

UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Ing. Civil Alexander Opazo Vega

Profesores comisión: Ing. Civil Ángela Salinas

Ing. Civil Cristina Belmar

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE MUROS DE
CORTE DE MADERA BAJO CARGAS
LATERALES MONOTÓNICA**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

BRANCO PIERO FUENTEALBA PEREZ

CONCEPCIÓN, Marzo 2014

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Justificación	4
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Metodología	5
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Caracterización mecánica de muros estructurales de madera	5
2.2. Influencia del revestimiento para la elaboración de marcos de madera en las propiedades mecánicas de muros de corte.	6
2.3. Evaluación de efecto de sistema y vías de cargas estructurales en una estructura de marcos de madera.	7
2.4. Comportamiento de muros de corte de madera desbloqueado.	8
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
3.1. Tipologías de muros de corte de madera ensayado.	10
3.2. Metodología de ensayo.	11
3.3. Tipología de los modelos analizados.	12
3.4. Metodología de calibración de los modelos.....	13
4. MODELACIÓN MURO DE CORTE.....	15
4.1. Modelo muro de corte.....	15
4.2. Elementos de madera aserrada.....	17
4.3. Revestimiento.	17
4.4. Anclaje.....	18
4.5. Conexión Revestimiento-Madera.	18
4.6. Conexión Madera-Madera.	19
4.7. Tipo de análisis.	20
4.8. Supuestos de modelación.....	20
5. RESULTADOS	20
5.1. Resultados ensayos	20
5.2. Resultados calibración modelos.....	21

5.3. Resultados modelos	22
6. ANALISIS DE RESULTADOS.....	25
6.1. Análisis económico.....	29
7. CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS.....	32
7.1. Comentarios:.....	33
7.2. Recomendación:.....	33
8. BIBLIOGRAFÍA.....	34
9. ANEXOS	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipología de muros de madera sometidos a carga horizontal.	10
Tabla 2. Variables a considerar en la modelación de los muro de corte.	12
Tabla 3. Significado de nomenclatura de los modelos.	13
Tabla 4. Resumen propiedades elementos modelo.....	16
Tabla 5. Resultados rigidez inicial de modelos de muros ensayados.	22
Tabla 6. Resultados rigidez inicial k (kgf/mm) modelos con escuadra A66.	23
Tabla 7. Resultados rigidez inicial k (kgf/mm) modelos con fierro estriado.	24
Tabla 8 Rigidez inicial agrupada según variables influyentes.	29
Tabla 9 Costo materiales muros de corte madera.....	29
Tabla 10. Costo total según tipología de muro.....	30
Tabla 11. Porcentaje de aumento de costo según cambio de variable.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipología típica muros ensayados.	11
Figura 2. Definición rigidez inicial.....	14
Figura 3. Modelo elementos finito muro de corte.	17
Figura 4. Resorte internos conexión revestimiento-madera.	19
Figura 5. Resorte interno conexión madera-madera.....	19

Figura 6. Resultado rigidez inicial según tipo de anclaje.	25
Figura 7. Resultado rigidez inicial según espaciamiento clavado.	26
Figura 8. Resultado rigidez inicial según espesor placa OSB.	27
Figura 9. Resultado rigidez inicial según escuadría madera.	27
Figura 10. Resultado rigidez inicial según espaciamiento pies derechos.	28

MODELACIÓN NUMÉRICA DE MUROS DE CORTE DE MADERA BAJO CARGAS LATERALES MONOTÓNICAS.

Autor: Branco Fuentealba Pérez.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental; Universidad del Bío Bío.

brafuent@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Ing. Civil. Alexander Opazo Vega.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental; Universidad del Bío Bío.

aopazove@ubiobio.cl

RESUMEN

Esta tesis tiene como objetivo modelar, a través del Software computacional Sap2000, el comportamiento de muros de corte de madera bajo cargas laterales monotónicas de las tipologías más utilizadas en las construcciones de viviendas de madera que cuentan con financiamiento del Estado de Chile.

La validación de los modelos se obtiene con los resultados de los ensayos de muros de corte de maderas producidos en el Laboratorio del Área de Ingeniería Estructural del Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío, encargados por el Instituto Forestal. Esta validación se genera a través de la rigidez inicial que presentan estos muros para una deformación angular máxima de 1/250 de su altura.

Las principales características que presentan los muros de madera ensayados son, el revestimiento con paneles de fibras orientadas (OSB) y el sistema de anclaje del muro a la fundación utilizado.

En esta investigación se determinó que las variables más influyentes en la capacidad de los muros de corte de madera frente a cargas laterales monotónicas son; el sistema de anclaje utilizado para conectar el muro a la fundación y el espaciamiento de clavado en la conexión de la placa de revestimiento a la madera. Cambiar de un sistema de anclaje con un fierro estriado a un sistema de escuadra y perno aumentando la rigidez inicial en un promedio del 100%, en cambio variar el clavado en el perímetro y centro del panel de 15 cm y 30 cm a 10 cm y 20 cm aumenta la rigidez inicial en un promedio de 11%.

Palabras claves: muros de corte de madera, rigidez inicial.

5794 Palabras Texto + 21 Figuras /Tablas*250 = 11044 Palabras Totales

ABSTRACT

This thesis has as objective to model, through the computer Software Sap2000, the wood shear walls performance under monotonic lateral loads of typologies more used on the wooden houses construction that count on with the funding of State of Chile.

The models validation are made with the wood shear walls tests results produced at the Laboratory of the Department of Structural Engineering Research Center for Construction Technologies of the University of Bío-Bío requested by the Forestry Institute. This validation is developed through the initial rigidity that presents these walls for a maximum angular deformation of 1/250 of its height.

The main characteristics that presents the wooden walls tested are the sheathing with oriented strand board (OSB) and the wall mooring system to the founding used.

This research determined that the most influetnial variable in the wood shear walls capacity against monotonic lateral loads are; the mooring system used to connect the wood founding and nail spacing on the connection of the sheathing plate to the wood. Change from a mooring system with a grooved iron to a framing square system and bolt increased the initial rigidity on 100% average, instead vary the perimeter nailing and plate center of 15 cm and 30 cm to 10 cm and 20 cm increased the initial rigidity on a 11% average.

Key words: wood shear walls, initial rigidity.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la escasa información existente en el país sobre el comportamiento mecánico de las viviendas con estructura de madera, particularmente sobre la capacidad de los muros estructurales; el Instituto Forestal (INFOR), junto con el apoyo de la División Técnica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, realizan una serie de ensayos para caracterizar las tipologías de muros de madera más utilizadas en las construcciones de viviendas que cuentan con financiamiento del Estado de Chile (INFOR, Informe Técnico N°191, 2012).

La presente investigación hace referencia a modelar el comportamiento de muros de corte de madera frente a cargas laterales monotónicas ensayados en el Laboratorio del Área de Ingeniería Estructural del Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (CITEC UBB) encargado por el INFOR. Se puede definir modelación, como la representación numérica aproximada del comportamiento de los muros de corte ensayados, siendo una herramienta complementaria a los estudios experimentales para obtener una mejor comprensión de estos.

Las características principales de estos tipos de muros es el revestimiento de placa de fibras orientadas (OSB), el sistema de anclaje, el espaciamiento de los pies derecho y la escuadría de estos, las cuales son influyentes a la capacidad de los muros de madera frentes a cargas laterales.

La investigación de estos muros de madera surge por el interés de conocer nuevas tipologías de muros de cortes y complementar a los ensayos realizados por el CITEC UBB con el fin de determinar cuál es o son los elementos más eficientes para resistir las cargas laterales.

Para llevar a cabo esta investigación se realiza un análisis de los resultados de los muros ensayados, los cuales son utilizados para calibrar los modelos numéricos, para posteriormente generar las nuevas tipologías. Los modelos se realizan a través de un programa computacional denominado “SAP2000 Versión 14” que implementa el uso de modelos matemáticos basado en el Método de Elementos Finitos para realizar los respectivos análisis.

1.1. Justificación

En enero del año 2013, el Instituto Forestal (INFOR) encargo al Laboratorio del Área de Ingeniería Estructural del Centro de Investigación Tecnológica de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (CITEC UBB) realización de 25 ensayos de muros de corte de madera, bajo cargas laterales monotónicas. El objetivo de este estudio fue investigar la influencia de distintas variables (escuadrías, placas arriostrantes, anclajes) en la resistencia lateral máxima de los muros. De esta manera, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) podría realizar recomendaciones constructivas y modificaciones a sus especificaciones técnicas de viviendas sociales de madera, con base científica – experimental.

Debido a restricciones de financiamiento no se pudieron realizar más ensayos experimentales, por lo que surge la necesidad de poder generar modelos numéricos de estos muros basados en el Método de Elementos Finitos, para ampliar la cobertura de casos analizados y complementar los alcances de la investigación original.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Modelar numéricamente el comportamiento de muros de corte de madera bajo cargas laterales monotónicas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Redactar el estado del arte respecto a técnicas de modelación numérica de muros de corte de madera bajo cargas laterales monotónicas.
- Analizar resultados de ensayos experimentales de muros de corte de madera realizados por el Laboratorio del Área de ingeniería Estructural del Centro de Investigación Tecnológica de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (CITEC UBB).
- Seleccionar técnicas de modelación de muros de corte de madera bajo cargas laterales monotónicas.
- Generar modelos numéricos en software SAP2000 que permitan simular el comportamiento de los ensayos experimentales.

1.3. Metodología

El trabajo realizado en esta memoria será dividido en tres fases principales:

- Estudio de antecedentes: corresponde a establecer el estado del arte de formas de modelación numérica de muros de corte de madera.
- Análisis de datos experimentales: corresponde al procesamiento y análisis de datos experimentales de ensayos realizados en el CITEC UBB.
- Elaboración de modelos: corresponde a elaboración de modelos numéricos con software SAP2000 para diferentes configuraciones de muros de corte de madera.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

En el presente capítulo se dan a conocer estudios que han sido realizados por diferentes grupos de investigadores, los cuales muestran las formas de modelar los distintos elementos que conforman los muros de corte de madera.

2.1. Caracterización mecánica de muros estructurales de madera

Autores: Luis Vásquez, Gonzalo Hernández, Raúl Campos, Marcelo Gonzáles.

Año: 2012.

En la siguiente investigación realizada por el Instituto Forestal (INFOR, Chile), se realizan una serie de ensayos para caracterizar las tipologías de muros de madera más utilizadas en las construcciones de viviendas que cuentan con financiamiento del Estado de Chile. En este trabajo se realizaron ensayos mecánicos de carga vertical, carga lateral, carga de flexión y carga de impacto, aplicados sobre cuatro configuraciones de muro de madera con dos sistemas de anclaje diferente.

Las variables de los muros ensayados fueron las escuadrías de los pies derechos, los espesores de la placa de recubrimiento de OSB y el sistema de anclaje a la fundación, siendo una con un sistema de perno y escuadra y otra con un fiero estriado. En la figura 1 del capítulo 3 se muestra la tipología típica de los muros de corte de madera ensayados.

Los resultados de esta investigación, en los ensayos de carga lateral, destacan que el modo de falla característicos que presentan los muros es el desclavado inferior del pie derecho-solera en el pie derecho traccionado, donde el sistema de anclaje perno y escuadra retrasa este mecanismo de

falla aumentado considerablemente la capacidad de los muros de madera, además se observó que el cambio de espesor de la placa de recubrimiento de OSB de 9.5mm a 11.1mm no tiene un cambio significativo en la capacidad lateral en los muros de madera ensayados.

2.2. Influencia del revestimiento para la elaboración de marcos de madera en las propiedades mecánicas de muros de corte.

Autores: Andrea Conte, Maurizio Piazza, Tiziano Sartori, Roberto Tomasi.

Año: 2011.

Esta investigación se realiza en Trento, Italia en la Universidad Degli Studi DI Trento, donde el objetivo de esta indagación es caracterizar experimentalmente el comportamiento mecánico de la conexión revestimiento-madera en los muros de corte, en términos de resistencia y rigidez, para posteriormente validar un modelo analítico propuesto capaz de predecir la característica de rigidez de la pared.

Analizaron un total de 34 probetas de conexión, 19 de estas fueron pruebas monotónicas y 15 ensayos cíclicos variando tanto los sistemas de conexión, espesor y tipo de tableros de recubrimiento

Lo observado en esta investigación en término de tipo de conexión, establece que cambiar de un clavo normar liso a un clavo estriado no cambia significativamente la capacidad de la unión. Por otra parte cambiar el tipo de recubrimiento de yeso a un panel OSB de genera un aumenta en la ductilidad considerable, donde el panel de yeso alcanzando un desplazamiento entre 6-7 mm en su capacidad máxima, en cambio las placas de OSB mantienen el nivel de resistencia hasta 20-24mm.

El fin de esta investigación era validar un modelo analítico el cual se realizó en el programa estructural Sap2000 donde los elementos de conexión revestimiento-madera ensayados se modelan a través de propiedades de enlace N-link con propiedad lineal, donde en conjunto con las propiedades de los distintos materiales es posible generar un modelo con resultados aceptables.

2.3.Evaluación de efecto de sistema y vías de cargas estructurales en una estructura de marcos de madera.

Autor: Kenneth G. Martin.

Año: 2010.

Esta investigación se realizó en Oregón, EEUU en la Universidad Estatal de Oregón, donde el objetivo de este proyecto era desarrollar un modelo de una estructura de madera ligera con un programa informático de análisis estructural, con el fin de evaluar los efectos del sistema y definir rutas de carga dentro de la estructura.

Se realizaron modelos 3D en Sap2000 de una casa de un nivel con técnicas simplificadas, se hicieron grandes esfuerzos para utilizar las funciones incorporadas de SAP2000 en conjunto con técnicas de modelado simples para capturar respuestas estructurales complejas (por ejemplo, efectos sobre el sistema, el efecto en los clavos, etc.). Los elementos de recubrimiento de los muro se modelaron a través del elemento Shell con propiedades ototrópicas, la estructura de madera se modelan a través de elementos Frame con propiedades isotrópicas, el sistema de anclaje se modelan a través de resorte lineales, la unión entre maderas se modela articuladamente ya que el marco no es capaz de proporcionar rigidez lateral sin el recubrimiento. Para poder representar el comportamiento de la conexión revestimiento-madera se incorporó un procedimiento de correlación novedoso que elimina la necesidad de representar cada clavo individualmente, esta consiste en igualar la deformación de un muro de corte de madera para una distribución de clavado dada cambiando el módulo de corte del revestimiento hasta igualar dicha deformación.

2.4.Comportamiento de muros de corte de madera desbloqueado.

Autor: Hongyong Mi.

Años: 2004.

Esta investigación se realizó en Fredericton, Canadá en la Universidad New Brunswick, el objetivo de este estudio es obtener una mejor comprensión del comportamiento de muros de madera no bloqueados a través de pruebas y modelos numéricos.

Realizan ensayos de muros de madera de corte de distintas escalas, las cuales luego fueron modeladas a través de Sap2000 en un análisis no lineal. Para realizar un análisis no lineal ensayan las distintas conexiones clavadas tales como la unión recubrimiento-madera y madera-madera, con esto obtienen curvar de carga-deformación las que se ingresarlas al programa a través de enlace N-link con propiedades no lineal.

El revestimiento se modelan a través de elemento Shell con propiedades ortotrópicas, los elementos de madera se modelan como elemento Framo con propiedades isotrópicas y el sistema de anclaje se modela a través de enlaces N-link con propiedades lineales.

Concluyen que es posible modelar los muros de corte de madera frente cargas laterales más allá del rango elástico. Modelos de elementos finitos desarrollados en este estudio fueron capaces de realizar un análisis estructural no lineal de muros de corte y predecir su comportamiento más allá de la carga máxima, es decir, la parte de la degradación de la curva de carga-desplazamiento. Esto es posible si se proporcionan las propiedades de los componentes y los materiales apropiados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

En el presente capítulo se presentan las tipologías de los muros de corte de madera ensayados por el CITEC UBB y la forma en la cual se ensayan. Posteriormente se presentan las variables a considerar en los modelos de elementos finitos, y la forma utilizada para calibrar los modelos a realizar.

3.1. Tipologías de muros de corte de madera ensayado.

Las tipologías de muros de corte de madera sometidos a cargas monotónicas se observan en la tabla 1. (INFOR, Informe Técnico N°191, 2012)

Tabla 1. Tipología de muros de madera sometidos a carga horizontal.

Nombre	Estructura	Placa de revestimiento	Sistema de anclaje
MCE-2x3-9	Madera aserrada estructural G2 de pino radiata impregnada y seca en cámara, escuadría de 45x69mm (2x3''); y pie derecho separados 600mm a eje uno de otro.	Placa de madera OSB de 9,5mm de espesor con clavos helicoidales de 2'', distanciados en la zona perimetral a 100mm y zona central a 200mm	2 Espárragos, fierro estriado 8mm
MCP-2x3-9	Madera aserrada estructural G2 de pino radiata impregnada y seca en cámara, escuadría de 45x69mm (2x3''); y pie derecho separados 600mm a eje uno de otro.	Placa de madera OSB de 9.5mm de espesor con clavos helicoidales de 2'', distanciados en la zona perimetral a 100mm y zona central a 200mm	2 Pernos de anclaje zincados, grado 2, de 3/8'' de diámetro; con escuadra de acero modelo A66, marca Simpson Strong-Tie.
MCP-2x3-11	Madera aserrada estructural G2 de pino radiata impregnada y seca en cámara, escuadría de 45x69mm (2x3''); y pie derecho separados 600mm a eje uno de otro..	Placa de madera OSB de 11,1mm de espesor con clavos helicoidales de 2'', distanciados en la zona perimetral a 100mm y zona central a 200mm	2 Pernos de anclaje zincados, grado 2, de 3/8'' de diámetro; con escuadra de acero modelo A66, marca Simpson Strong-Tie.
MCP-2x4-9	Madera aserrada estructural G2 de pino radiata impregnada y seca en cámara, escuadría de 45x94mm (2x4''); y pie derecho separados 600mm a eje uno de otro.	Placa de madera OSB de 9,5mm de espesor con clavos helicoidales de 2'', distanciados en la zona perimetral a 100mm y zona central a 200mm	2 Pernos de anclaje zincados, grado 2, de 3/8'' de diámetro; con escuadra de acero modelo A66, marca Simpson Strong-Tie.
MCP-2x4-11	Madera aserrada estructural G2 de pino radiata impregnada y seca en cámara, escuadría de 45x94mm (2x4''); y pie derecho separados 600mm a eje uno de otro.	Placa de madera OSB de 11,1mm de espesor con clavos helicoidales de 2'', distanciados en la zona perimetral a 100mm y zona central a 200mm	2 Pernos de anclaje zincados, grado 2, de 3/8'' de diámetro; con escuadra de acero modelo A66, marca Simpson Strong-Tie.

El tamaño de todas las probetas fue de 1,22m de ancho por 2,44m de alto, con revestimiento de placa de fibras orientadas (OSB) por solo una cara, clavada cada 10cm en su perímetro y 20cm en el interior con clavos helicoidales de 2", 60 cm de separación entre pies derechos a eje uno de otro, la tipología típica de los muros ensayados se puede observar en la figura 1.



Figura 1. Tipología típica muros ensayados.

- Nota:
- U1: Medición desplazamiento vertical.
 - U2: Medición desplazamiento horizontal superior.
 - U3: Medición desplazamiento horizontal inferior.
 - P : Aplicación carga horizontal.

3.2. Metodología de ensayo.

El método de ensayo aplicado es el descrito en la norma chilena NCh 802.Eof71: Arquitectura y construcción – Paneles prefabricados – Ensayo de carga horizontal; sin embargo se realizaron las siguientes modificaciones al método de ensayo:

- La restricción horizontal inferior de los muros se generó a través de los sistemas de anclaje a la viga de fundación.

- No se restringió el desplazamiento vertical del panel en la zona de aplicación de carga.
- Por cada tipología constructiva se evaluaron 5 probetas, dando un total de 25 ensayos.
- La carga horizontal se aplicó monotónicamente de manera continua hasta la falla. No se realizaron incrementos discretos de carga ni se midieron desplazamientos laterales residuales.

La implementación del ensayo y la ubicación de los transductores de desplazamiento se muestran en la figura 1(a).

3.3. Tipología de los modelos analizados.

Para dar validez a este estudio se determinó el número de variables influyentes en la capacidad de los muros de madera bajo cargas laterales monotónicas, donde las variables fueron, espesor placa OSB, escuadría madera estructural, grado estructural madera, sistema de anclaje, espaciamiento pies derechos, espaciamientos clavos unión OSB-Madera, dando un total de sesenta y cuatro modelos analizados. La elección de estas variables se realiza con el fin de poder reflejar y complementar al estudio realizado por el INFOR. En la tabla 2 se resumen las distintas variables y la tabla 3 se resume el significado de la nomenclatura de los modelos realizados.

Tabla 2. Variables a considerar en la modelación de los muro de corte.

Escuadría	Grado estructural	Espaciamiento o pie derecho	Espesor OSB	Tipo de anclaje	Espaciamiento clavo
2x3"	G1	600 mm	9.5 mm	Fierro estriado 8mm	100 mm perímetro, 200 mm zona central
2x4"	G2	400 mm	11.1 mm	Escuadra A66 Simpson Strong-Tie pernos zincados, grado 2, de 3/8"	150 mm perímetro, 300 mm zona central

Tabla 3. Significado de nomenclatura de los modelos.

Nomenclatura	mcZY-AxB-D-ExF-G
mc	Muro de corte
Z	Sistema de anclaje, p: Escuadra Simpson A66 o e:Fierro estriado
Y	Grados estructural madera, G1 o G2
AxB	Escuadría pies derechos y soleras, 2x3” o 2x4”
D	Espesor placa OSB, 9.5 mm o 11.1 mm
ExF	Espaciamiento clavo conexión OSB-Madera E: espaciamiento perimetral, 10 cm o 15 cm F: espaciamiento central, 20 cm o 30 cm
G	Espaciamiento pies derecho, 40 cm o 60 cm

3.4. Metodología de calibración de los modelos.

El análisis realizado en los diferentes modelos es un análisis lineal estático, por lo tanto, buscar una calibración para la predicción del desplazamiento horizontal no se aproxima a reflejar los resultados de los ensayos realizados, por ende, la calibración se realiza para reflejar la rigidez inicial que presentan los muros de corte de madera ensayados, donde se busca siempre representar la rigidez más desfavorable de las diferentes tipologías de muros ensayos.

