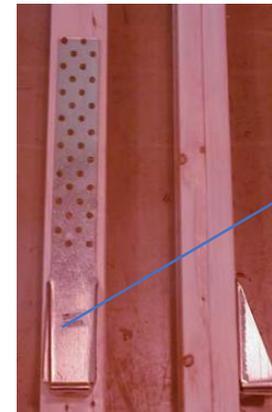
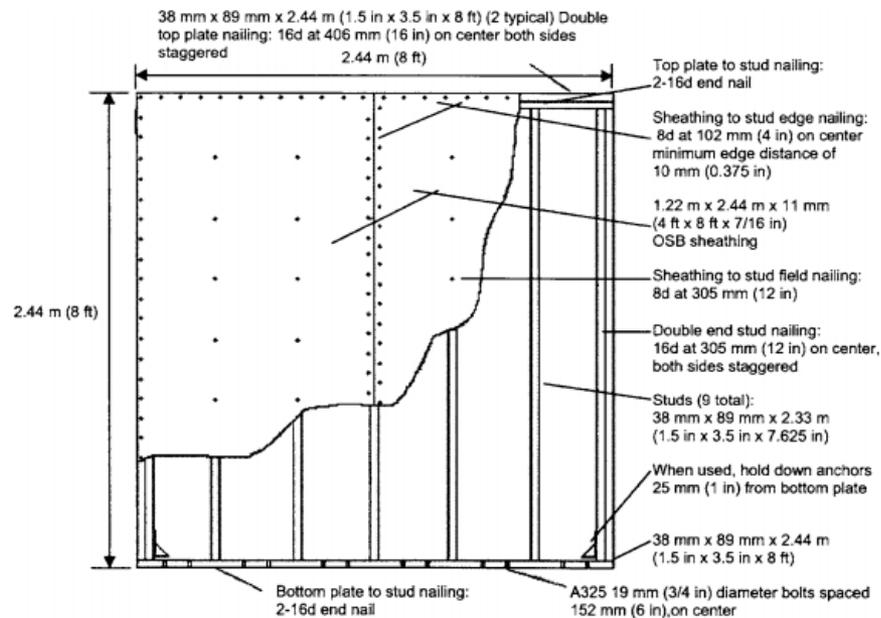
Clavos a 100 mm	v (kN/m) Experimental
C120-01	49,2
C120-02	47,0
C240-01	41,2
C240-02	41,3
C360-01	44,0
C360-02	41,2
Promedio	44,0
Desv est	3,4
CV	0,08

$$v \text{ SDPWS} = 20,4 \text{ kN/m}$$

$$v \text{ Exp/SDPWS} = 2,2$$

Muros típicos ensayados

2 pies derechos de borde, anclajes poco resistentes



Anclajes típicos





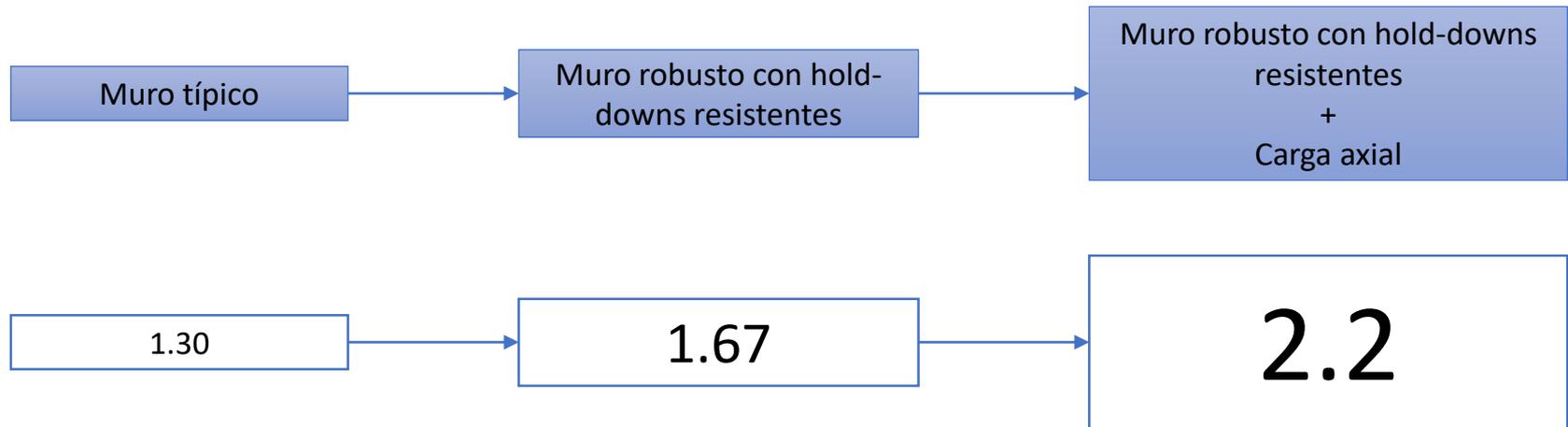
Resultados de la literatura

Test	Strength (kN/m)	SPDWS Strength (kN/m)	Ratio
Line et al. (2008)	13.5	10.2	1.32
Lebeda et al. (2005)	13.3	10.2	1.30
Johnston et al (2006)	14.7	10.2	1.44
Shenton III, et al (1998)	11.7	10.2	1.15
Promedio	13.2	10.2	1.30



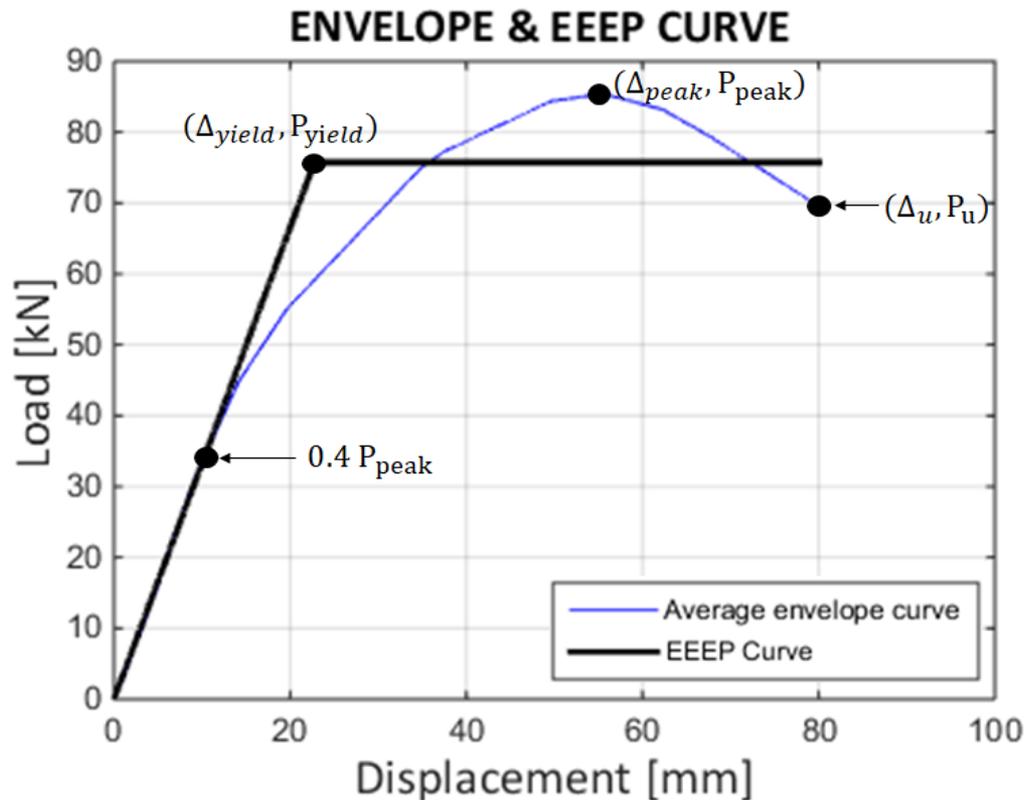
Resistencia de muros bajo cargas cíclicas

