

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIRÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Ing. Civil Alexander Opazo Vega

**Profesores Comisión:** Ing. Civil Ángela Salinas Barrera

Ing. Civil Gilda Espinoza Valenzuela

**MODELACIÓN NUMÉRICA NO LINEAL DE  
MUROS DE CORTE DE MADERA SOMETIDOS A  
CARGAS LATERALES MONOTÓNICAS**

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

**JOSÉ LUIS LÓPEZ SALDÍAS**

Concepción, Agosto 2015

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN.....                                                                               | 1  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                                       | 3  |
| 1.1 Justificación.....                                                                     | 4  |
| 1.2 Objetivos.....                                                                         | 4  |
| 1.2.1 <i>Objetivo general</i> .....                                                        | 4  |
| 1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....                                                   | 4  |
| 1.3 Metodología.....                                                                       | 5  |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....                                                             | 6  |
| 2.1 Caracterización mecánica de muros estructurales de madera.....                         | 6  |
| 2.2 Comportamiento de muros de corte de madera sin cadenetras.....                         | 7  |
| 2.3 Enfoque numérico para la simulación del comportamiento de muros de corte de madera.... | 8  |
| 3. ENSAYOS MECÁNICOS EN MUROS DE CORTE DE MADERA.....                                      | 9  |
| 3.1 Nomenclatura.....                                                                      | 9  |
| 3.2 Tipología de muros ensayados.....                                                      | 10 |
| 3.3 Metodología de ensayo.....                                                             | 11 |
| 4. MODELACIÓN NUMÉRICA EN MUROS DE CORTE DE MADERA.....                                    | 13 |
| 4.1 Diseño del modelo.....                                                                 | 13 |
| 4.2 Marco de madera.....                                                                   | 15 |
| 4.3 Revestimiento.....                                                                     | 15 |
| 4.4 Conexión Revestimiento-Madera.....                                                     | 15 |
| 4.4.1 <i>Conexión revestimiento-madera perpendicular</i> .....                             | 17 |
| 4.4.1 <i>Conexión revestimiento-madera paralela.</i> .....                                 | 18 |
| 4.4.3 <i>Técnicas de Modelación conexión revestimiento-madera.</i> .....                   | 21 |
| 4.5 Conexión Madera-Madera.....                                                            | 22 |
| 4.5.1 <i>Conexión madera-madera para sistema escuadra</i> .....                            | 24 |
| 4.5.2 <i>Conexión madera-madera para sistema fierros estriados</i> .....                   | 25 |
| 4.6 Conexión Sistema de Anclaje.....                                                       | 26 |
| 4.7 Fundación.....                                                                         | 27 |
| 4.8 Tipo de análisis.....                                                                  | 28 |
| 4.8.1 <i>Control de aplicación de la carga</i> .....                                       | 28 |
| 4.8.2 <i>Control de solución</i> .....                                                     | 29 |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 5. VALIDACIÓN DE MODELO.....            | 30 |
| 5.1 Resultados.....                     | 30 |
| 5.2 Análisis de resultados .....        | 33 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... | 36 |
| 6.1 Conclusiones.....                   | 36 |
| 6.2 Recomendaciones .....               | 37 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA .....                   | 38 |
| 8. ANEXOS .....                         | 40 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Nomenclatura utilizada para los muros de corte. ....                       | 9  |
| Tabla 2. Tipología de muros sometidos a ensayos de carga horizontal monotónica..... | 10 |
| Tabla 3. Input de datos modelo muro de corte. ....                                  | 14 |
| Tabla 4. Resumen de resultados carga máxima y desplazamiento máximo asociado.....   | 33 |
| Tabla 5. Influencia del cambio de sistema de anclaje. ....                          | 34 |
| Tabla 6. Influencia del cambio de escuadría. ....                                   | 34 |
| Tabla 7. Influencia del cambio de espesor de placa OSB. ....                        | 35 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Tipología típica de muros con estructura de madera ensayados .....   | 11 |
| Figura 2. Sistemas de anclaje. ....                                            | 12 |
| Figura 3. Implementación de la toma de datos. ....                             | 12 |
| Figura 4. Modelo de elementos finitos .....                                    | 13 |
| Figura 5. Dirección de deformación resortes conexión revestimiento-madera..... | 17 |
| Figura 6. Ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular. ....             | 17 |
| Figura 7. Gráfico propiedad conexión revestimiento-madera paralelo .....       | 18 |
| Figura 8. Ensayo conexión revestimiento-madera paralelo.....                   | 19 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 9. Gráfico propiedad conexión revestimiento-madera paralelo .....    | 20 |
| Figura 10. Conexión revestimiento-madera. ....                              | 21 |
| Figura 11. Ubicación rótulas en bastidor modelado .....                     | 23 |
| Figura 12. Resorte interno conexión madera-madera.....                      | 23 |
| Figura 13. Propiedad conexión madera-madera sistema escuadra .....          | 24 |
| Figura 14. Propiedad conexión madera-madera sistema fierros estriados. .... | 25 |
| Figura 15. Resortes internos conexión sistema de anclaje. ....              | 26 |
| Figura 16. Diagrama de equilibrio de fuerzas.. ....                         | 27 |
| Figura 17. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología ME 2x3-9 .....    | 30 |
| Figura 18. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x3-9.....     | 31 |
| Figura 19. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x3-11.....    | 31 |
| Figura 20. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x4-9.....     | 32 |
| Figura 21. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x4-11.....    | 32 |

## **MODELACIÓN NUMÉRICA NO LINEAL DE MUROS DE CORTE DE MADERA SOMETIDO A CARGAS LATERALES MONOTÓNICAS.**

**Autor: José Luis López Saldías.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.

jllopez@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 por objetivo modelar numéricamente el comportamiento de muros de corte de madera sometidos a cargas laterales monotónicas, caracterizando las tipologías de muros más utilizadas en la construcción de viviendas sociales chilenas.

Se presentan 5 configuraciones de muros con estructura de madera, con base a pie derechos y revestimiento de paneles de fibras orientadas (OSB) fijada bajo un sistema de clavado específico. Además se consideran dos sistemas de anclaje a la fundación. Para el ingreso de datos al modelo, se asignaron propiedades específicas a los elementos de conexión tipo clavo, ya sea en la conexión revestimiento-marco y conexión madera-madera, con la finalidad que representen los desplazamientos verticales y horizontales frente a cargas laterales.

La validación de los modelos se obtiene a partir de los resultados de ensayos mecánicos de muros de corte de madera publicados por el Instituto Forestal (INFOR).

Luego, se determinó que los modelos numéricos son capaces de realizar un análisis estático no lineal. También, se aprecia que al cambiar el sistema de anclaje de fierro estriado a un sistema de pernos y escuadra produce un incremento significativo en la resistencia promedio a la carga lateral. Además, existe un bajo incremento en la capacidad resistente de los muros en sus pies derechos, al pasar de una escuadría menor a una mayor. Por último, no se observa un incremento importante en la resistencia a la carga lateral al aumentar el espesor de la placa de OSB.

**Palabras Claves:** muros de corte de madera, análisis estático no lineal, capacidad resistente.

6393 Palabras Texto + 19 Figuras/Tablas\*250 = 11143 Palabras Totales.

## **ABSTRACT**

This thesis aims to numerically model the behavior of timber shearwalls under monotonic lateral loads, characterizing the types of walls more used in the construction of Chilean social housing.

Five configurations of wood-frame walls are presented based on studs and sheathing with oriented strand board (OSB) fastened under a specific nailing system. Also they consider two anchoring systems to the foundation. For input data into model, specific properties were assigned to the nails connection elements, either in the sheathing-to-lumber connection and lumber-to-lumber connection, in order to represent the vertical and horizontal displacements against lateral loads.

The validation of the models was obtained from the results of mechanical tests of timber shearwalls published by Instituto Forestal (INFOR).

Later, it was determined that the numerical models are able to perform a static nonlinear analysis. Moreover, it is appreciated that changing the grooved-iron bar anchoring system to a bolt and framing square system produces a significant increase in the average resistance to lateral loading. Furthermore, there is a small increase in the bearing capacity of the shearwalls in their studs going from a lower to a higher squareness. Finally, it is not observed a important increase in the lateral load resistance by increasing the OSB plate thickness.

**Keywords:** timber shearwalls, static nonlinear analysis, bearing capacity.

## 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, junto con el apoyo de la División Técnica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, realizaron 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).

Entonces, poder contar con modelos numéricos predictivos del comportamiento de muros de corte de madera sometidos a cargas laterales sería de gran utilidad, ya que se traducen en ahorros de tiempo y dinero que pudiesen utilizarse en la ejecución de posteriores ensayos experimentales.

A modo de contextualizar esta investigación, se dice que un muro de corte es un sistema estructural vertical muy utilizado en edificios menores de estructura de madera, el cual proporciona la fuerza para resistir cargas horizontales, tales como cargas de vientos o sismos (Hongyong Mi, 2004). El muro de corte diseñado en este estudio consiste en una estructura de marco de madera, que incluye pies derecho, solera inferior y superior; revestimiento de placa de fibras orientadas (OSB); un sistema de conexiones compuesto por una conexión revestimiento-marco de madera, conexión madera-madera y sistemas de anclajes que conectan la estructura a la fundación.

Esta tesis presenta información que puede ser de ayuda a la confección de modelos numéricos de muros de corte de madera, de los cuales se puede lograr un mejor entendimiento de su comportamiento en referencia a la carga-desplazamiento sufrido por el muro y poder determinar cuáles son las variables más influyentes en la capacidad de resistir cargas laterales.

## 1.1 Justificación

En enero del año 2013, el INFOR encargó al Laboratorio del Área de Ingeniería Estructural del Centro de Investigación Tecnológica de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (CITEC UBB) la realización de ensayos de muros de corte de madera sometidos a cargas laterales monotónicas. El propósito de estos ensayos fue investigar la influencia de distintas variables asociadas a la resistencia lateral máxima de los muros. De esta forma, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) podría generar recomendaciones constructivas y modificaciones a las especificaciones técnicas de viviendas sociales de madera.

Debido a limitaciones de financiamiento, no se pudo continuar con la realización de los ensayos experimentales. Surgió entonces, la idea de modelar numéricamente los efectos de cargas laterales en muros de corte de madera y poder simular el comportamiento de respuesta de los muros de corte ensayados mecánicamente. El propósito, es ser una opción viable para ahorrar tiempo y dinero en futuros experimentos mecánicos de esta misma categoría y aún más, ser un aporte para ayudar a generar mayor conocimiento y mayor conciencia, en cómo la madera puede volver a transformarse en un material útil para la construcción chilena.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivo general*

Modelar numéricamente el comportamiento no lineal de muros de corte de madera sometido a cargas laterales monotónicas, seguido de una calibración respecto de los ensayos experimentales publicados por INFOR.

### 1.2.2 *Objetivos específicos:*

- Sintetizar el estado de arte respecto a técnicas de modelación no lineal de muros de corte de madera.
- Seleccionar técnicas de modelaciones no lineales de muros de corte de madera que tengan una adaptación válida en Chile.
- Implementar un modelo altamente documentado en un muro de corte de madera mediante un software de elementos finitos, SAP2000 (CSI 2009)
- Calibrar el modelo para poder simular apropiadamente el comportamiento lineal y no lineal y evaluar la validez respecto a los ensayos experimentales.



### **1.3 Metodología**

El procedimiento realizado en esta memoria es dividido en cuatro fases principales:

En la etapa de estudio de antecedentes se revisan las publicaciones existentes que hacen referencia al modelamiento de muros de corte con un enfoque no lineal y las técnicas de modelación en programas computacionales de elementos finitos que puedan trabajar con madera, con el fin de sintetizar el estado de arte y así obtener una base teórica adecuada.

Luego, una etapa de técnicas de modelación, donde se revisan las técnicas más usadas que contemplen buenos resultados y la factibilidad de implementación en el modelo, para así lograr seleccionar una técnica de modelación a desarrollar.

Posteriormente, sigue una etapa de análisis e ingreso de datos al modelo. Se analizan los elementos implementados en los ensayos experimentales publicados por INFOR, para definir adecuadamente, los input de datos al modelo y así generar correcciones y ajustes para obtener un modelo de muro preliminar.

Por último, es necesario calibrar el modelo. Se analizan los resultados de los ensayos experimentales y los obtenidos por el software para realizar una comparación ensayo-modelo. Se hacen las últimas correcciones y ajustes para finalmente establecer una validación del modelo de muro de corte de madera. Además se realizan recomendaciones y conclusiones, para complementar la información de esta investigación.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En este capítulo se presenta una revisión de investigaciones anteriores relevantes para este estudio. Con la revisión de la literatura, se intenta extraer información importante y necesaria para dar un sustento teórico a la realización de los modelos numéricos.

### **2.1 Caracterización mecánica de muros estructurales de madera**

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

Año: 2012

Esta es una publicación del Instituto Forestal (INFOR, Chile), la cual se desarrolló en Concepción, Chile, en la Universidad del Bío-Bío y sirve para validar los modelos de muros de corte a desarrollar en esta tesis, ya que se exponen resultados de tipologías de muros ampliamente utilizadas en Chile, sometidos a ensayos mecánicos para distintos tipos de cargas, incluyendo ensayos para cargas laterales, aplicadas sobre cuatro configuraciones de muro de madera y donde además se consideran dos sistemas de anclaje unidos a una viga de fundación de hormigón.

Los muros ensayados están contruidos en base a pie derechos de madera aserrada de pino radiata de grado estructural G2 y placa arriostrante OSB fijada bajo un esquema de clavado determinado.

Con los resultados obtenidos por los ensayos mecánicos, se estimaron capacidades admisibles de los muros frente a distintos tipos de carga, los cuales son útiles para el diseño de estructuras.

En esta publicación se concluye que al ensayar un muro con sistema de pernos y escuadra, se obtiene un incremento de un 85% en la resistencia promedio a la carga lateral, respecto de un muro con sistema de anclaje de fierros estriados o “espárragos”. También, se aprecia que existe una clara influencia de la escuadría de los pies derechos en la capacidad resistente de los muros al corte, donde la escuadría con mayores dimensiones presenta valores entre 31% y 44% mayores que las escuadrías de menor tamaño. Además, se concluye que no existe un incremento importante en la resistencia a la carga lateral promedio, al aumentar el espesor de la placa OSB.

## **2.2 Comportamiento de muros de corte de madera sin cadenetas.**

Autor: Hongyong Mi.

Año: 2004.

Esta es una investigación realizada en Fredericton, Canadá, en la Universidad New Brunswick. Tiene por objetivo obtener un mejor entendimiento del comportamiento de muros de corte de madera sin cadenetas, realizando una serie de ensayos mecánicos y modelos numéricos. Los resultados de las pruebas experimentales fueron usados para validar el modelo numérico.

Además, se determinan las propiedades de las conexiones de tipo clavo, mediante ensayos experimentales. Las propiedades de los clavos utilizadas en la conexión revestimiento-madera y madera-madera están representadas por curvas carga-desplazamiento que se ingresan al modelo numérico con propiedades no lineales. El software utilizado es SAP2000 (CSI 2003).

Luego, se definen las propiedades de los elementos que componen la estructura de muro de corte de madera, el revestimiento y el sistema de anclaje utilizado. Las propiedades sirven como datos que se ingresan al programa.

El autor concluye que los modelos son capaces de representar un comportamiento no lineal estático, incluso predecir el comportamiento más allá de la carga máxima. Además, agrega que la comparación de las curvas carga-desplazamiento entre las predicciones del modelo y los ensayos experimentales fue excelente.

### **2.3 Enfoque numérico para la simulación del comportamiento de muros de corte de madera**

Autores: Wei Yuen Loo, Pierre Quenneville y Nawawi Chouw

Año: 2012

Investigación realizada en Auckland, Nueva Zelanda, en la Universidad de Auckland, en la cual se determina que el comportamiento de los muros de corte de madera puede ser razonablemente representado si se usa un modelo en el cual, la falla de los materiales no lineales estén concentrados sólo en las conexiones por clavos del revestimiento y el marco de madera.

Para determinar los parámetros del comportamiento de los clavos, se basan en datos experimentales obtenidos de una serie de ensayos, tanto monotónicos como cíclicos, de diversas investigaciones. Estos parámetros se utilizan para definir una curva de referencia, pudiendo elevar o bajar la curva para hacerla coincidir con diferentes valores de carga máxima resistidas por los clavos. El desplazamiento máximo se asume invariable para todos los tamaños y resistencias de los clavos. Se utilizan además, fórmulas matemáticas para poder predecir la carga máxima resistente por los clavos para complementar el estudio.

Se concluye que es factible generar modelos de elementos finitos, calibrados con datos experimentales de propiedades de uniones revestimiento-madera y que simulen numéricamente el comportamiento de muros de corte de madera actuando bajo cargas laterales.

### 3. ENSAYOS MECÁNICOS EN MUROS DE CORTE DE MADERA

En este capítulo se describe la metodología de ensayo de muros de corte de madera sometidos a cargas horizontales. Los ensayos mecánicos fueron realizados en el Laboratorio del Área de Ingeniería Estructural del CITEC UBB y publicados por INFOR en el año 2012.

#### 3.1 Nomenclatura

En la tabla 1 se define la nomenclatura de la tipología de los muros ensayados. Esta nomenclatura será utilizada en el resto de este informe.

**Tabla 1. Nomenclatura utilizada para los muros de corte.**

| Nomenclatura | MX AxB-Z                                            |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| M            | Muro de corte                                       |
| X            | E = Anclaje Espárrago (fierro estriado)             |
|              | P= Anclaje Perno y Escuadra                         |
| AxB          | 2x3 = Escuadrías pies derechos y soleras, 45 x 69mm |
|              | 2x4 = Escuadrías pies derechos y soleras, 45 x 94mm |
| Z            | 9= Espesor placa OSB de 9,5mm                       |
|              | 11= Espesor placa OSB de 11,1mm                     |

Nota: Se utilizó madera aserrada estructural G2 para el marco de todos los muros.

### 3.2 Tipología de muros ensayados

Para caracterizar los muros más utilizados en la construcción de viviendas sociales chilenas, la tabla 2 presenta la tipología de muros sometidos a cargas horizontales, con su nomenclatura correspondiente.

**Tabla 2. Tipología de muros sometidos a ensayos de carga horizontal monotónica.**

| Nombre    | Estructura                                                                                                                                                | Placa de revestimiento                                                                                                                   | Sistema de anclaje                                                                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ME-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                                                                                       |
| MP-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. |
| MP-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. |
| MP-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. |
| MP-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. |

Nota: Tabla obtenida del Informe Técnico N° 191, publicado por INFOR (2012).

### 3.3 Metodología de ensayo

Tal como lo describe INFOR en su Informe Técnico N° 191 (2012), el método de ensayo aplicado es el descrito en la norma chilena NCh. 802.Eof 71: 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.

Cabe destacar que el tamaño de todos los paneles fue de 1,22m de ancho y 2,44m de alto y ninguno tiene cadenas entre pies derechos. Se utilizó una placa arriostrante OSB por sólo una cara del muro, fijada con clavos helicoidales de 2", distanciados en la zona perimetral a 10cm y en la zona central a 20cm y 2 clavos de unión entre pie derecho y solera, tal como lo resume la figura 1.



**Figura 1. Tipología típica de muros con estructura de madera ensayados.**

La figura 2 muestra los sistemas de anclajes utilizados.



(a) Anclaje tipo perno-escuadra



(b) Anclaje tipo “espárrago”

**Figura 2. Sistemas de anclaje**

Para la implementación de los ensayos se utilizó un sistema de adquisición de datos que tiene la capacidad de registrar simultáneamente la carga aplicada y los desplazamientos del muro, indicados en la figura 3. Los resultados de los ensayos mecánicos se adjuntan en el Anexo A.