La rigidez inicial al corte se puede determinar de dos formas:

- Restringiendo el desplazamiento máximo de los muros a una distorsión angular de 1/250 de la altura (Chun Ni, et al).

$$K = \frac{P_k}{\Delta_k} \quad \text{Ec. (1)}$$

K: rigidez al corte para una distorsión angular de 1/250 de la altura.

P: Nivel de carga en el extremo superior del muro para una deformación de 1/250 da la altura ($F_{1/250h}$).

Δ_k : Deformación 1/250 de la altura del muro ($D_{1/250h}$). Esta variable incluye la deformación por corte puro del conjunto y aquella contribuida por la deformación del anclaje y el sistema de conexión interna.

En la figura 2 (a) se representa gráficamente la forma de determinar esta rigidez.

- Restringiendo la carga a 1/3 de la carga máxima (ASTM E564, 2012),

$$G' = \frac{P}{\Delta} \times \frac{a}{b} \quad \text{Ec. (2)}$$

G' : Rigidez al corte del muro para 1/3 de la carga máxima.

P : 1/3 del nivel de carga máxima en el extremo superior del muro ($1/3F_{\max}$).

Δ : Deformación total del muro alcanzada para 1/3 del nivel de carga máxima del muro durante el ensayo ($D_{1/3F_{\max}}$). Esta variable incluye la deformación por corte puro del conjunto y aquella contribuida por la deformación del anclaje y el sistema de conexión interna.

a : Altura del muro de corte.

b : Longitud del muro de corte.

El factor a/b de la rigidez restringida por la carga (G') no se aplica ya que las dimensiones, alto y largo, de todos los muros ensayados y modelados no varía.

En la figura 2 (b) se representa gráficamente la forma de determinar esta rigidez.

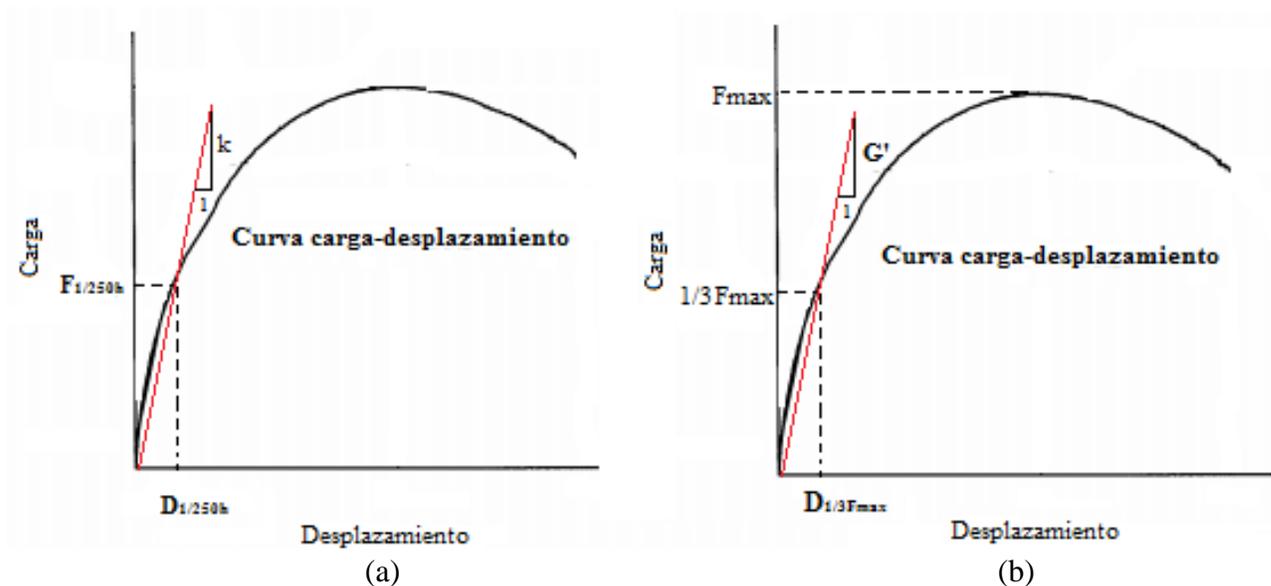


Figura 2. Definición rigidez inicial.

4. MODELACIÓN MURO DE CORTE

La modelación numérica es una herramienta complementaria para comprender el comportamiento de los muros de corte.

En esta memoria de tesis, se utilizó el software SAP2000 (CSI, 2009) para modelar los muros de corte de madera. SAP2000 es un programa comercial de elementos finitos especialmente diseñado para la realización de análisis estructural. En este programa se realizó un análisis lineal suponiendo que todos los materiales se comportan dentro del rango elástico.

En este capítulo se describe el desarrollo del modelo de muro de corte, incluyendo la lógica de la discretización, elección de los elementos y sus asignaciones de propiedad y mallado.

4.1. Modelo muro de corte

Los modelos de la figura 3 representan la estructura física de los muros de corte ensayados que se muestran en la figura 1. En los modelos, el sistema estructural se divide en segmentos que representan la placa de OSB, pies derechos, soleras, conexión placa de OSB-Madera (clavos), conexión solera pies derecho y sistema de anclaje. Las dimensiones de todos los modelos fueron 2400 mm de alto por 1200 mm de ancho, estas dimensiones se definieron con el fin de facilitar el mallado de la placa OSB.

En la tabla 4 se resumen las propiedades de los distintos elementos ingresados para la modelación. Del anexo A hasta el anexo D se detallan la forma de determinar estas propiedades.

Tabla 4. Resumen propiedades elementos modelo.

Elemento	Tipo	Elemento Finito	Propiedad Material
OSB	9.5 mm	Shell	E ₁ =14666 kg/cm ² E ₂ =37332 kg/cm ² U ₁₂ =0.3 G ₁₂ =6200 kg/cm ²
	11.1 mm		E ₁ =8396 kg/cm ² E ₂ =35264 kg/cm ² U ₁₂ =0.3 G ₁₂ =9000 kg/cm ²
Pie derecho, Solera superior e inferior	G1	Frame	E=100000 kg/cm ² U=0.3
	G2		E=89000 kg/cm ² U=0.3
Sistema de anclaje	Escuadra A66 Simpson Strong-Tie pernos zincados, grado 2, de 3/8"	one-joint link	U1 = 900 kgf/mm
	Fierro estriado 8 mm		U1 = 120 kgf/mm
Clavo conexión Revestimiento-Madera	Pie derecho-OSB	two-joint link	U2 = 44 kgf/mm U3 = 44 kgf/mm
	Solera-OSB		U2 = 44 kgf/mm U3 = 44 kgf/mm
Clavo conexión Madera-Madera	Escuadra A66 Simpson Strong-Tie pernos zincados, grado 2, de 3/8"	two-joint link	U1 = 80 kgf/mm
	Fierro estriado 8 mm		U1 = 20 kgf/mm

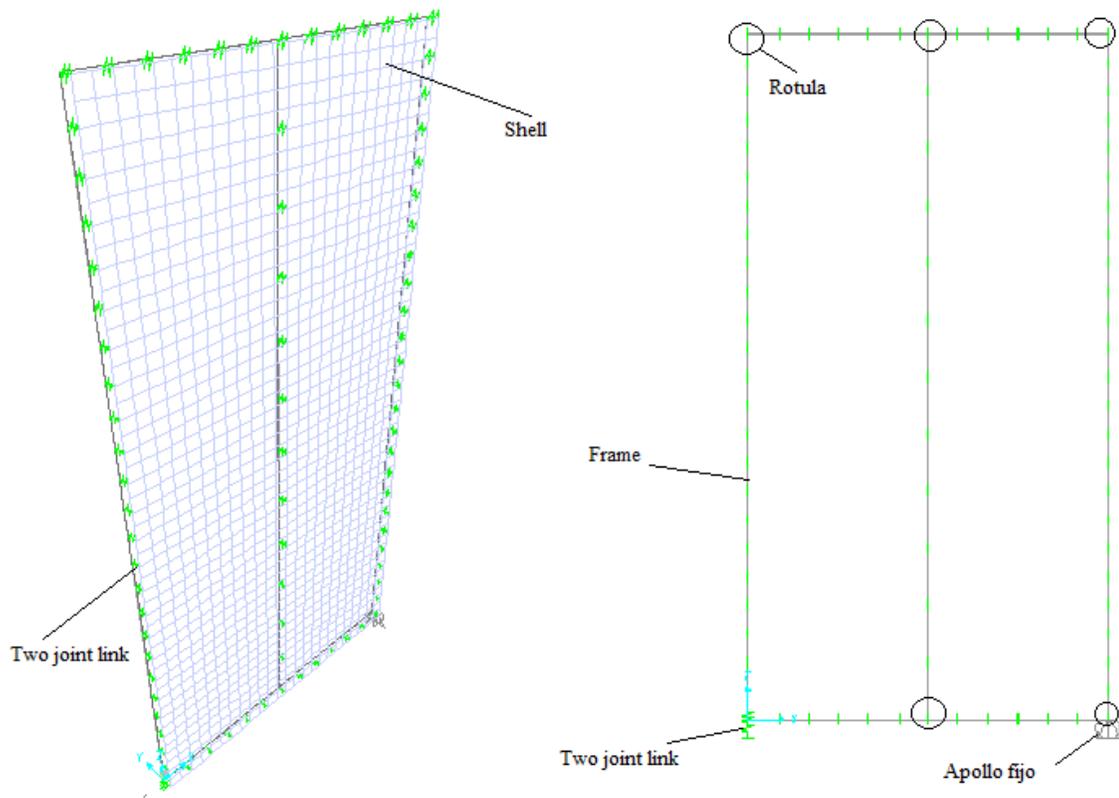


Figura 3. Modelo elementos finito muro de corte.

4.2.Elementos de madera aserrada.

Los elementos de madera, pies derechos, solera superior y solera inferior se modelan como elementos tipo Frame con propiedades isotrópicas que se representan por una línea recta que conecta dos nodos.

4.3.Revestimiento.

El revestimiento de OSB se representa a través del elemento tipo Shell con propiedades ortotrópicas, este se malla formando cuadriláteros de 50x50 mm. La elección de este tamaño de mallado se genera para coincidir el nodo que representa el clavo de unión con un nodo del cuadrilátero y así poder modelar el clavo. Cabe mencionar que esta alternativa concuerda para todas las tipologías modeladas.

La placa de OSB es desfasada de la estructura de madera para modelar el clavo de unión, donde este desfase representa la distancia entre los centroides de los elementos a unir.

4.4.Anclaje.

Los sistemas de anclaje (perno de anclaje 3/8" zincado grado 2 y espárragos fierro estriado 8mm) se modelan de dos formas, el anclaje izquierdo de la figura 1 (a) se modela a través de elementos de enlace de one-joint link con propiedades lineales; el cual se compone de seis resortes internos independientes (U1, U2, U3, R1, R2, R3). Solo se activan U1 y U2, donde U1 representa la deformación axial a lo largo del eje local 1 (eje Z en la figura 4) y U2 representa la deformación por corte a lo largo del eje local 2 (eje X en la figura 4). Debido a que la solera inferior sufre desplazamientos horizontales despreciables en los ensayos realizados, el grado de libertad U2 se fija, por la misma razón el anclaje derecho de la figura 1 (a) se modela a través de un apoyo fijo. En el anexo A se detalla la forma de obtener las propiedades de estos resortes.

4.5.Conexión Revestimiento-Madera.

La conexión de la placa de OSB a la madera (clavo) se modela a través del elemento de enlace two-joint link con propiedades lineales, el cual se compone de seis resortes internos independientes, solo se activan los grados de libertad U2 y U3, donde U2 representa la deformación por corte a lo largo del eje local 2 (eje Z en la figura 4), U3 representa la deformación por corte a lo largo del eje local 3 (eje X en la figura 4). La rigidez de estos resortes depende de la dirección en que sufre el corte el clavo respecto a la fibra de la madera, si este es perpendicular a la fibra o paralela a esta.

La rigidez de estos resortes se determinaron a través de las curvas carga-deformación de los ensayos de conexión Revestimiento-Madera paralela a la fibra, realizados por Radmacher F. (2006) para obtener su título de ingeniería civil en obras civiles en la Universidad Austral de Chile y por Leiva J. y Vilches P. (1996) los cuales obtuvieron curvas carga-deformación con probetas perpendicular a la fibra para su tesis de Doctorado en la Universidad Santiago de Chile. En el anexo B se detalla los resultados y la forma en que se determinó dichas propiedades.

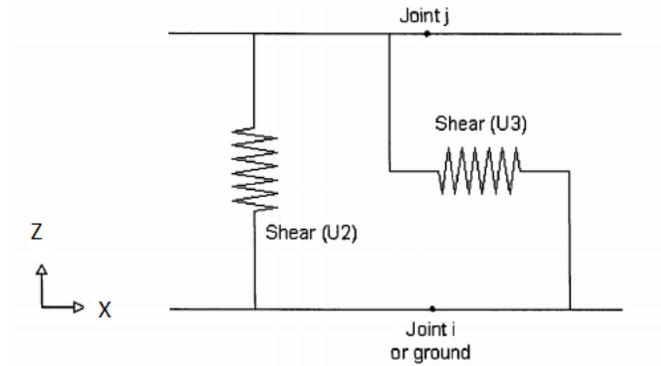


Figura 4. Resorte internos conexión revestimiento-madera.

4.6. Conexión Madera-Madera.

Las conexiones entre el pie derecho y las soleras superior e inferior se modelan a través de uniones rotuladas debido a que estas no presentan rigidez frente a cargas laterales. Solo la conexión inferior izquierda (lugar de medición del desplazamiento vertical U1, figura 1) se modela diferente, con la finalidad de poder representar el desclavado del pie derecho con la solera, la cual se observó en los distintos ensayos realizados en el CITEC UBB. La forma de modelar este desclavado es a través de elemento de enlace de two-joint link con propiedad lineal, el cual se compone de seis resortes internos independientes, se activa solo el grado de libertad U1 que representa la deformación axial a lo largo del eje local 1 (eje Z en la figura 5).

La propiedad de este resorte depende del sistema del anclaje utilizado, ya que para el sistema con escuadra Simpson A66 esta refuerza la unión entre el pies derecho con la solera aumentando la rigidez de desclavado del pie derecho, en cambio, para el sistema de anclaje con fierro estriado este solo sujeta a la solera y la única rigidez al desclavado que tiene el pie derecho es sola un par de clavos que poseen este tipo de unión.

En el anexo C se detalla la forma de determinar la rigidez de los resortes para los distintos casos de anclaje.

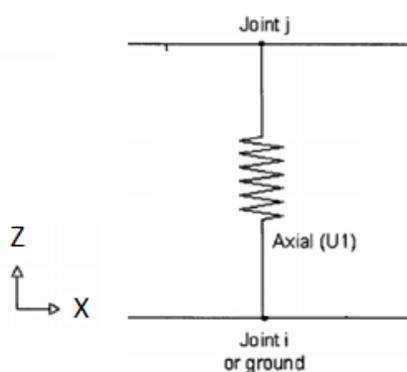


Figura 5. Resorte interno conexión madera-madera.

4.7. Tipo de análisis.

Tipo de análisis define cómo se aplican las cargas a la estructura (por ejemplo, estática o dinámicamente) y cómo responde la estructura (por ejemplo, linealmente o no linealmente). En este estudio, el análisis lineal estático se utiliza en el análisis de los muros de corte.

4.8. Supuestos de modelación.

Para realizar cualquier modelo computacional que intente predecir el comportamiento real de una estructura, se deben asumir ciertos supuestos que deben suceder:

- No se consideró cambios de volumen de las piezas de madera y placa de OSB producto de la condición de humedad.
- Por faltas de ensayos en el modelo las uniones entre los elementos de madera aserrada se consideran indeformables o rígidas frente a traslaciones modeladas en forma de rotulas, excepto la unión izquierda inferior que se detalle en el punto 3.5, por lo que sabremos de antemano que las deformaciones del panel no coincidirán con los ensayos para un mismo rango de carga lateral.
- Las secciones transversales de los elementos en flexión no se deforman fuera de su plano o lo que se conoce como: “secciones planas permanecen planas” (hipótesis de flexión de Bernoulli).
- Sólo se consideran deformaciones en el plano del panel que es donde se aplica la carga (XZ).

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados (tabla1) para luego compararlos con los resultados de los modelos con las pruebas correspondientes, y así evaluar su validez, posteriormente generar nuevas tipologías de muros y determinar su rigidez frente a cargas laterales monotónicas.

5.1. Resultados ensayos

Los resultados promedios de la rigidez inicial controlada por el desplazamiento y por 1/3 de la carga máxima, para las distintas tipologías, se observan en las tabla 5. En el anexo D se muestran los resultados para los distintos ensayos y se representan gráficamente la rigidez a través de la curva carga-desplazamiento de las distintas tipologías ensayadas.

Al comparar la tipología de muro mce-2x3-9.5-10x20-60 con mcp-2x3-9.5-10x20-60, se puede apreciar una diferencia significativa, donde el cambio de sistema de anclaje “esparrago” al sistema “perno y escuadra” permitió un incremento del 98% en la rigidez inicial controlada por el desplazamiento de 1/250 de la altura del muro y un incremento de 124% en la rigidez inicial controlada por 1/3 de la carga máxima. En cambio al comparar la tipología mcp-2x3-9.5-10x20-60 con mcp-2x3-11.1-10x20-60 y la tipología mcp-2x4-9.5-10x20-60 con mcp-2x4-11.1-10x20-60 donde solo cambia el espesor de la placa OSB, se observa un incremento en la rigidez inicial del 6.5% y un 18% respectivamente para el método controlada por el desplazamiento mientras que la rigidez inicial controlada por carga máxima aumenta en un 3.0% y 91.7% respectivamente

5.2.Resultados calibración modelos.

Una vez determinado la rigidez inicial de los distintos muros de corte de madera ensayados se procede a comparar las predicciones de los modelos con sus respectivas tipologías. En la tabla 5 se observan los resultados de los modelos y los promedios de los ensayos para las distintas tipologías de muros.

Al comparar el promedio de los ensayos de las distintas tipologías con sus respectivos modelos se puede observar, salvo en la tipología mcpG2-2x3-9.5-10x20-60, que el modelo representa una rigidez menor tanto para el método controlado por el desplazamiento como el controlado por carga máxima. La mayor diferencia se aprecia en la tipología mcpG2-2x4-11.1-10x20-60 donde el modelo es un 14% más bajo que el promedio de los ensayos con el método controlado por desplazamiento, mientras que para el método controlado por carga máxima, el modelo es un 53% más bajo que el promedios de los ensayos. Por otra parte, la menor diferencia se encuentra en la tipología mcpG2-2x4-9.5-10x20-60 donde el modelo es 0.6% y 13% más bajo que el promedio de los ensayos para el método controlado por desplazamiento y carga máxima respectivamente.

Se puede apreciar en los resultados de los distintos modelos que; el método controlado por deformación representan de mejor forma las rigidez inicial, donde solo se tiene un promedio de diferencias de las distintas tipologías de un 3.5%, mientras que para el métodos controlado por carga máxima se tiene un promedio de diferencia del 30%.

Tabla 5. Resultados rigidez inicial de modelos de muros ensayados.

Tipología de muro	Rigidez inicial experimental (promedios)		Rigidez inicial numérica K _{num} (kgf/mm)	Razón de rigideces numérica/experimental (%)	
	K(kgf/mm)	G'(kgf/mm)		K _{num} /K	K _{num} /G'
mceG2-2x3-9,5-10x20-60	12,62	16,24	12,45	98,7%	76,7%
mcpG2-2x3-9,5-10x20-60	25,01	36,30	25,06	100,2%	69,0%
mcpG2-2x4-9,5-10x20-60	25,92	29,57	25,77	99,4%	87,1%
mcpG2-2x3-11,1-10x20-60	26,63	37,40	26,15	98,2%	69,9%
mcpG2-2x4-11,1-10x20-60	31,39	56,71	26,90	85,7%	47,4%

Se observan en la tabla 5 que el método controlado por carga máxima no representa adecuadamente la rigidez inicial de los muros ensayados por el CITEC UBB, ya que al momento de generar una mejora estructural (aumento de escuadría) y pasar de la tipología mcpG2-2x3-9.5-10x20-60 a la tipología mcpG2-2x4-9.5-10x20-60, la rigidez inicial decae de 36.30 (kgf/mm) a 29.57 (kgf/mm) en vez de aumentar, por lo tanto, solo el método controlado por el desplazamiento se usa para determinar la rigidez inicial de las nuevas tipologías estudiadas.

5.3. Resultados modelos

Una vez calibrados los modelos se procede a generar nuevas tipologías de análisis que junto con las utilizadas para calibrar suman un total de sesenta y cuatro casos analizados, en la tabla 6 y 7 se muestran los resultados de las distintas tipologías estudiadas.

En las tablas se puede observar que la rigidez aumenta considerablemente al momento de cambiar el sistema de anclaje de fierro estriado a una escuadra Simpson modelo A66, además se puede ver que el cambio de grado estructural de los pies derechos y solera es indiferente frente a cargas laterales para el modelo generado. En el capítulo siguiente se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos.

Tabla 6. Resultados rigidez inicial k (kgf/mm) modelos con escuadra A66.