Razón promedio entre resistencia entregada por SDPWS y resistencia máxima medida en laboratorio



Capacidad de deformación

Envolvente promedio y parámetros calculados para medir la capacidad de deformación



ASTM E2126-11



Capacidad de deformación

Muros sin carga axial

Tested wall	Nail Spacing [mm]	Δ_y [mm]	Δ_u [mm]	Ductility
C120-10-01	100	35	116	3,3
C120-10-02	100	38	116	3,0
C120-05-01	50	39	115	3,0
C120-05-02	50	40	148	3,7
C240-10-01	100	24	87	3,6
C240-10-02	100	22	89	4,1
C240-05-01	50	27	87	3,2
C240-05-02	50	22	91	4,2
C360-10-01	100	21	82	3,9
C360-10-02	100	24	78	3,2
Average		29,3	101,0	3,5
Desv. Est.		7,88	22,0	0,44
CV				0,12

Muros con carga axial

Tested wall	Nail spacing [mm]	Δ_y [mm]	Δ_u [mm]	Ductility
C120-01	50	26	106	4,0
C120-02	100	18	87	4,8
C120-03	100	11	81	7,5
C240-01	100	11	84	7,8
C240-02	50	19	96	5,0
C240-03	100	12	83	6,9
C360-01	100	16	76	4,9
C360-02	100	13	78	5,9
Average		16	86	5,85
Desv. Est.		5,3	9,8	1,41
CV				0,24



Capacidad de deformación

Drift de los muros a 40% P_{peak}
(mm)

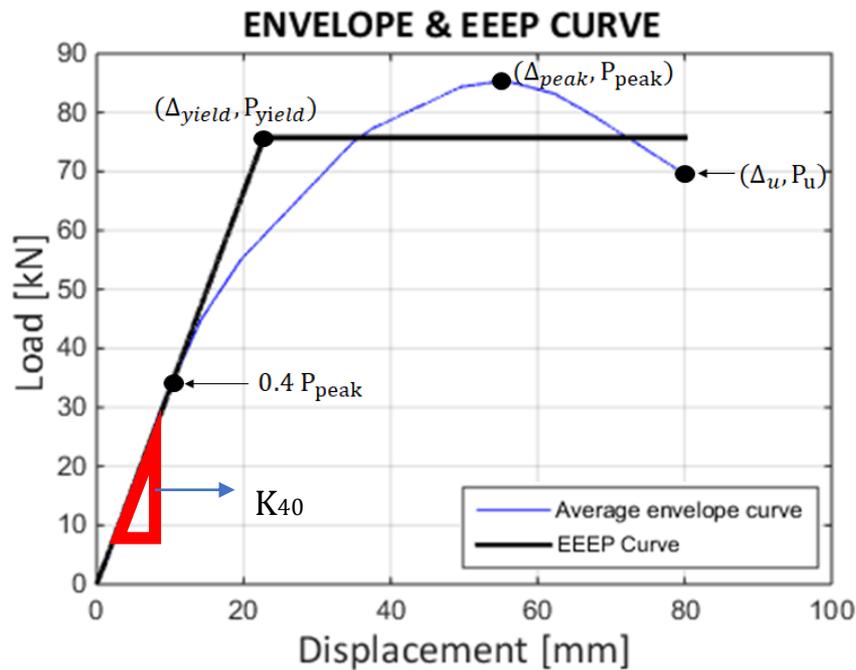
Muros sin carga axial

Tested wall	drift40
C120-10-01	0,0065
C120-10-02	0,0072
C120-05-01	0,0071
C120-05-02	0,0075
C240-10-01	0,0046
C240-10-02	0,0041
C240-05-01	0,0050
C240-05-02	0,0040
C360-10-01	0,0040
C360-10-02	0,0046
Average	0,0055
Desv. Est.	0,0015
CV	0,27

Muros con carga axial

Tested wall	drift40
C120-01	0,0050
C120-02	0,0034
C120-03	0,0022
C240-01	0,0020
C240-02	0,0036
C240-03	0,0022
C360-01	0,0029
C360-02	0,0024
Average	0,0030
Desv. Est.	0,0010
CV	0,34

Rigidez de muros



Se calcula rigidez al 40% P_{peak}



Rigideces por unidad de longitud

Muros sin carga axial

Muros con carga axial

Tested wall	Nail Spacing [mm]	K_{40} [kN/mm/m]
C120-10-01	100	0,93
C120-10-02	100	0,78
C120-05-01	50	1,04
C120-05-02	50	1,02
C240-10-01	100	1,09
C240-10-02	100	1,19
C240-05-01	50	1,16
C240-05-02	50	1,50
C360-10-01	100	1,35
C360-10-02	100	1,08

Tested wall	Nail spacing [mm]	K_{40} [kN/mm/m]
C120-01	50	2,27
C120-02	100	1,85
C120-03	100	2,90
C240-01	100	3,02
C240-02	50	2,67
C240-03	100	2,81
C360-01	100	2,43
C360-02	100	2,58



Rigidez de muros

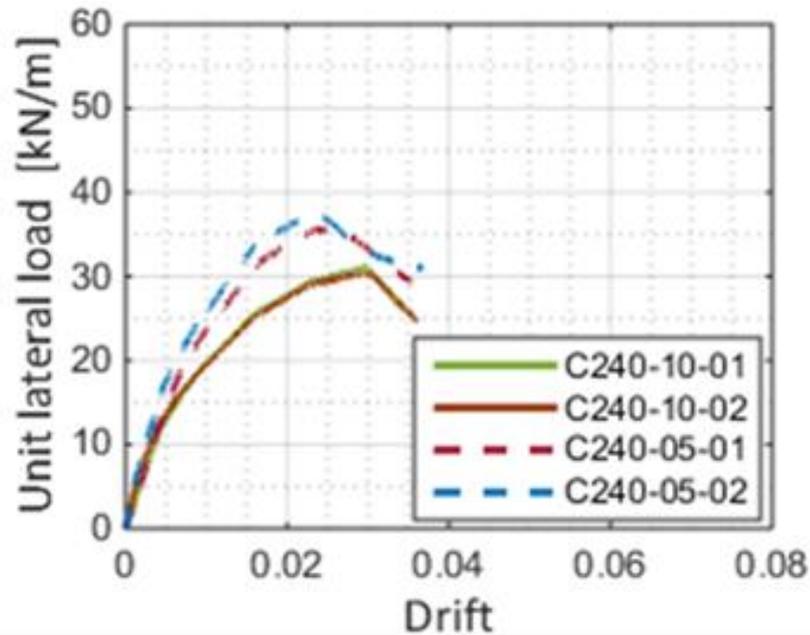
	Espaciamiento de clavos [mm]	Rigidez promedio (40% Ppeak) [kN/mm/m]
Sin carga axial	100	1,07
	50	1,18
Con carga axial	100	2,60
	50	2,47

No se puede afirmar estadísticamente que la rigidez calculada con clavos a 50 mm sea mayor que con clavos a 100 mm.

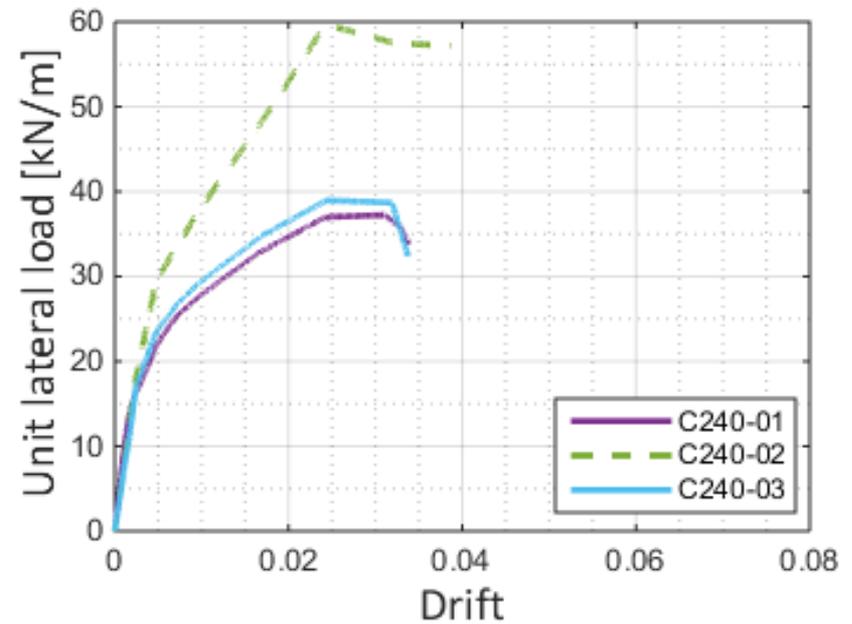
¿Por qué?