**Figura 3. Implementación de la toma de datos.**

Nota: P: Carga horizontal aplicada monotónicamente.

D1: Medición desplazamiento vertical

D2: Medición desplazamiento horizontal inferior

D3: Medición desplazamiento horizontal superior



#### 4. MODELACIÓN NUMÉRICA EN MUROS DE CORTE DE MADERA

En este capítulo se describe la metodología utilizada para modelar muros de corte de madera, incluyendo argumentos de discretización, elección de elementos y sus respectivas asignaciones de propiedades.

Se diseñan 5 modelos con los mismos detalles constructivos que los descritos en el capítulo anterior, para tener una mejor representación de sus comportamientos y así otorgarles mayor validez.

El software comercial SAP2000 (CSI, 2009) fue utilizado para el modelado de los muros, ya que es un programa computacional de elementos finitos especialmente diseñado para procesar datos bajo un análisis estructural. SAP2000 es capaz de realizar un análisis estático no lineal y es apto para modelar el comportamiento de muros de corte más allá de la carga máxima si se asignan propiedades de conexión adecuadas.

##### 4.1 Diseño del modelo

La figura 4 muestra un esquema del modelo con sus dimensiones respectivas, se indican los elementos finitos y los elementos de la estructura física del muro, como se mostró en la figura 1.

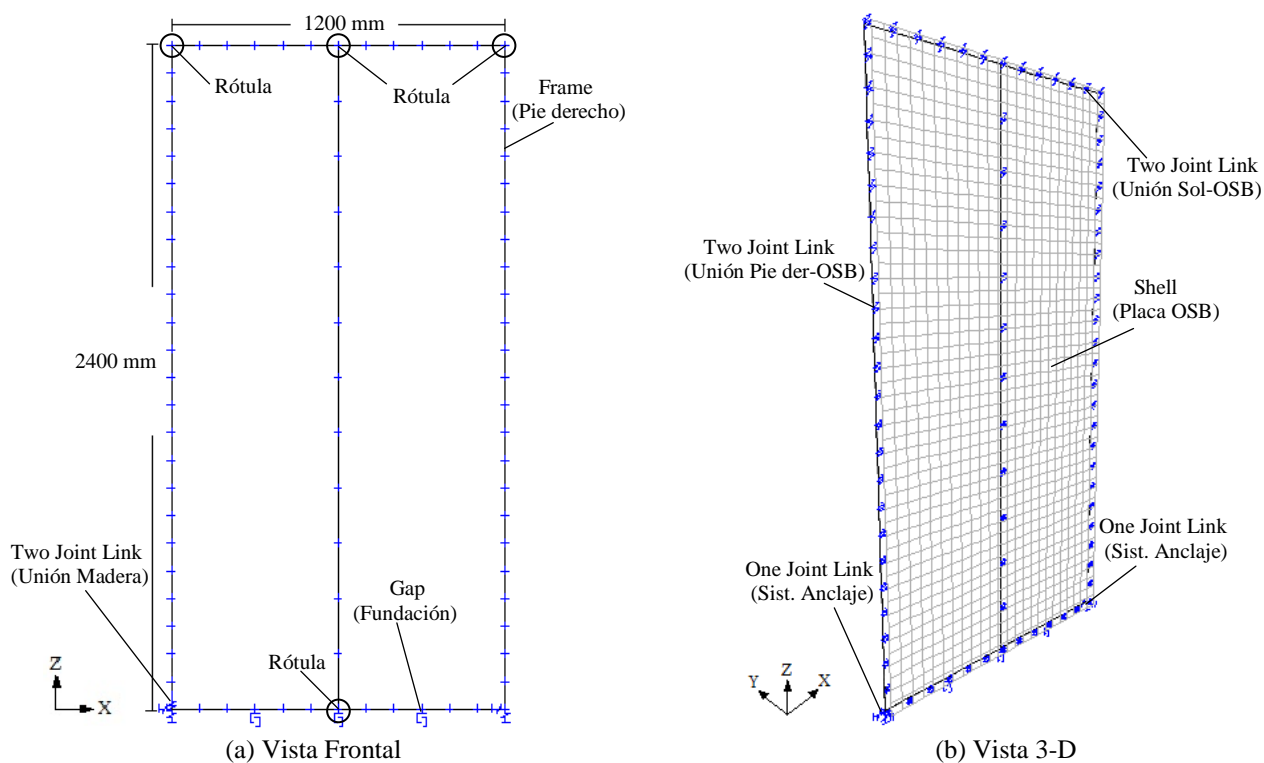


Figura 4. Modelo de elementos finitos.

Cabe mencionar que las dimensiones de todos los muros fueron de 2400mm de alto por 1200mm de ancho para facilitar el mallado de la placa OSB.

Los elementos físicos que conforman el muro de corte, así como sus respectivos elementos finitos y el detalle de las propiedades no lineales asignadas a cada uno de éstos se resumen en la tabla 3.

**Tabla 3. Input de datos modelo muro de corte.**

| Elemento Físico                        | Tipo                                     | Elemento Finito | Propiedades Mecánicas                                                                                                         |
|----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Marco de madera (G2)                   | Pie derecho                              | Frame           | E= 89000 kg/cm <sup>2</sup> , u= 0,3                                                                                          |
|                                        | Solera superior e inferior               |                 |                                                                                                                               |
| Revestimiento                          | Placa de OSB<br>9,5 mm                   | Shell           | E <sub>1</sub> = 14666 kg/cm <sup>2</sup> , E <sub>2</sub> = 37332 kg/cm <sup>2</sup> ,<br>u= 0,3; G= 6200 kg/cm <sup>2</sup> |
|                                        | Placa de OSB<br>11,1 mm                  |                 |                                                                                                                               |
| Conexión Revestimiento-Madera (Clavos) | Pie derecho-OSB,<br>Solera-OSB           | Two Joint Link  | Determinado por curvas carga-desplazamiento                                                                                   |
| Conexión Madera-Madera                 | Escuadra<br>Clavos                       | Two Joint Link  | Determinado por curvas carga-desplazamiento                                                                                   |
| Sistema de Anclaje                     | Pernos<br>Espárrago<br>(Fierro estriado) | One Joint Link  | Determinado por curvas carga-desplazamiento                                                                                   |
| Fundación                              | Fundación                                | One Joint Link  | R= 106000 kg/cm                                                                                                               |

Nota: 1, Valores obtenidos de la tesis *Behavior of unblocked wood shearwalls*, por Hongyong Mi (2004).  
 2, En SAP2000, las propiedades de los elementos son definidos en un sistema de coordenadas locales. Los ejes del sistema están denotados por direcciones 1,2 y 3.  
 3, Frame: E= módulo de elasticidad, u= coeficiente de Poisson.  
 4, Shell: E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>= módulo de elasticidad en direcciones 1 y 2 respectivamente. G= módulo de corte.  
 5, One, Two Joint: Las propiedades fueron determinadas de acuerdo a curvas carga-desplazamiento de ensayos experimentales obtenidas de distintas publicaciones.  
 6, Gap: R= Rigidez.

## **4.2 Marco de madera**

El bastidor de madera del muro de corte tiene propiedades isotrópicas y está conformado por pies derechos separados 600mm a eje uno del otro y una solera inferior y superior. Se diseñaron las secciones transversales (escuadrías) a utilizar y posteriormente fueron modeladas por elementos tipo Frame, las cuales están representadas por una línea recta que conecta dos puntos (nodos). Para los pies derechos y las soleras se diseñaron escuadrías de 45x69mm y 45x94mm, escuadrías de 2x3 y 2x4 respectivamente. Estos elementos están situados en un plano vertical 3,925 cm alejados del revestimiento, donde esta diferencia representa la distancia entre el centroide de los elementos del marco y el centroide de la placa OSB. Lo anterior puede verse en detalle en el Anexo A.

## **4.3 Revestimiento**

El revestimiento se modela como elemento Shell con propiedades ortotrópicas y consiste en 1152 placas de OSB de 50x50mm que se van rellenando hasta completar el revestimiento. El mallado de placa se utiliza para hacer coincidir los nodos necesarios de cada cuadrilátero con la ubicación de los clavos que lo conectan al bastidor y entregar un análisis de procesos más detallado. Se aplicó un espesor de placa de 9,5 mm y de 11,1 mm.

## **4.4 Conexión Revestimiento-Madera**

La unión entre el revestimiento y el marco de madera es determinante en el comportamiento estructural del muro frente a sollicitaciones externas, ya que es ésta unión la que permite que la placa de OSB (elemento rígido) pueda trabajar en conjunto con el marco o bastidor de madera (elemento flexible). Rademacher (2006).

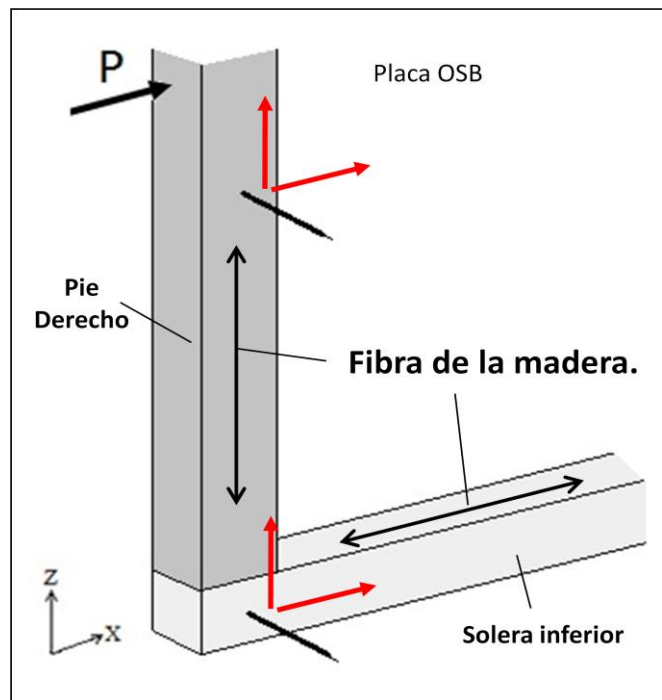
Experimentalmente, se ha determinado que los clavos presentan un comportamiento no lineal Canales (1994). Lo anterior debido a que el marco de madera falla en forma frágil, por lo tanto es necesario asegurar la ductilidad del muro revestido mediante apropiados espaciamientos y dimensiones de los clavos que conectan ambos elementos de madera. Con esto se pretende que la falla en el muro se deba al aflojamiento de los clavos, en lugar que ocurra en la madera y que se puedan producir cortes en la placa de OSB o en el bastidor. Carvallo (1989).

La conexión revestimiento-madera fue modelada por elementos Two-Joint Link de tipo Multilinear Elastic. En general, cada conexión está compuesta por seis “resortes” internos independientes, un resorte por cada grado de libertad. Además, cada resorte fue asignado con propiedades no lineales.

Para la representación de esta conexión se activan dos grados de libertad en el plano XZ (plano donde se diseñó el modelo) debido a que la resistencia de la madera al giro del clavo alrededor del eje Y es despreciable, como lo muestra la figura 5. Cabe destacar que los resortes tienen participación en el modelo mediante la activación de sus respectivos grados de libertad.

En el modelo se considera que el comportamiento no lineal de los clavos es distinto frente a cargas laterales paralelas y perpendiculares a la fibra de la madera.

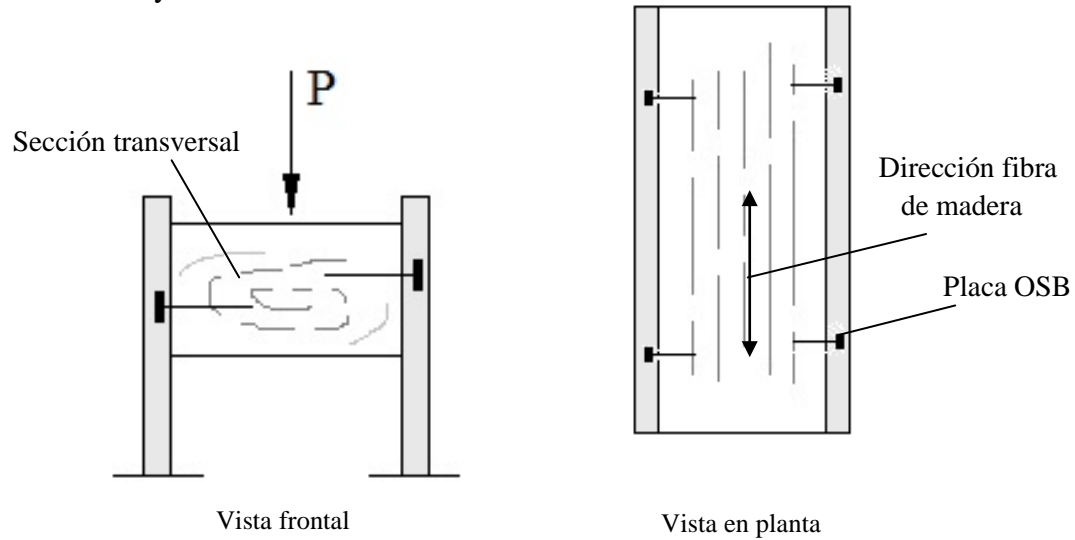
El comportamiento de la conexión revestimiento-madera depende de la dirección de la deformación del clavo producto de la carga lateral aplicada, pudiendo ser paralela o perpendicular a la fibra de la madera. Las propiedades están representadas por una curva carga-desplazamiento. La figura 5 ayuda a comprender la dirección de deformación de los resortes (flechas rojas) que componen la conexión revestimiento-madera.



**Figura 5. Dirección de deformación de resortes conexión revestimiento-madera.**

#### 4.4.1 Conexión revestimiento-madera perpendicular

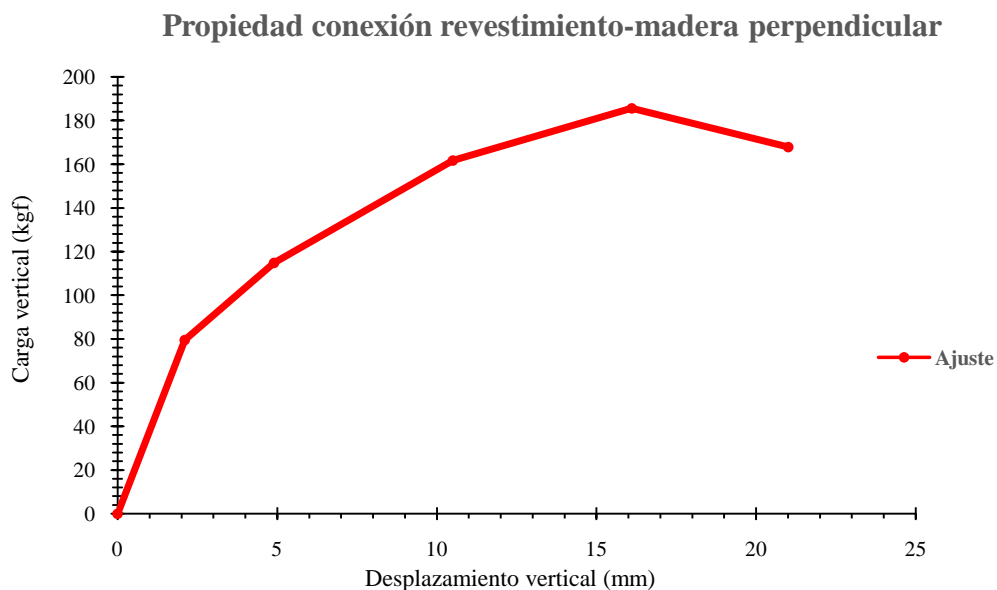
El comportamiento perpendicular del clavo se determina de acuerdo a los ensayos realizados por Leiva J. y Vilches P. (1996) en la Universidad de Santiago de Chile. El ensayo consiste en la aplicación de una carga vertical en dirección perpendicular a la fibra de la madera en 10 probetas. El descenso de la pieza de madera se registra por medio de un transductor de deformación para así obtener los valores de las deformaciones sufridas por los clavos. La figura 6 muestra un diagrama del ensayo.



**Figura 6. Ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular.**

La propiedad del resorte que define el comportamiento perpendicular a la fibra de la madera está representada por una curva carga-desplazamiento, como lo muestra el gráfico de la figura 7.

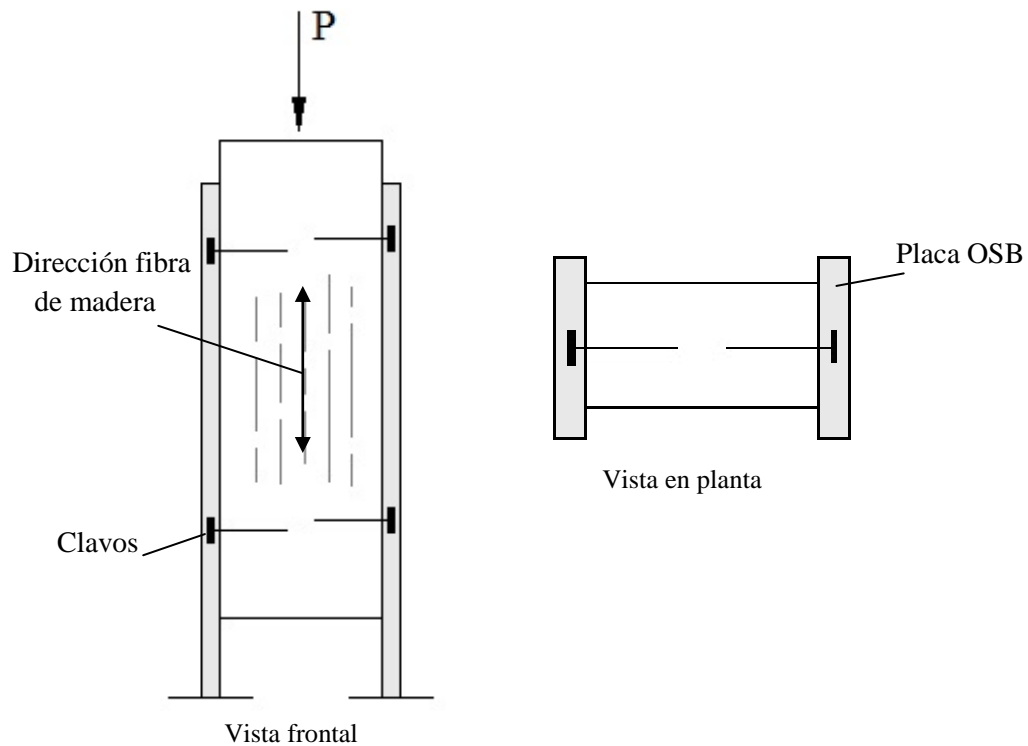
Cabe destacar que la curva de color rojo es una curva representativa del total de las 10 probetas ensayadas y viene a representar la propiedad de comportamiento de deformación perpendicular a la fibra de la madera de los clavos. Los detalles del ensayo realizado y los datos que componen el gráfico se encuentran en el anexo B.



**Figura 7. Gráfico propiedad conexión revestimiento-madera paralelo**

#### 4.4.1 Conexión revestimiento-madera paralela.

La asignación de la propiedad del clavo que define su comportamiento paralelo a la fibra de madera frente a cargas laterales se determinó mediante una serie de ensayos realizados por Rademacher F. (2006) en la Universidad Austral de Chile. Se 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 figura 8 muestra un diagrama del ensayo realizado.