	Sistema anclaje	Grado estructural madera	Escuadría madera (in)	Espesor OSB (mm)	Espaciamien to clavo (cm)	Espaciamien to pies derecho (cm)	Carga (kgf)	Desplazamie nto (mm)	K (kgf/mm)		
mc	p: Escuadra A66 Simpson Strong-Tie pernos zincados, grado 2, de 3/8"	G2	2x3"	9,5	10x20	60	244,6	9,76	25,06		
					15x30		218,8	9,76	22,41		
				11,1	10x20		255,2	9,76	26,15		
					15x30		227,5	9,76	23,31		
				9,5	10x20		40	245,8	9,76	25,18	
					15x30			220,8	9,76	22,62	
			11,1	10x20	256,4	9,76		26,27			
				15x30	229,6	9,76		23,52			
			2x4"	9,5	60	10x20		251,5	9,76	25,77	
						15x30		223,8	9,76	22,93	
				11,1		10x20	262,5	9,76	26,90		
						15x30	232,9	9,76	23,86		
				9,5		40	10x20	253,8	9,76	26,00	
							15x30	227,3	9,76	23,29	
			11,1	10x20	265,0		9,76	27,15			
				15x30	236,6		9,76	24,24			
			G1	2x3"	9,5		10x20	60	244,6	9,76	25,06
							15x30		218,8	9,76	22,41
					11,1	10x20	255,2		9,76	26,15	
						15x30	227,5		9,76	23,31	
					9,5	40	10x20		245,8	9,76	25,18
							15x30		220,8	9,76	22,62
				11,1	10x20		256,4	9,76	26,27		
					15x30		229,6	9,76	23,52		
		2x4"		9,5	60		10x20	251,5	9,76	25,77	
							15x30	223,8	9,76	22,93	
				11,1		10x20	262,5	9,76	26,90		
						15x30	232,9	9,76	23,86		
				9,5		40	10x20	253,8	9,76	26,00	
							15x30	227,3	9,76	23,29	
		11,1		10x20	265,0		9,76	27,15			
				15x30	236,6		9,76	24,24			

Tabla 7. Resultados rigidez inicial k (kgf/mm) modelos con fierro estriado.

	Sistema anclaje	Grado estructural madera	Escuadría madera (in)	Espesor OSB (mm)	Espaciamien to clavo (cm)	Espaciamien to pies derecho (cm)	Carga (kgf)	Desplazamie nto (mm)	K (kgf/mm)	
mc	e: Fierro estriado 8mm	G2	2x3"	9,5	10x20	60	121,5	9,76	12,45	
					15x30		110,9	9,76	11,37	
				11,1	10x20		124,7	9,76	12,78	
					15x30		113,8	9,76	11,66	
				9,5	10x20		40	122,4	9,76	12,54
					15x30			112,4	9,76	11,52
			11,1	10x20	125,7	9,76		12,88		
				15x30	115,3	9,76		11,81		
			2x4"	9,5	60	10x20		125,3	9,76	12,84
						15x30		114,1	9,76	11,69
				11,1		10x20	128,7	9,76	13,18	
						15x30	117,0	9,76	11,99	
		9,5		40		10x20	127,0	9,76	13,02	
						15x30	116,6	9,76	11,95	
		11,1	10x20		130,4	9,76	13,36			
			15x30		119,6	9,76	12,26			
		G1	2x3"		9,5	10x20	60	121,5	9,76	12,45
						15x30		110,9	9,76	11,37
				11,1	10x20	124,7		9,76	12,78	
					15x30	113,8		9,76	11,66	
				9,5	40	10x20		122,4	9,76	12,54
						15x30		112,4	9,76	11,52
			11,1	10x20		125,7	9,76	12,88		
				15x30		115,3	9,76	11,81		
2x4"	9,5		60	10x20		125,3	9,76	12,84		
				15x30		114,1	9,76	11,69		
	11,1			10x20	128,7	9,76	13,18			
				15x30	117,0	9,76	11,99			
	9,5	40		10x20	127,0	9,76	13,02			
				15x30	116,6	9,76	11,95			
11,1	10x20		130,4	9,76	13,36					
	15x30		119,6	9,76	12,26					

6. ANALISIS DE RESULTADOS.

De los resultados obtenidos y presentados anteriormente, se obtiene lo siguiente:

Al cambiar en los modelos solo el grado estructural de la madera (pies derechos y soleras) de G2 a G1, se observó que no se genera cambio en la rigidez inicial. Se cree que la forma de modelar la unión entre el pie derecho y las soleras de forma rotulada no permite que los modelos reflejen diferencia entre los grados estructurales, por lo tanto, los análisis que se realizan a continuación solo se concentran a un solo grado estructural, siendo este G2.

La variable más influyente que se observa en la tabla 6 y 7 es el sistema de anclaje, donde cambiar el sistema de anclaje de fierro estriado de 8 mm a un anclaje a escuadra de acero modelo A66 marca Simpson Strong-Tie con pernos de anclaje zincado grado 2 de 3/8", la rigidez aumenta en un promedio en las distintas tipologías del 100%, en la figura 7 se puede observar el cambio grafico para las distintas tipologías.

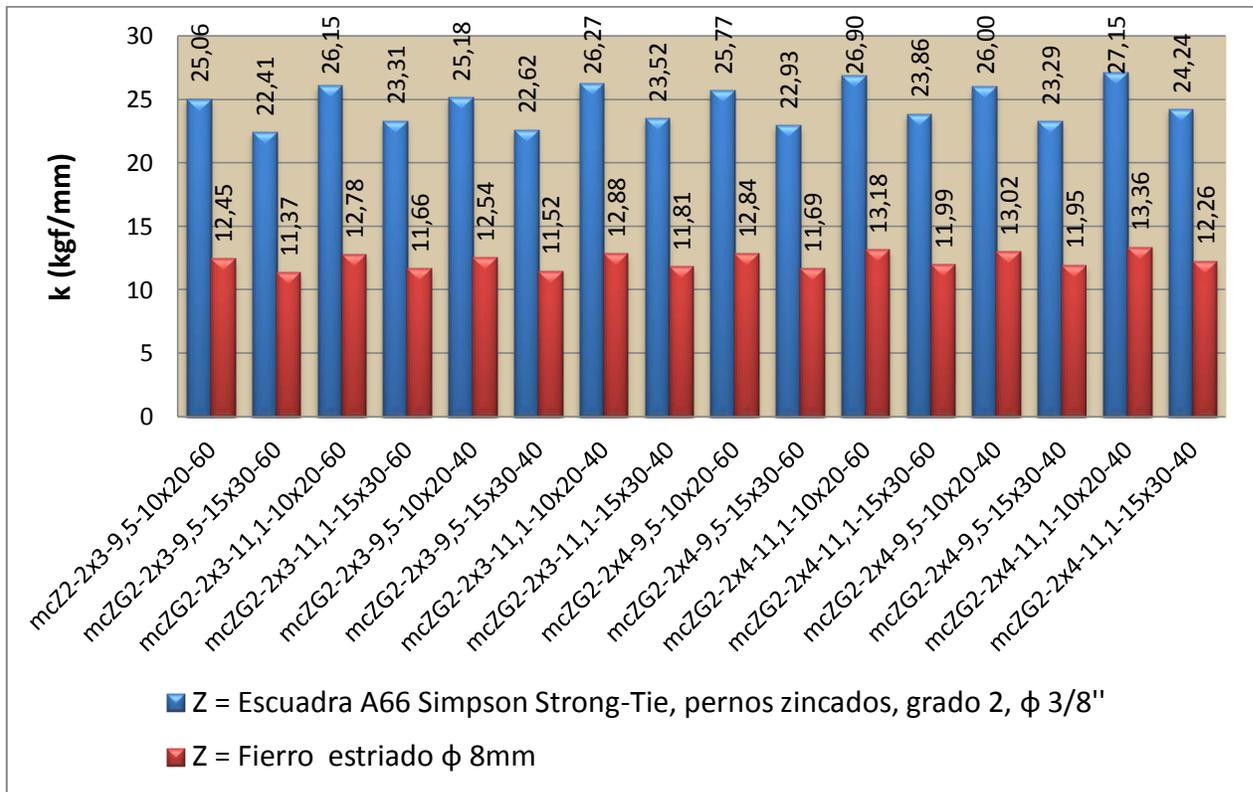


Figura 6. Resultado rigidez inicial según tipo de anclaje.

Según lo planteado anteriormente, la mayor rigidez se obtiene utilizando una escuadra Simpson A66 en el sistema de anclaje, pero observando los resultados se ve que la segunda variable que toma más relevancia en la rigidez inicial frente a cargas laterales monotónicas es la densidad de

clavado, donde cambiar el clavado de 15x30 a 10x20 utilizando el sistema de anclaje Simpson produce un aumento en un promedio del 12%, mientras que para el sistema de anclaje con fierro estriado esta rigidez aumenta en un 9% promedio. En la figura 8 se puede observar esta variación para las distintas tipologías.

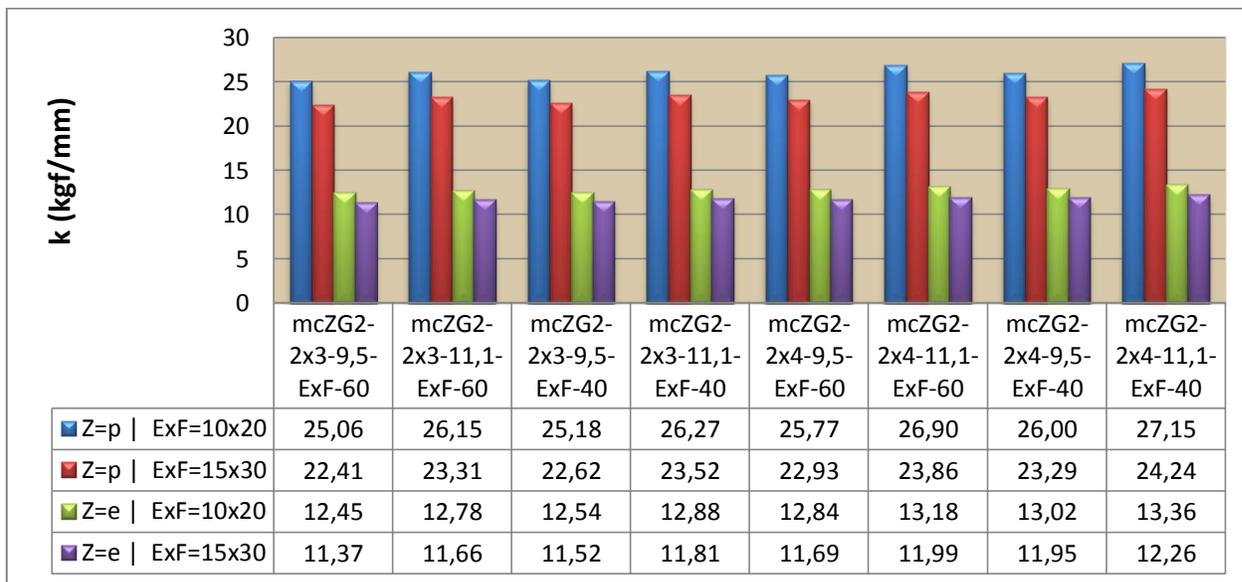


Figura 7. Resultado rigidez inicial según espaciamiento clavado.

Por otra parte de los resultados obtenidos se determina que el cambio del espesor de la placa de OSB de 9.5 mm a 11.1 mm en las distintas tipologías, produce un aumento de la rigidez inicial no muy relevante generando solo un aumento del 4.2% promedio para el sistema de anclaje Simpson, mientras que para el sistema de anclaje de fierro estriado el promedio de aumento es solo un 2.6%. En la figura 9 se puede observar estas variaciones para las distintas tipologías.

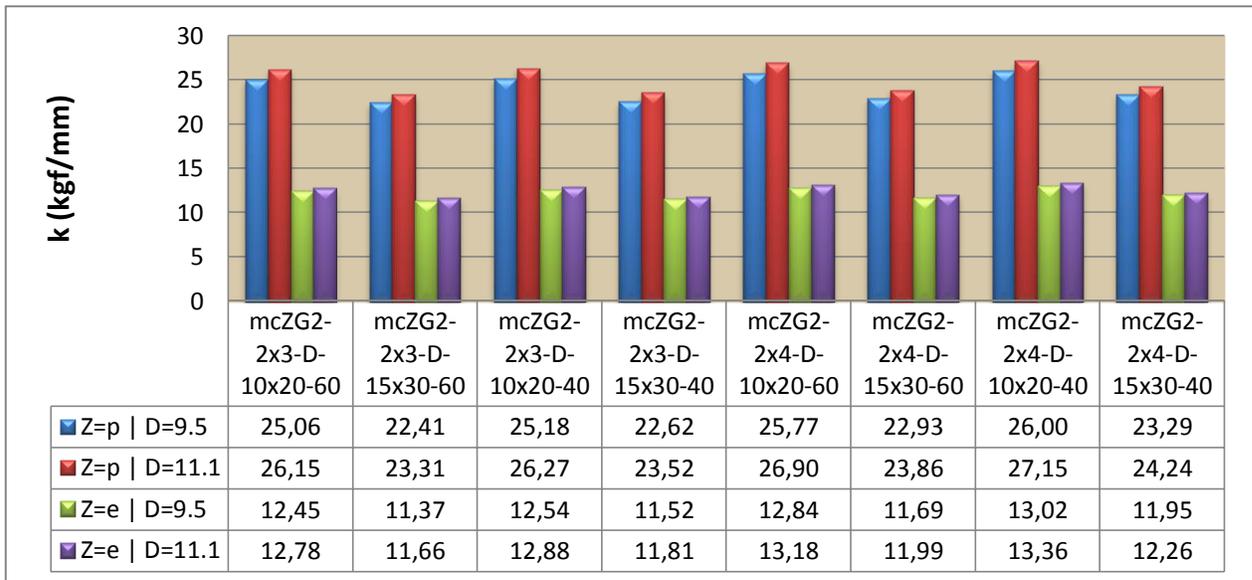


Figura 8. Resultado rigidez inicial según espesor placa OSB.

Al igual que el caso del cambio del espesor de la placa de OSB, el cambio en la escuadría de la madera de 2x3” a 2x4” produce un aumento no muy relevante en la rigidez inicial, pero para este caso la rigidez aumenta en un mayor porcentaje para el sistema de anclaje con fierro estriado que con escuadra Simpson, siendo esto el caso opuesto de lo que se ha reflejado anteriormente, donde la rigidez aumenta en un promedio de 2.9% y 3.4% para las distintas tipologías con sistema de anclaje Simpson y fierro estriado respectivamente. En la figura 10 se puede observar estas variaciones para las distintas tipologías.

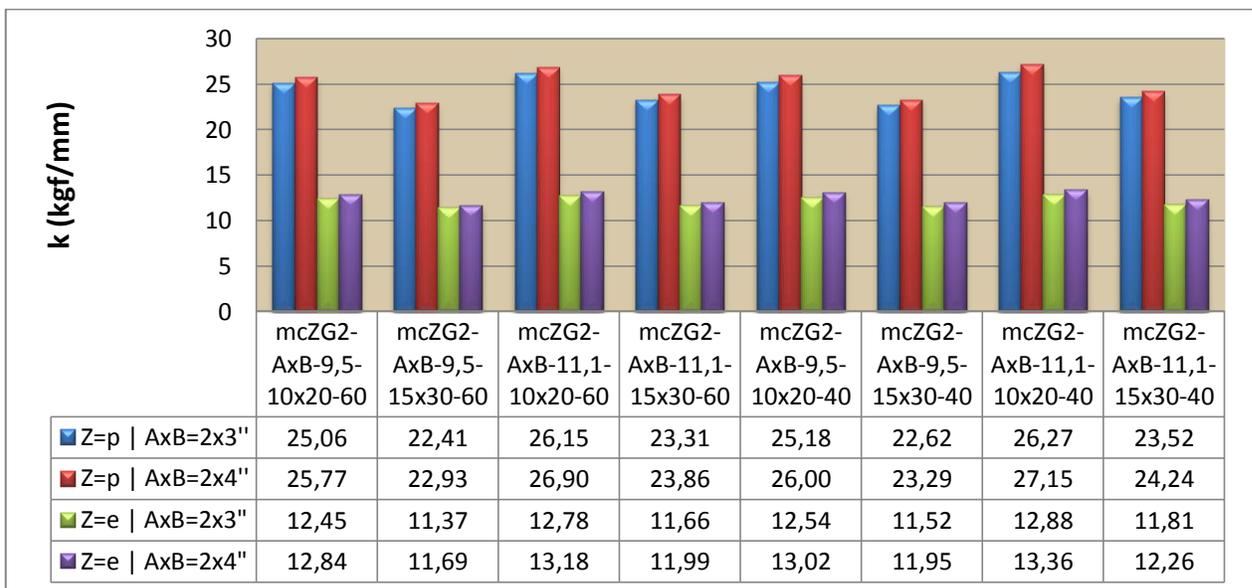


Figura 9. Resultado rigidez inicial según escuadría madera.

Por último se determina que la variable, en las distintas tipologías, que tiene un aumento en la rigidez inicial despreciable es el espaciamiento de los pies derechos, donde para el sistema de anclaje Simpson esta aumenta en un promedio de 1.0% y para el sistema de anclaje con fierro estriado esta aumenta sola 1.4% en promedio, al igual que el caso anterior en el cambio de escuadría de madera, este cambio es más influyente en la rigidez inicial para el sistema de anclaje con fierro estriado. En la figura 11 se puede observar estas variaciones para las distintas tipologías.

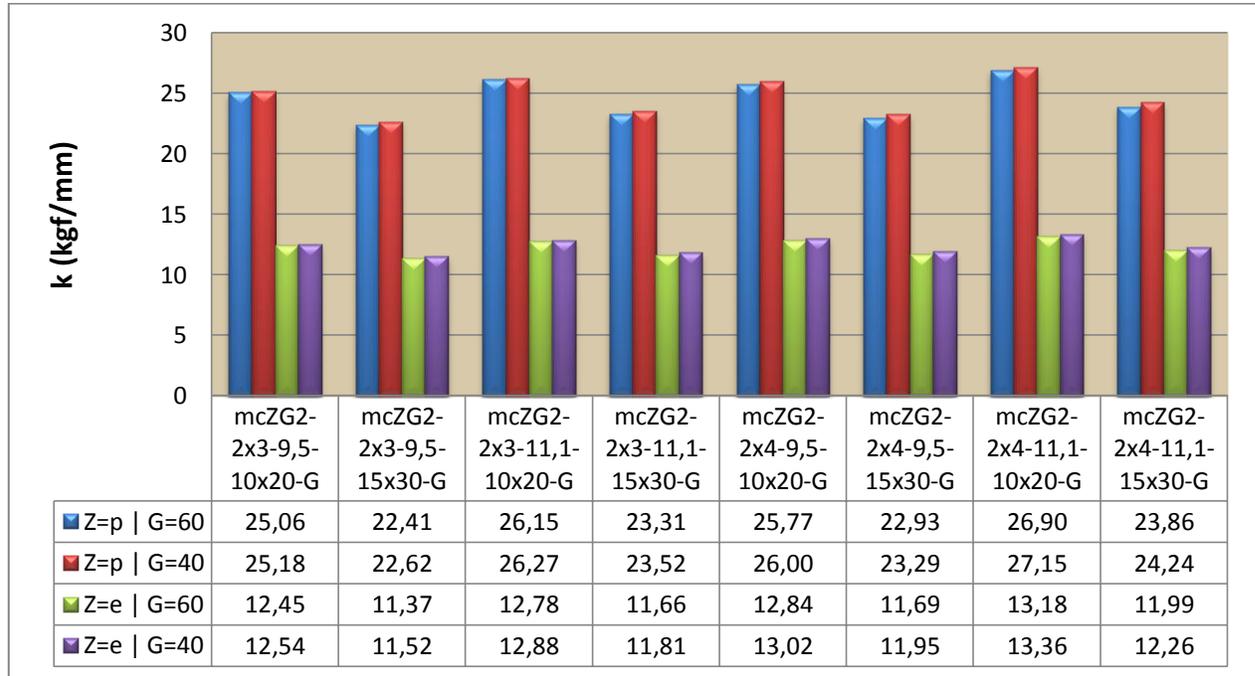


Figura 10. Resultado rigidez inicial según espaciamiento pies derechos.

Una vez realizado un análisis individual entre tipologías donde solo se compara la influencia de cambiar una variable, se procede a realizar un análisis global de los modelos realizados.

De los resultado entregados anteriormente en la tabla 6 y 7, se observa que el set de datos se puede dividir en dos grandes categorías, los muros de corte de madera con sistema de anclaje Simpson, donde la rigidez varía entre 22.41 (kgf/mm) a 27.15 (kgf/mm) , y los muros de corte de madera con sistema de anclaje fierro estriado, donde la rigidez inicial varía entre 11.37 (kgf/mm) a 13.36 (kgf/mm), además estas categorías se pueden subdividir en dos subcategorías, los muros de corte con espaciamiento de clavo 10x20 y los muros de corte con espaciamiento de clavo 15x30 donde es apreciable el cambio en la rigidez inicial. En la tabla 8 se resumen las categorías

en las que se dividen los resultados obtenidos y en el anexo E se puede observar gráficamente la rigidez inicial para las distintas categorías ordenada de forma descendente.

Tabla 8 Rigidez inicial agrupada según variables influyentes.

Categoría	Subcategoría	Sistema de anclaje	Espaciamiento clavos	Rango rigidez inicial (kgf/mm)
C1	C1.1	Escuadra	10x20	25.06-27.15
	C1.2	Simpson A66	15x30	22.41-24.24
C2	C2.1	Fierro estriado	10x20	12.45-13.36
	C2.2		15x30	11.37-12.26

6.1. Análisis económico.

Para determinar que tanto aumenta el costo de un muro de corte al cambiar una variable para aumentar su rigidez, se realiza un análisis económico. Los materiales utilizados en las distintas tipologías se cotizan en la tienda sodimac. Cabe mencionar que en este análisis no se considera el costo de mano de obra. En la tabla 9 se resumen el costo de cada elemento y en la tabla 10 se resumen el costos de todos las tipologías de muros analizados, donde se excluyeron las tipologías con madera grado estructural G1 ya que esta no tiene ningún cambio en la rigidez al cambiar el grado estructural.

Tabla 9 Costo materiales muros de corte madera.