Rigidez de muros

Muros sin carga axial

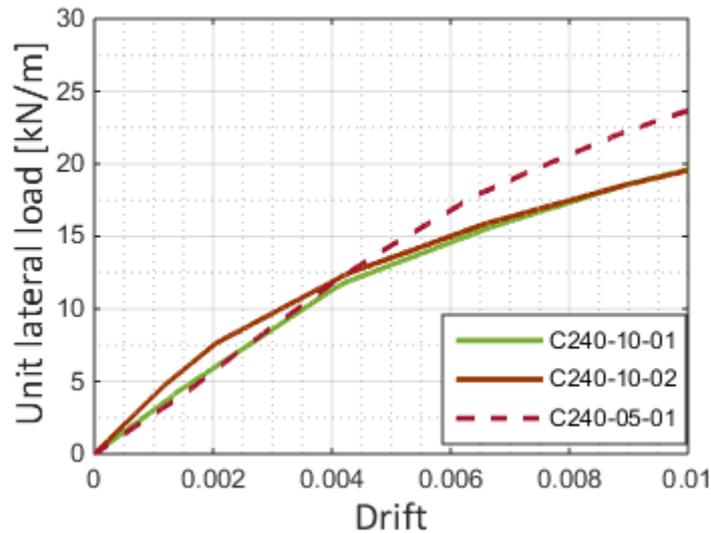


Muros con carga axial

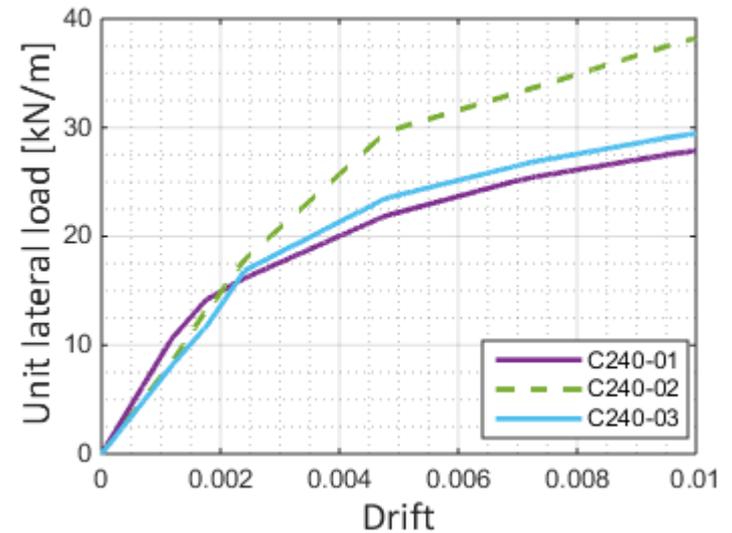


Rigidez de muros

Muros sin carga axial



Muros con carga axial



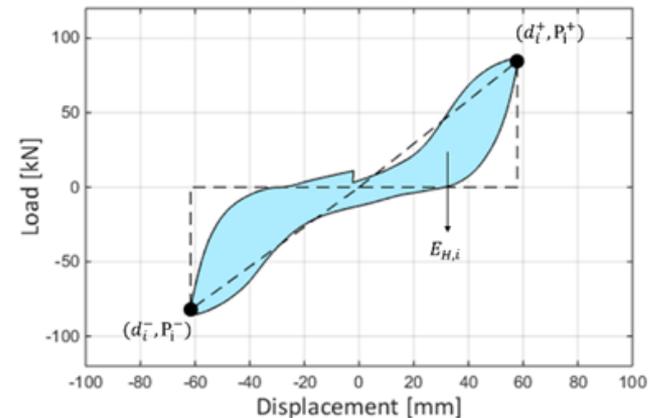
Amortiguamiento viscoso equivalente

$$\xi_{eq,i} = \frac{E_{H,i}}{2\pi K_{sec,i} \delta_{max,i}^2}$$

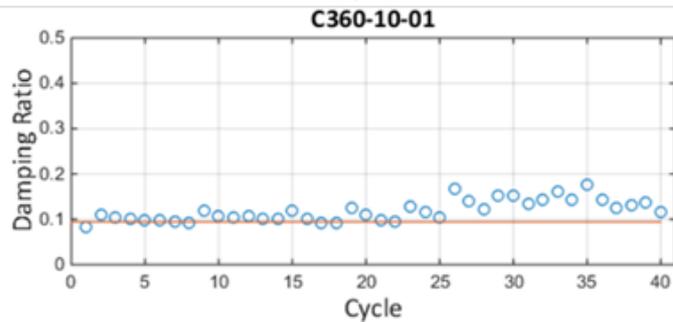
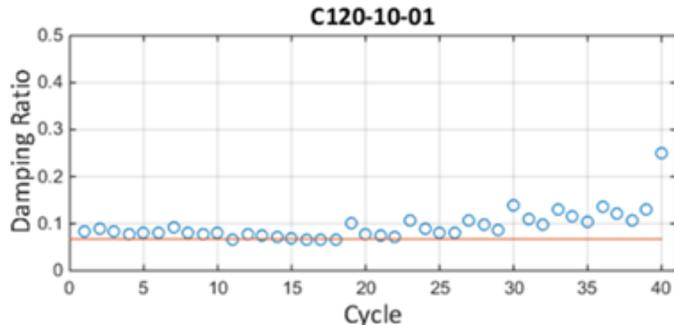
Tenemos ciclos asimétricos \longrightarrow

$$\xi_{eq,i} = \frac{E_{H,i}}{2\pi(0.5 d_i^+ P_i^+ + 0.5 d_i^- P_i^-)}$$

- $E_{H,i}$ = Energía histerética de cada ciclo
- $K_{sec,i}$ = Rigidez secante de cada ciclo
- $\delta_{max,i}$ = Máximo desplazamiento de cada ciclo



Amortiguamiento viscoso equivalente



- Se obtiene dato de amortiguamiento para cada uno de los ciclos de carga
- Se define un amortiguamiento característico como el valor que es superado por el 90% de los datos en un ensayo
- Se observa consistencia de los datos a lo largo del ensayo



Amortiguamiento viscoso equivalente

Amortiguamientos viscosos equivalentes característicos

Muros sin carga axial

Tested wall	Nail Spacing [mm]	Viscous Damping
C120-10-01	100	0,07
C120-10-02	100	0,10
C120-05-01	50	0,04
C120-05-02	50	0,10
C240-10-01	100	0,16
C240-10-02	100	0,10
C240-05-01	50	0,10
C240-05-02	50	0,08
C360-10-01	100	0,09
C360-10-02	100	0,10
Average		0,09
Desv. Est.		0,01
CV		0,14

Muros con carga axial

Tested wall	Nail spacing [mm]	Viscous Damping
C120-01	50	0,18
C120-02	100	0,15
C120-03	100	0,13
C240-01	100	0,14
C240-02	50	0,13
C240-03	100	0,13
C360-01	100	0,11
C360-02	100	0,13
Average		0,14
Desv. Est.		0,02
CV		0,16



Resumen

- Se pudo adquirir información relevante respecto al comportamiento de los muros, que facilitarán eventualmente la elaboración de un manual o guía de diseño para edificios de madera en mediana altura con el sistema marco plataforma.
- Las resistencias entregadas por los códigos utilizados son ampliamente conservadoras para los muros estudiados. Además, la proporción en la que crecen las resistencias al disminuir el espaciamiento de clavos, no es consistente entre lo teórico (SDPWS) y lo observado experimentalmente.
- La deformación entre piso de los muros está limitada a 0.002 veces la altura efectiva del piso (Se definió principalmente para limitar corte basal de edificios de hormigón armado). Esto no tiene sentido para estructuras de madera, ya que son más flexibles. Es necesario utilizar otro criterio para definir este límite en estructuras de madera.