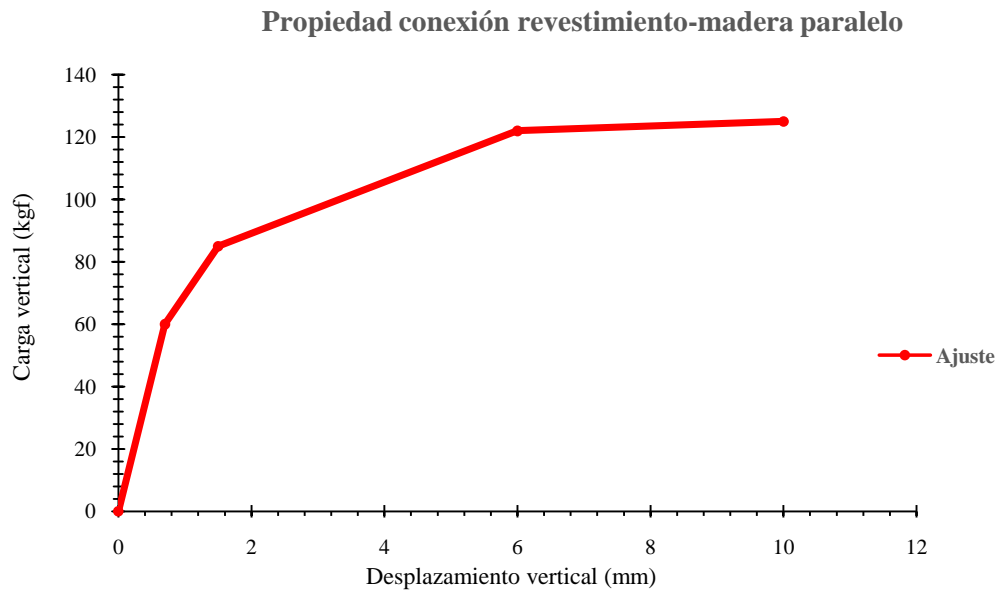


**Figura 8. Ensayo conexión revestimiento-madera paralelo.**

La propiedad del resorte que define el comportamiento paralelo a la fibra de la madera está representada por una curva carga-desplazamiento, como lo muestra el gráfico de la figura 9.

Es importante mencionar que la curva de color rojo es una curva representativa del total de las 10 probetas ensayadas de este tipo y viene a representar la propiedad de comportamiento de deformación paralelo a la fibra de la madera de los clavos

Los detalles del ensayo realizado y los datos que componen el gráfico se encuentran en el anexo B.



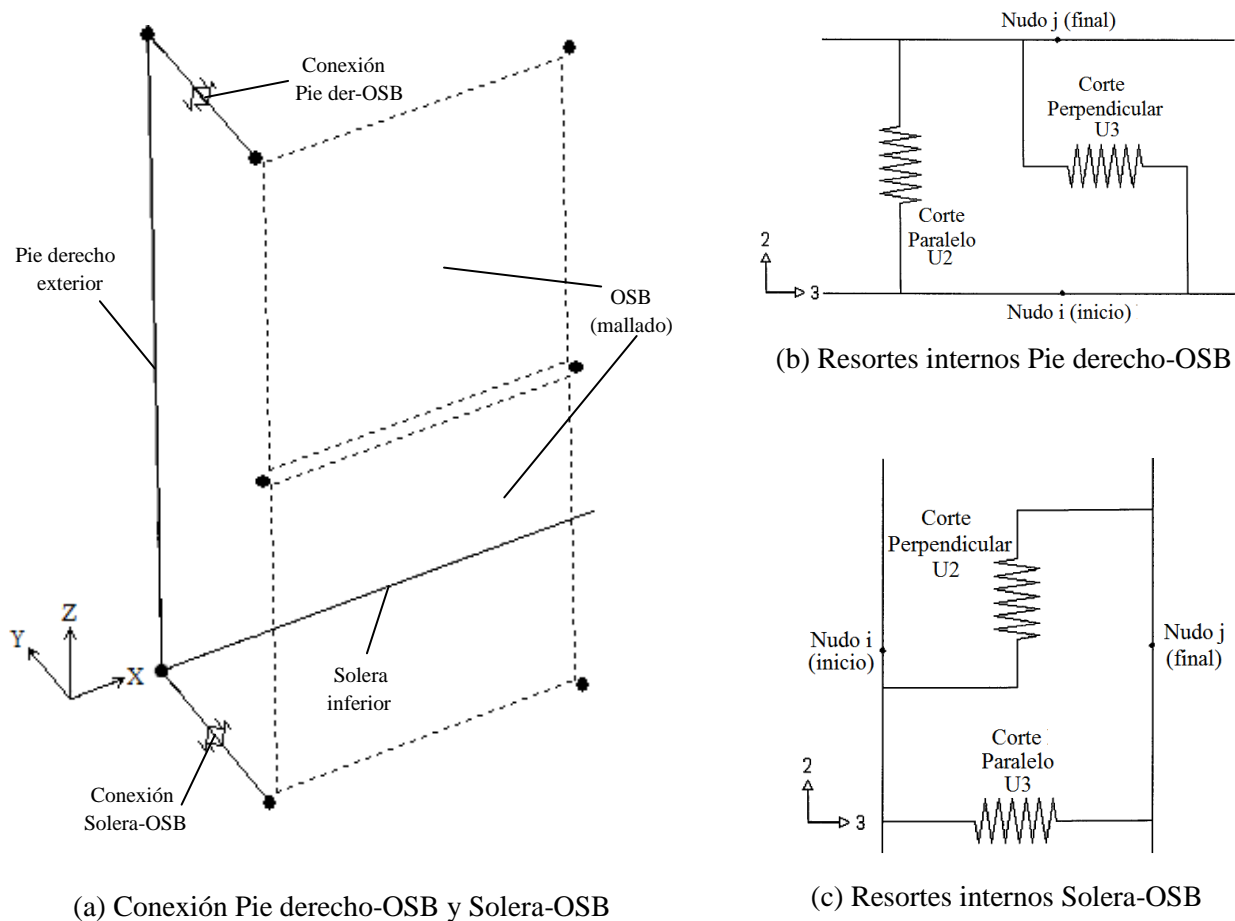
**Figura 9. Gráfico propiedad conexión revestimiento-madera paralelo**



4.4.3 Técnicas de Modelación conexión revestimiento-madera.

Para la conexión entre el pie derecho y la placa de OSB como se aprecia en la figura 10 (a), se activa el grado de libertad U2 ya que representa la deformación por corte paralelo a la fibra de la madera, es decir, a lo largo del eje 2 y se activa U3 que representa una deformación por corte perpendicular a la fibra, a lo largo del eje 3. Ejes 2 y 3 representan los ejes Z y X respectivamente en el esquema de la figura 10(b).

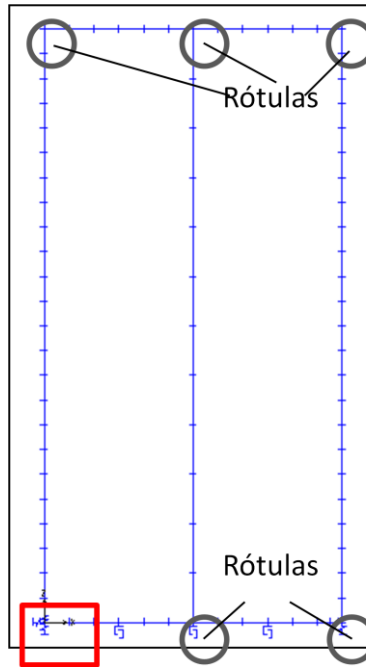
En cambio, para la conexión solera-OSB se activan U2 y U3 tal como en la conexión anterior, sólo que en este caso, se invierten las propiedades asignadas a cada grado de libertad debido a la posición geométrica de los elementos que conforman el marco de madera. Por lo tanto, se compone de una deformación por corte U2 con propiedad de comportamiento perpendicular a la fibra de la madera y una deformación por corte U3 paralela a la fibra. Ejes 2 y 3 representan los ejes Z y X respectivamente, como lo indica el esquema de la figura 10(c).



**Figura 10. Conexión revestimiento-madera.**

#### 4.5 Conexión Madera-Madera

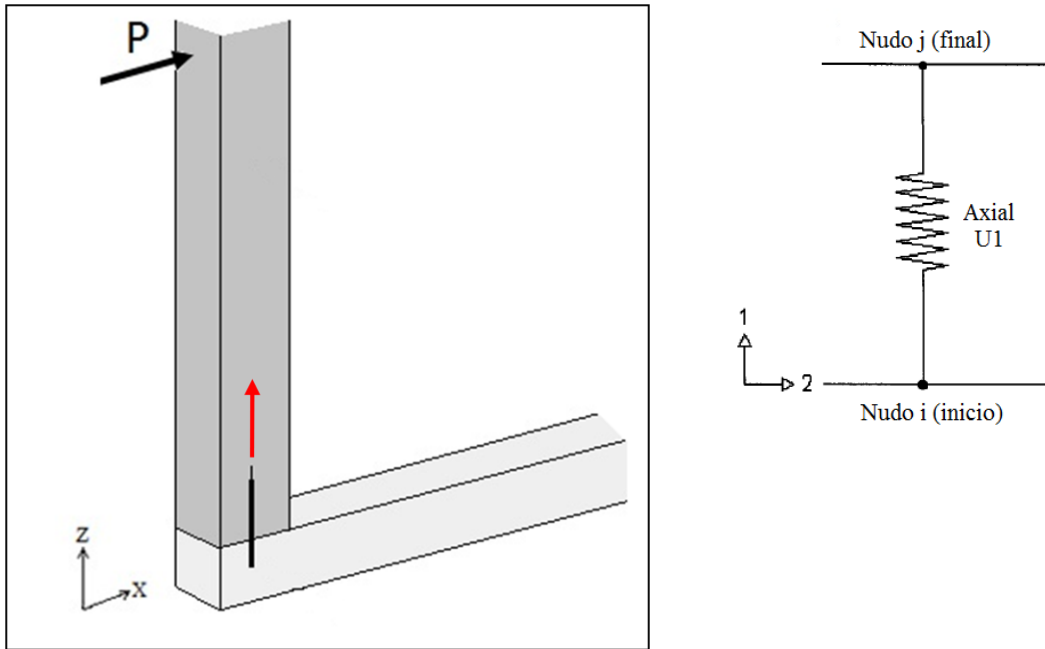
La conexión madera-madera representa la unión entre pies derechos y soleras. Las conexiones madera-madera fueron modeladas aproximadamente a través de uniones tipo rótula por su baja capacidad para transmitir momento y no presentar una gran resistencia al giro de las piezas de madera en los puntos que se muestran encerrados en un círculo en la figura X.



**Figura 11. Ubicación rótulas en bastidor modelado.**

Como se puede apreciar en la figura 11, no todas las conexiones madera-madera fueron rotuladas. Las conexiones externas de la solera inferior se modelan por elementos tipo Two-Joint Link de tipo Multilinear Elastic con propiedades no lineales y consisten en representar el efecto del desclavado del pie derecho exterior con la solera inferior debido a la tracción producida por las cargas laterales, como se aprecia a la derecha de la figura 12.

La conexión madera-madera está compuesta por sólo un resorte interno, por lo que se activa el grado de libertad U1, que es la dirección del desclavado y representa la deformación axial a lo largo del eje 1, eje Z en la parte izquierda de la figura 12.



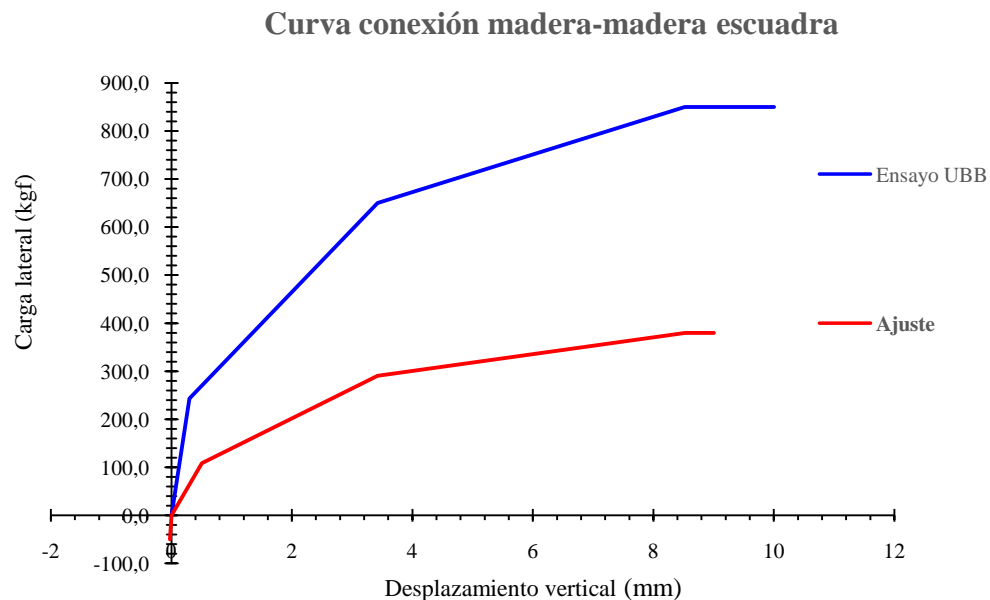
**Figura 12. Resorte interno conexión madera-madera**

La asignación de propiedades de la unión madera-madera está determinada por el sistema de anclaje al cual está sometido el muro de corte. Si bien en el sistema de fierros estriados y en el sistema de pernos y escuadra los pies derechos y soleras están unidos por dos clavos, en este último sistema de anclaje, es la escuadra la que refuerza la conexión pie derecho-solera sumándose a los clavos, aumentando la rigidez inicial y permitir un desclavado más lento y más resistente que en el sistema espárrago.

#### 4.5.1 Conexión madera-madera para sistema escuadra

Para el sistema de pernos y escuadra, se activa el grado de libertad U1 con propiedad no lineal representada por una curva carga-desplazamiento obtenida en un ensayo de herrajes realizado en la Universidad del Bío-Bío (UBB).

De la curva en tracción obtenida por el ensayo, se conservan los desplazamientos y se disminuye la capacidad resistente por un factor de ajuste debido a una diferencia de rigidez en la escuadra ensayada y la que se necesita en este modelo. Además, se le agrega una curva en compresión que considera el índice de aplastamiento normal a la fibra de la madera. El gráfico de la figura 13 muestra la propiedad asignada. En el anexo C se detalla el procedimiento para obtener el factor de ajuste.



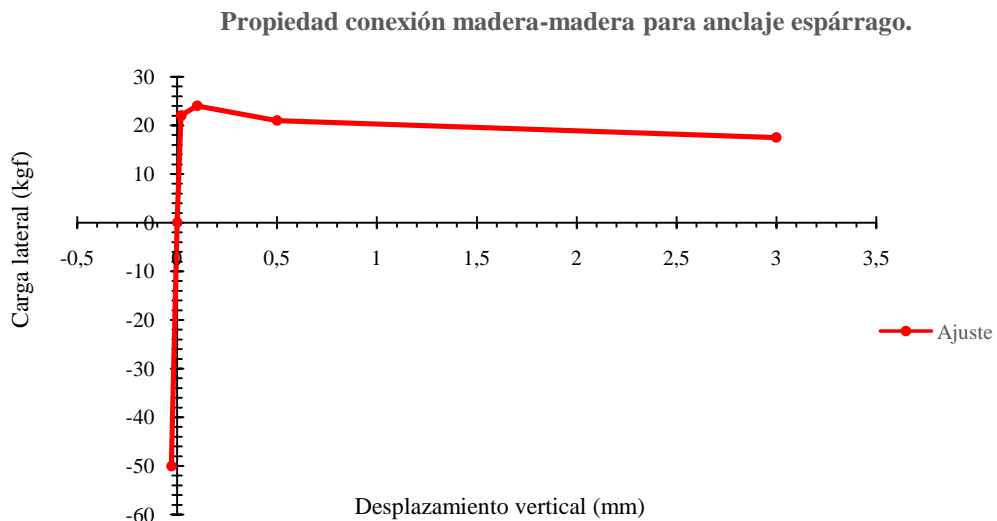
**Figura 13. Propiedad conexión madera-madera sistema escuadra.**

#### 4.5.2 Conexión madera-madera para sistema fierros estriados

Para el sistema de fierros estriados se activa el grado de libertad U1 con propiedad no lineal, la cual está representada por una curva carga-desplazamiento. Los datos obtenidos forman parte de una serie de ensayos de conexión entre pie derecho y solera unidos sólo con clavos, Hongyong Mi (2004). Se agrega también una curva en compresión que considera el índice de aplastamiento a la fibra de la madera.

La propiedad asignada a la conexión madera-madera para un sistema de anclaje de fierros estriados se muestra en la figura 14.

Los datos de las propiedades asignadas a la conexión madera-madera, el detalle de los ensayos y la curva en compresión se encuentran en el anexo C.

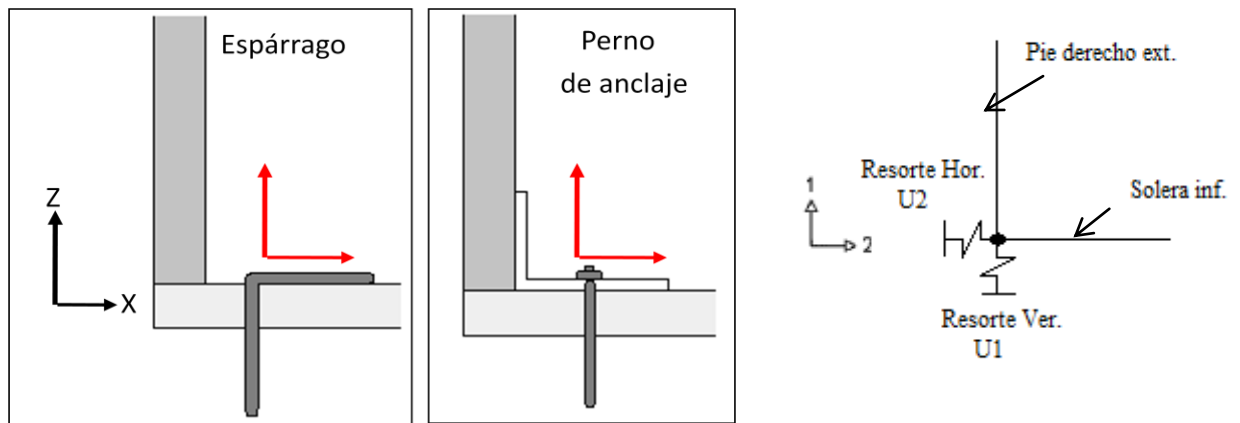


**Figura 14. Propiedad conexión madera-madera sistema fierros estriados.**

#### 4.6 Conexión Sistema de Anclaje

El sistema de anclaje del muro a la fundación aporta rigidez al muro al impedir la flexión de la solera inferior y el levantamiento producido por la tracción generada por las cargas laterales.