Materiales	\$
Madera pino radiata 2x3" elaborado	\$ 2.070
Madera pino radiata 2x4" elaborado	\$ 2.638
OSB LP estructural 9,5mm	\$ 6.790
OSB LP estructural 11,1mm	\$ 7.590
Escuadra Simpson A66 + perno de anclaje	\$ 7.679
Fierro estriado 8mm A630 (40cm)	\$ 87
Clavo helicoidal 2" unidad	\$ 13

Tabla 10. Costo total según tipología de muro.

	Sistema anclaje	Grado estructural madera	Escuadría madera (in)	Espesor OSB (mm)	Espaciamien to clavo (cm)	Espaciamien to pies derecho (cm)	K (kgf/mm)	Costo \$	
mc	p: Escuadra A66 Simpson Strong-Tie pernos zincados, grado 2, de 3/8"	G2	2x3	9,5	10x20	60	25,06	\$ 31.496	
					15x30		22,41	\$ 31.136	
				11,1	10x20		26,15	\$ 32.296	
					15x30		23,31	\$ 31.936	
				9,5	10x20		40	25,18	\$ 33.708
					15x30			22,62	\$ 33.296
			11,1	10x20	26,27	\$ 34.508			
				15x30	23,52	\$ 34.096			
			2x4	9,5	60	10x20		25,77	\$ 33.768
						15x30		22,93	\$ 33.408
				11,1		10x20	26,90	\$ 34.568	
						15x30	23,86	\$ 34.208	
				9,5		40	10x20	26,00	\$ 36.548
							15x30	23,29	\$ 36.136
			11,1	10x20	27,15		\$ 37.348		
				15x30	24,24		\$ 36.936		
mc	e: Fierro estriado 8mm	G2	2x3	9,5	60		12,45	\$ 16.312	
							15x30	11,37	\$ 15.951
				11,1		10x20	12,78	\$ 17.112	
						15x30	11,66	\$ 16.751	
				9,5		40	10x20	12,54	\$ 18.523
							15x30	11,52	\$ 18.111
			11,1	10x20	12,88		\$ 19.323		
				15x30	11,81		\$ 18.911		
			2x4	9,5	60		10x20	12,84	\$ 18.584
							15x30	11,69	\$ 18.223
				11,1		10x20	13,18	\$ 19.384	
						15x30	11,99	\$ 19.023	
				9,5		40	10x20	13,02	\$ 21.363
							15x30	11,95	\$ 20.951
			11,1	10x20	13,36		\$ 22.163		
				15x30	12,26		\$ 21.751		

De la tabla 10 se puede determinar que al cambiar el sistema de anclaje de fierro estriado a escuadra Simpson A66 el costo del muro de corte de madera aumenta en un promedio de las tipologías en un 81% pero este cambio produce un aumento promedio en la rigidez del 100%. Este análisis se realiza para todas las tipologías cambiando una variable donde los resultados se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Porcentaje de aumento de costo según cambio de variable.

Cambio	% aumento promedio rigidez	% aumento promedio costo
Sistema de anclaje de Fierro estriado a escuadra Simpson A66	100,0	81,0
Espaciamiento de clavado conexión OSB-Madera 15x30 a 10x20 con anclaje Simpson A66	12,0	1,1
Espaciamiento de clavado conexión OSB-Madera 15x30 a 10x20 con anclaje Fierro estriado	9,0	2,1
Espesor placa OSB de 9,5mm a 11,1mm con anclaje Simpson A66	4,2	1,2
Espesor placa OSB de 9,5mm a 11,1mm con anclaje Fierro estriado	2,6	2,1
Escuadría madera de 2x3" a 2x4" con anclaje Simpson A66	2,9	7,8
Escuadría madera de 2x3" a 2x4" con anclaje Fierro estriado	3,4	14,5
Espaciamiento pie derecho de 60cm a 40cm con anclaje Simpson A66	1,0	7,5
Espaciamiento pie derecho de 60cm a 40cm con anclaje Fierro estriado	1,4	13,9

De la tabla 11 se puede concluir, que la mayor influencia para aumentar la rigidez a menor costo es el espaciamiento de clavado en la conexión Recubrimiento-Madera, en cambio se observa que el mayor porcentaje de aumento de costo, en relación al aumento de rigidez, se encuentra en los cambios realizados con la madera aserrada, tanto como el cambio de escuadría como el espaciamiento de los pie derechos.

7. CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS.

De la influencia ejercida en la capacidad de los muros de corte de madera por las distintas variables se determinó que la más influyente frente a cargas laterales monotónicas es el sistema de anclaje donde cambiar de un sistema con fierro estriado a una escuadra Simpson A66 dobla la rigidez que presentan estos muros, del mismo modo la segunda variable que toma importancia en la capacidad de estos muros es la distribución de clavado del revestimiento en la madera donde cambiar el clavado perimetral y central de 15 cm y 30 cm a 10 cm y 20 cm produce un aumento en la rigidez inicial en un promedio del 11%, en cambio las placas de OSB, escuadría de madera y separación de los pie derechos producen un aumento en la rigidez inicial menor al 5% siendo esto irrelevante frente a cargas laterales monotónicas.

Las características de conexión Revestimiento-Madera puede afectar fuertemente a las predicciones del modelo de muros de corte, ya que esta es la segunda variable más influyente frente a cargas laterales monotónicas, por lo tanto las propiedades a ingresar a esta conexión pasa a ser fundamental, es por ello que surge la necesidad de realizar una investigación con resultados de curvas carga-deformación fidedignos, ya que para este estudio los datos se obtuvieron de forma visual de los trabajos experimentales realizado por Radamacher F, Vilches y Leiva.

Los métodos utilizados para determinar la rigidez inicial de los muros de corte ensayados por el CITEC UBB se observó que solo el método controlado por el desplazamiento es capaz de reflejar adecuadamente, en todas las tipologías, el aumento de rigidez a medida que se generan mejoras estructurales, tales como el cambio de anclaje, espesor placa OSB entre otros. En cambio, el método controlado por 1/3 de la carga máxima no es capaz de reflejar el aumento de rigidez al mejorar la escuadría de la madera y así pasar de la tipología mcpG2-2x3-9.5-10x20-60 con escuadría de 2x3" a la tipología mcpG2-2x4-9.5-10x20-60 con escuadría de 2x4", donde la tipología de menor escuadría (2x3") tiene una rigidez inicial un 23% mayor en comparación a la rigidez de la tipología con mejor escuadría (2x4").

Para el comportamiento general de los muros de corte ensayados, las predicciones del modelo numérico generados en Sap2000 están en muy buen acuerdo con los resultados obtenidos en los

ensayos, donde se observó una diferencia en la predicción de la rigidez inicial promedio menor al 4%, donde la mayor diferencia obtenida fue del 14%.

7.1.Comentarios:

De la modelación de los muros de corte de madera se determinó que la conexión pie derecho solera modelada de forma rotulada genera una indiferencia rotunda respecto al grado estructural de la madera utilizada ya que no se observa cambio alguno en la rigidez inicial de los muros de corte modelados.

7.2.Recomendación:

En el desarrollo de esta investigación se pudo determinar que para generar los modelos numéricos es necesario tener los resultados de las curvas carga-deformación de las distintas conexiones para poder realizar un análisis en el rango no lineal, por lo tanto se deja plantado para realizar futuras investigaciones en el rango no lineal realizando los ensayos de las conexiones necesarias.

Con el fin ampliar esta investigación se recomienda generar nuevas geometrías de muros de corte tales como muros L y T, además de generar modelos con sistema de anclaje diseñados para ello con escuadras más elaboradas.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Campos F. (2009). Modelación numérica de muros de corte de madera sometida carga lateral cíclica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío Bío.
- [2] Chun Ni, Lina Zhou, Minjuan He, Asociación Engineered Wood Products, Finite Element Analysis of the Racking Performance of Tall Unblocked Shear Walls. http://www.ewpa.com/Archive/2008/june/Paper_233.pdf. Acceso 5 Agosto de 2013.
- [3] Conte A., Piazza M., Sartori T., Tomasi R. (2011). Influence of sheathing to framing connections on mechanical properties of wood framed shear walls. Presentado en el XIV congreso ANIDIS de Ingeniería Sísmica, Bari, Italia, Septiembre.
- [4] Instituto Nacional de Normalización. Arquitectura y construcción – Paneles prefabricados – Ensayo de carga horizontal. Norma NCh 802.E Of.71, 1971.
- [5] Instituto Nacional de Normalización. Madera – Construcción en madera – Cálculo. Norma NCh 1198 Of.06, 2006.
- [6] Kenneth G. (2010). Evaluation of system effects and structural load paths in a wood-framed structure. Memoria para optar al grado de Master de Ciencia en Ingeniería Civil y Ciencias de la Madera, Universidad Estatal de Oregón.
- [7] Leiva J., Vilches P. (1996). Comportamiento de muros de corte de madera rigidizados mediante tablero de contrachapado bajo la acción de carga horizontal estática y cíclica combinada con carga vertical m su propio plano. Memoria para optar al título de Doctor en Ciencias, Universidad de Santiago de Chile. (Original no consultado, citado por Campos F. Modelación numérica de muros de corte de madera sometida carga lateral cíclica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío Bío).
- [8] LP Buildin Products, Propiedades físicas de tableros LP OSB propiedades mecánicas tablero LP OSB. <http://lpchile.cl/descargas/tecnicos/propiedades-osb-2009.pdf>. Acceso el 15 Julio de 2013.
- [9] Mi H. (2004). Behavior of unblocked wood shearwalls. A Thesis, Dissertation or Report Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science, Forest Engineering, the University of New Brunswick
- [10] Rademacher F. (2006). Análisis de vulnerabilidad estructural de muros en base a paneles de madera, reforzados con placa OSB, frente a cargas horizontales en su plano. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile.

- [11] Sap2000, versión 14: Analysis reference manual. Computer and Estructures, Inc., 2009.

- [12] Sartori T. (2012). comportamento strutturale di sistemi costruttivi in legno realizzati con pareti portanti intelaiate. Estuctural behavior or timber framed buildings. Dottorato di Ricerca in Ingegneria del Sistemi Estrutturali Civili en Ceccanici XXV ciclo, Universita' Degli Di fTrento.

- [13] SIMPSON Strong-Tie (2011-2012). Conectores metálicos estructurales 2011-2012 C-Espanol11.

- [14] Standard Method of Static Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings, ASTM E564 – 95 2012, Annual Book of ASTM Standards. EEUU.

- [15] Vásquez L., Hernández G., Campos R. y González M. (2012). Caracterización mecánica de muros estructurales de madera. Unidad de tecnología e industria de la madera, informe técnico N°191, Instituto forestal.

9. ANEXOS

ÍNDICE GENERAL ANEXOS

Anexo A 40
 Anexo B 45
 Anexo C 55
 Anexo D 61
 Anexo E 68

ÍNDICE DE TABLAS ANEXOS

Tabla A1. Propiedad sistema de anclaje..... 41

 Tabla B1. Resumen resultados conexión Revestimiento-Madera paralelo a la fibra. 47
 Tabla B2. Resultados carga deformación curva promedio ensayos paralelo a la fibra
 de la madera..... 50
 Tabla B3. Resumen resultados conexión Revestimiento-Madera perpendicular a la fibra..... 51
 Tabla B4. Resultados carga deformación curva promedio ensayos paralelo a la fibra
 de la madera..... 54
 Tabla B5. Propiedad clavo de unión Revestimiento-Madera. 54

 Tabla C1. Propiedad clavo de unión Madera-Madera..... 60

 Tabla D 1. Rigidez inicial controlada por desplazamiento 1/250 de la altura. 62
 Tabla D 2. Rigidez inicial controlada 1/3 carga máxima. 62

 Tabla E 1. Rigidez inicial agrupada según variables influyentes. 69

ÍNDICE DE FIGURAS ANEXOS

Figura A 1. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior
 tipología mceG2-2x3-9.5-10x20-60. 42

Figura A 2. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior
 tipología mcpG2-2x3-9.5-10x20-60..... 42

Figura A3. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior
 tipología mcpG2-2x4-9.5-10x20-60..... 43

Figura A 4 Curva carga deformación, levantamiento solera inferior
 tipología mcpG2-2x3-11.1-10x20-60..... 43

Figura A5. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior
 tipología mcpG2-2x3-11.1-10x20-60..... 44

Figura B1. Probeta tradicional de ensayo unión Revestimiento-Madera paralelo a la fibra. 46

Figura B2. Curvas carga-deformación por probetas, unión paralela a la fibra de la madera. 49

Figura B3. Grafico resumen carga-deformación ensayos conexión Revestimiento-Madera
 paralelo a la fibra. 50

Figura B4. Probeta tradicional de ensayo unión Revestimiento-Madera perpendicular a la fibra. 51

Figura B5. Curvas carga-deformación por probetas, unión perpendicular
 a la fibra de la madera..... 53

Figura B6. Grafico resumen carga-deformación ensayos conexión Revestimiento-Madera
 perpendicular a la fibra. 53

Figura C 1. Curva carga-deformación rigidez inicial K tipología mceG2-2x3-9.5-10x20-60. 57

Figura C 2. Curva carga-deformación rigidez inicial G' tipología mceG2-2x3-9.5-10x20-60..... 57

Figura C 3. Deformación escuadra Simpson A66. 58

Figura C 4. Modelo escuadra Simpson A66..... 58

Figura C5. Escuadra Simpson A66..... 60

Figura D1 . Resultado rigidez inicial K ensayos, tipologías mceG2-2x3-9.5-10x20-60..... 63

Figura D2. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mceG2-2x3-9.5-10x20-60. 63

Figura D3. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x3-9.5-10x20-60. 64

Figura D 4. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x3-9.5-10x20-60.	64
Figura D 5. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x4-9.5-10x20-60.	65
Figura D6. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x4-9.5-10x20-60.	65
Figura D7. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x3-11.1-10x20-60.	66
Figura D 8. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x3-11.1-10x20-60.	66
Figura D 9. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x4-11.1-10x20-60.	67
Figura D 10. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x4-11.1-10x20-60.	67
Figura E 1. Resultado rigidez inicial categoría C1.	70
Figura E 2. Resultado rigidez inicial categoría C2.	70

Anexo A
Anclaje

Anclaje.

La rigidez de los anclajes modelados a través de elementos de one-joint link se determinan de forma iterativa, donde se calibran la rigidez compara el desplazamiento vertical U1 (figura 1a) obtenido en los ensayos de los muros de corte, el cual representa el levantamiento de la solera inferior, con el desplazamiento vertical de los modelos para las tipologías correspondientes, la rigidez para cada tipo de anclaje se resume en la tabla A1.

La comparación del levantamiento de la solera inferior de los ensayos con los modelos correspondiente se observan en las figurasA1 hasta la figura A5.

Tabla A1. Propiedad sistema de anclaje.

Elemento	Tipo	Elemento Finito	Propiedad Material
Sistema de anclaje	Escuadra A66 Simpson Strong-Tie pernos zincados, grado 2, de 3/8"	one-joint link	U1 = 900 kg/mm
	Fierro estriado 8 mm		U1 = 120 kg/mm

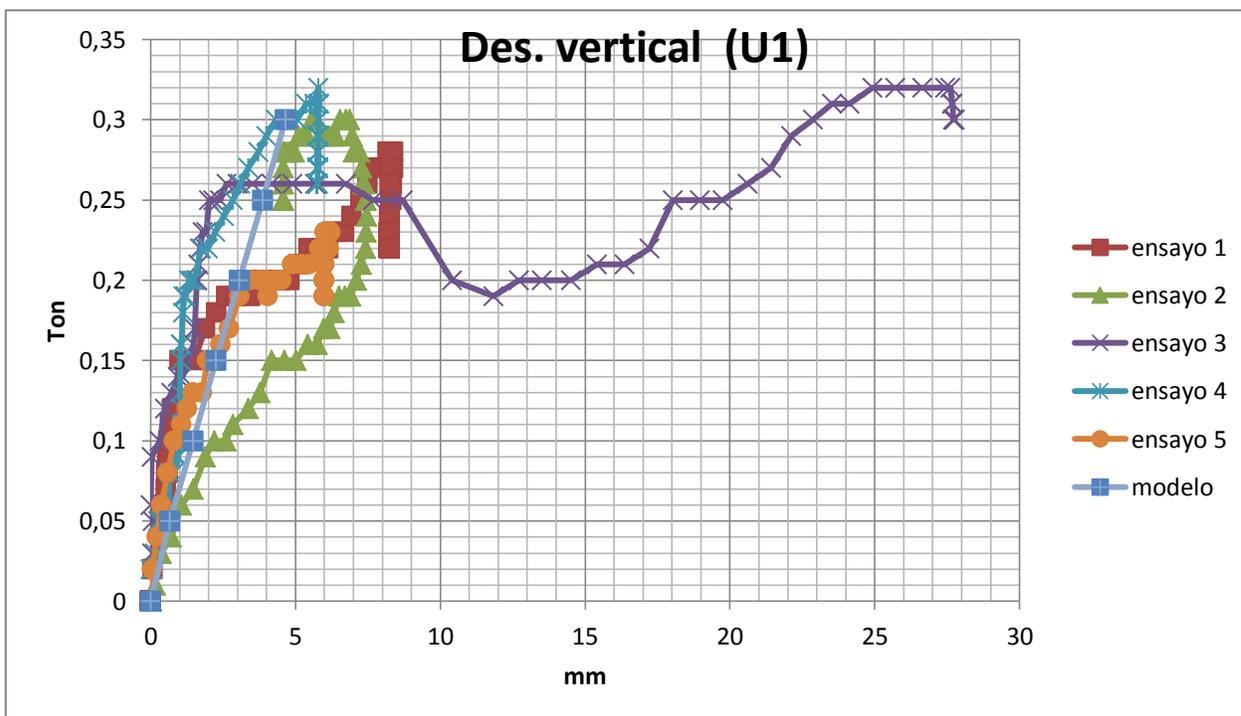


Figura A 1. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior tipología mceG2-2x3-9.5-10x20-60.

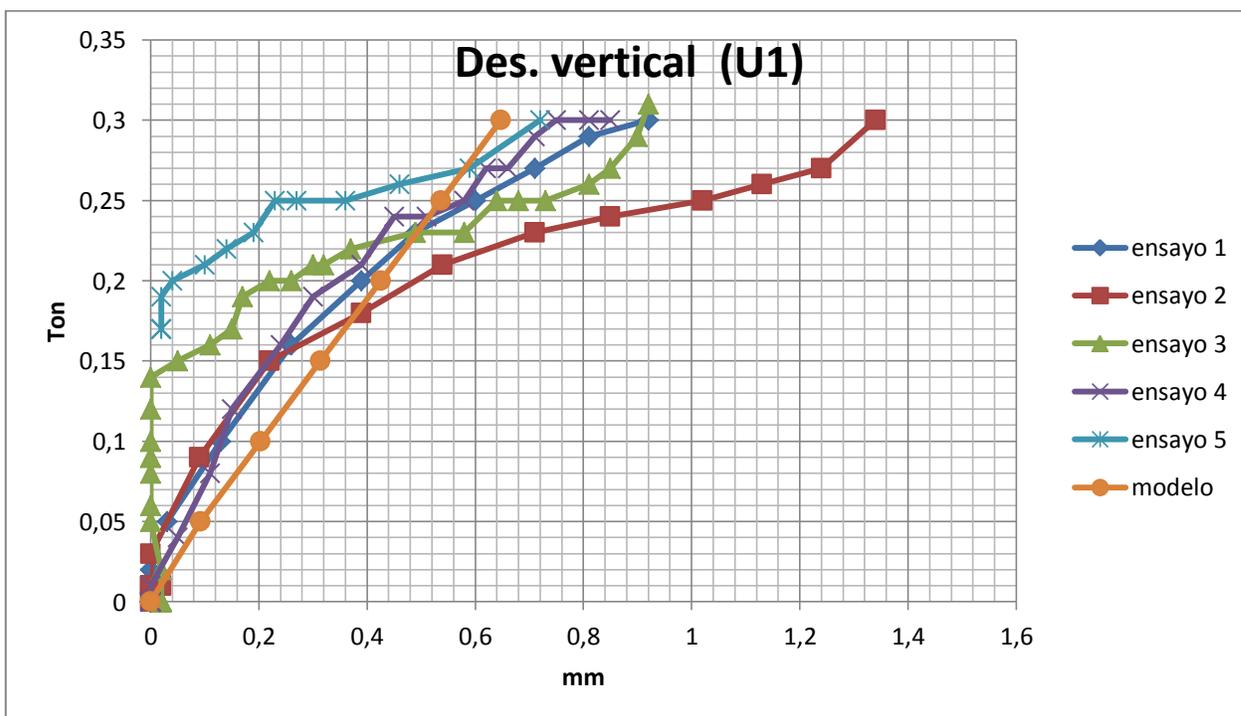


Figura A 2. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior tipología mcpG2-2x3-9.5-10x20-60.