Resumen

- Las rigideces teóricas sobreestiman las rigideces reales de los muros, lo que es un problema para el proceso de diseño de edificios. Se pretende proponer una expresión o valores de rigidez más reales.
- Se observan amortiguamientos característicos consistentes en los muros: 9% para muros sin carga axial y 14% para muros con carga axial. El considerar estos valores pueden permitir optimizar el diseño de las estructuras de madera
- Se espera incluir todas estas consideraciones en una propuesta de manual o guía de diseño de edificios de mediana altura de madera en el sistema marco-plataforma.



Los resultados de los ensayos permiten calibrar modelos lineales-elásticos y no-lineales

- Valor de rigidez lateral que se debe usar para verificar desplazamientos máximos de entrepisos.
- Determinar un límite adecuado para desplazamientos máximos de entrepisos para edificios de madera en marco plataforma de hasta 6 pisos.
- Determinar un factor de reducción R para marco plataforma (FEMA P695).



Se usa metodología del FEMA-P695 - CUANTIFICACIÓN DE FACTORES DE DESEMPEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS.



Quantification of Building Seismic Performance Factors

FEMA P695 / June 2009



FEMA 695 (ATC-63):

LOS FACTORES DE DESEMPEÑO SÍSMICO PARA UN SISTEMA PROPUESTO, SE ESTABLECEN A TRAVÉS DE SIMULACIÓN NO LINEAL DE LA RESPUESTA AL MOVIMIENTO SÍSMICO DEL SUELO, Y MEDIANTE LA EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL RIESGO DE COLAPSO.



Quantification of Building Seismic Performance Factors

FEMA P695 / June 2009

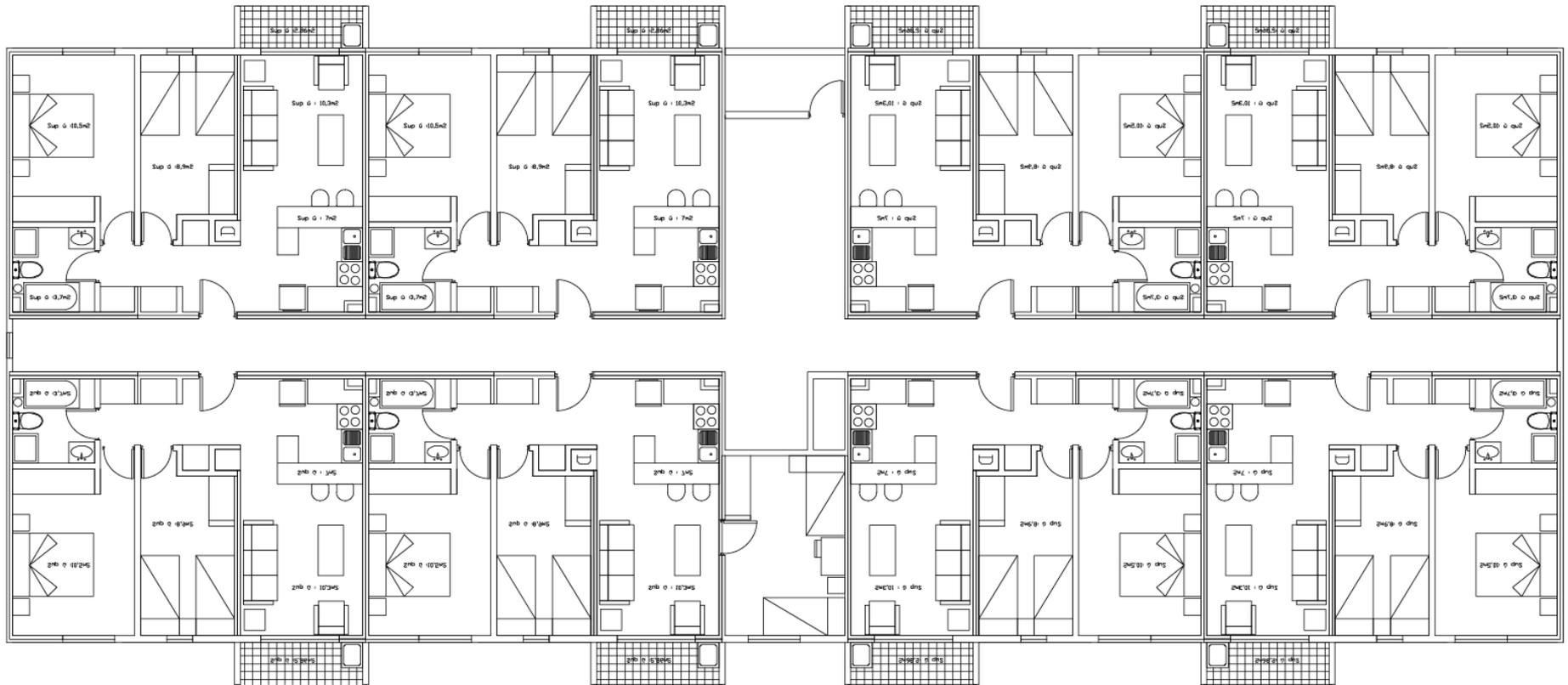


FEMA 695 (ATC-63): CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL SISTEMA.

- OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN REQUERIDA DEL SISTEMA.
- DESARROLLO DE ARQUETIPOS Y CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO.
- DESARROLLO DE MODELOS NO-LINEALES.
- ANÁLISIS DE MODELOS NO-LINEALES.
- EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO.