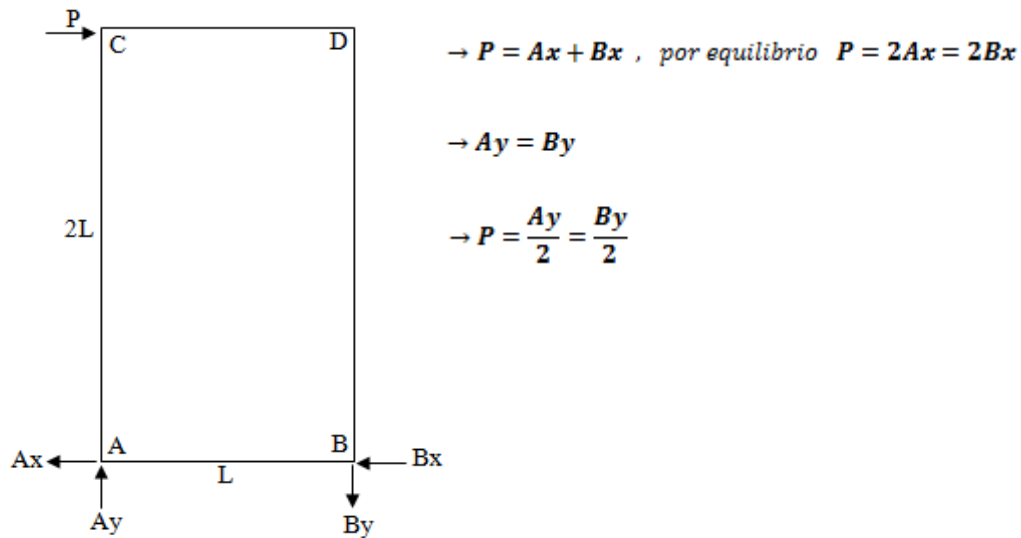
La conexión sistema de anclaje está modelado por elementos One-Joint Link tipo Multilinear Elastic con propiedades no lineales que definen el comportamiento de deformación de los sistemas de anclajes en la dirección de los resortes indicados con flecha roja a la derecha de la figura 15. Se activan los grados de libertad U1 y U2 donde U1 es el resorte vertical y representa la deformación axial a lo largo del eje local 1 y U2 es el resorte horizontal y representa la deformación por corte a lo largo del eje local 2. Esto se indica a la izquierda de la figura 15.



**Figura 15. Resortes internos conexión sistema de anclaje.**

Las propiedades del sistema de anclaje de fierro estriado y de pernos y escuadra están representadas por curvas carga-desplazamiento, las cuales se obtuvieron directamente de los ensayos realizados por el CITEC UBB y posteriormente publicados por INFOR.

Para una apropiada predicción del comportamiento del muro se realiza un análisis de equilibrio de fuerzas, incluyendo la carga horizontal, las reacciones verticales (resorte vertical) y las reacciones horizontales (resorte horizontal) del muro, como se aprecia en la figura 16.



**Figura 16. Diagrama de equilibrio de fuerzas.**

El resultado de este equilibrio de fuerzas tanto para anclaje con fierro estriado como para anclaje de pernos y escuadra, más la rigidez a compresión asignada a cada sistema se resume a continuación:

- Para las propiedades del resorte vertical U1, las cargas de tracción ingresadas al modelo deben ser el doble de las cargas horizontales aplicadas en el ensayo. La carga aplicada indica la tracción del pie derecho del extremo izquierdo del muro, por lo que se asigna a la curva una rigidez a compresión alta, similar a la rigidez axial de una barra de acero de 8mm y un largo de 100mm.
- Para las propiedades del resorte horizontal U2, las cargas de corte ingresadas al modelo deben ser la mitad de las cargas horizontales aplicadas en el ensayo. Además se asignó una rigidez a compresión idéntica en las dos direcciones de carga.

En el anexo D se adjunta el equilibrio de fuerzas realizado y las propiedades asignadas tanto para el resorte vertical como para el resorte horizontal por cada tipología de muro.

#### **4.7 Fundación**

La fundación a la cual está unida el sistema de anclaje del muro se representa mediante elementos One-Joint. Se utiliza la propiedad no lineal tipo gap ya que le indica al programa que este elemento es capaz sólo de trabajar a compresión. Se asigna una alta capacidad de resistencia a compresión pues se trata de una fundación de hormigón.

## 4.8 Tipo de análisis

El tipo de análisis define como las cargas son aplicadas a la estructura (de forma estática o dinámica) y como la estructura responde (lineal o no linealmente), Hongyong Mi (2004).

En este estudio, un análisis estático no lineal es usado en el análisis del muro de corte para considerar los efectos de los materiales no lineales, como las conexiones revestimiento-madera y madera-madera.

### 4.8.1 Control de aplicación de la carga

En un análisis estático no lineal, existen dos diferentes métodos de control de aplicación de la carga, los cuales son carga controlada y desplazamiento controlado. Cuando la magnitud de la carga que será aplicada es conocida y la estructura sea capaz de soportar esa carga, se utiliza el método carga controlada en el análisis. Cuando la deformación de la estructura en un nodo específico es conocida o se desea conocer, se utiliza la opción de desplazamiento controlado.

En este estudio se aplica el método de desplazamiento controlado, debido a que todos los ensayos se llevaron hasta un desplazamiento lateral máximo de 10cm. Al momento de modelar el muro, el grado de libertad horizontal U3 del nudo 3 (punto D3 en la figura 3) fue seleccionado como punto de monitoreo del desplazamiento.

Es importante mencionar que la carga es aplicada en el nodo 2 (Punto D2 en la figura 3) y de tipo Pushover, esto es un método de análisis estático no lineal donde primero actúan las cargas gravitacionales en la estructura produciéndose las primeras deformaciones, luego pasan a actuar las cargas laterales monotónicas que se incrementan, paso a paso, en una dirección hasta que se forma la primera rótula plástica y se presenta una redistribución de rigidez de la estructura, y así prosigue un proceso iterativo hasta que la estructura falla totalmente.

El programa tratará de aplicar esta carga para llegar a un desplazamiento de 100mm. La magnitud de la carga lateral aplicada inicialmente es de 50kg.



#### 4.8.2 Control de solución

Durante el análisis estático no lineal del desplazamiento controlado, el desplazamiento va incrementando hasta llegar al requerido, por lo que una serie de pasos son necesarios para satisfacer el equilibrio. Para resolver las ecuaciones no lineales en cada paso, las iteraciones se llevan a cabo hasta que la solución converge. Si no se logra la convergencia, el programa divide los pasos en sub-pasos más pequeños y lo intenta de nuevo. Hongyong Mi (2004).

La convergencia puede ser controlada mediante una serie de asignaciones tales como:

- Tolerancia de convergencia: Es un criterio que asegura alcanzar el equilibrio en cada paso e influye directamente en el tiempo del análisis. Se utiliza una tolerancia de 0,0001, ya que al utilizar una tolerancia de convergencia cercana a 1 no se realiza un análisis detallado y se obtienen resultados sobredimensionados.
- Máximas iteraciones por paso: Controla el número de iteraciones permitidas en un paso antes de que el programa requiera de un sub-paso más pequeño. Se utiliza un valor de 10.
- Máximos pasos nulos: Los pasos nulos ocurren durante el procedimiento de solución no lineal cuando la iteración no converge y se intenta con un paso más pequeño. Un excesivo número de pasos nulos indica que el programa tiene problemas para converger. Se utilizan 50 pasos nulos a lo máximo.

## 5. VALIDACIÓN DE MODELO

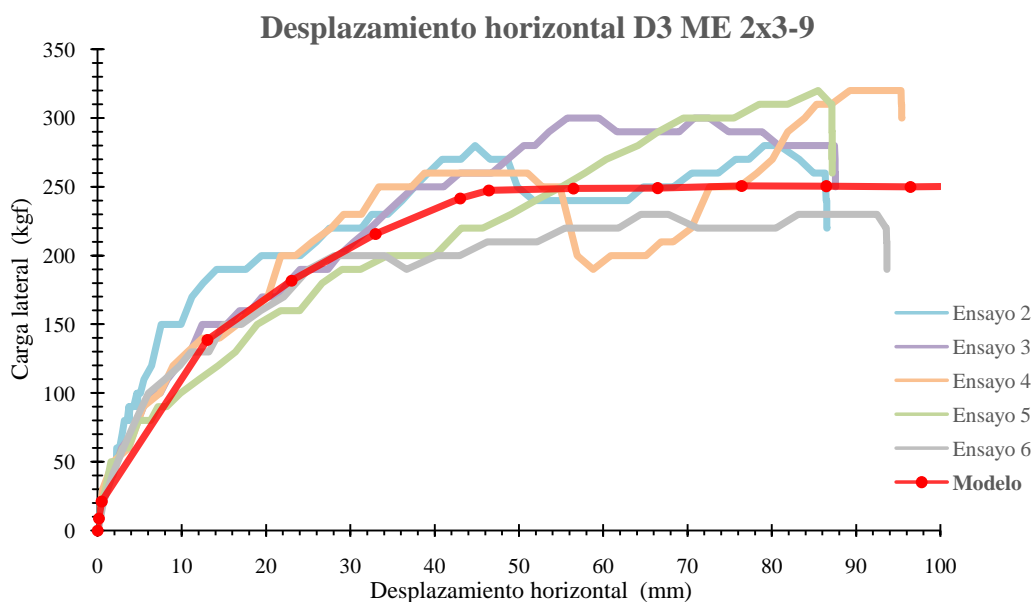
En este capítulo se exponen los resultados de los muros de corte de madera modelados y calibrados en el software computacional SAP2000 mediante un análisis estático no lineal de elementos finitos. Los resultados están expresados en forma de curvas carga horizontal-desplazamiento horizontal y muestran una representación total del comportamiento del muro en su solera superior, específicamente en el punto de monitoreo nodo 3 (D3 figura 3). Se menciona la palabra “total” ya que el muro está conformado por un set de propiedades no lineales en forma de curvas carga-desplazamiento, donde cada una compone el muro en forma independiente.

La validez de los modelos es evaluada por una comparación de los datos que conforman las curvas carga-desplazamiento obtenidas tanto por los ensayos mecánicos como por los modelos numéricos. Específicamente la comparación se centra en la capacidad máxima resistente por ambos métodos y cómo se ven influenciados por el sistema de anclaje, la escuadría y el espesor de la placa OSB utilizados.

### 5.1 Resultados

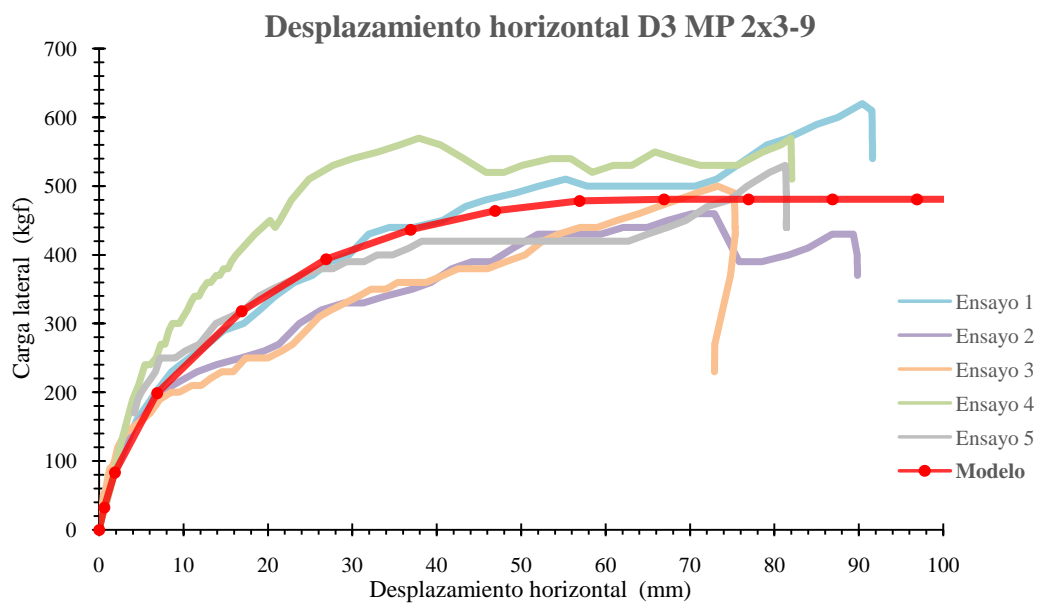
Cada gráfico carga-desplazamiento mostrado desde la figura 8 a la 12 presenta, en forma simultánea, el comportamiento de 5 muros ensayados por cada tipología de muro y la predicción del modelo respectivo para cada tipología de muro.

- Tipología ME 2x3-9:



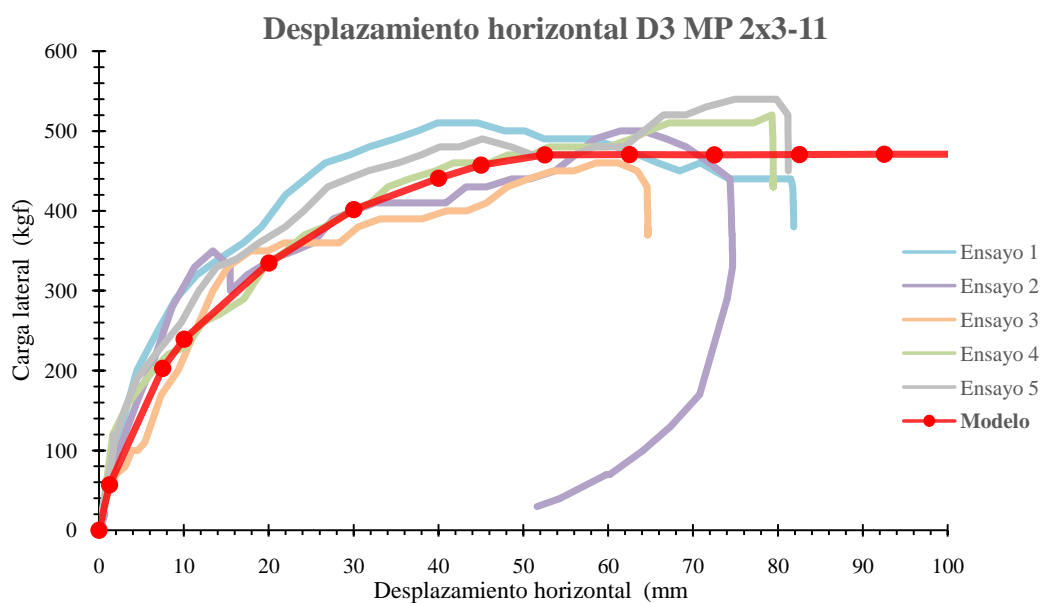
**Figura 17. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología ME 2x3-9.**

- Tipología MP 2x3-9:



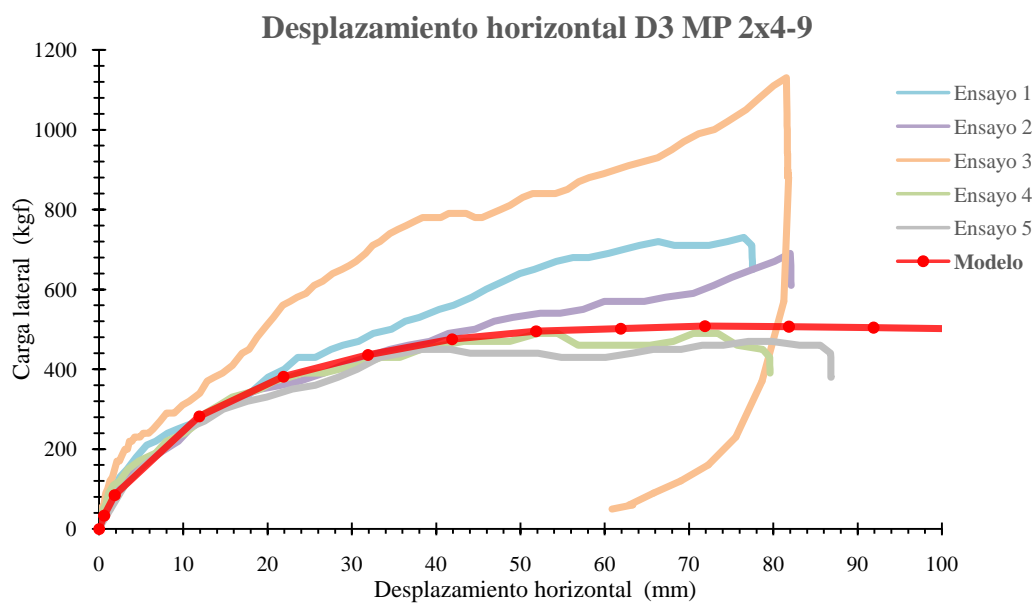
**Figura 18. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x3-9.**

- Tipología MP 2x3-11:



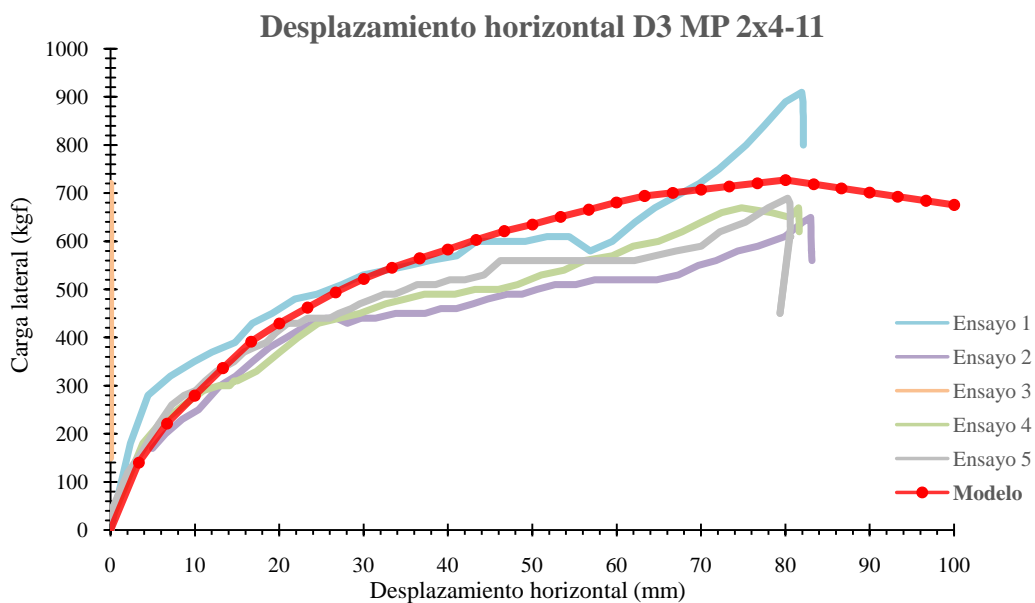
**Figura 19. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x3-11.**

- Tipología MP 2x4-9:



**Figura 20. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x4-9.**

- Tipología MP 2x4-11:



**Figura 21. Gráfico carga-desplazamiento para la tipología MP 2x4-11.**

La tabla 4 resume las cargas máximas y los respectivos desplazamientos máximos obtenidos por los modelos y por los ensayos mecánicos. Tanto la carga máxima como el desplazamiento máximo de los 5 ensayos mecánicos se promediaron. Los datos que componen la predicción en forma de curvas carga-desplazamiento realizada por los modelos se encuentran en el anexo E.

**Tabla 4. Resumen de resultados carga máxima y desplazamiento máximo asociado.**

| Tipología |      | Output<br>SAP2000 | INFOR<br>(promedios) |
|-----------|------|-------------------|----------------------|
| ME 2x3-9  | Cmáx | 250.81            | 290                  |
|           | Dmáx | 76.45             | 74.35                |
| MP 2x3-9  | Cmáx | 481.02            | 536                  |
|           | Dmáx | 76.89             | 78.13                |
| MP 2x3-11 | Cmáx | 470.55            | 506                  |
|           | Dmáx | 62.51             | 60.01                |
| MP 2x4-9  | Cmáx | 508.11            | 702                  |
|           | Dmáx | 71.88             | 75.58                |
| MP 2x4-11 | Cmáx | 508.73            | 728                  |
|           | Dmáx | 80.31             | 79.31                |

Nota: Cmáx: kgf.; Dmáx: mm.