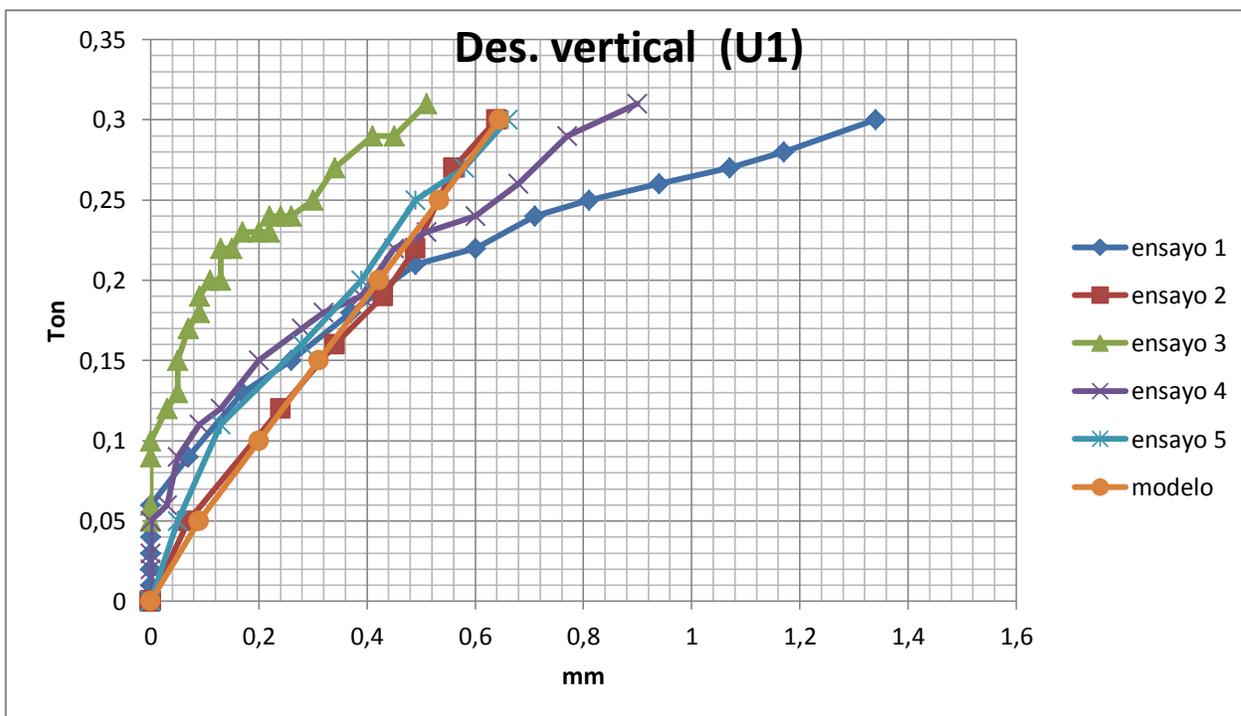


Figura A3. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior tipología mcpG2-2x4-9.5-10x20-60.

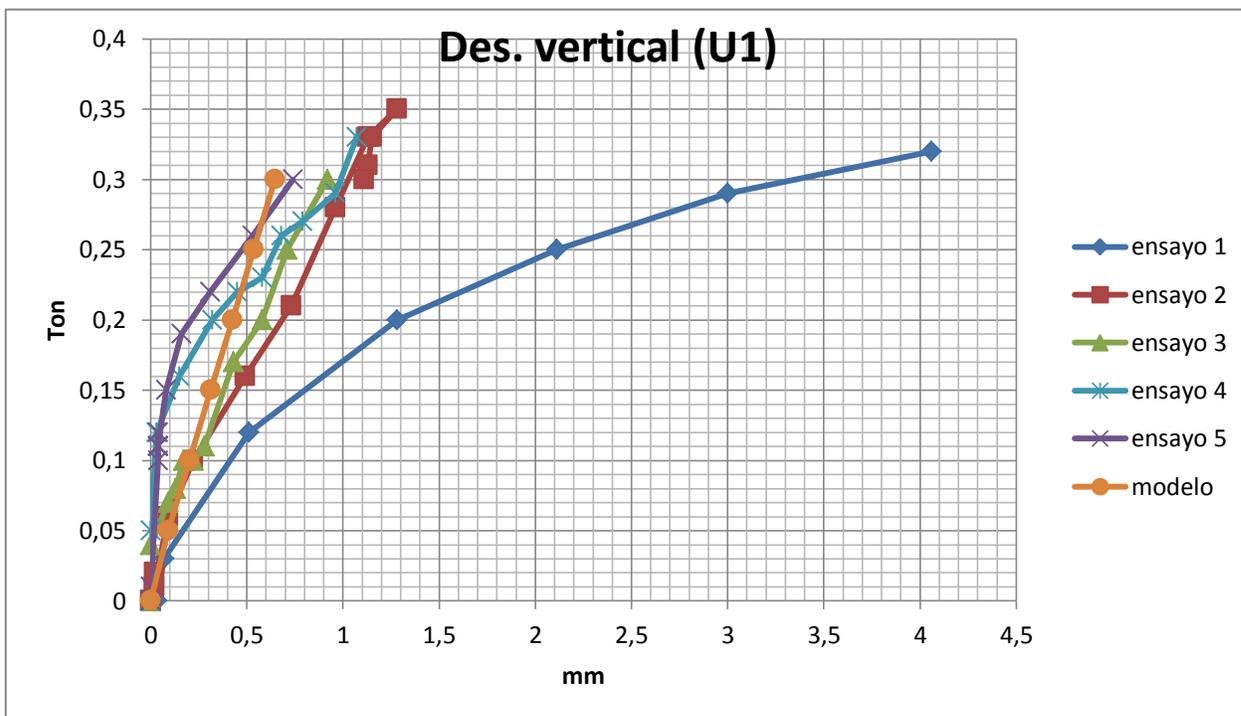


Figura A 4 Curva carga deformación, levantamiento solera inferior tipología mcpG2-2x3-11.1-10x20-60.

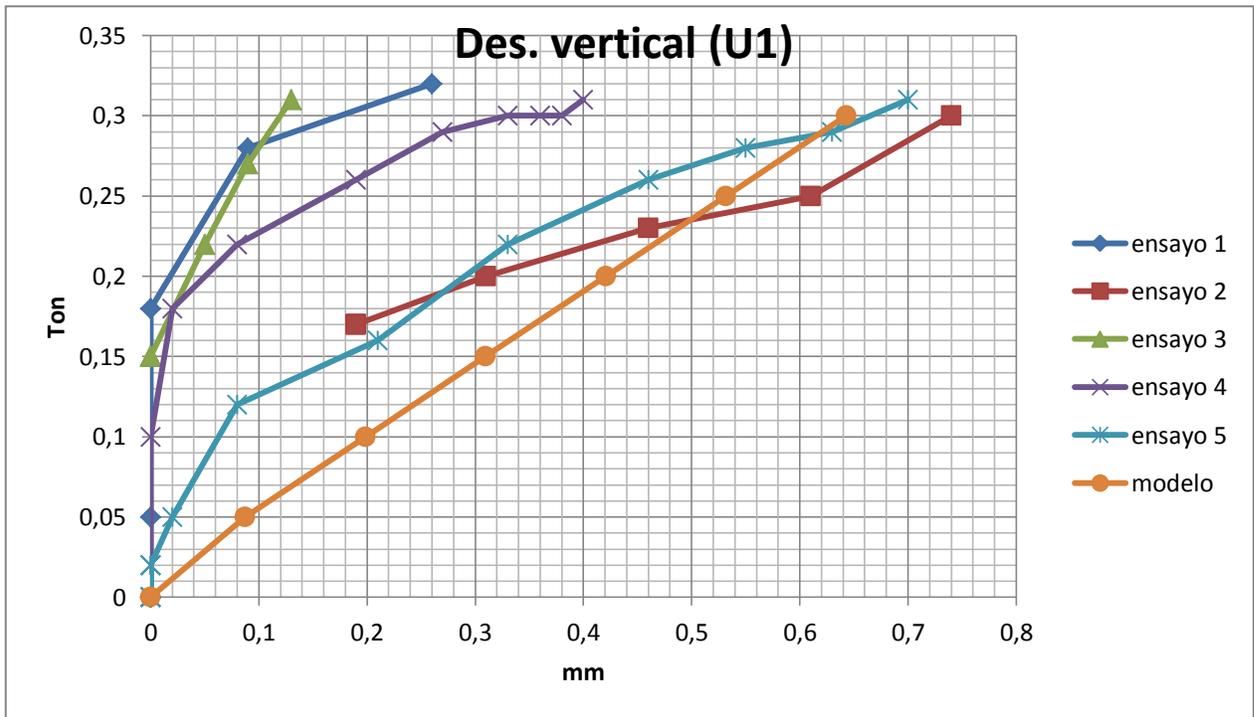


Figura A5. Curva carga deformación, levantamiento solera inferior tipología mcpG2-2x3-11.1-10x20-60.

Anexo B
Conexión Recubrimiento-Madera

Conexión Recubrimiento-Madera

Las propiedades de la rigidez de los clavos para la unión OSB-Madera se determinaron a través de las curvas carga-deformación de los ensayos de unión de placas de OSB con madera realizados por los siguientes autores:

Radmacher F.

En la Universidad Austral de Chile, Radmacher ensaya un total de 10 probetas de unión Revestimiento-Madera paralelo a la fibra de madera la cual representa la unión de pie derecho con la placa de recubrimiento, el ensayo consiste en la aplicación de una carga en la dirección de la pieza que representa a la madera. La probeta se confecciona con una pieza de 41 x 90mm de escuadría y de 230mm de longitud, revestida por ambos lados con OSB de 9,5 mm de espesor y de dimensiones 70x230mm unidos por 4 clavos corrientes de 50 x 2,8mm como se aprecia en la figura B1.

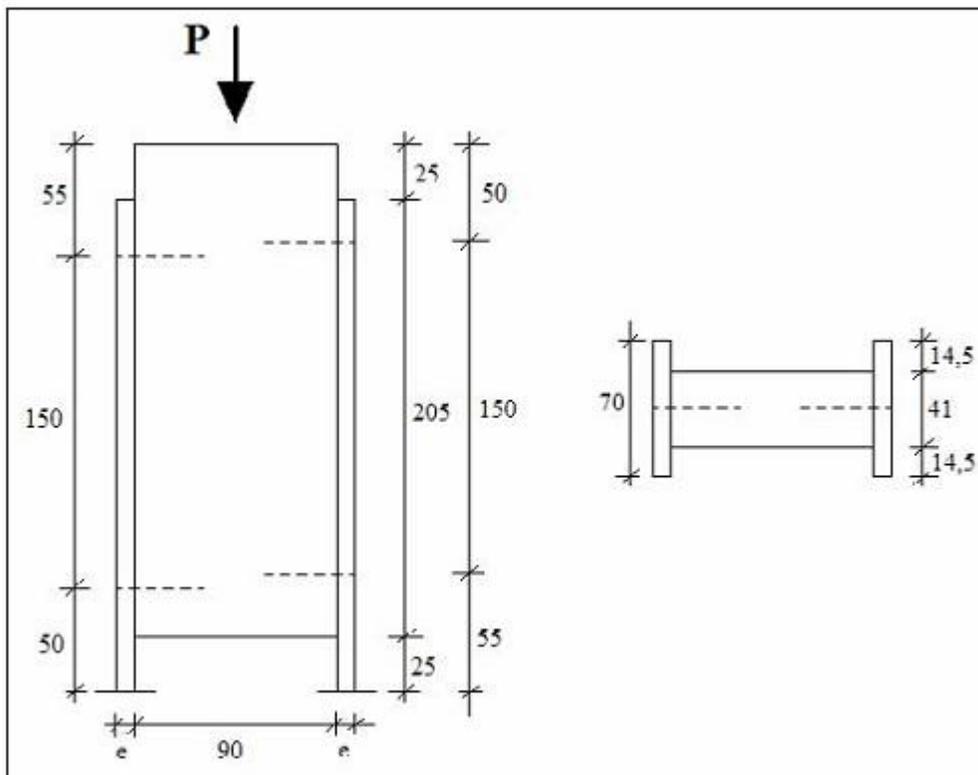


Figura B1. Probeta tradicional de ensayo unión Revestimiento-Madera paralelo a la fibra.

La información más relevante con respecto a cada una de las curvas carga-deformación se detalla en la Tabla B1. Además, en esta tabla se ha incluido el nivel de carga último por clavo, el cual se obtiene dividiendo la carga última por el número de clavos utilizados en la unión (4 unidades), y la carga alcanzada en el límite 1 mm, valor que se desprende de los gráficos carga deformación de la figura B2, donde los valores del eje Y corresponden a la carga en (Kgf) por clavo de cada probeta que es igual a la carga total dividida en 4. Los valores del eje X corresponden a la deformación de la probeta en cm (Radmacher, 2006).

Tabla B1. Resumen resultados conexión Revestimiento-Madera paralelo a la fibra.

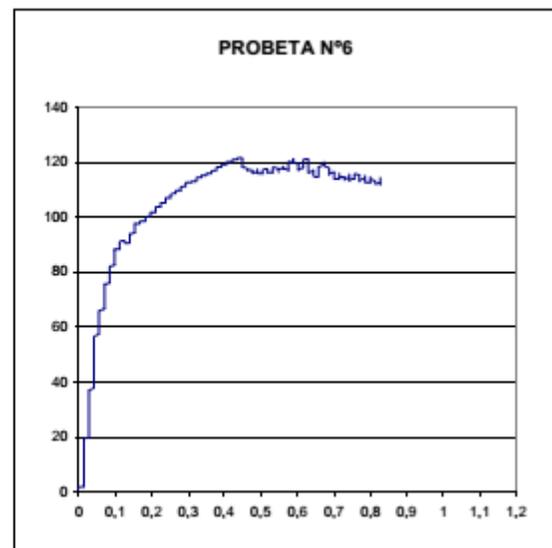
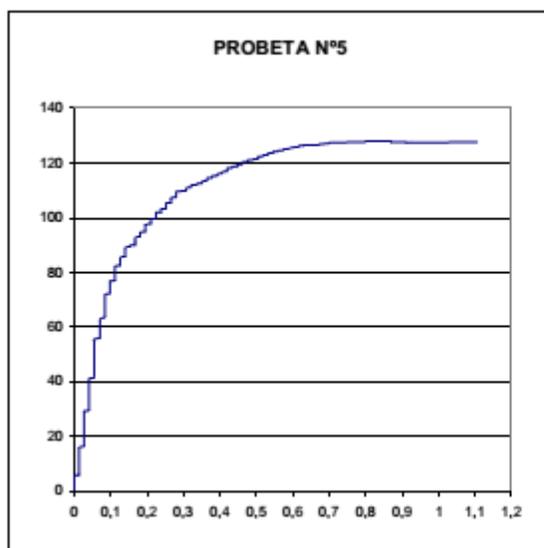
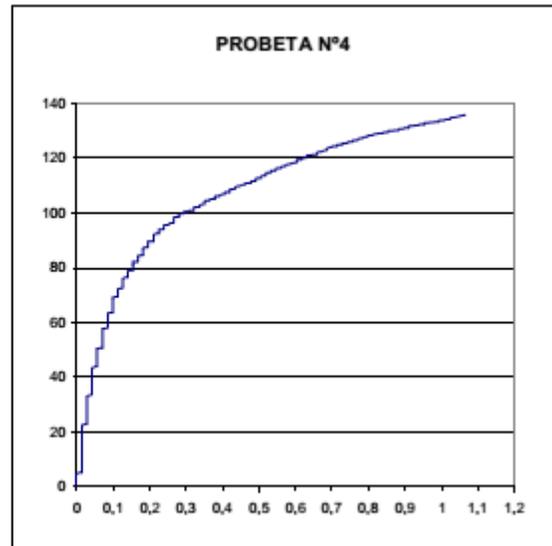
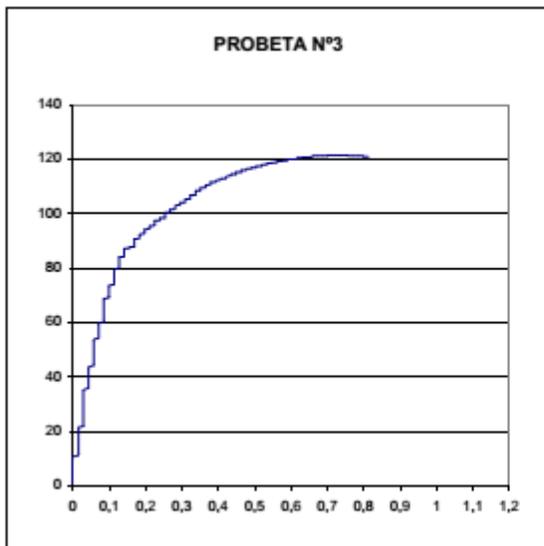
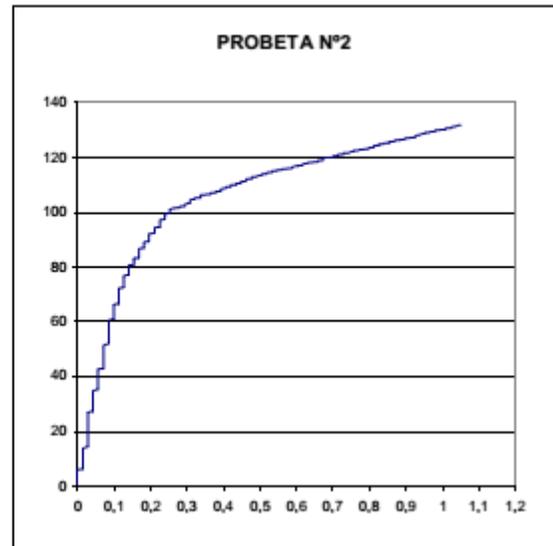
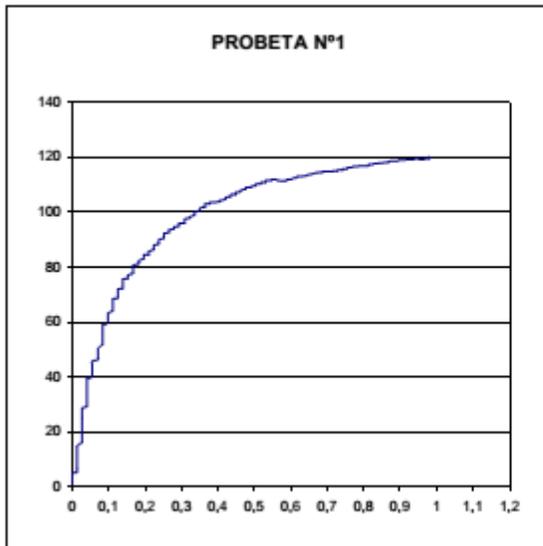
PROBETA N°	Pu (kg)	Du(mm)	Pu por clavo (kg)	P _{1mm} por clavo (kg)
1	482	10,00	120,50	64,00
2	521	10,00	130,25	66,50
3	484	8,12	121,00	73,50
4	536	10,00	134,00	69,50
5	510	10,00	127,50	81,25
6	447	8,26	111,75	88,50
7	451	10,00	112,75	51,75
8	554	10,00	138,50	80,75
9	515	10,00	128,75	70,50
10	511	10,00	127,75	66,50
Promedio	501,10		125,28	71,275
Desv. Estand.	34,76		8,69	10,41
Coef. Variac.	0,07		0,07	0,15

Pu: Carga última. Es el menor valor entre la carga ultima alcanzada por la probeta o la alcanzada para una deformación de 10mm.

Du: Deformación correspondiente a la carga última.

Pu por clavo: Carga última por clavo.

P_{1mm}: Carga correspondiente a una deformación de 1mm.



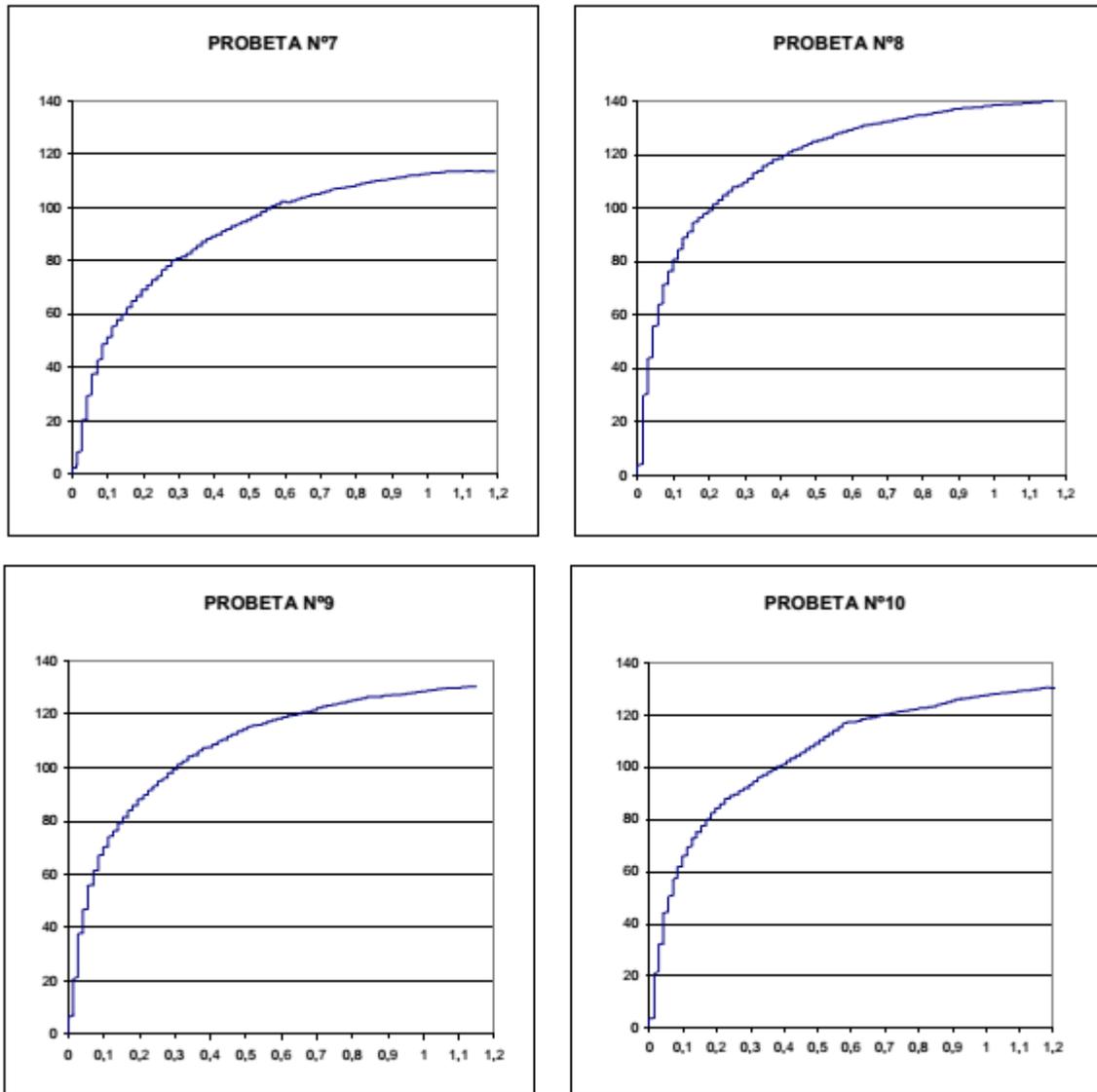


Figura B2. Curvas carga-deformación por probetas, unión paralela a la fibra de la madera.