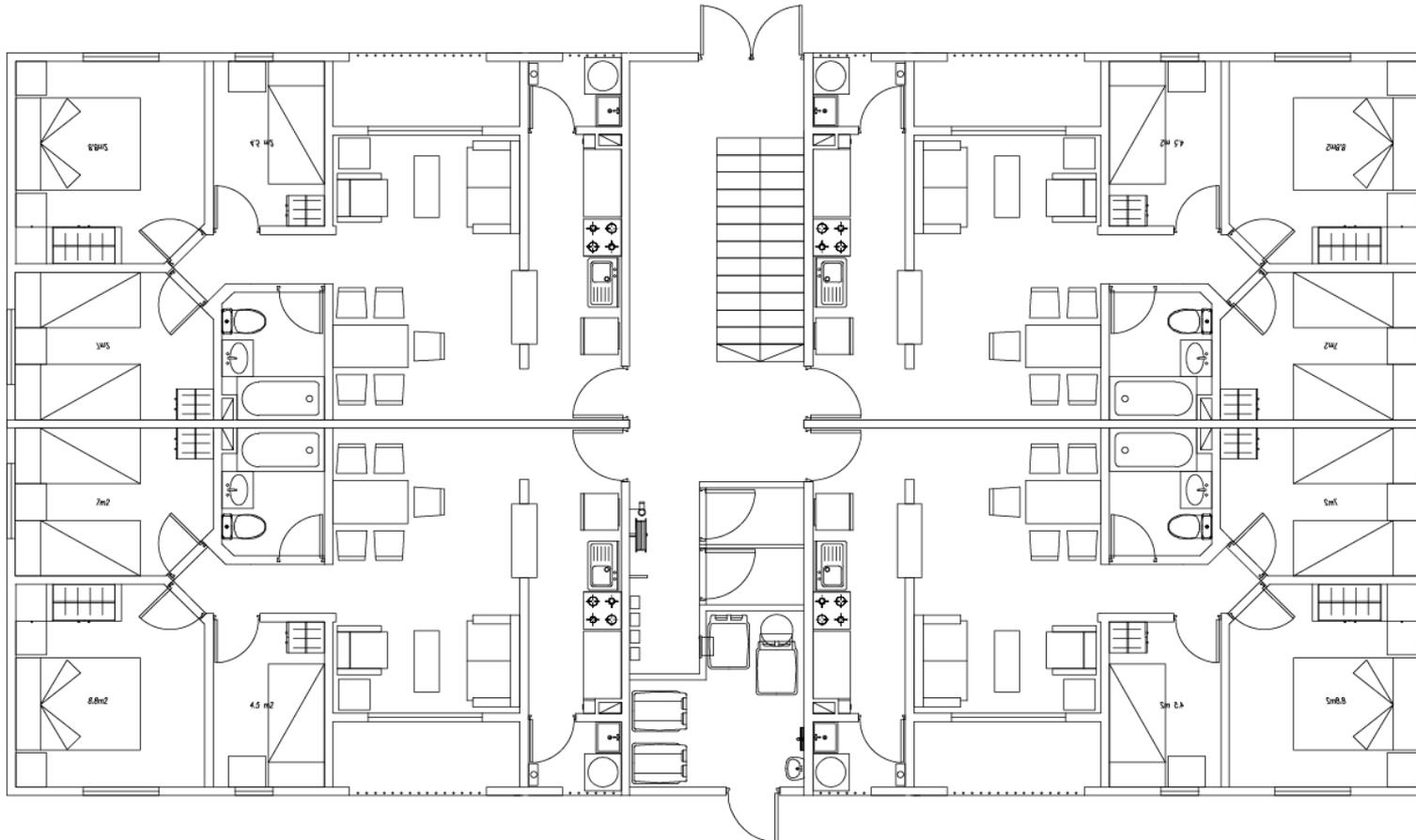


Configuración de edificio tipo A



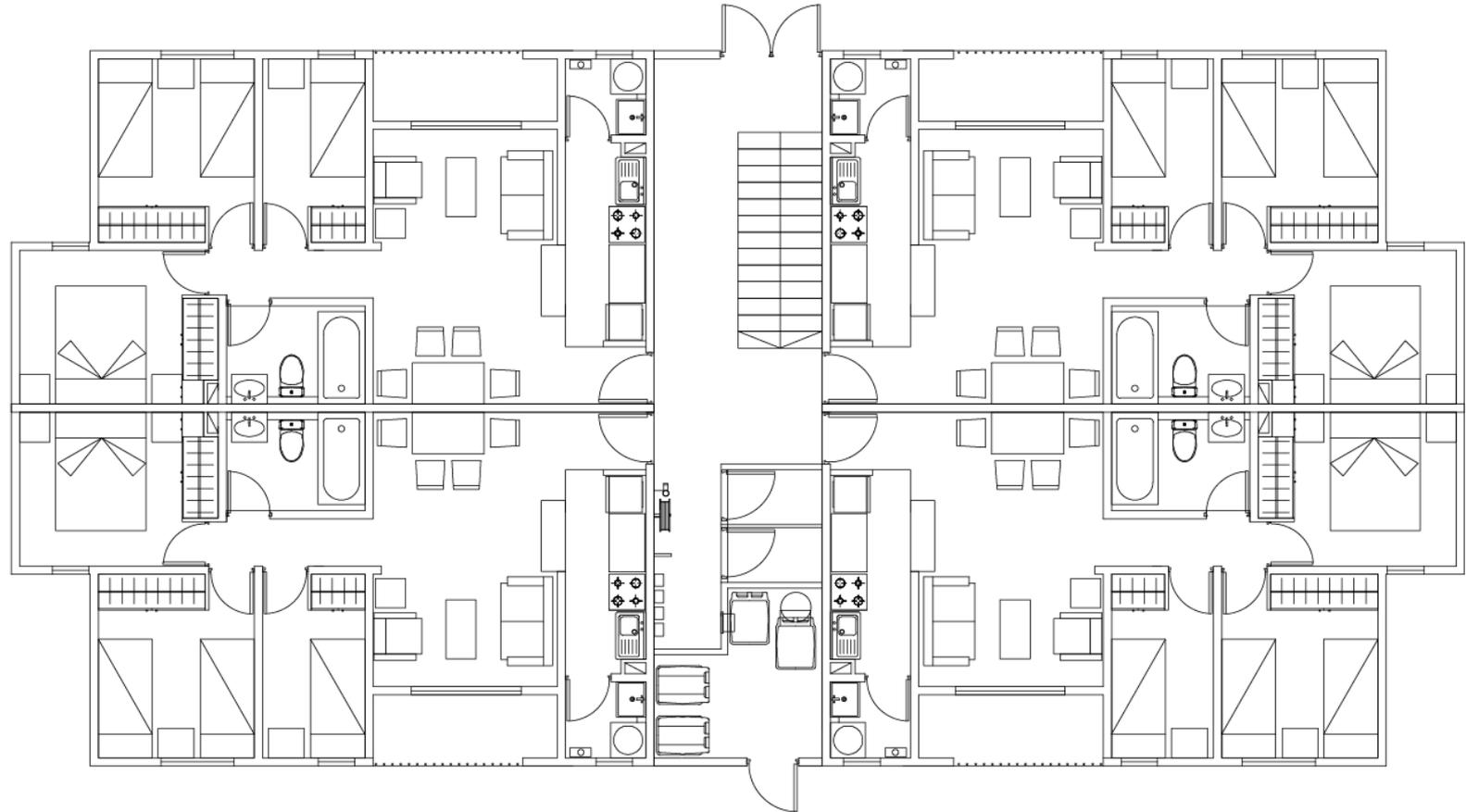


Configuración de edificio tipo B





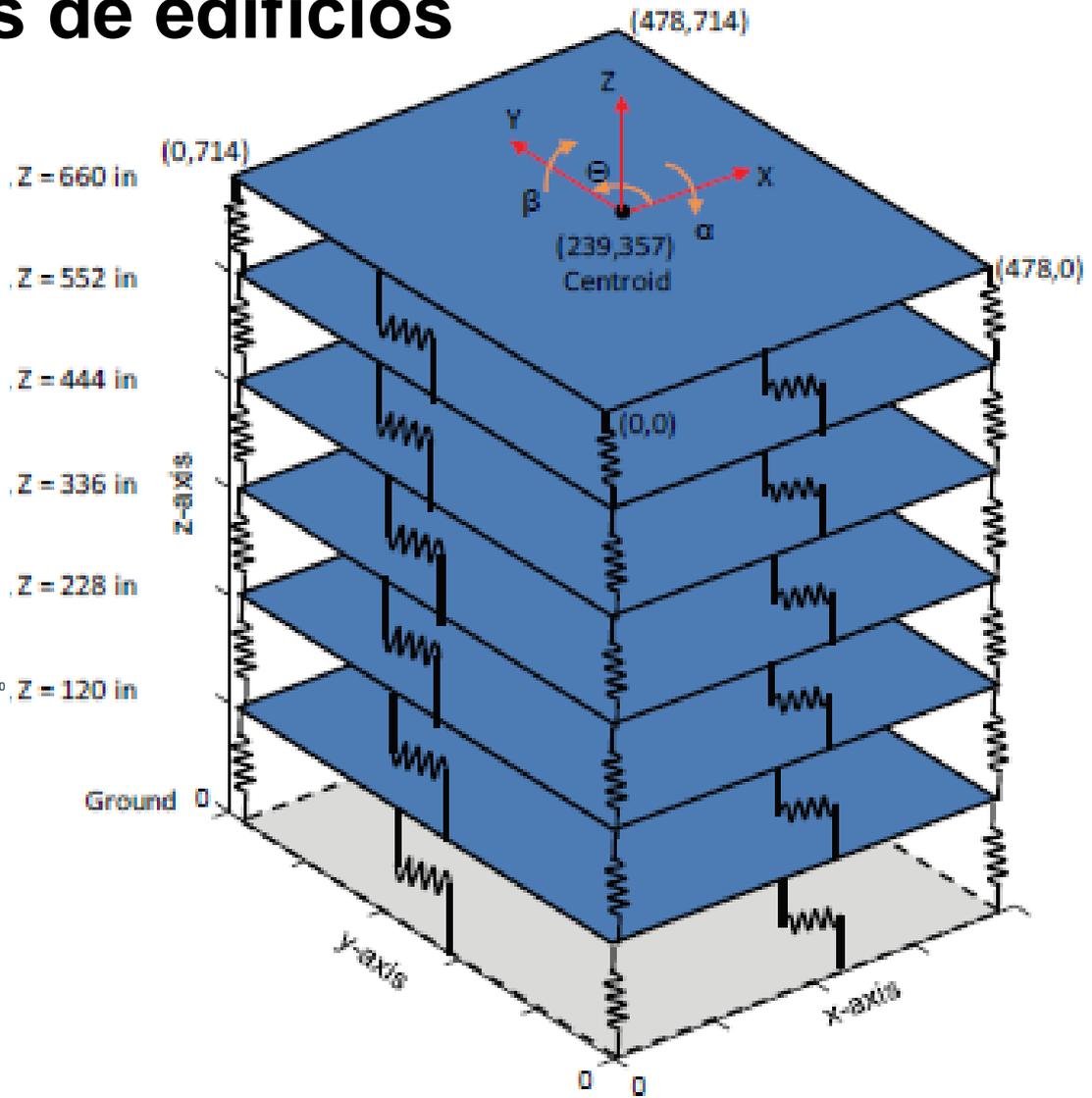
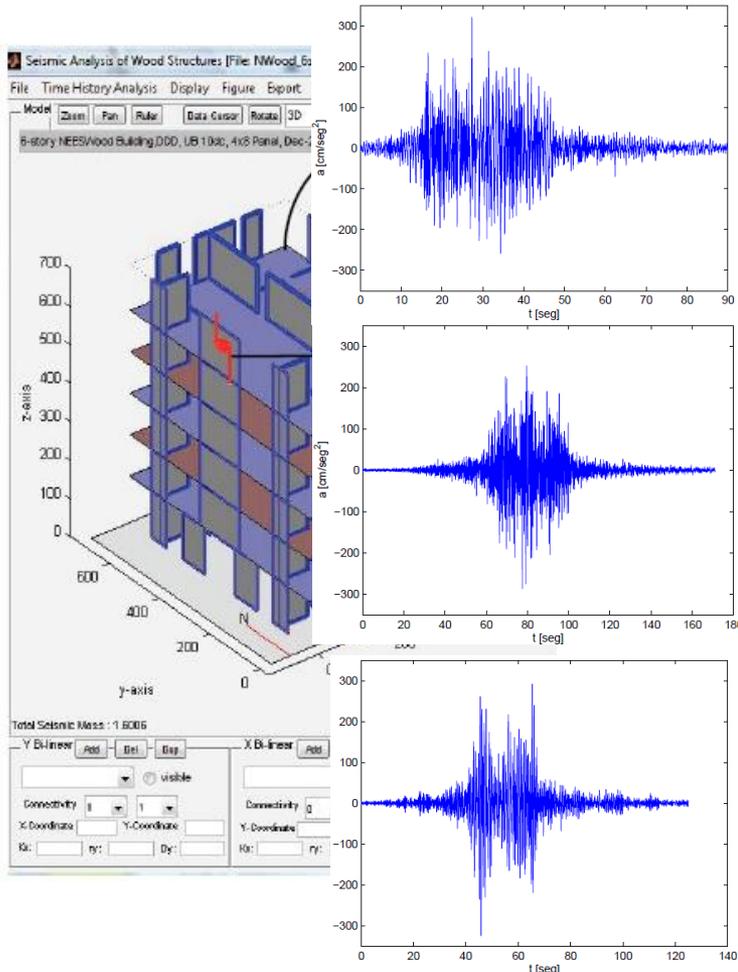