## 5.2 Análisis de resultados

Según la información entregada por los modelos numéricos, al comparar la tipología de muro ME 2x3-9 con MP 2x3-9 se puede apreciar una diferencia significativa, ya que el cambio de sistema de anclaje de fierros estriados a un sistema de anclaje de pernos y escuadra permitió un incremento del 92% en la resistencia promedio a la carga lateral, mientras que en los ensayos mecánicos se observa un incremento de 85%.

La tabla 5 resume lo anterior e indica el porcentaje de diferencia entre las capacidades de los muros modelados y los ensayados.

**Tabla 5. Influencia del cambio de sistema de anclaje.**

|                                                                   | Método | Tipología | C <sub>máx</sub> | Incremento | Diferencia |
|-------------------------------------------------------------------|--------|-----------|------------------|------------|------------|
| Cambio de sistema de anclaje fierro estriado a pernos y escuadras | Ensayo | ME 2x3-9  | 290              | 85%        | 7%         |
|                                                                   |        | MP 2x3-9  | 536              |            |            |
|                                                                   | Modelo | ME 2x3-9  | 250,8            | 92%        |            |
|                                                                   |        | MP 2x3-9  | 481              |            |            |

Por otro lado, en los resultados obtenidos por los modelos se observan los valores de las tipologías con sistema de anclaje de pernos y escuadras (MP 2x3-9, MCP 2x3-11, MP 2x4-9 y MP 2x4-11) y se aprecia una pequeña influencia de la escuadría de los pies derechos en la capacidad resistente de los muros, donde la escuadría 2x4 (45x94 mm.) presenta valores entre un 6% y 8% mayores a las tipologías con escuadría de 2x3 (45x69 mm.). En cambio, en los ensayos mecánicos se nota una clara influencia de la escuadría de mayor dimensión, con valores entre 31% y 44% superiores a la escuadría menor. La tabla 6 indica la influencia en la capacidad de resistencia al cambio de escuadría

**Tabla 6. Influencia del cambio de escuadría.**

|                                | Método | Tipología | C <sub>máx</sub> | Incremento | Diferencia |
|--------------------------------|--------|-----------|------------------|------------|------------|
| Cambio de escuadría 2x3 a 2x4. | Ensayo | MP 2x3-9  | 536              | 31%        | 25%        |
|                                |        | MP 2x4-9  | 702              |            |            |
|                                | Modelo | MP 2x3-9  | 481              | 6%         |            |
|                                |        | MP 2x4-9  | 508.1            |            |            |
|                                | Ensayo | MP 2x3-11 | 506              | 44%        | 36%        |
|                                |        | MP 2x4-11 | 728              |            |            |
|                                | Modelo | MP 2x3-11 | 470.6            | 8%         |            |
|                                |        | MP 2x4-11 | 508.7            |            |            |

Además, tanto para los muros modelados como para los ensayados se determina que al aumentar el espesor de la placa de OSB de 9,5 mm. a 11,1 mm. no se observa un incremento importante en la resistencia a la carga lateral entre las tipologías de muros de una misma escuadría.

La tabla 7 indica la influencia en el comportamiento del muro al cambiar de espesor de placa OSB.

**Tabla 7. Influencia del cambio de espesor de placa OSB.**

|                                                 | Método | Tipología | C <sub>máx</sub> | Relación | Diferencia |
|-------------------------------------------------|--------|-----------|------------------|----------|------------|
| Cambio de espesor placa OSB de 9,5mm. a 11,1mm. | Ensayo | MP 2x3-9  | 536              | 6%       | 4%         |
|                                                 |        | MP 2x3-11 | 506              |          |            |
|                                                 | Modelo | MP 2x3-9  | 481              | 2%       |            |
|                                                 |        | MP 2x3-11 | 470.6            |          |            |
|                                                 | Ensayo | MP 2x4-9  | 702              | 4%       | 4%         |
|                                                 |        | MP 2x4-11 | 728              |          |            |
|                                                 | Modelo | MP 2x4-9  | 508.1            | 0%       |            |
|                                                 |        | MP 2x4-11 | 508.7            |          |            |

Finalmente, en los modelos numéricos se observa que los desplazamientos máximos horizontales asociados a las cargas máximas horizontales no presentaron diferencias significativas entre las tipologías de muro modeladas. Se observaron valores que variaron entre los 63 mm. y 80mm. Similares valores se obtuvieron en los ensayos, cuyos desplazamientos varían entre 60 mm y 79mm.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

El modelo de elementos finitos desarrollado en esta tesis puede realizar un análisis estructural estático no lineal de muros de corte de madera y predecir un comportamiento óptimo y válido en comparación al comportamiento mostrado por los muros de corte ensayados.

El modelo logra capturar el efecto de cambio de sistema de anclaje de fierro estriado a un sistema de pernos y escuadra, ya que se registra un incremento de un 92% en la resistencia promedio a la carga lateral, en comparación al 85% de incremento en la resistencia que arrojaron los ensayos mecánicos.

En cambio, el modelo no logra capturar de forma óptima el efecto de pasar de una escuadría de 2x3” a una de 2x4”. Mientras los ensayos mecánicos registran un 31% y un 44% de incremento en la capacidad resistente de los muros en sus pies derechos, el modelo sólo alcanza a generar un incremento del 6% y 8%. La baja relación entre los ensayos y los modelos se debe principalmente a que la unión entre pies derechos y solera fue modelada como rótula, lo cual en la realidad no es válido. El modelo al estar ausente de rigidez en los encuentros madera-madera actúa como un mecanismo con articulaciones y al intentar oponerse a la carga lateral actuante, no distingue adecuadamente la influencia de una escuadría menor o mayor.

Por último, no se observa un incremento importante en la resistencia a la carga lateral al aumentar el espesor de la placa de OSB.

Durante la etapa de calibración de los modelos, se logró determinar que la propiedad no lineal asignada a la conexión revestimiento-madera afecta fuertemente a la predicción del muro de corte. Debido a la fragilidad del marco de madera, es necesario asegurar la ductilidad del muro mediante clavos que lo conecten a la placa de OSB, de tal forma que la falla del muro se concentre en los clavos pertenecientes a la conexión revestimiento-madera. La conexión revestimiento-madera influye directamente en la capacidad última resistente, pudiendo controlar la carga y el desplazamiento máximo del muro, por lo que para una mayor precisión en la predicción de los modelos, mayor precisión tiene que asignarse a la propiedad.



Existen tiempos en el modelo en el cual las distintas partes que lo conforman van trabajando y se van haciendo presente según sea la exigencia de la carga. Al principio, en el rango lineal, el trabajo en resistir la carga es adquirido principalmente por los clavos del revestimiento muy en paralelo por el sistema de anclaje, luego comienza la no linealidad a ser conducida sólo por los clavos hasta la falla. Por lo tanto, la cota de carga máxima de respuesta está limitada por la conexión que primero alcance la falla. En el caso de los modelos fue el sistema de anclaje.

Respecto a la predicción realizada por los modelos, se observa que a medida que la carga lateral aumenta monotónicamente, la curva de respuesta carga-desplazamiento del modelo comienza con una pendiente creciente típica hasta llegar a la carga última resistente.

En el último tramo de la curva, el panel adquiere un comportamiento horizontal y recto debido a que el resorte vertical del sistema de anclaje logra alcanzar su capacidad máxima resistente frente a las cargas laterales, por lo que el panel no resistirá mayores cargas, reflejando este efecto en una carga máxima constante en los gráficos.

A pesar de que los clavos del revestimiento-madera puedan resistir aún más, esto no se ve reflejado en la curva ya que los pernos o los fierros estriados entran primero en la etapa de fluencia.

## **6.2 Recomendaciones**

La influencia de buenos datos de ingreso de conexión revestimiento-madera es primordial en un modelo de muro de corte de madera que no se condice con la poca información circundante. Por lo tanto, se recomienda realizar ensayos de conexión revestimiento-madera donde se ensayen diversos tipos de clavos que conecten el revestimiento al marco de madera de forma paralela y perpendicular a la fibra de tal manera que se pueda registrar el comportamiento no lineal de éstos en forma de curvas carga-desplazamiento y así tener una base de datos útil y necesaria para futuros modelos de corte de madera.

La madera es fácil de ser trabajada, tiene un largo tiempo de vida útil y es posible emplearla en casi todas las áreas de aplicación. Ningún otro material de construcción como la madera, podrá ser conseguido y empleado con tan poco uso de energía y ser producido sin perjudicar el medio ambiente. Se recomienda seguir fomentando el estudio de la madera como material constructivo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vásquez L., Hernández G., Campos R., González M. (2012). Caracterización mecánica de muros estructurales de madera, Informe técnico N°191, Instituto Forestal (INFOR), Chile.
- [2] 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.
- [3] Fuentealba B. (2014). Modelación numérica de muros de corte de madera bajo cargas laterales monotónicas. Proyecto de título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile.
- [4] Yuen Loo W., Quenneville P., Chouw N. (2012). A numerical approach for simulating the behaviour of timber shear walls. Departamental of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- [5] 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.
- [6] Jain A., Hart G., Ekwueme C., Dumortier A. (2004). Performance based Pushover Analysis of wood framed buildings. 13th world conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada.
- [7] SAP2000, versión 14.0: *Analysis reference manual*. Computer and Estructures, Inc., 2009.
- [8] 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.

[9] Canales, V., Gutiérrez, G. (1994). Análisis no lineal de muros de madera mediante modelos de elementos finitos. Memoria para obtener el título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad de Santiago de Chile.

[10] Carvallo, V. (1989). Antecedentes Básicos sobre el Comportamiento Estructural de Diafragmas Verticales Solicitados por Cargas Horizontales Inducidas en su Plano. Instituto Forestal (INFOR), Chile.

[11] Eliud Hernández, Computers and Structures, Inc., Análisis No Lineal.

[http://kheops.webs.com/documents/AENL\\_Pushover\\_PRM%20de%20Concreto%20Armado\\_Feb%202009.pdf](http://kheops.webs.com/documents/AENL_Pushover_PRM%20de%20Concreto%20Armado_Feb%202009.pdf). Acceso el 16 de Julio de 2015.

[12] Corporación Chilena de la madera, Corma. Manual de la construcción de viviendas en madera, Capítulo 1.

[http://www.cttmadera.cl/wp-content/uploads/2007/03/unidad\\_1-madera.pdf](http://www.cttmadera.cl/wp-content/uploads/2007/03/unidad_1-madera.pdf). Acceso el 08 de abril de 2015.

[13] Nicolas Richard, Laurent Daudeville, Helmut Prion, Frank Lam. Timber shear walls with large openings: Experimental and numerical prediction of the structural behaviour, 2002.

<http://geo.hmg.inpg.fr/~daudevil/publis/CJCE.pdf>. Acceso el 14 de julio de 2015.

## **8. ANEXOS**

## ÍNDICE GENERAL ANEXOS

|               |    |
|---------------|----|
| Anexo A ..... | 43 |
| Anexo B.....  | 45 |
| Anexo C.....  | 53 |
| Anexo D.....  | 58 |
| Anexo E.....  | 71 |

## ÍNDICE DE TABLAS ANEXOS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla A1. Carga máxima horizontal, resultados ensayos mecánicos.....                      | 44 |
| Tabla A2. Desplazamiento horizontal para carga máxima, resultados ensayos mecánicos. .... | 44 |
| Tabla B1. Resultados ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular. ....             | 47 |
| Tabla B2. Propiedad asignada a la conexión revestimiento-madera perpendicular. ....       | 48 |
| Tabla B3. Resultados ensayo conexión revestimiento-madera paralelo. ....                  | 50 |
| Tabla B4. Propiedad asignada a la conexión revestimiento-madera paralelo. ....            | 51 |
| Tabla C1. Resultados y ajuste conexión madera-madera, sistema de fierros estriados.....   | 55 |
| Tabla C2. Factor de ajuste escuadra. ....                                                 | 56 |
| Tabla C3. Propiedad conexión madera-madera escuadra.....                                  | 56 |
| Tabla D1. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje ME 2x3-9.....            | 61 |
| Tabla D2. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje ME 2x3-9.....          | 62 |
| Tabla D3. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-9 .....           | 63 |
| Tabla D4. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-9.....          | 64 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla D5. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-11 .....   | 65 |
| Tabla D6. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-11 ..... | 66 |
| Tabla D7. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x4-9 .....    | 67 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura B1. Probeta ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular a la fibra. .... | 46 |
| Figura B2. Gráfico resultados ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular. .... | 48 |
| Figura B3. Ensayo conexión revestimiento-madera paralelo. ....                         | 49 |
| Figura B4. Gráfico resultados ensayo conexión revestimiento-madera paralelo. ....      | 51 |
| Figura B5. Propiedades asignadas a conexión revestimiento-madera. ....                 | 52 |
| <br>                                                                                   |    |
| Figura C1. Ensayo de desclavado conexión madera-madera .....                           | 54 |
| Figura C2. Conexión madera-madera y ajuste para sistema de fierros estriados. ....     | 55 |
| Figura C3. Conexión madera-madera y ajuste para sistema de escuadra. ....              | 57 |
| <br>                                                                                   |    |
| Figura D1. Diagrama equilibrio de fuerzas. ....                                        | 59 |
| Figura D2. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje ME 2x3-9. ....         | 61 |
| Figura D3. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje ME 2x3-9. ....       | 62 |
| Figura D4. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-9. ....         | 63 |
| Figura D5. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-9. ....       | 64 |
| Figura D6. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-11. ....        | 65 |
| Figura D7. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-11. ....      | 66 |
| Figura D8. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x4-9. ....         | 67 |
| Figura D9. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x4-9. ....       | 68 |
| Figura D10. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x4-11. ....       | 69 |
| Figura D11. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x4-11. ....     | 70 |

## **Anexo A**

### **Resultados Ensayos mecánicos publicados por INFOR**

**RESULTADOS ENSAYOS MECÁNICOS (CARGA MÁX. Y DESP. ASOCIADO)**

La tabla A1 muestra los resultados de las 5 cargas horizontales máximas obtenidos en los ensayos mecánicos por cada tipología de muro y el promedio respectivo. Las cargas máximas fueron registradas en la solera superior en el punto D3 (figura 3).

**Tabla A1. Carga máxima horizontal, resultados ensayos mecánicos.**

| <b>Carga máxima horizontal (Kgf)</b> |                 |                 |                  |                 |                  |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| <b>N° ensayo</b>                     | <b>ME 2x3-9</b> | <b>MP 2x3-9</b> | <b>MP 2x3-11</b> | <b>MP 2x4-9</b> | <b>MP 2x4-11</b> |
| <b>1</b>                             | 280             | 620             | 510              | 730             | 910              |
| <b>2</b>                             | 300             | 460             | 500              | 690             | 650              |
| <b>3</b>                             | 320             | 500             | 460              | 1130            | 720              |
| <b>4</b>                             | 320             | 570             | 520              | 490             | 670              |
| <b>5</b>                             | 230             | 530             | 540              | 470             | 690              |
| <b>Promedio</b>                      | <b>290</b>      | <b>536</b>      | <b>506</b>       | <b>702</b>      | <b>728</b>       |

La tabla A2 en cambio, muestra los resultados de los desplazamientos horizontales asociados a las 5 cargas máximas horizontales por cada tipología de muro ensayado y el promedio respectivo.

**Tabla A2. Desplazamiento horizontal para carga máxima, resultados ensayos mecánicos.**

| <b>Desplazamiento horizontal para carga máxima (mm)</b> |                 |                 |                  |                 |                  |
|---------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| <b>N° ensayo</b>                                        | <b>ME 2x3-9</b> | <b>MP 2x3-9</b> | <b>MP 2x3-11</b> | <b>MP 2x4-9</b> | <b>MP 2x4-11</b> |
| <b>1</b>                                                | 72,48           | 88.58           | 24.58            | 72.48           | 80.87            |
| <b>2</b>                                                | 66.7            | 70.28           | 60.83            | 80.35           | 80.41            |
| <b>3</b>                                                | 66.65           | 71.81           | 59.94            | 78.77           | 79.88            |
| <b>4</b>                                                | 79.55           | 80.44           | 76.93            | 70.11           | 79.21            |
| <b>5</b>                                                | 86.37           | 79.54           | 77.76            | 76.17           | 76.16            |
| <b>Promedio</b>                                         | <b>74.35</b>    | <b>78.13</b>    | <b>60.01</b>     | <b>75.58</b>    | <b>79.31</b>     |



## **Anexo B**

### **Propiedades conexión revestimiento-madera**

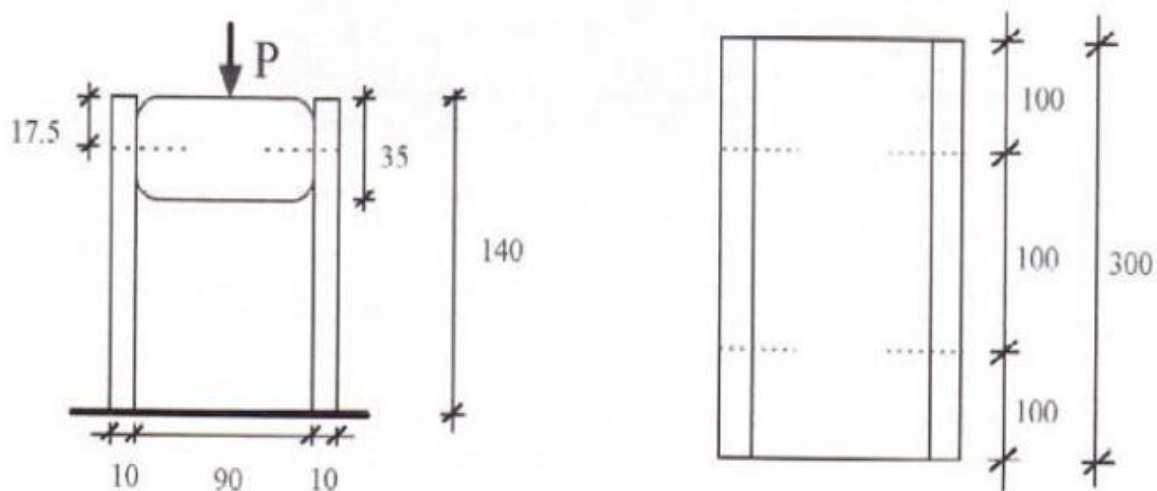
## PROPIEDADES CONEXIÓN REVESTIMIENTO-MADERA

En el modelo se considera que el comportamiento no lineal de los clavos de la conexión revestimiento-madera es distinto frente a cargas laterales paralelas y perpendiculares a la fibra de la madera.

Es importante mencionar, que las propiedades asignadas tienen forma de curvas carga-desplazamiento y son obtenidas mediante un ajuste, el cual representa en una sola curva la totalidad de las curvas obtenidas por los ensayos.

### Conexión revestimiento-madera perpendicular

En la Universidad de Santiago de Chile, Leiva J. y Vilches P. ensayan un total de 10 probetas de unión revestimiento-madera con carga lateral perpendicular a la fibra de madera utilizada en el ensayo. La probeta consiste en una pieza de escuadría 35x90 mm. y de 300 mm. de longitud, revestida por ambos lados por una placa de pino radiata de 10 mm. de espesor con dimensiones de 300x140 mm. conectadas por 4 clavos helicoidales de 50x2,8 mm. La figura B1 representa la probeta de ensayo utilizada.



**Figura B1. Probeta ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular a la fibra.**

La tabla B1 muestra los resultados obtenidos por el ensayo de conexión revestimiento-madera perpendicular a la fibra de madera.