Debido a la falta de información digital los resultados de los distintos gráficos se extraen de forma visual, para posteriormente tabularlo y graficarlos. Una vez graficados todos los ensayos en un solo, como se ve en la figura B3, se procede a sacar un promedio de estos en la que se observa que la curva tiende a formar dos rectas características, por lo tanto la rigidez inicial se determina utilizando la primera recta la que se encuentra dentro del rango lineal, en la tabla B2 se muestran los resultados carga deformación y la rigidez de la curva promedio de los ensayos.

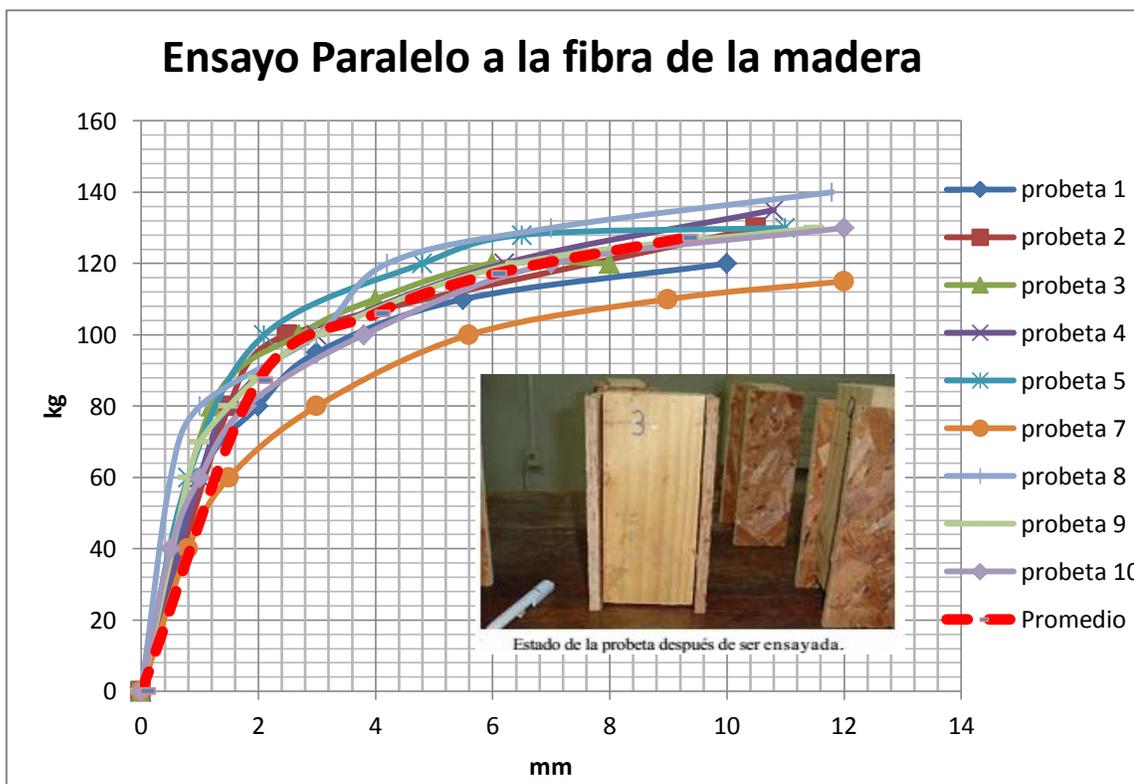


Figura B3. Grafico resumen carga-deformación ensayos conexión Revestimiento-Madera paralelo a la fibra.

Tabla B2. Resultados carga deformación curva promedio ensayos paralelo a la fibra de la madera.

Desplazamiento(mm)	Carga por clavo (kgf)	K(kgf/mm)
0	0	0
2	87,18	44
4	105,90	26
6	117,03	20
9,26	127,14	14

Leiva J. y Vilches P.

En la Universidad de Santiago de Chile, Leiva J. y Vilches P ensayan un total de 10 probetas de unión Revestimiento-Madera perpendicular a la fibra de madera la cual representa la unión de la solera con la placa de recubrimiento. La probeta se confecciona con una pieza de 35 x 90 mm de escuadría y de 300 mm de longitud, revestida por ambos lados con contrachapado de pino radiata

de 10 mm de espesor y de dimensiones 300 x 140 mm unidos por 4 clavos helicoidales de 50x2.8 mm, como se aprecia en la figura B4

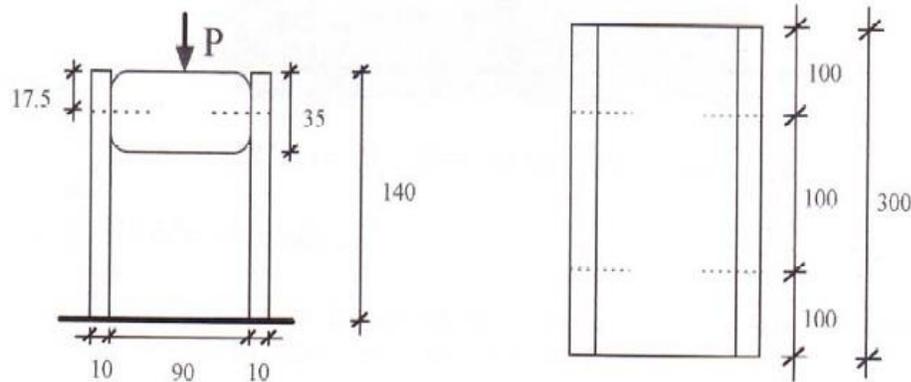
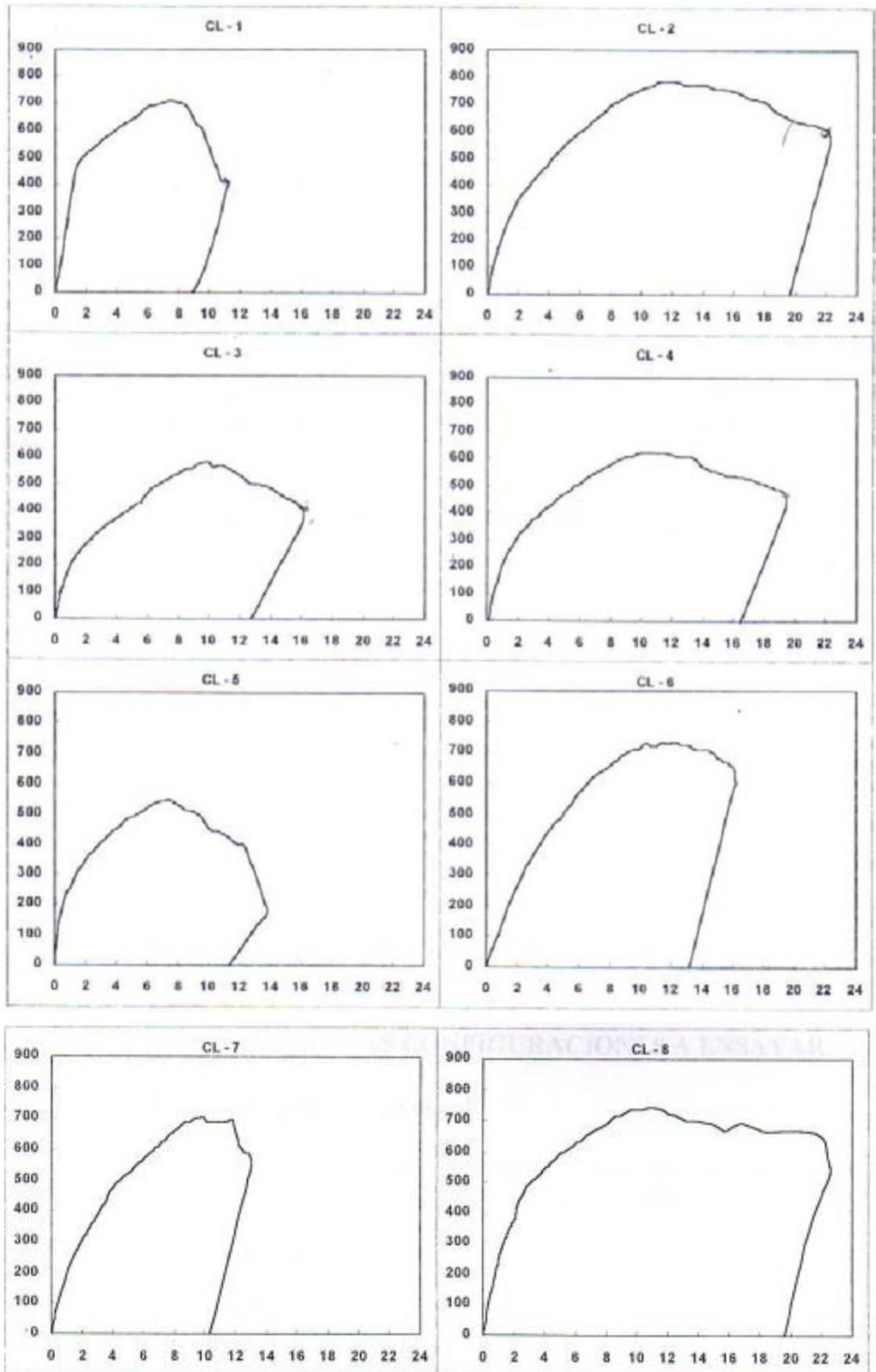


Figura B4. Probeta tradicional de ensayo unión Revestimiento-Madera perpendicular a la fibra.

La información más relevante con respecto a cada una de las curvas carga-deformación de los ensayos se detalla en la tabla B3, valor que se desprenden de los gráficos carga deformación de la figura B5, donde los valores del eje Y corresponden a la carga en (Kgf) por los clavos totales de cada probeta. Los valores del eje X corresponde a la deformación de la probeta en mm (Leiva J., Vilches P., 1996).

Tabla B3. Resumen resultados conexión Revestimiento-Madera perpendicular a la fibra.

PROBETA N°	Pu (kg)	Du(mm)	Pu por clavo (kg)
1	704,34	7,92	176,09
2	782,96	12,23	195,74
3	583,12	10,01	145,78
4	625,71	11,62	156,43
5	547,09	7,50	136,77
6	730,54	12,40	182,64
7	704,35	9,92	176,09
8	743,65	10,96	185,91
9	743,65	11,08	185,91
10	766,58	12,10	191,65
Promedio	693,20	10,57	173,30
Desv. Estand.	80,41		20,10
Coef. Variac.	0,12		0,12



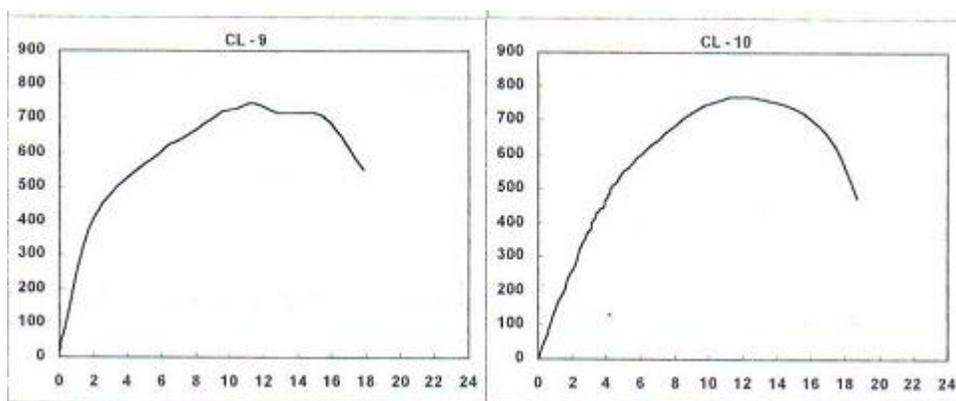


Figura B5. Curvas carga-deformación por probetas, unión perpendicular a la fibra de la madera.

Debido a la falta de información digital los resultados de los distintos gráficos se extraen de forma visual, para posteriormente tabularlo y graficarlos. Una vez graficados todos los ensayos en un solo, como se ve en la figura B6, se procede a sacar un promedio de estos en la que se observa que la curva tiende a formar dos rectas características, por lo tanto la rigidez inicial se determina utilizando la primera recta la que se encuentra dentro del rango lineal, en la tabla B4 se muestran los resultados carga deformación y la rigidez de la curva promedio de los ensayos.

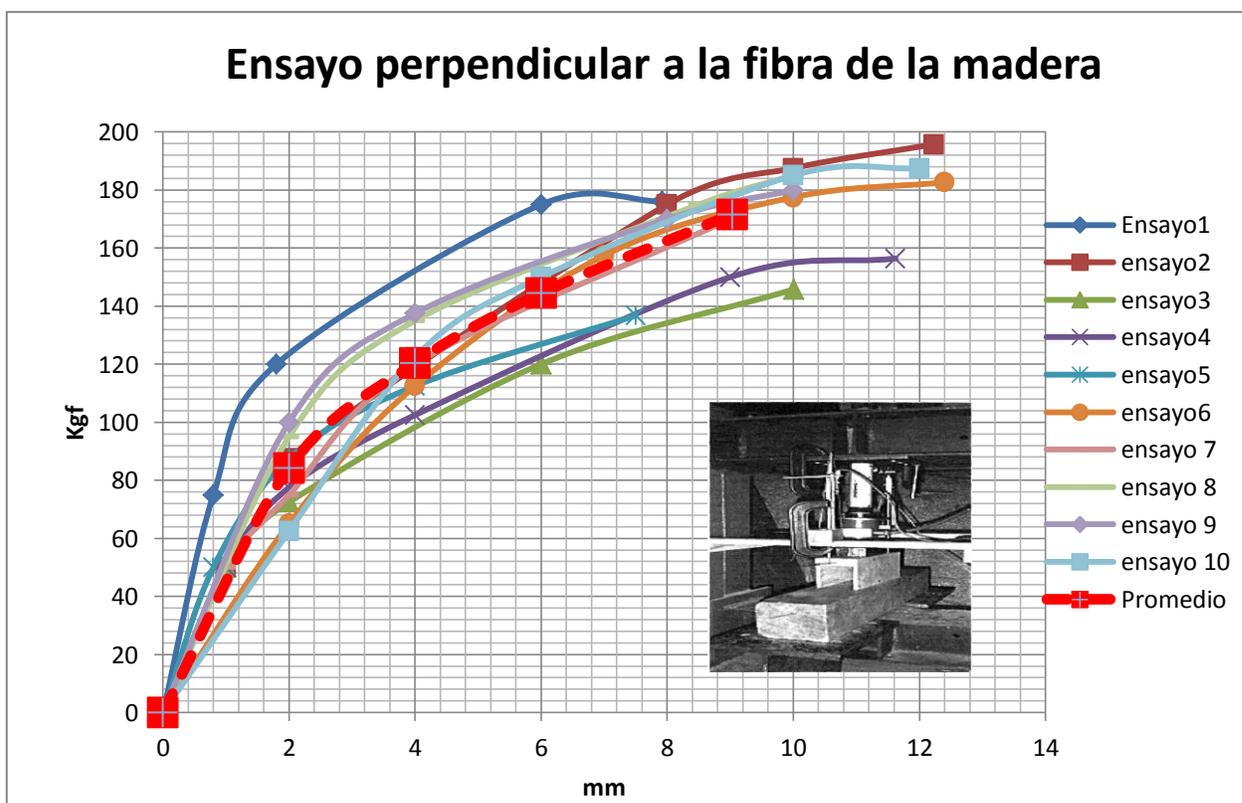


Figura B6. Grafico resumen carga-deformación ensayos conexión Revestimiento-Madera perpendicular a la fibra.

Tabla B4. Resultados carga deformación curva promedio ensayos paralelo a la fibra de la madera.

Desplazamiento (mm)	Carga por clavo (kgf)	K(kgf/mm)
0	0	0
2	84,25	42
4	120,42	30
6	144,44	24
9,03	171,59	19

Aunque el ensayo de unión Revestimiento-Madera perpendicular a la fibra no es realizado con placa de OSB el resultado de la rigidez inicial de 42 (kgf/mm) se aproxima al resultado del ensayo realizado con la unión Revestimiento-Madera paralelo a la fibra de 44 (kgf/mm), por lo tanto, como la diferencia es despreciable se asume tomar como la rigidez inicial, para los dos casos, igual al mayor de estos.

En la tabla B5 se resumen las propiedades de los resortes

Tabla B5. Propiedad clavo de unión Revestimiento-Madera.

Elemento	Tipo unión	Elemento Finito	Propiedad Material
Clavo	Pie derecho-OSB	two-joint link	U2 = 44 kgf/mm U3 = 44 kgf/mm
	Solera-OSB		U2 = 44 kgf/mm U3 = 44 kgf/mm

Anexo C
Conexión madera-madera

Conexión Madera-Madera.

La conexión entre el pie derecho y las soleras superior e inferior se modelan a través de una unión rotulada, ya que es incapaz de transmitir momento, con excepción de la conexión inferior izquierda (lugar de medición del desplazamiento vertical U1, figura 1a) la cual se modela a través de elemento de enlace de two-joint link con propiedad lineal, esta conexión depende del sistema de anclaje utilizado, ya que para el sistema con escuadra Simpson A66 aparte del par de clavos que tienen todas las probetas para unión la solera con el pie derecho, esta refuerza la unión entre el pies derecho con la solera aumentando de esta forma la rigidez de desclave del pie derecho, en cambio para el sistema de anclaje con fierro estriado la única sujeción que tiene el pie derecho con la solera es sola el par de clavos, las propiedades se determinan de las siguientes formas:

Fierro estriado 8 mm

Para determinar la rigidez que tienen los clavos en la unión pie derecho solera, estos se obtienen a través de métodos de calibración, ya que solo la variable que falta por determinar es la rigidez de esta unión, por lo tanto, para determinar esta propiedad se comparan los resultados de la rigidez inicial de los ensayos realizados en el CITECC UBB con la rigidez obtenida a través de los modelos numéricos. El rango para determinar la rigidez de los calvos de unión madera-madera es entre 0(kgf/mm) - 44(kgf/mm), el tope de rigidez 44(kgf/mm) se debe a que el clavo de esta unión, que es una rigidez axial, no puede tener mayor rigidez que los clavos utilizados en la unión OSB-Madera que son rigideces al corte, por lo tanto se llegó a determinar que la rigidez que presenta esta unión es 20(kgf/mm).

Los resultados de la calibración se observan en las figuras C1 para el método de calibración controlado por deformación (K) y en la figura C2 para el método controlado por carga máxima (G').

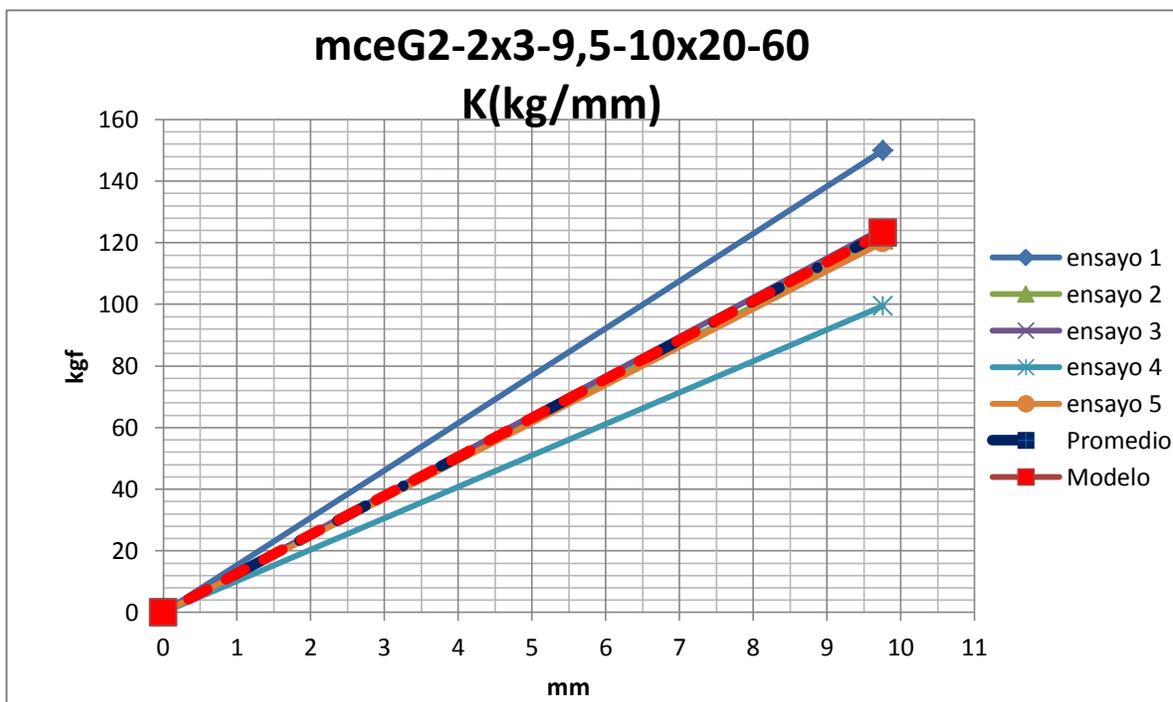


Figura C 1. Curva carga-deformación rigidez inicial K tipología mceG2-2x3-9.5-10x20-60.