Configuración de edificio tipo C



Configuración de edificio tipo D

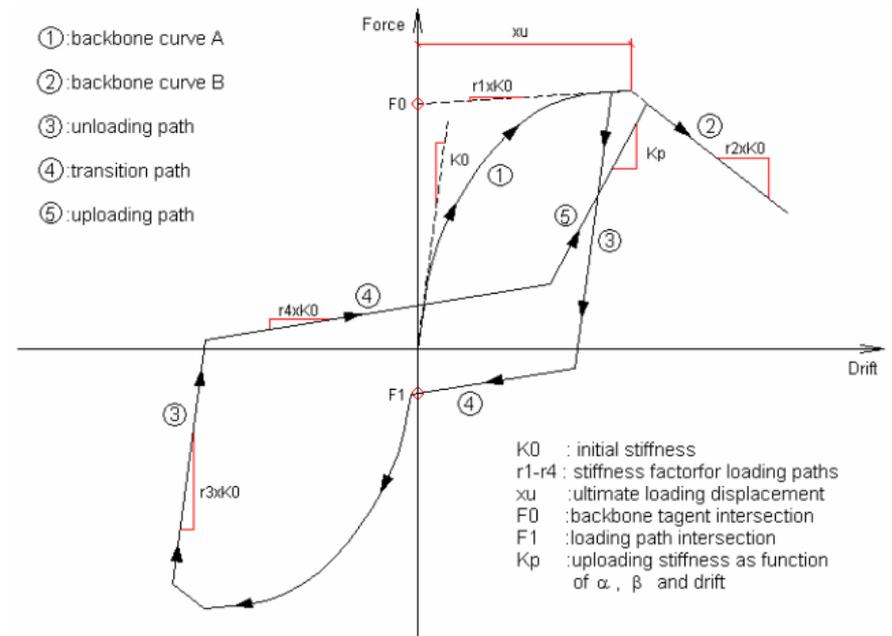
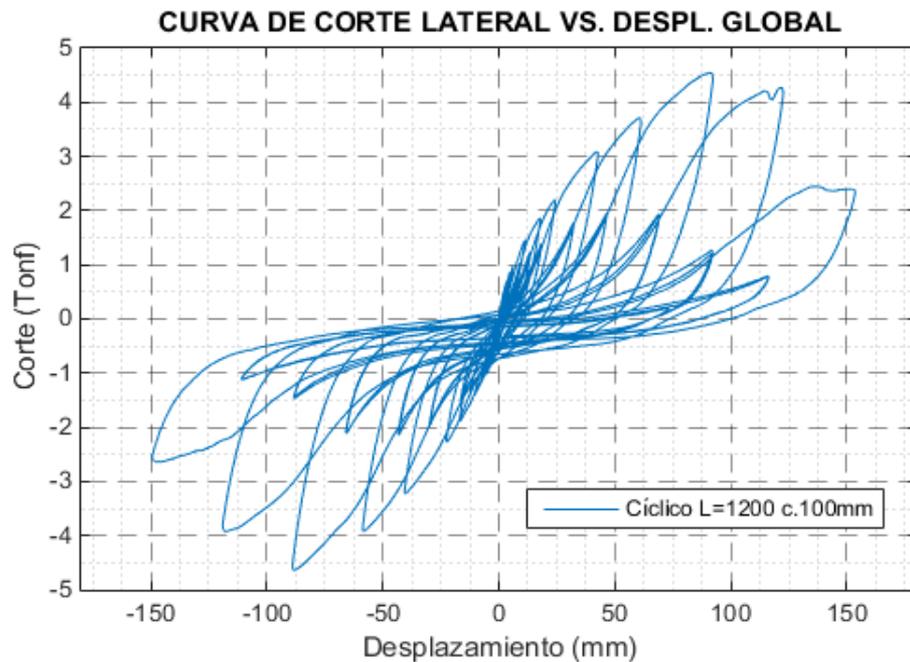


Modelos No-Lineales de edificios



DESARROLLO DE LOS MODELOS DE ARQUETIPOS:

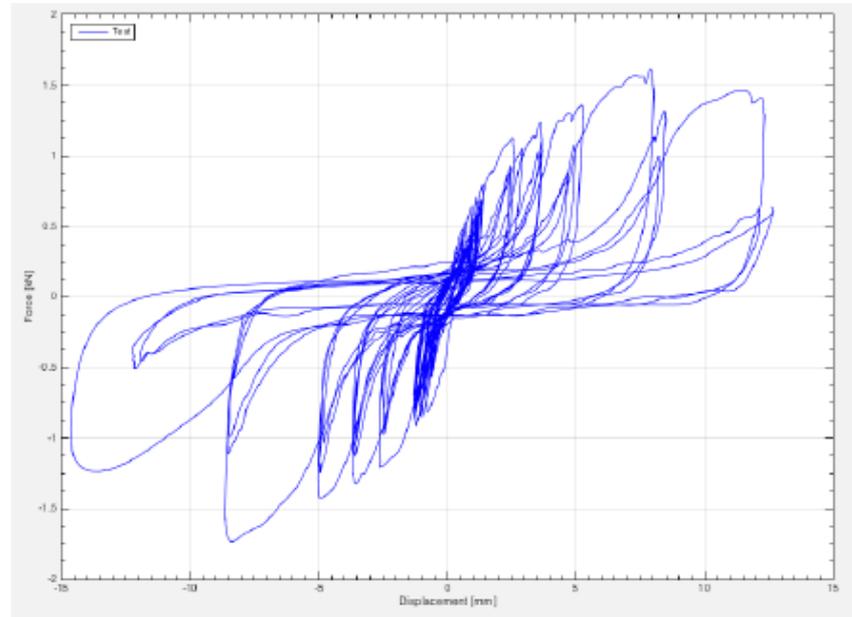
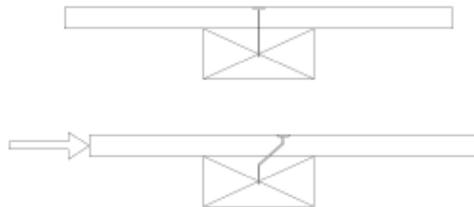
CALIBRACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES:



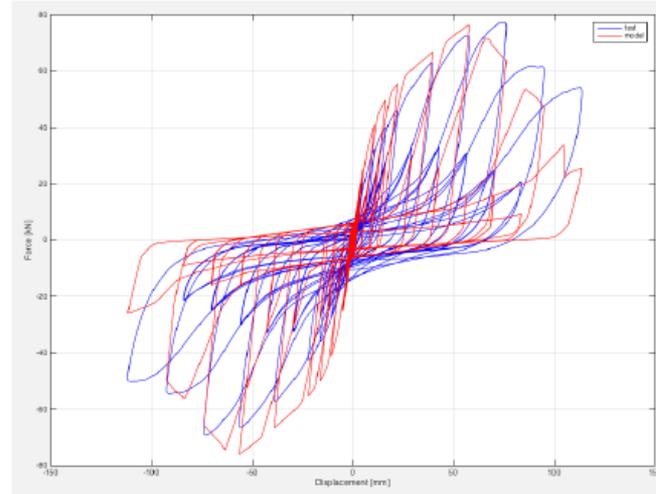
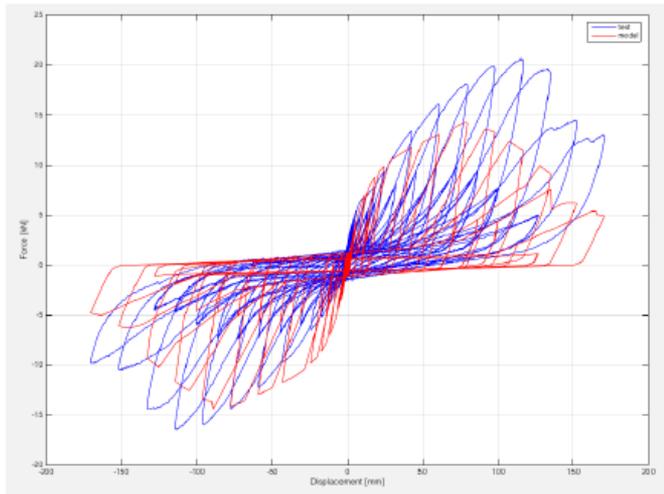
Loading paths and parameters in SAWS hysteresis model

Información de input

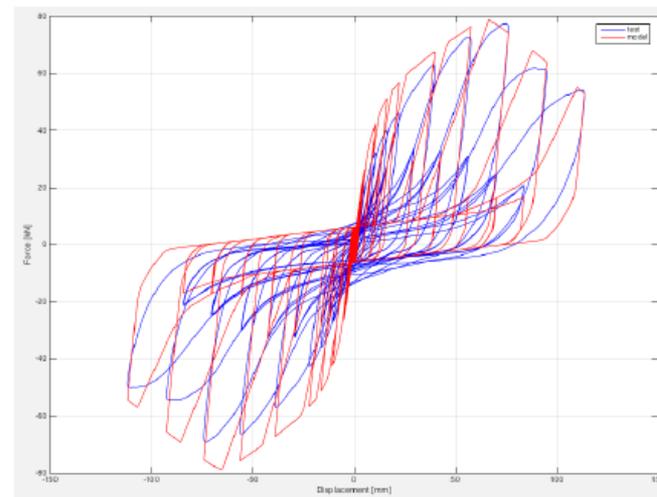
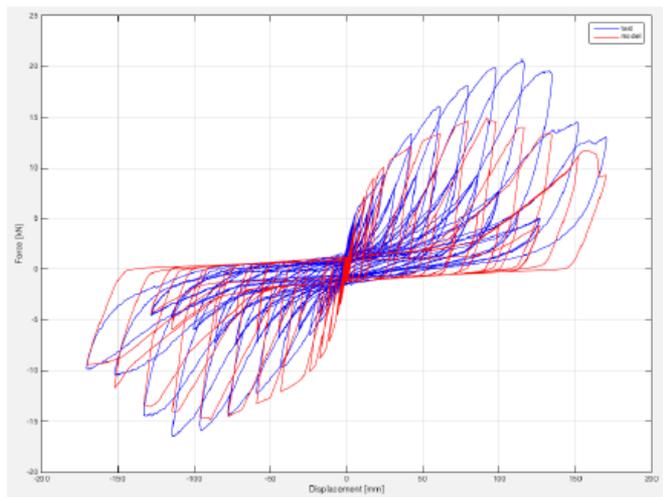
Propiedades de las conexiones clavadas pie-derecho/OSB



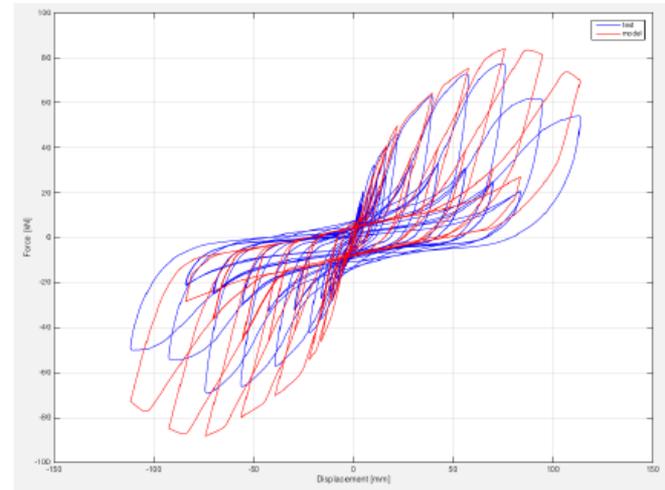
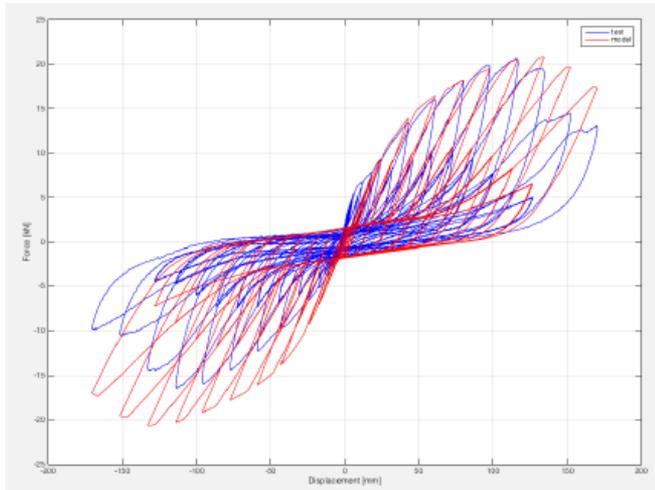
Modelo de corte CASHEW