**Tabla B1. Resultados ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular.**

| <b>Ensayo 1</b> |             | <b>Ensayo 2</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 1.3             | 115         | 2               | 87.5        |
| 7.2             | 175         | 11.2            | 195         |
| 11              | 100         | 22              | 150         |

| <b>Ensayo 3</b> |             | <b>Ensayo 4</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 1.3             | 62.5        | 2               | 80          |
| 9.8             | 145         | 10              | 152.5       |
| 16              | 100         | 19              | 117.5       |

| <b>Ensayo 5</b> |             | <b>Ensayo 6</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 1               | 62.5        | 4               | 110         |
| 7               | 137.5       | 12              | 180         |
| 12              | 100         | 16              | 162.5       |

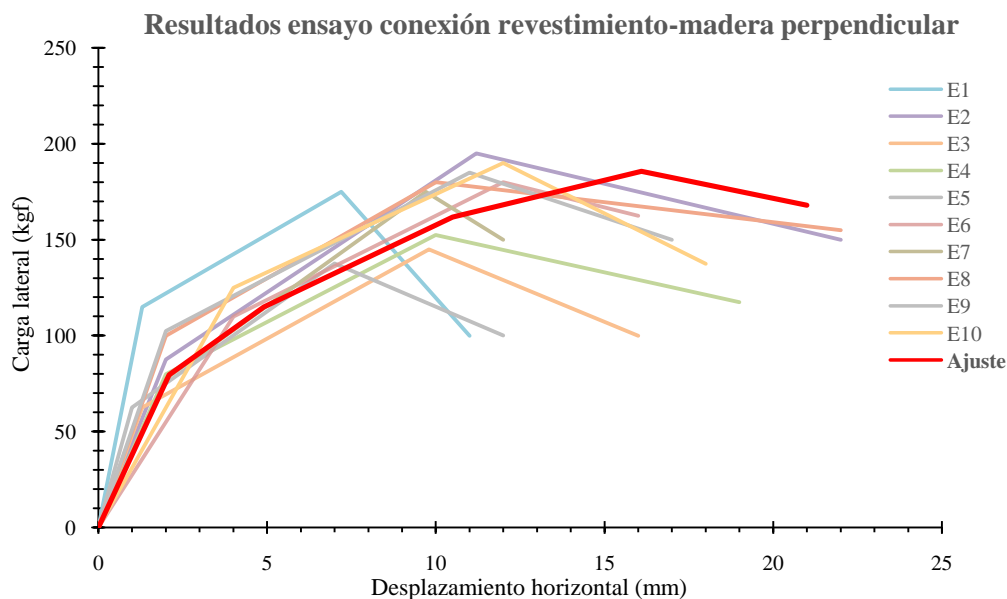
  

| <b>Ensayo 7</b> |             | <b>Ensayo 8</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 2               | 77.5        | 2               | 100         |
| 9.7             | 175         | 10              | 180         |
| 12              | 150         | 22              | 155         |

| <b>Ensayo 9</b> |             | <b>Ensayo 10</b> |             |
|-----------------|-------------|------------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)        | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0                | 0           |
| 2               | 102.5       | 4                | 125         |
| 11              | 185         | 12               | 190         |
| 17              | 150         | 18               | 137.5       |

La figura B2 muestra un gráfico que resume los resultados indicados en la tabla B1 en forma de curvas carga-desplazamiento. Además, se señala una curva de tipo ajuste, el cual representa la propiedad no lineal asignada a la conexión revestimiento-madera perpendicular.



**Figura B2. Gráfico resultados ensayo conexión revestimiento-madera perpendicular.**

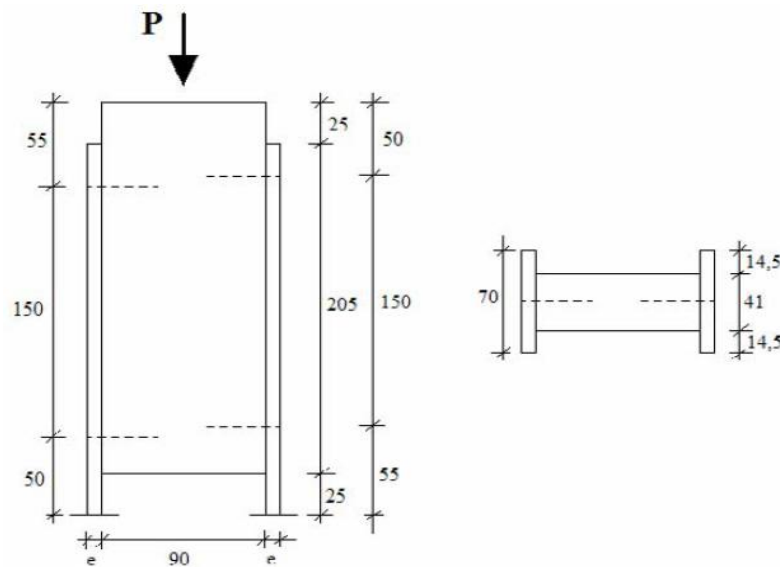
En la tabla B2 se indica la propiedad asignada a la conexión revestimiento-madera perpendicular con comportamiento idéntico en las dos direcciones de carga horizontal.

**Tabla B2. Propiedad asignada a la conexión revestimiento-madera perpendicular.**

| <b>Propiedad conexión revestimiento-madera perpendicular</b> |                    |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Desp (mm)</b>                                             | <b>Carga (kgf)</b> |
| 0                                                            | -167.93            |
| 1.47                                                         | -185.60            |
| 3.43                                                         | -161.74            |
| 7.35                                                         | -114.90            |
| 11.27                                                        | -79.54             |
| 0                                                            | 0                  |
| 2.1                                                          | 79.54              |
| 4.9                                                          | 114.90             |
| 10.5                                                         | 161.74             |
| 16.1                                                         | 185.60             |
| 21                                                           | 167.93             |

### Conexión revestimiento-madera paralelo

En la Universidad Austral de Chile, Rademacher realiza un ensayo de 10 probetas de conexión revestimiento-madera con cargas verticales paralelas a la fibra de la madera y consiste en aplicar sobre la parte superior de la probeta una carga vertical por medio de un sistema hidráulico, donde el descenso de la pieza de madera se registra por medio de un transductor de deformación, de tal forma de poder obtener el valor de las deformaciones sufridas por los clavos de conexión. Tal como lo muestra la figura B3.



**Figura B3. Ensayo conexión revestimiento-madera paralelo.**

La tabla B3 muestra los resultados obtenidos por el ensayo de conexión revestimiento-madera paralelo a la fibra de madera.

**Tabla B3. Resultados ensayo conexión revestimiento-madera paralelo.**

| <b>Ensayo 1</b> |             | <b>Ensayo 2</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 1               | 60          | 1               | 62          |
| 2.4             | 90          | 2.4             | 100         |
| 5.4             | 113         | 5.5             | 114         |
| 10              | 120         | 10.5            | 130         |

| <b>Ensayo 3</b> |             | <b>Ensayo 4</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 1               | 70          | 0.7             | 60          |
| 1.4             | 86          | 1.5             | 80          |
| 3.4             | 110         | 3               | 100         |
| 5.6             | 120         | 8               | 130         |
| 8               | 120         | 10.6            | 135         |

| <b>Ensayo 5</b> |             | <b>Ensayo 6</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 1               | 73          | 1               | 82          |
| 1.4             | 90          | 1.6             | 98          |
| 2.9             | 110         | 4               | 120         |
| 6.2             | 127         | 8.2             | 112         |

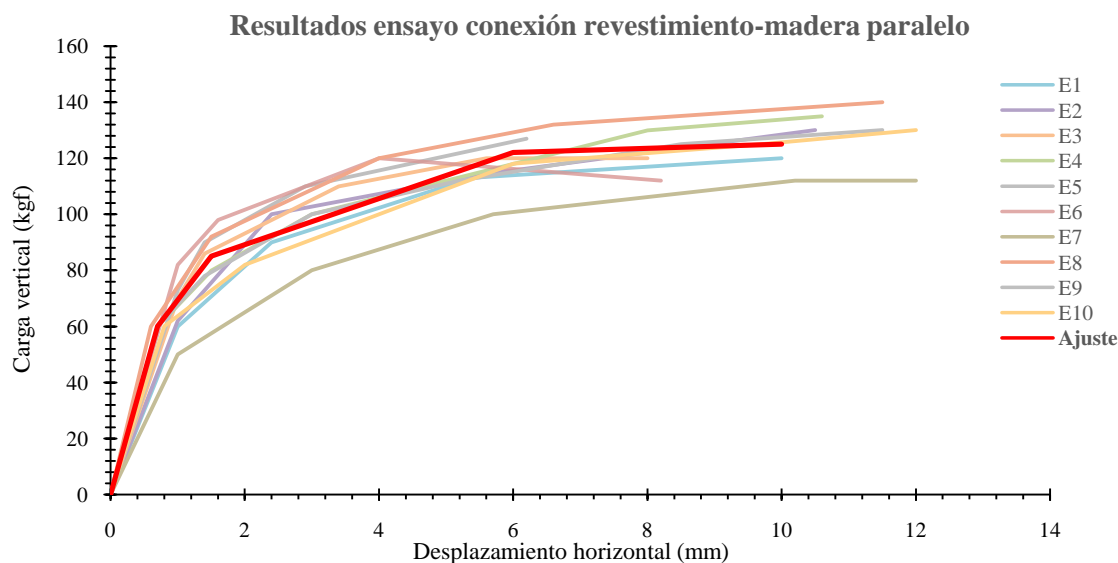
  

| <b>Ensayo 7</b> |             | <b>Ensayo 8</b> |             |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)       | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0               | 0           |
| 1               | 50          | 0.6             | 60          |
| 3               | 80          | 1.5             | 92          |
| 5.7             | 100         | 4               | 120         |
| 10.2            | 112         | 6.6             | 132         |
| 12              | 112         | 11.5            | 140         |

| <b>Ensayo 9</b> |             | <b>Ensayo 10</b> |             |
|-----------------|-------------|------------------|-------------|
| Desp (mm)       | Carga (kgf) | Desp (mm)        | Carga (kgf) |
| 0               | 0           | 0                | 0           |
| 0.7             | 60          | 0.8              | 60          |
| 1.4             | 78          | 2                | 82          |
| 3               | 100         | 6                | 118         |
| 5.2             | 112         | 9.7              | 125         |
| 8.5             | 125         | 12               | 130         |

La figura B4 muestra un gráfico que resume los resultados indicados en la tabla B3 en forma de curvas carga-desplazamiento. Además, se señala una curva de tipo ajuste, el cual representa la propiedad no lineal asignada a la conexión revestimiento-madera paralela.



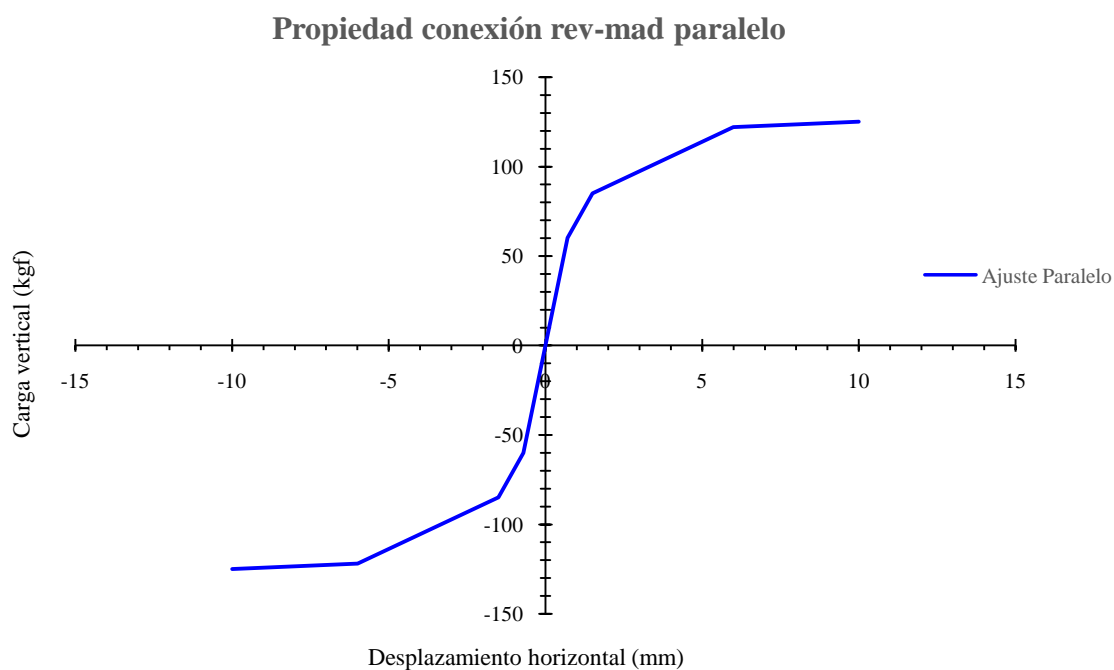
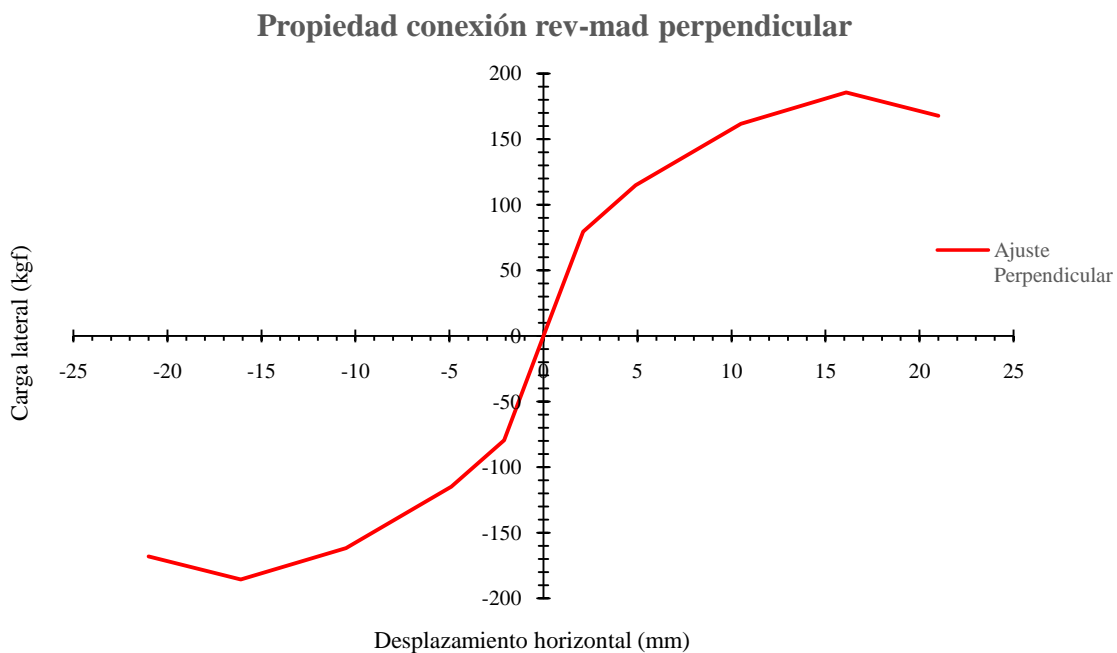
**Figura B4. Gráfico resultados ensayo conexión revestimiento-madera paralelo.**

En la tabla B4 se indica la propiedad asignada a la conexión revestimiento-madera paralelo con comportamiento idéntico en las dos direcciones de carga horizontal.

**Tabla B4. Propiedad asignada a la conexión revestimiento-madera paralelo.**

| <b>Propiedad conexión revestimiento-madera paralelo</b> |                    |
|---------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Desp (mm)</b>                                        | <b>Carga (kgf)</b> |
| -10                                                     | -125               |
| -6                                                      | -122               |
| -1.5                                                    | -85                |
| -0.7                                                    | -60                |
| 0                                                       | 0                  |
| 0.7                                                     | 60                 |
| 1.5                                                     | 85                 |
| 6                                                       | 122                |
| 10                                                      | 125                |

La figura B5 muestra dos gráficos que indican la propiedad asignada a la conexión revestimiento-madera perpendicular y paralelo a la fibra de madera en forma de curvas carga-desplazamiento.



**Figura B5. Propiedades asignadas a conexión revestimiento-madera.**



## **Anexo C**

### **Propiedades conexión madera-madera**

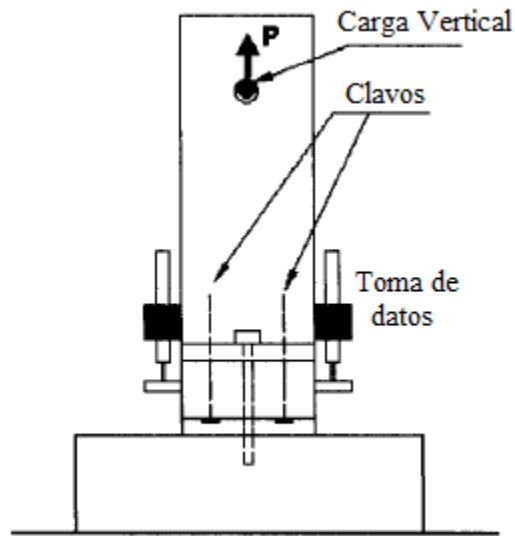
## PROPIEDADES CONEXIÓN MADERA-MADERA

La asignación de propiedades de la unión madera-madera está determinada por el sistema de anclaje al cual está sometido el muro de corte.

Las propiedades asignadas tienen forma de curvas carga-desplazamiento y son obtenidas mediante ajustes de las curvas obtenidas. El ajuste pretende facilitar el ingreso de datos al modelo.

### Conexión madera-madera para el sistema de anclaje de fierros estriados

En la Universidad de New Brunswick, Hongyong Mi realiza un ensayo de conexión madera-madera que simula el desclavado simple, por efectos de carga vertical, entre un pie derecho y una solera anclada con pernos a una fundación metálica. La figura C1 muestra un diagrama del ensayo.



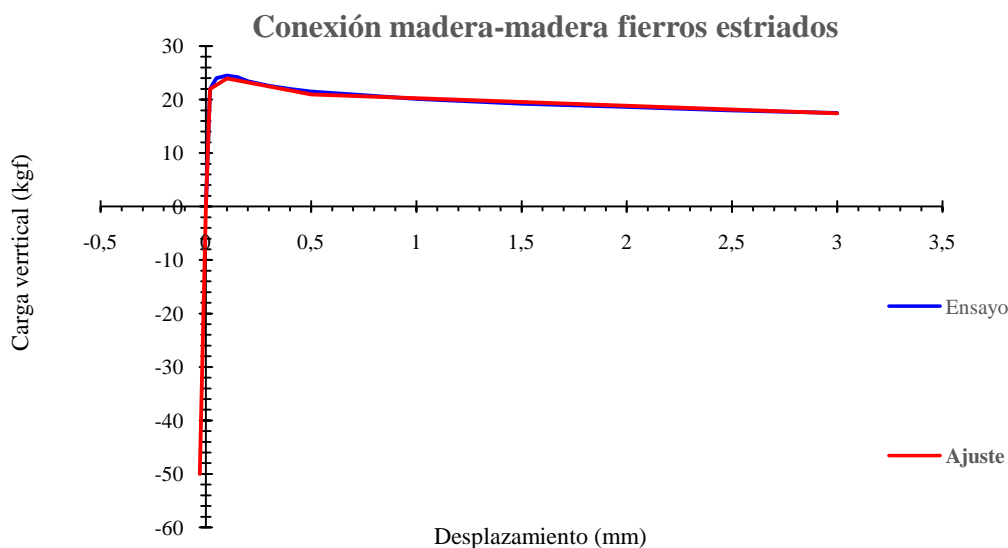
**Figura C1. Ensayo de desclavado conexión madera-madera**

La tabla C1 muestra los resultados obtenidos por el ensayo de conexión madera-madera, donde la unión es exclusivamente por clavos. Además muestra el ajuste realizado con la rigidez a compresión asignada.