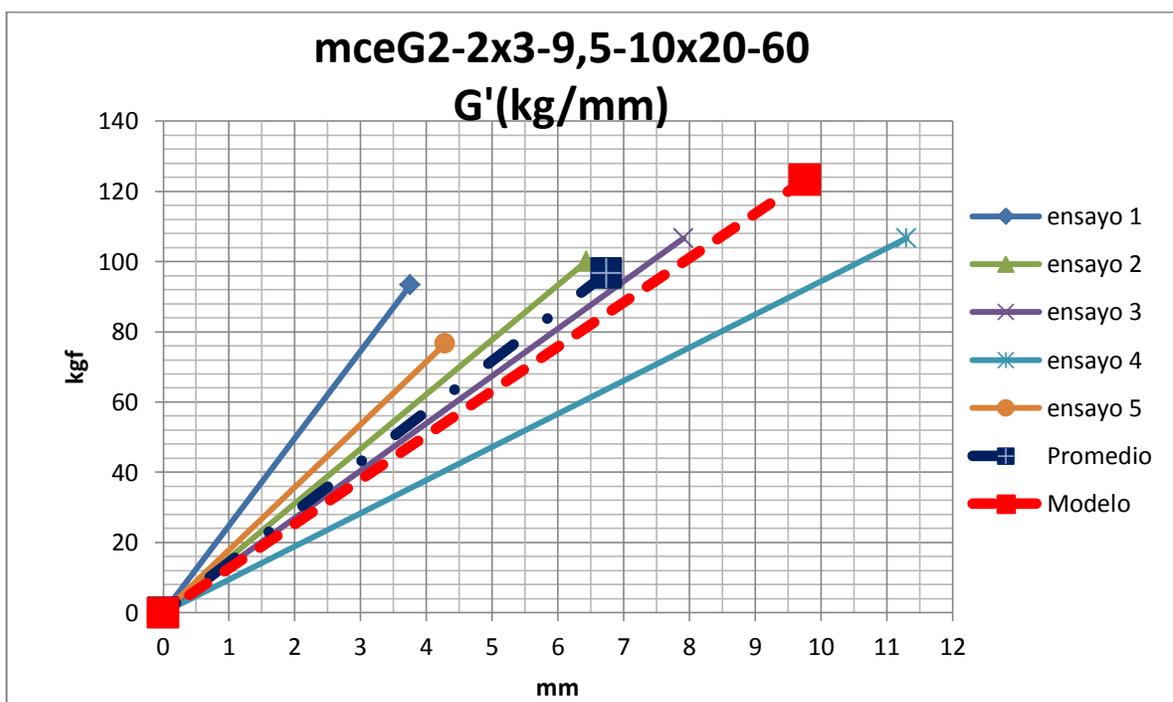


Figura C 2. Curva carga-deformación rigidez inicial G' tipología mceG2-2x3-9.5-10x20-60.

Escuadra Simpson A66

Una vez determinada la rigidez que tiene la unión entre el pie derecho y la solera se procede a determinar la rigidez adicional que aporta la escuadra Simpson A66.

Tal como se muestra en la figura C3 se observa que la escuadra se deforma sin producir un desgarre de los clavos en el pie derecho en los ensayos realizados, por lo tanto, se genera un modelo de una viga envoladizo para determinar la rigidez que esta posee, donde el largo de la viga es la distancia entre el perno de anclaje hasta pie derecho, siendo el perno de anclaje el lugar de empotramiento en el pequeño de modelo de viga envoladizo tal como se muestra en la figura C4



Figura C 3. Deformación escuadra Simpson A66.



Figura C 4. Modelo escuadra Simpson A66.

Las dimensiones necesarias para determinar la deformación del modelo se observan en la C5, por lo tanto la rigidez que presentan la escuadra Simpson A66 se la calcula de la siguiente forma

$$K = \frac{P}{\Delta}$$

Donde la deformación que presenta una viga envoladizo con una carga puntual (P) en el extremo libre está definida como:

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

Donde E es el módulo de elasticidad de la escuadra igual a $2.1e6$ (kg/cm^2), I es la inercia de una sección rectangular se definida como:

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

Reemplazando se tiene:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}3.8 \times 0.3^3 = 0.00855 \text{ cm}^4$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{1 \times 4.5^3}{3 \times 2.1e6 \times 0.00855} = 0.001692 \text{ cm}$$

$$K = \frac{P}{\Delta} = \frac{1}{0.001692} = 591.11 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}} = \mathbf{59.11} \frac{\text{kgf}}{\text{mm}}$$

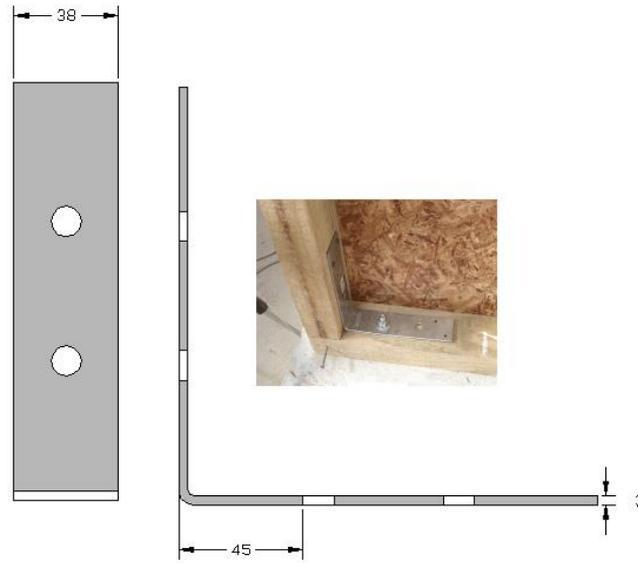


Figura C5. Escuadra Simpson A66.

Determinada la rigidez adicional que incorpora la escuadra a la unión del pie derecho con la solera esta se suma a la rigidez obtenida con el sistema de anclaje de fierro estriado dando un total de 79.11 (kgf/mm) la cual se aproxima a 80 (kgf/mm).

En la tabla C1 se resumen las propiedades de los resortes para la unión Madera-Madera.

Tabla C1. Propiedad clavo de unión Madera-Madera.

Elemento	Tipo	Elemento Finito	Propiedad Material
Clavo	Escuadra A66 Simpson Strong-Tie pernos zincados, grado 2, de 3/8"	two-joint link	U1 = 80 kg/mm
	Fierro estriado 8 mm		U1 = 20 kg/mm

Anexo D
Resultados ensayos

Resultados ensayos

La rigidez inicial que presentan cada ensayo realizados por el CITECC UBB se muestran en la tabla D 1 y D 2 para el método controlado por desplazamiento y carga máxima respectiva, además se muestran las curvas de rigidez inicial carga-deformación para las distintas tipologías de muros de corte de madera ensayados para observar gráficamente su dispersión en los distintos métodos.

Tabla D 1. Rigidez inicial controlada por desplazamiento 1/250 de la altura.

Ensayo	Rigidez inicial K(kgf/mm)				
	mceG2-2x3-9,5-10x20-60	mcpG2-2x3-9,5-10x20-60	mcpG2-2x4-9,5-10x20-60	mcpG2-2x3-11,1-10x20-60	mcpG2-2x4-11,1-10x20-60
ensayo 1	15,37	24,74	26,01	30,58	35,72
ensayo 2	12,43	22,27	23,33	30,88	24,90
ensayo 3	12,78	20,49	31,48	21,61	38,83
ensayo 4	10,20	31,27	24,24	23,31	28,03
ensayo 5	12,31	26,25	24,55	26,76	29,46
Promedio	12,62	25,01	25,92	26,63	31,39
Desv. estándar	1,84	4,15	3,26	4,18	5,73
Coef. de variación	0,15	0,17	0,13	0,16	0,18

Tabla D 2. Rigidez inicial controlada 1/3 carga máxima.

Ensayo	Rigidez inicial G'(kgf/mm)				
	mceG2-2x3-9,5-10x20-60	mcpG2-2x3-9,5-10x20-60	mcpG2-2x4-9,5-10x20-60	mcpG2-2x3-11,1-10x20-60	mcpG2-2x4-11,1-10x20-60
ensayo 1	24,84	29,01	28,55	46,15	50,68
ensayo 2	15,55	35,13	23,32	35,48	28,45
ensayo 3	13,49	28,87	28,12	22,55	129,45
ensayo 4	9,44	47,50	38,01	39,01	37,08
ensayo 5	17,87	40,99	29,86	43,82	37,91
Promedio	16,24	36,30	29,57	37,40	56,71
Desv. estándar	5,72	8,02	5,33	9,28	41,43
Coef. de variación	0,35	0,22	0,18	0,25	0,73

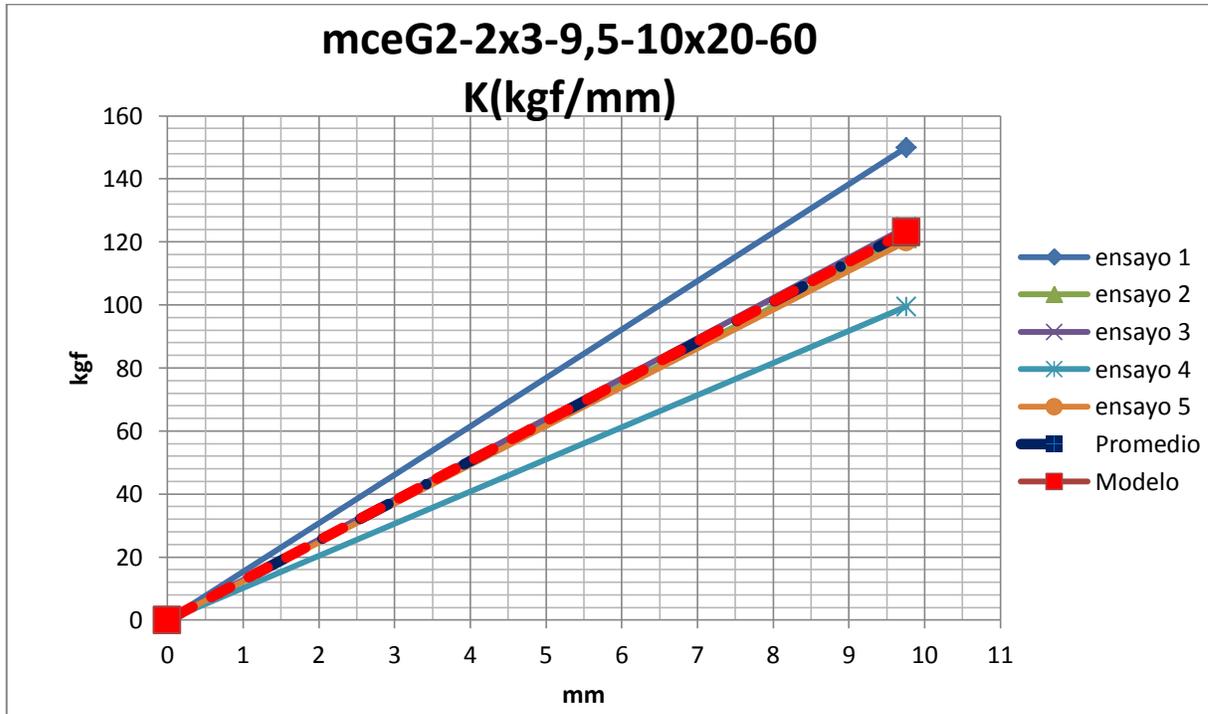


Figura D1 . Resultado rigidez inicial K ensayos, tipologías mceG2-2x3-9.5-10x20-60.

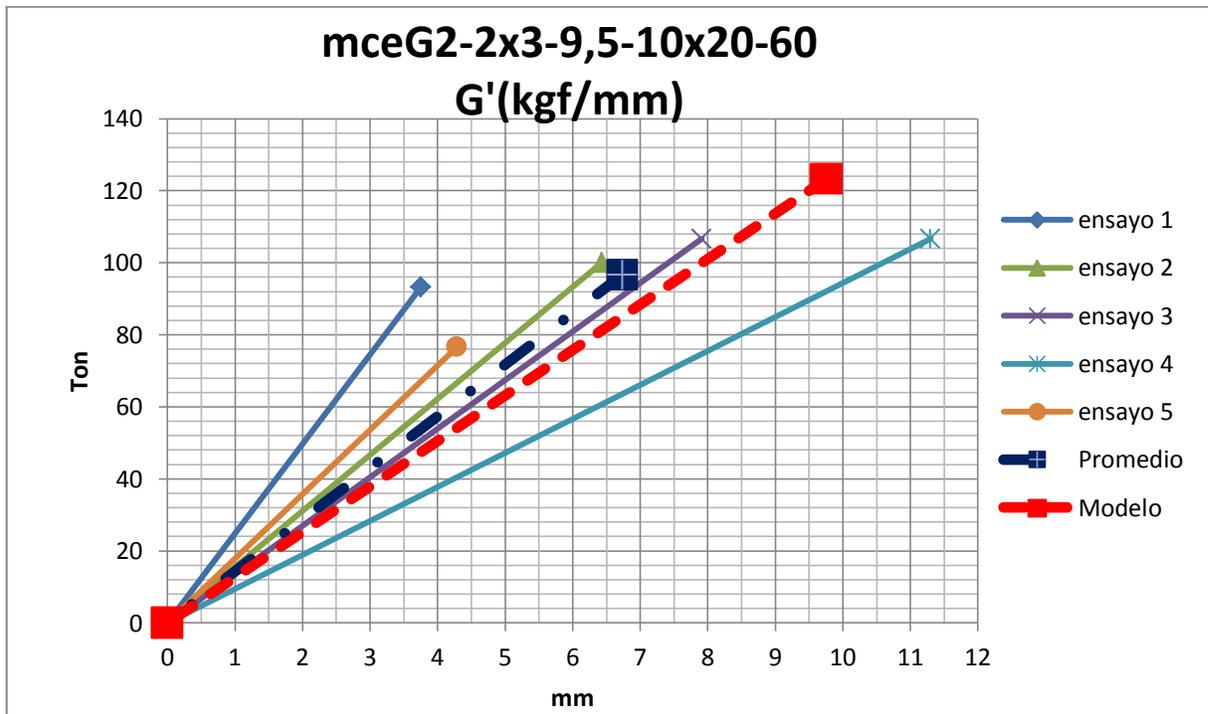


Figura D2. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mceG2-2x3-9.5-10x20-60.

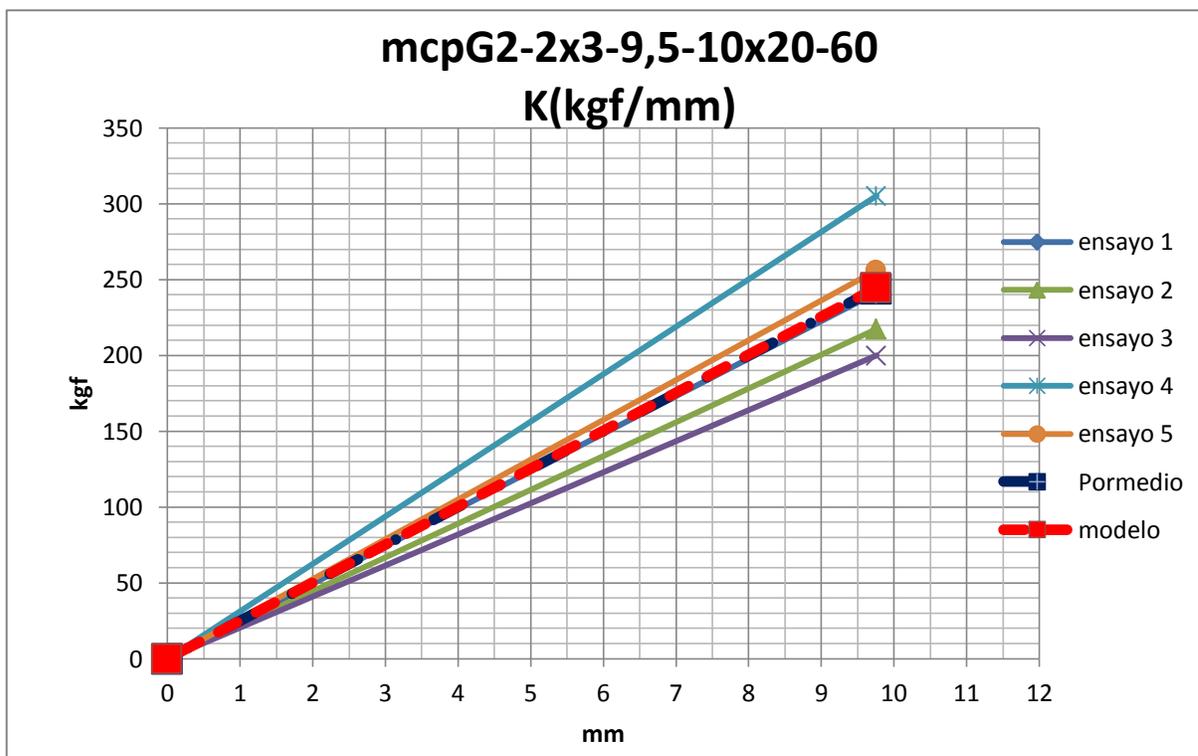


Figura D3. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x3-9.5-10x20-60.

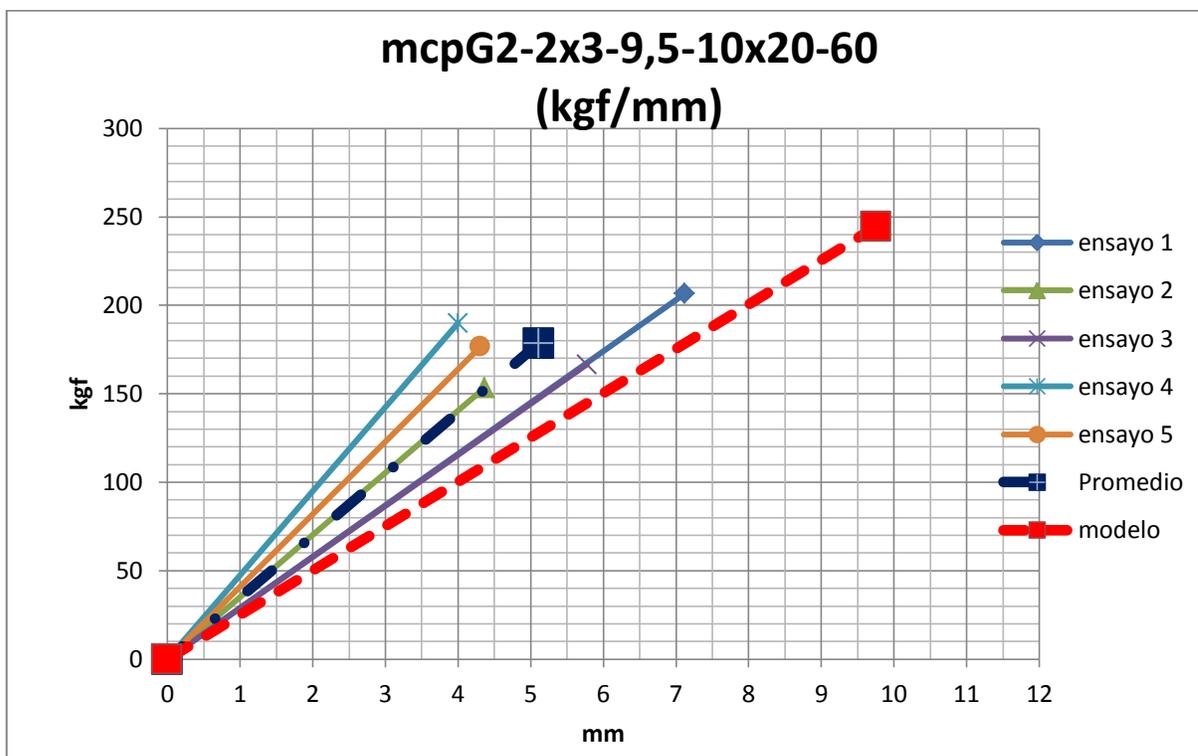


Figura D 4. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x3-9.5-10x20-60.

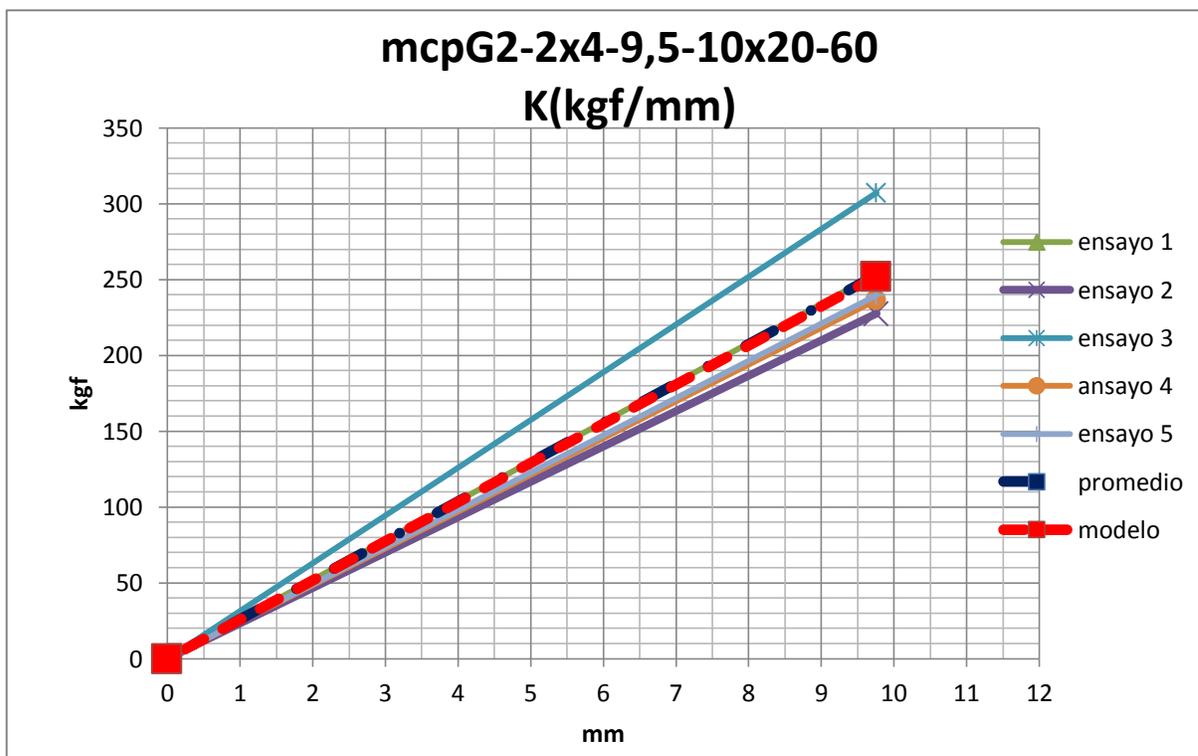


Figura D 5. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x4-9.5-10x20-60.