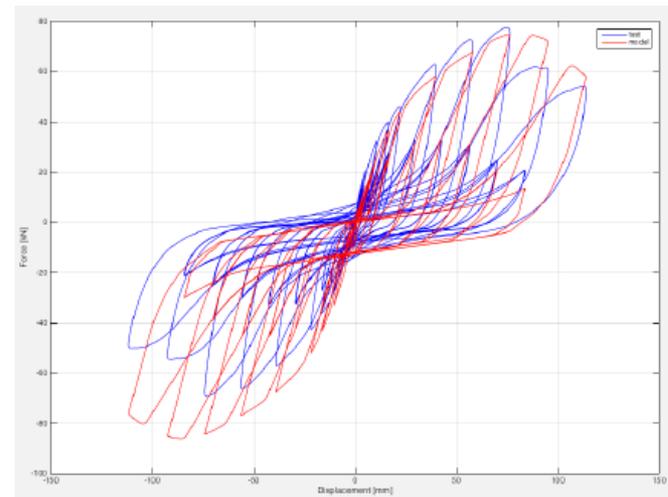
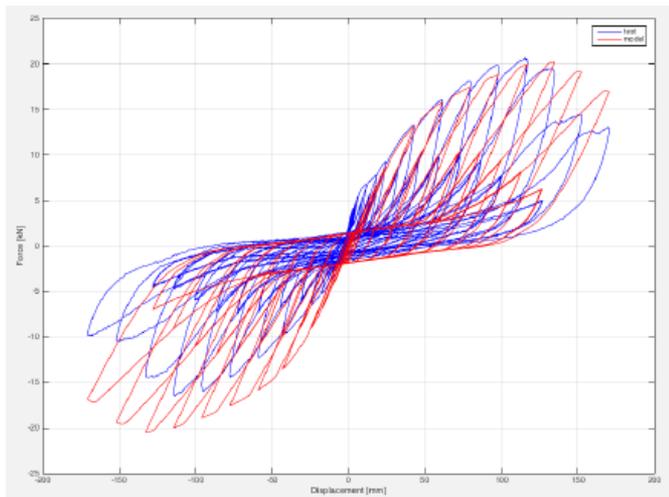
Modelo de corte Judd & Fonseca (2005)



Modelo de corte CASHEW con rocking

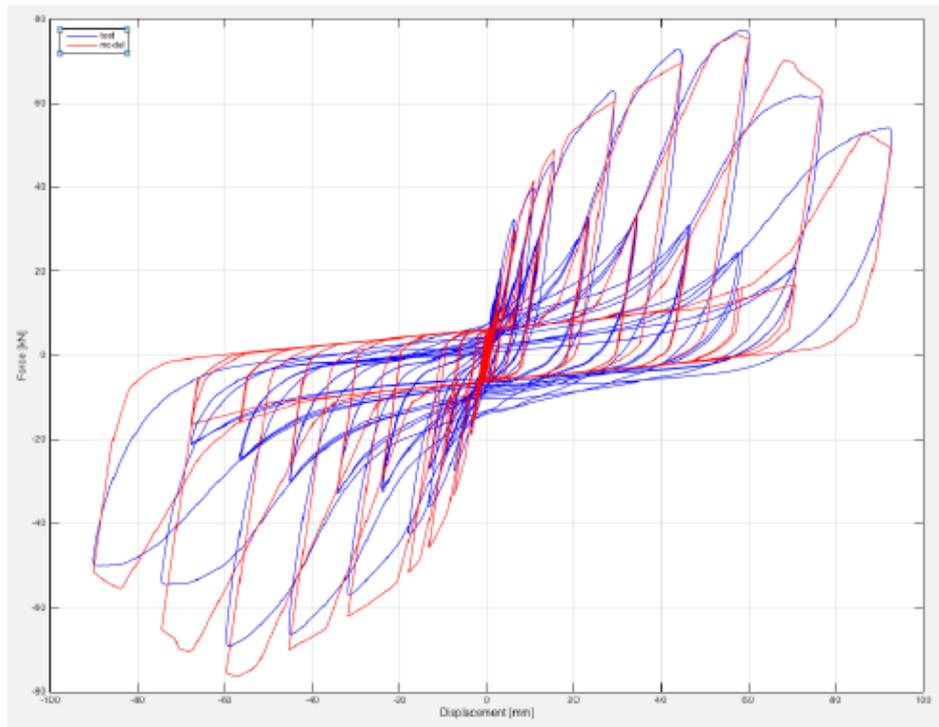


Modelo con rocking y flexión



Modelación simplificada

1 GdL



C2401002

Fmax	0.99
dmax	0.96
k0	1.05
kmax	1.03
Energ	0.83
Duct	0.93
Mean	0.96
DesvStd	0.08



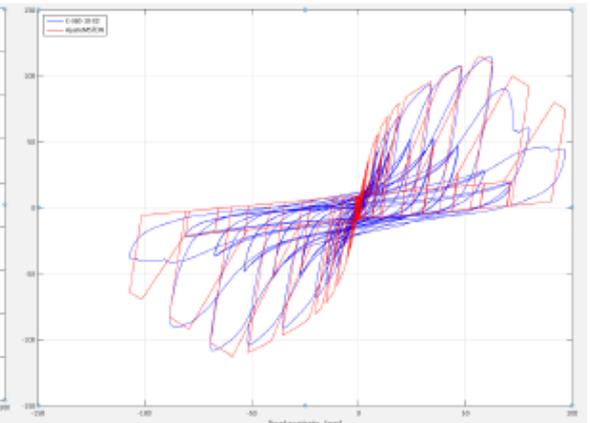
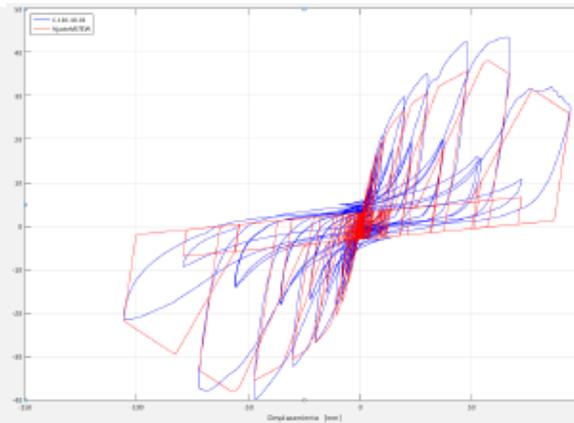
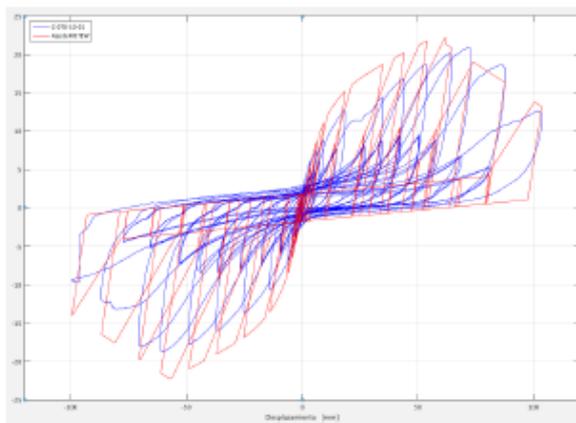
Modelación simplificada

SDOF

700 mm

1200mm

3600 mm





Agradecimientos

Estudiantes Felipe Guíñez, Sebastián Cárcamo, Xavier Estrella

Ingeniero Jairo Montaña

Profesores José Luis Almazán, Pablo Guindos, Juan José Ugarte

Laboratorio de Ingeniería Estructural, Pontificia Universidad Católica de Chile

CORFO, MINVU

Empresas y profesionales participantes en el proyecto