**Tabla C1. Resultados y ajuste conexión madera-madera, sistema de fierros estriados.**

| Ensayo conexión madera-madera, desclavado simple |             | Propiedad conexión madera-madera, sistema fierros estriados. |             |
|--------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------|-------------|
| Desp (mm)                                        | Carga (kgf) | Desp (mm)                                                    | Carga (kgf) |
| 0                                                | 0           | -0.0285                                                      | -50         |
| 0.02                                             | 22          | 0                                                            | 0           |
| 0.05                                             | 24          | 0.02                                                         | 22          |
| 0.1                                              | 24.5        | 0.1                                                          | 24          |
| 0.15                                             | 24.2        | 0.5                                                          | 21          |
| 0.2                                              | 23.4        | 3                                                            | 17.5        |
| 0.3                                              | 22.6        |                                                              |             |
| 0.4                                              | 22          |                                                              |             |
| 0.5                                              | 21.5        |                                                              |             |
| 1                                                | 20.1        |                                                              |             |
| 1.5                                              | 19.2        |                                                              |             |
| 2                                                | 18.6        |                                                              |             |
| 2.5                                              | 18          |                                                              |             |
| 3                                                | 17.5        |                                                              |             |

La figura C2 muestra un gráfico que resume lo indicado en la tabla C1, con su respectivo ajuste utilizado como propiedad.



**Figura C2. Conexión madera-madera y ajuste para sistema de fierros estriados.**

### Conexión madera-madera para el sistema de anclaje de pernos y escuadras

La curva carga-desplazamiento obtenida por un ensayo de herrajes realizado en la Universidad del Bío-Bío. Como la escuadra ensayada posee mayor espesor y dimensiones que la escuadra requerida para los modelos, se procede a disminuir la rigidez de la escuadra ensayada como una forma de equilibrar ambas escuadras. La tabla C2 indica las características de la escuadra ensayada y la requerida y luego el factor de ajuste.

**Tabla C2. Factor de ajuste escuadra.**

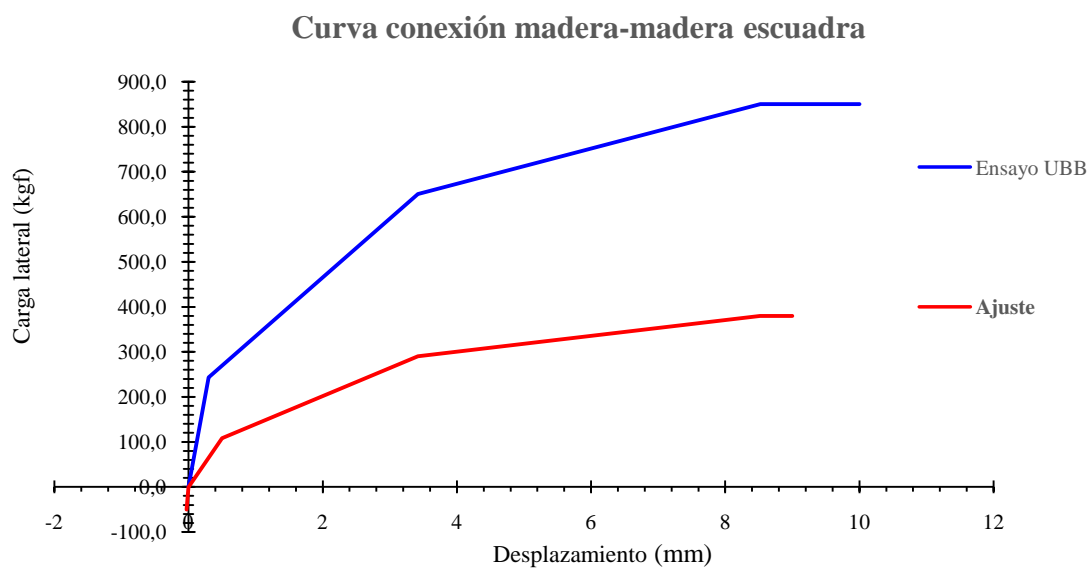
|                         | Ensayo  | Modelo | Factor      |
|-------------------------|---------|--------|-------------|
| Espesor                 | 3.00    | 3.00   | 1.00        |
| #Clavos                 | 2.00    | 3.00   | 1.50        |
| Ancho                   | 60.00   | 38.00  |             |
| Volado                  | 35.00   | 45.00  |             |
| Rigidez/E               | 1889.21 | 562.96 | 0.30        |
| Rigidez global          |         |        | 0.45        |
| <b>Factor de ajuste</b> |         |        | <b>2.24</b> |

La tabla C3 muestra los resultados del comportamiento en forma de curvas carga-desplazamiento de la escuadra ensayada y la propiedad asignada a la conexión madera-madera ajustada por el factor de ajuste de la escuadra del modelo.

**Tabla C3. Propiedad conexión madera-madera escuadra.**

| Ensayo Escuadra UBB |             | Propiedad conexión mad-mad escuadra |             |
|---------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| Desp (mm)           | Carga (kgf) | Desp (mm)                           | Carga (kgf) |
| 0                   | 0.0         | -0.0285                             | -50         |
| 0.3                 | 243.0       | 0                                   | 0.0         |
| 3.42                | 650.0       | 0.3                                 | 108.5       |
| 8.52                | 850.0       | 3.42                                | 290.2       |
| 10                  | 850.0       | 8.52                                | 379.5       |
|                     |             | 10                                  | 379.5       |

La figura C3 muestra el gráfico de las curvas carga-desplazamiento indicada en la tabla C3.



**Figura C3. Conexión madera-madera y ajuste para sistema de escuadra.**

## **Anexo D**

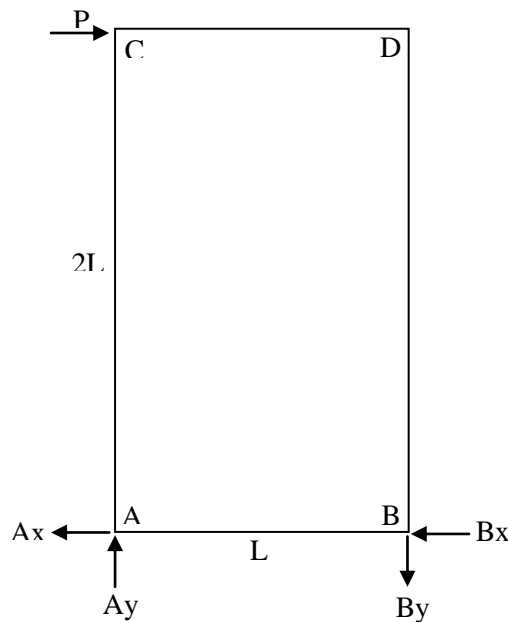
### **Propiedades conexión sistema de anclaje**

## PROPIEDADES CONEXIÓN SISTEMA DE ANCLAJE

Las propiedades del sistema de anclaje de fierro estriado y de pernos y escuadra están representadas por curvas carga-desplazamiento, las cuales se obtuvieron directamente de los ensayos realizados por el CITEC UBB y posteriormente publicados por INFOR.

Para una apropiada predicción del comportamiento del muro se realiza un análisis de equilibrio de fuerzas, incluyendo la carga horizontal, las reacciones verticales (resorte vertical) y las reacciones horizontales (resorte horizontal) del muro.

La figura D1 muestra el diagrama utilizado para el análisis de equilibrio de fuerzas.



**Figura D1. Diagrama equilibrio de fuerzas.**

Según el análisis de equilibrio de fuerzas, se tiene que:

$$\sum F_x = P - Ax - Bx = 0 \quad \rightarrow P = Ax + Bx, \text{ por equilibrio } P = 2Ax = 2Bx$$

$$\sum F_y = Ay - By = 0 \quad \rightarrow Ay = By$$

$$\sum MA = -P \cdot 2L + By \cdot L = 0 \quad \rightarrow P = \frac{Ay}{2} = \frac{By}{2}$$

De la solución anterior, se determina que para las propiedades del resorte vertical U1, las cargas de tracción ingresadas al modelo deben ser el doble de las cargas horizontales aplicadas en el ensayo y que para las propiedades del resorte horizontal U2, las cargas de corte ingresadas al modelo deben ser la mitad de las cargas horizontales aplicadas en el ensayo.

Las propiedades asignadas a la conexión sistema de anclaje se obtuvieron mediante un ajuste de curva carga-desplazamiento para cada tipología de muro ensayada. El ajuste representa la totalidad de las curvas ensayadas y sirve para ingresar la propiedad al modelo.

### **Propiedades resortes verticales.**

El ajuste realizado y las propiedades asignadas a los resortes verticales de cada tipología de muro están indicadas en las tablas D1, D3, D5, D7, D9.

Los gráficos curvas carga-desplazamiento de los resortes verticales por cada tipología de muro se muestran en las figuras D2, D4, D6, D8, D10.

### **Propiedades resortes horizontales**

En las tablas D2, D4, D6, D8, D10 se indica el ajuste realizado en el resorte horizontal y las propiedades asignadas a los resortes horizontales de cada tipología de muro.

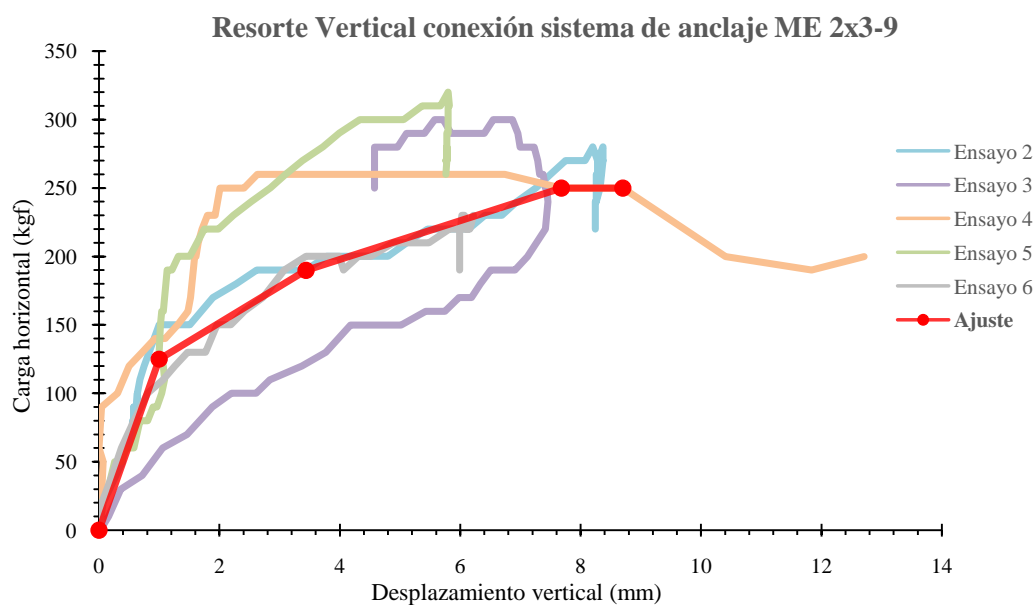
Los gráficos curvas carga-desplazamiento de los resortes horizontales por cada tipología de muro se muestran en las figuras D3, D5, D7, D9, D11.



- ME 2x3-9:

**Tabla D1. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje ME 2x3-9**

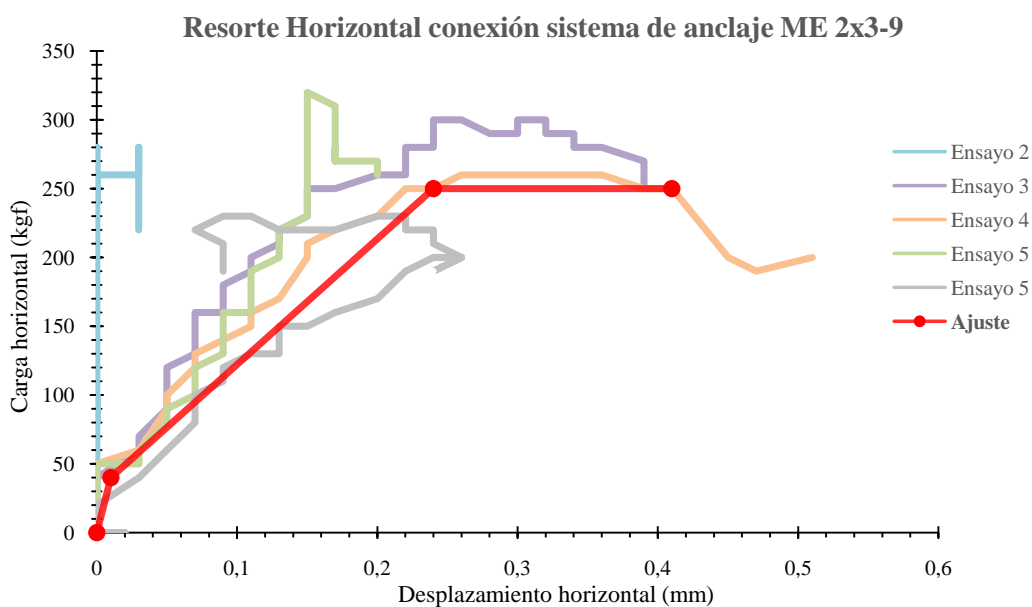
| <b>Ajuste resorte vertical</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                      | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| -0.05                          | -500        | -0.05                | -500        |
| 0                              | 0           | 0                    | 0           |
| 1                              | 125         | 1                    | 250         |
| 3.44                           | 190         | 3.44                 | 380         |
| 7.68                           | 250         | 7.68                 | 500         |
| 8.7                            | 250         | 8.7                  | 500         |



**Figura D2. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje ME 2x3-9.**

**Tabla D2. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje ME 2x3-9**

| Ajuste resorte horizontal |             | Input Sap2000 |             |
|---------------------------|-------------|---------------|-------------|
| Desp (mm)                 | Carga (kgf) | Desp (mm)     | Carga (kgf) |
| 0                         | 0           | -0.41         | -125        |
| 0.01                      | 40          | -0.24         | -125        |
| 0.24                      | 250         | -0.01         | -20         |
| 0.41                      | 250         | 0             | 0           |
|                           |             | 0.01          | 20          |
|                           |             | 0.24          | 125         |
|                           |             | 0.41          | 125         |

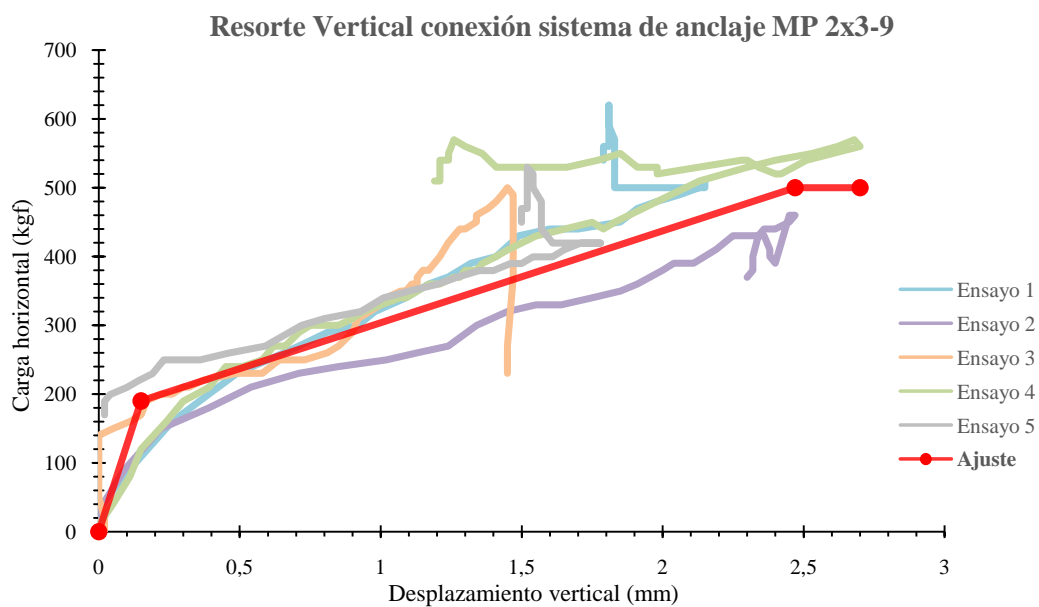


**Figura D3. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje ME 2x3-9.**

- MP 2x3-9:

**Tabla D3. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-9**

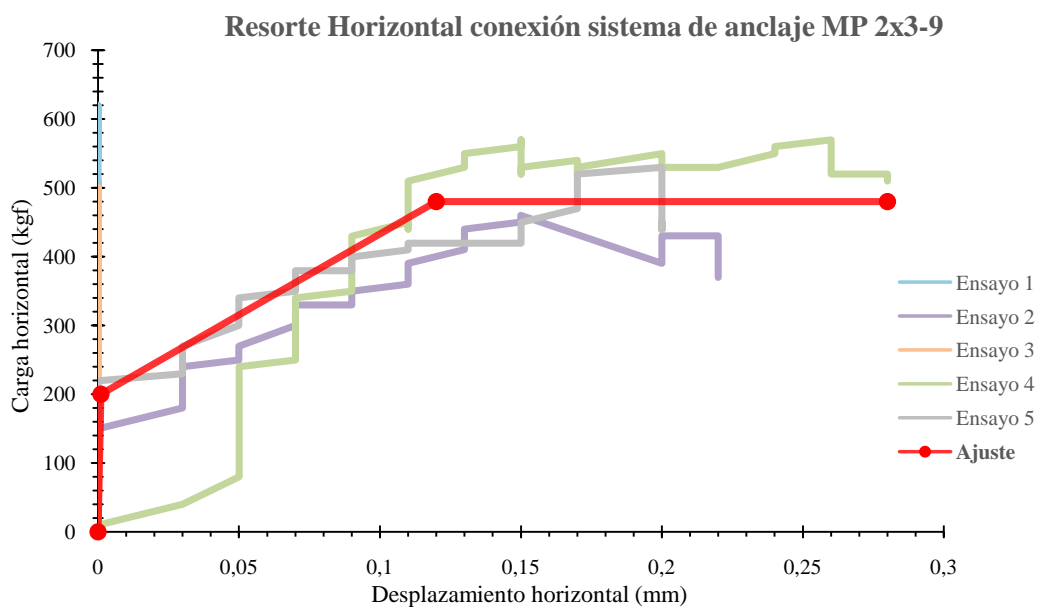
| <b>Ajuste resorte vertical</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                      | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| -0.05                          | -500        | -0.05                | -500        |
| 0                              | 0           | 0                    | 0           |
| 0.15                           | 190         | 0.15                 | 380         |
| 2.47                           | 500         | 2.47                 | 1000        |
| 2.7                            | 500         | 2.7                  | 1000        |



**Figura D4. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-9.**

**Tabla D4. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-9**

| Ajuste resorte horizontal |             | Input Sap2000 |             |
|---------------------------|-------------|---------------|-------------|
| Desp (mm)                 | Carga (kgf) | Desp (mm)     | Carga (kgf) |
| 0                         | 0           | -0.28         | -240        |
| 0.001                     | 200         | -0.12         | -240        |
| 0.12                      | 480         | -0.001        | -100        |
| 0.28                      | 480         | 0             | 0           |
|                           |             | 0.001         | 100         |
|                           |             | 0.12          | 240         |
|                           |             | 0.28          | 240         |