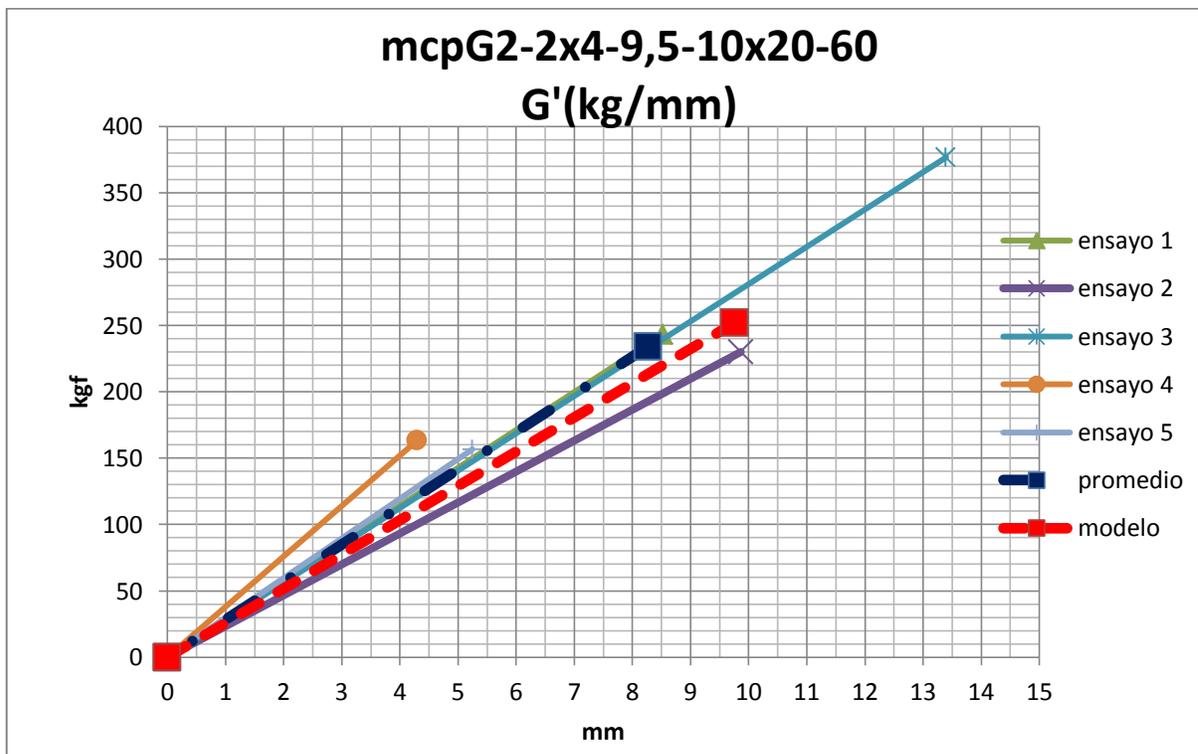


Figura D6. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x4-9.5-10x20-60.

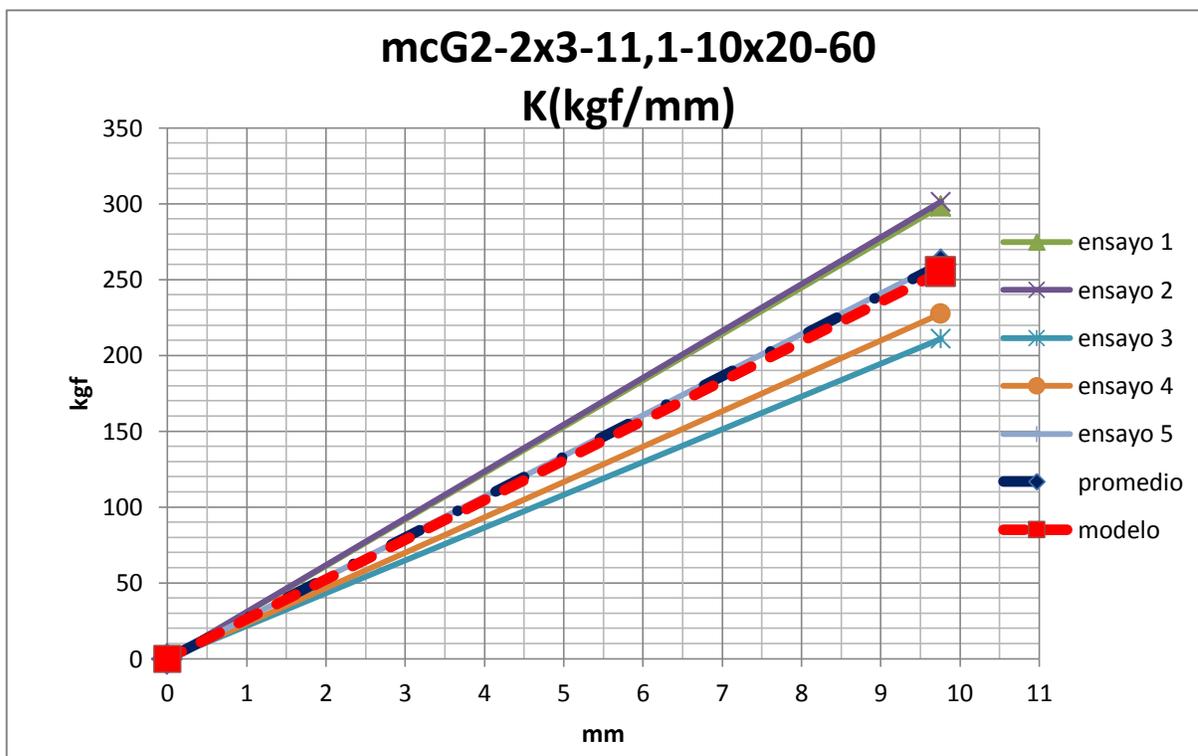


Figura D7. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x3-11.1-10x20-60.

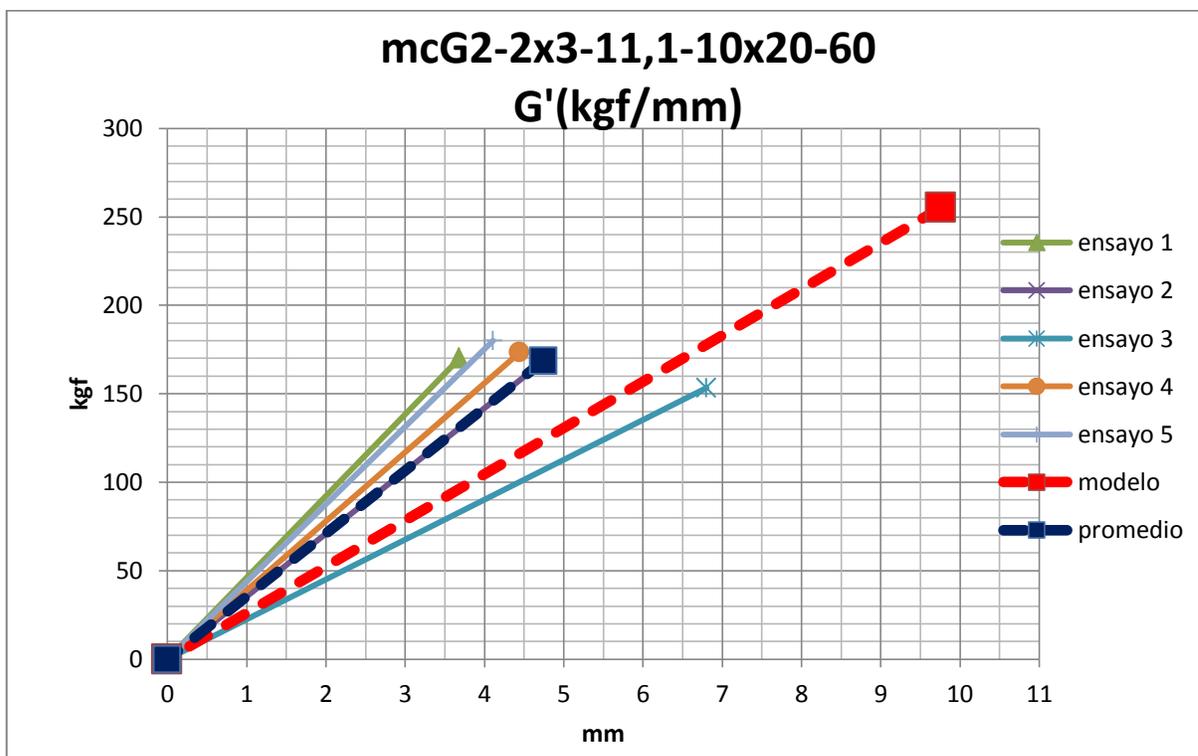


Figura D 8. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x3-11.1-10x20-60.

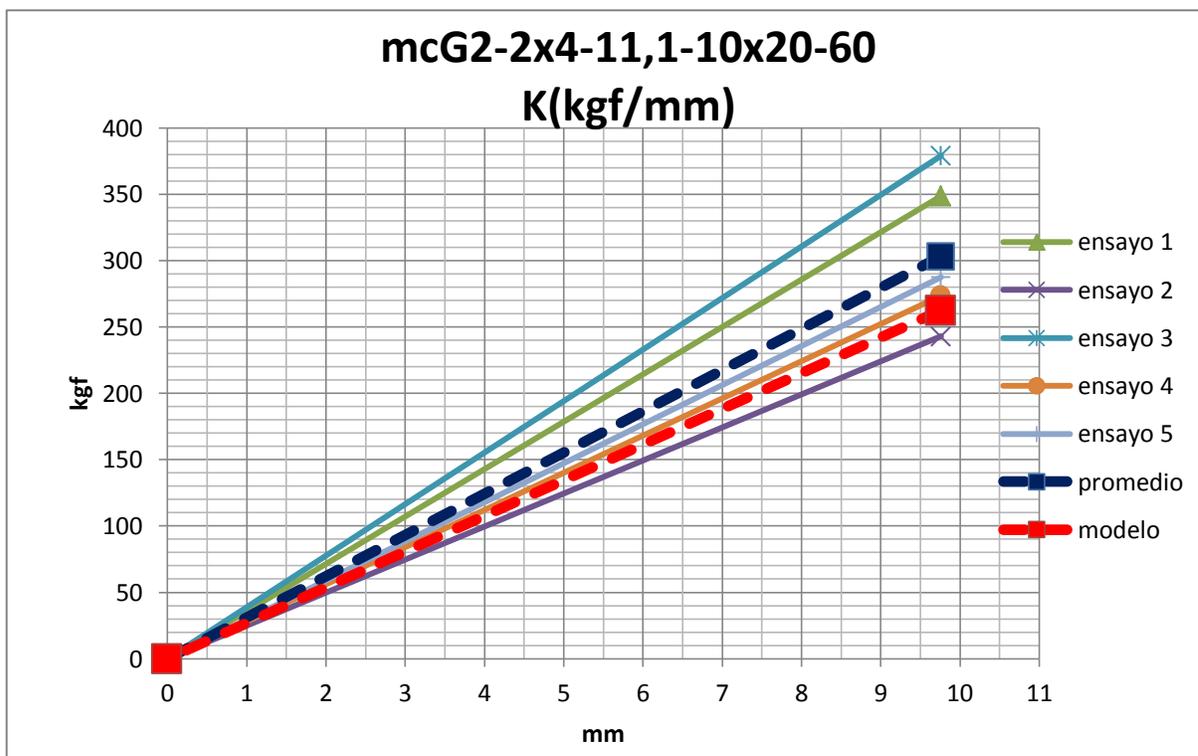


Figura D 9. Resultado rigidez inicial k ensayos, tipologías mcpG2-2x4-11.1-10x20-60.

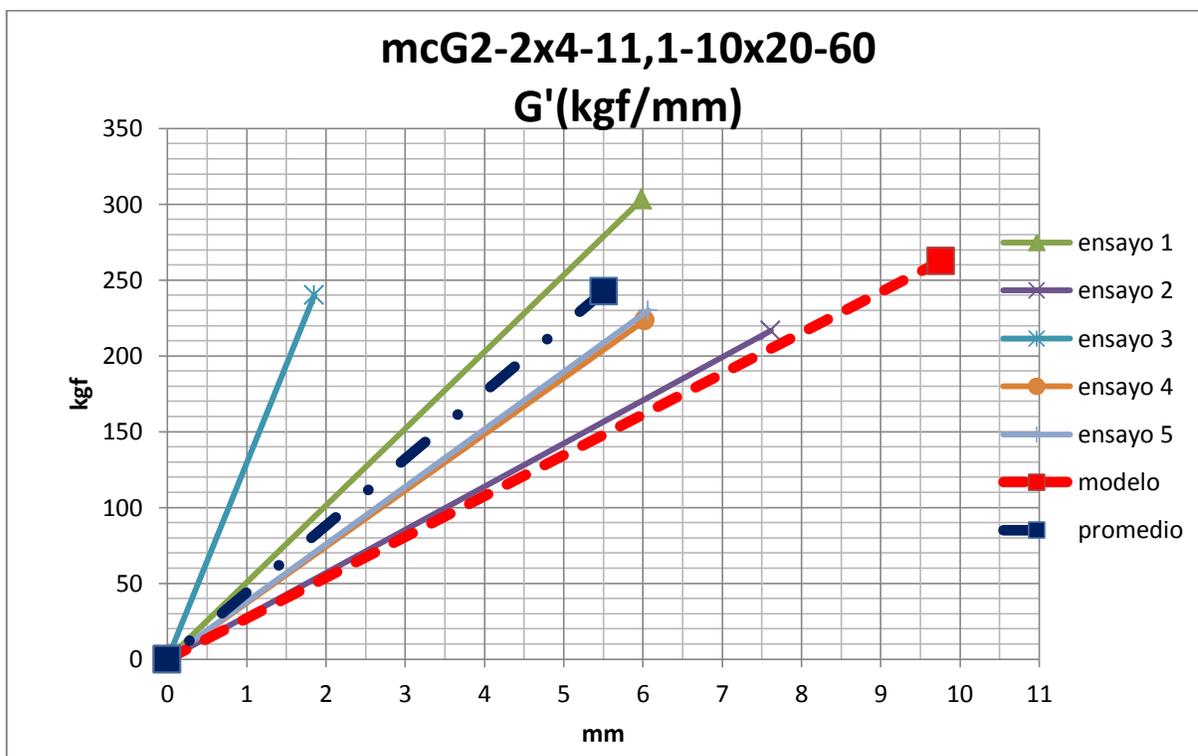


Figura D 10. Resultado rigidez inicial G' ensayos, tipologías mcpG2-2x4-11.1-10x20-60.

Anexo E
Rigidez inicial según categoría

Rigidez inicial según categoría

De los resultado entregados en la tabla 6 y 7, se observa que el set de datos se puede dividir en dos grandes categorías, los muros de corte de madera con sistema de anclaje Simpson, donde la rigidez varía entre 22.41 (kgf/mm) a 27.15 (kgf/mm) , y los muros de corte de madera con sistema de anclaje fierro estriado, donde la rigidez inicial varía entre 11.37 (kgf/mm) a 13.36 (kgf/mm), además estas categorías se pueden subdividir en dos subcategorías, los muros de corte con espaciamiento de clavo 10x20 y los muros de corte con espaciamiento de clavo 15x30 donde es apreciable el cambio en la rigidez inicial. En la tabla E1 se resumen las categorías en las que se dividen los resultados obtenidos y en la figura E1 y E2 se puede observar gráficamente la rigidez inicial para las distintas categorías ordenada de forma descendente.

Tabla E 1. Rigidez inicial agrupada según variables influyentes.

Categoría	Subcategoría	Sistema de anclaje	Espaciamiento clavos	Rango rigidez inicial (kgf/mm)
C1	C1.1	Escuadra	10x20	25.06-27.15
	C1.2	Simpson A66	15x30	22.41-24.24
C2	C2.1	Fierro estriado	10x20	12.45-13.36
	C2.2		15x30	11.37-12.26

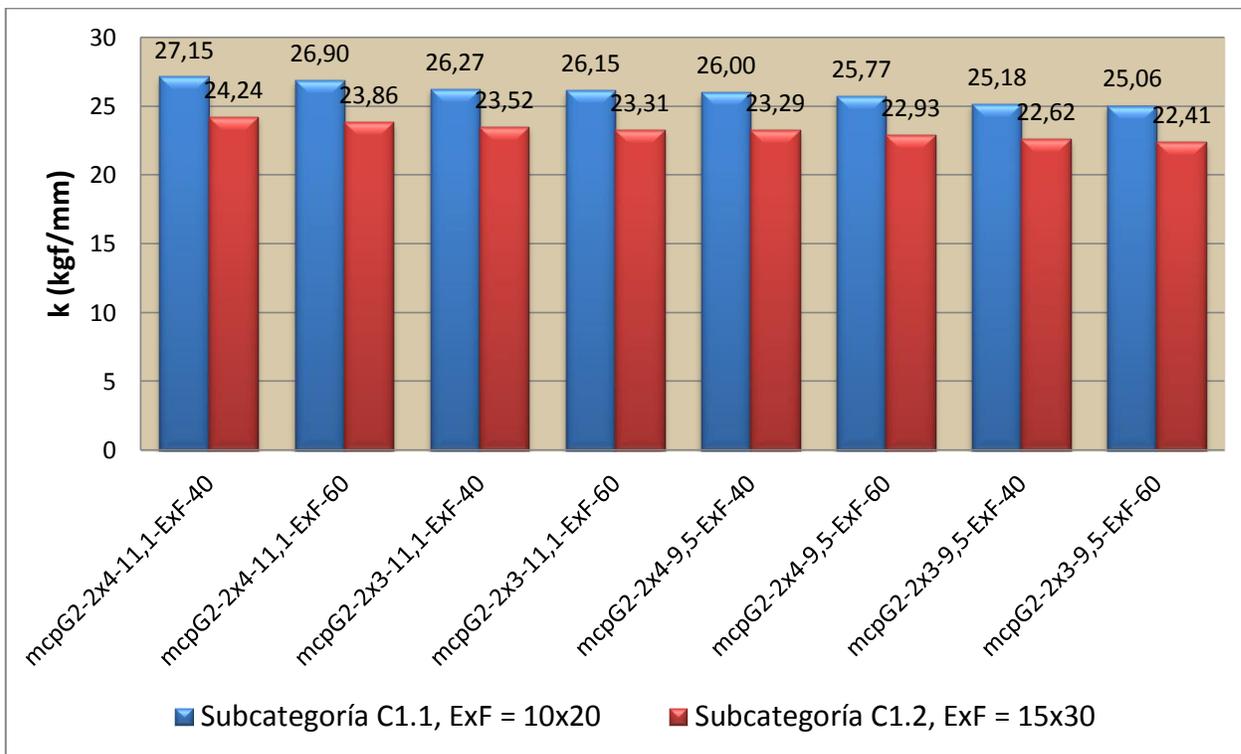


Figura E 1. Resultado rigidez inicial categoría C1.

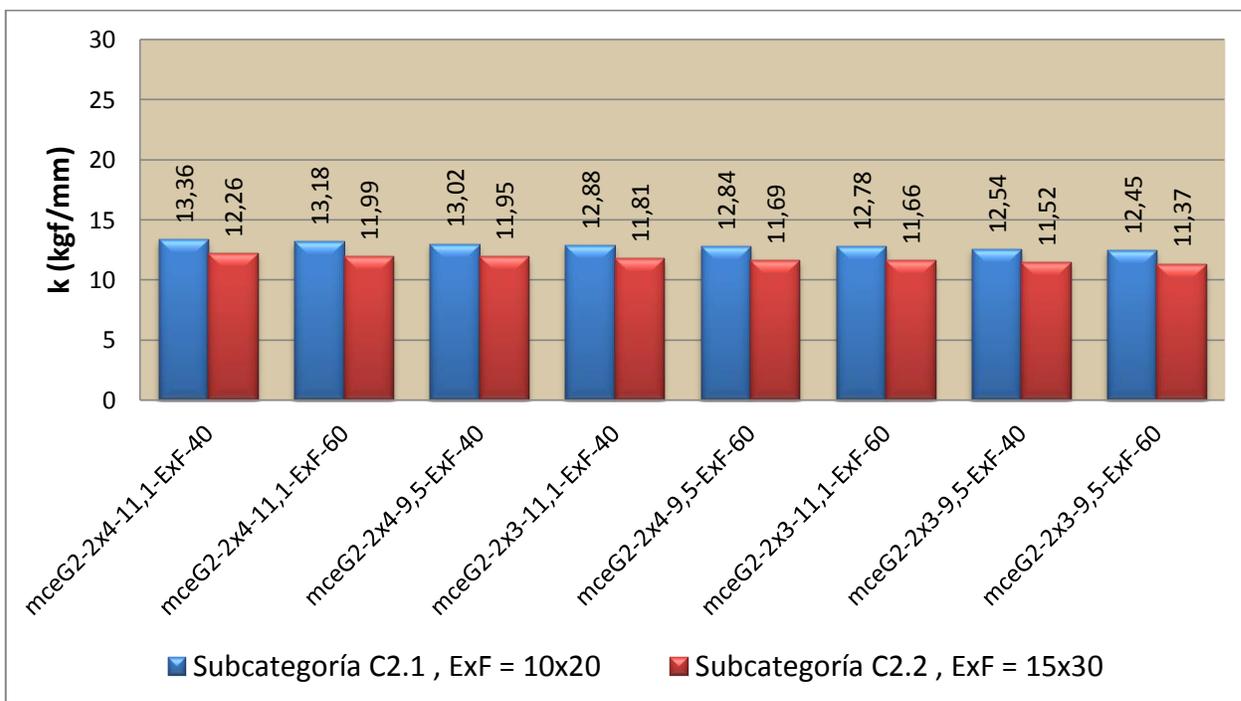


Figura E 2. Resultado rigidez inicial categoría C2.