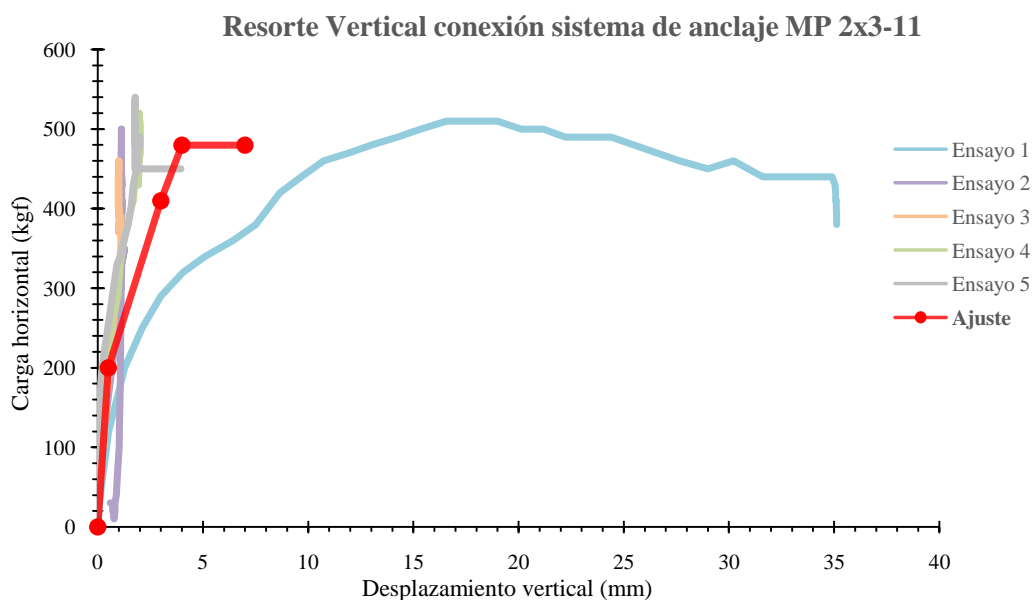


**Figura D5. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-9.**

- MP 2x3-11:

**Tabla D5. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-11**

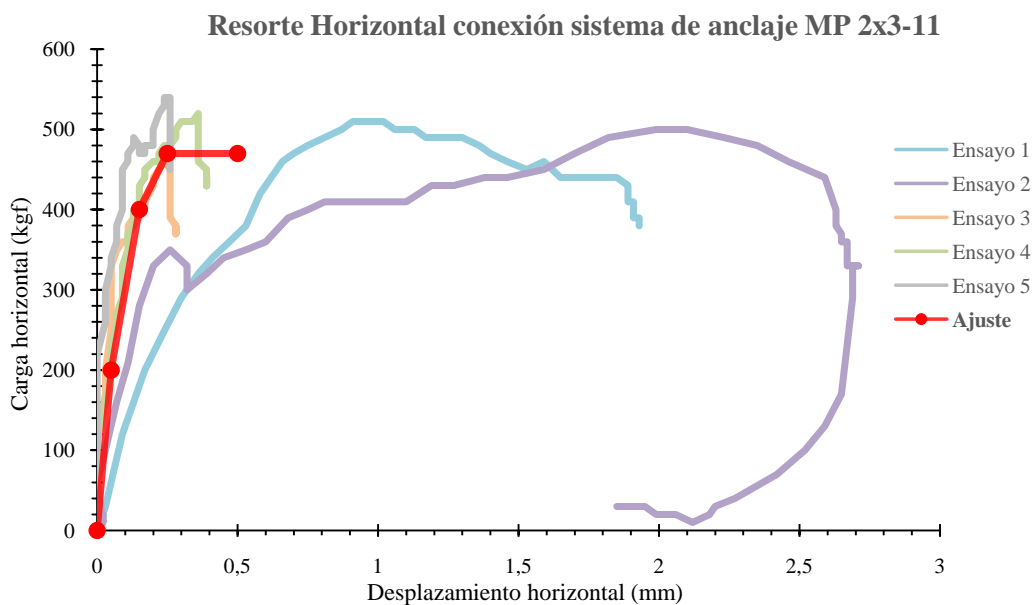
| <b>Ajuste resorte vertical</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                      | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| -0.05                          | -500        | -0.05                | -500        |
| 0                              | 0           | 0                    | 0           |
| 0.5                            | 200         | 0.5                  | 400         |
| 3                              | 410         | 3                    | 820         |
| 4                              | 480         | 4                    | 960         |
| 7                              | 480         | 7                    | 960         |



**Figura D6. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x3-11.**

**Tabla D6. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-11**

| <b>Ajuste resorte horizontal</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|----------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                        | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| 0                                | 0           | -0.5                 | -235        |
| 0.05                             | 200         | -0.25                | -235        |
| 0.15                             | 400         | -0.15                | -200        |
| 0.25                             | 470         | -0.05                | -100        |
| 0.5                              | 470         | 0                    | 0           |
|                                  |             | 0.05                 | 100         |
|                                  |             | 0.15                 | 200         |
|                                  |             | 0.25                 | 235         |
|                                  |             | 0.5                  | 235         |

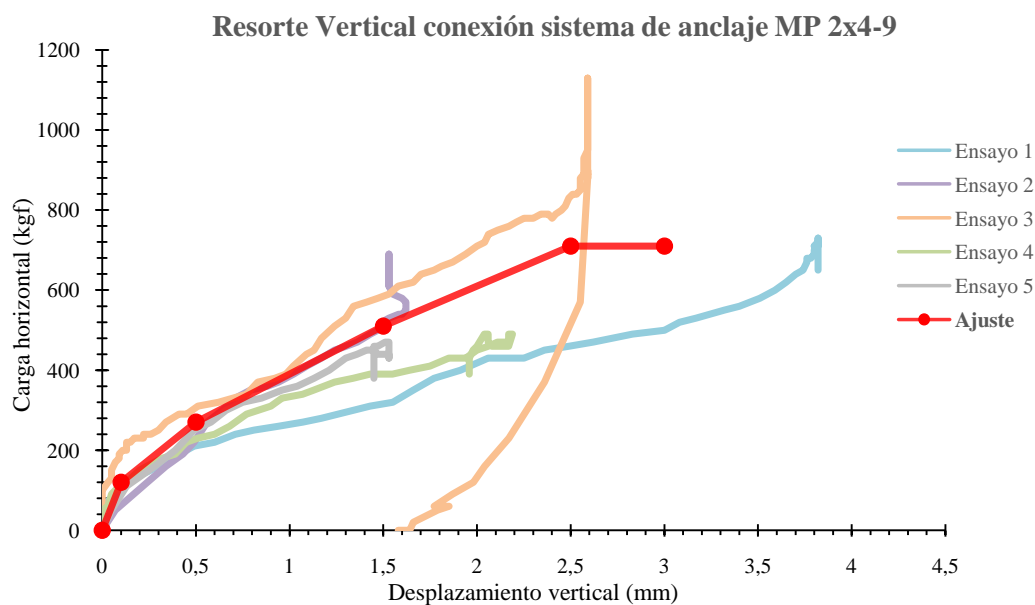


**Figura D7. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x3-11.**

- MP 2x4-9:

**Tabla D7. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x4-9**

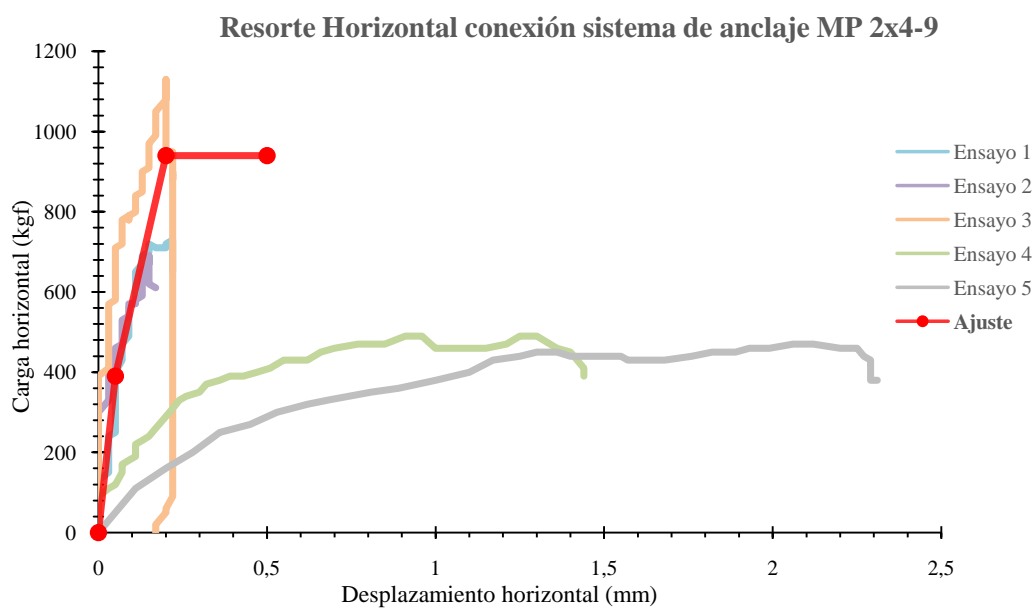
| <b>Ajuste resorte vertical</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                      | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| -0.05                          | -500        | -0.05                | -500        |
| 0                              | 0           | 0                    | 0           |
| 0.1                            | 120         | 0.1                  | 240         |
| 0.5                            | 270         | 0.5                  | 540         |
| 1.5                            | 510         | 1.5                  | 1020        |
| 2.5                            | 710         | 2.5                  | 1420        |
| 3                              | 710         | 3                    | 1420        |



**Figura D8. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x4-9.**

**Tabla D8. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x4-9**

| <b>Ajuste resorte horizontal</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|----------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                        | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| 0                                | 0           | -0.5                 | -470        |
| 0.05                             | 390         | -0.2                 | -470        |
| 0.2                              | 940         | -0.05                | -195        |
| 0.5                              | 940         | 0                    | 0           |
|                                  |             | 0.05                 | 195         |
|                                  |             | 0.2                  | 470         |
|                                  |             | 0.5                  | 470         |



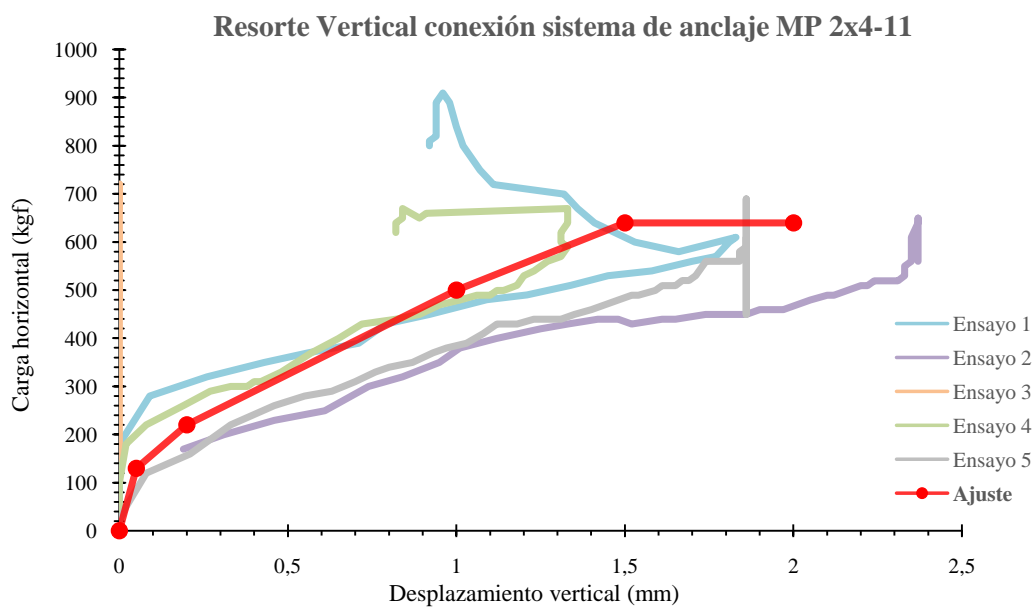
**Figura D9. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x4-9.**



- MP 2x4-11:

**Tabla D9. Propiedad resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x4-11**

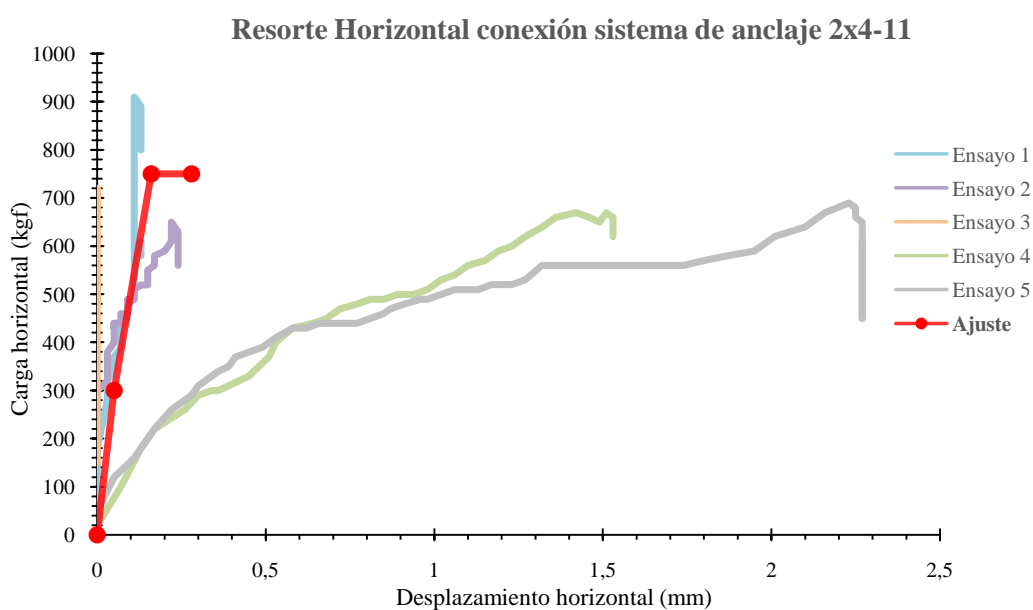
| <b>Ajuste resorte vertical</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                      | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| -0.05                          | -500        | -0.05                | -500        |
| 0                              | 0           | 0                    | 0           |
| 0.05                           | 130         | 0.05                 | 260         |
| 0.2                            | 220         | 0.2                  | 440         |
| 1                              | 500         | 1                    | 1000        |
| 1.5                            | 640         | 1.5                  | 1280        |
| 2                              | 640         | 2                    | 1280        |



**Figura D10. Gráfico resorte vertical conexión sistema de anclaje MP 2x4-11.**

**Tabla D10. Propiedad resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x4-11**

| <b>Ajuste resorte horizontal</b> |             | <b>Input Sap2000</b> |             |
|----------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Desp (mm)                        | Carga (kgf) | Desp (mm)            | Carga (kgf) |
| 0                                | 0           | -0.28                | -375        |
| 0.05                             | 300         | -0.16                | -375        |
| 0.16                             | 750         | -0.05                | -150        |
| 0.28                             | 750         | 0                    | 0           |
|                                  |             | 0.05                 | 150         |
|                                  |             | 0.16                 | 375         |
|                                  |             | 0.28                 | 375         |



**Figura D11. Gráfico resorte horizontal conexión sistema de anclaje MP 2x4-11.**

## **Anexo E**

### **Resultados Modelos muros de corte**

## RESULTADOS MODELOS MUROS DE CORTE

Los resultados en forma de gráficos fueron presentados desde la figura 8 hasta la 12 en el punto 5 Validación de modelo.

Los datos que conforman las curvas carga horizontal-desplazamiento horizontal resultantes del modelo realizado en SAP2000 se indican en las tablas E1 hasta la tabla E5, por cada tipología de muro.

**Tabla E1. Resultado comportamiento muro ME 2x3-9**

| <b>Output Sap2000</b> |                    |
|-----------------------|--------------------|
| <b>Desp (mm)</b>      | <b>Carga (kgf)</b> |
| 0.0                   | 0.0                |
| 0.1                   | 8.9                |
| 0.5                   | 21.2               |
| 13.0                  | 138.8              |
| 23.0                  | 181.9              |
| 33.0                  | 215.9              |
| 43.0                  | 241.7              |
| 46.4                  | 247.4              |
| 56.4                  | 248.8              |
| 66.4                  | 249.0              |
| <b>76.4</b>           | <b>250.8</b>       |
| 86.4                  | 250.4              |
| 96.4                  | 250.0              |
| 100.0                 | 250.2              |

**Tabla E2. Resultado comportamiento muro MP 2x3-9**

| <b>Output Sap2000</b> |                    |
|-----------------------|--------------------|
| <b>Desp (mm)</b>      | <b>Carga (kgf)</b> |
| 0.0                   | 0.0                |
| 0.6                   | 32.6               |
| 1.9                   | 83.1               |
| 6.9                   | 198.6              |
| 16.9                  | 317.8              |
| 26.9                  | 393.8              |
| 36.9                  | 436.6              |
| 46.9                  | 464.1              |
| 56.9                  | 478.6              |
| 66.9                  | 480.9              |
| <b>76.9</b>           | <b>481.0</b>       |
| 86.9                  | 481.0              |
| 96.9                  | 481.0              |
| 100.0                 | 480.9              |

**Tabla E3. Resultado comportamiento muro MP 2x3-11**

| <b>Output Sap2000</b> |                    |
|-----------------------|--------------------|
| <b>Desp (mm)</b>      | <b>Carga (kgf)</b> |
| 0.0                   | 0.0                |
| 1.2                   | 57.1               |
| 7.5                   | 203.0              |
| 10.0                  | 239.5              |
| 20.0                  | 334.6              |
| 30.0                  | 401.8              |
| 40.0                  | 440.9              |
| 45.0                  | 457.1              |
| 52.5                  | 470.2              |
| <b>62.5</b>           | <b>470.6</b>       |
| 72.5                  | 470.0              |
| 82.5                  | 470.4              |
| 92.5                  | 470.8              |
| 100.0                 | 471.1              |

**Tabla E4. Resultado comportamiento muro MP 2x4-9**

| <b>Output Sap2000</b> |                    |
|-----------------------|--------------------|
| <b>Desp (mm)</b>      | <b>Carga (kgf)</b> |
| 0.0                   | 0.0                |
| 0.6                   | 33.8               |
| 1.9                   | 85.1               |
| 11.9                  | 282.2              |
| 21.9                  | 381.5              |
| 31.9                  | 436.5              |
| 41.9                  | 475.2              |
| 51.9                  | 495.4              |
| 61.9                  | 502.0              |
| <b>71.9</b>           | <b>508.1</b>       |
| 81.9                  | 506.4              |
| 91.9                  | 503.8              |
| 100.0                 | 501.7              |

**Tabla E5. Resultado comportamiento muro MP 2x4-11**

| <b>Output Sap2000</b> |                    |
|-----------------------|--------------------|
| <b>Desp (mm)</b>      | <b>Carga (kgf)</b> |
| 0.0                   | 0.0                |
| 0.3                   | 18.9               |
| 10.3                  | 272.5              |
| 20.3                  | 377.2              |
| 30.3                  | 436.0              |
| 40.3                  | 475.8              |
| 50.3                  | 496.1              |
| 60.3                  | 502.8              |
| 70.3                  | 508.0              |
| <b>80.3</b>           | <b>508.7</b>       |
| 90.3                  | 504.6              |
| 100.0                 | 502.1              |