



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA  
PATRIMONIAL DE VALPARAÍSO MEDIANTE ENSAYOS  
EXPERIMENTALES**

Memoria de Título presentada por

**Javier Klenner Reyes**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Ramiro Bazáez G.

ENERO, 2024

# CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA PATRIMONIAL DE VALPARAÍSO MEDIANTE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Javier Klenner R.<sup>1</sup>, Ramiro Bazález G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Técnica Federico Santa María

## Resumen

En el presente trabajo de investigación se evidencia el grado de deterioro al que pueden llegar a estar, hoy en día, algunas edificaciones patrimoniales de madera en Valparaíso. En base a ello, se plantea la necesidad de determinar las propiedades mecánicas de este material en dicha condición, a modo de poder cuantificar el efecto de los daños sobre ésta y así poder, a futuro, contar con valores empíricos locales. En línea con esto, se propone un programa experimental con miras a generar una base de datos de propiedades mecánicas del roble y pino oregón en condiciones nuevas y deterioradas, el cual contempla la ejecución de 5 ensayos destructivos con diferentes orientaciones de carga y dirección de fibra. En particular, se genera un análisis estadístico que relaciona la resistencia y rigidez de la madera con un nivel de ataque por termitas a partir de una propuesta de escala de daño. Se obtiene que, para todas las propiedades mecánicas ensayadas excepto la resistencia a la compresión paralela, las medianas de los resultados del grupo de roble patrimonial son menores que los de su símil nueva. Asimismo, la dispersión obtenida en las probetas de roble patrimonial es mayor que las nuevas en todos los casos. Finalmente, se puede observar una tendencia a disminuir la magnitud de las propiedades mecánicas cuando el nivel de ataque por termitas es mayor. Esto se observa en todos los ensayos, excepto en cizalle paralelo y densidad normal. En base a estas tendencias, se proponen ecuaciones predictivas empíricas.

## 1. Contextualización

Valparaíso es una ciudad que siempre ha destacado por su cultura y arquitectura. El casco histórico de la comuna fue reconocida el año 2003 como patrimonio de la humanidad por la UNESCO (UNESCO, 2003), incluyendo reconocidos sectores de la ciudad puerto como lo son los cerros Alegre y Concepción, entre otros, los cuales son visitados todo el año por turistas nacionales e internacionales.

El patrimonio histórico descansa principalmente sobre las antiguas edificaciones construidas sobre los cerros, cuya arquitectura destaca por sus coloridas fachadas y sus sistemas estructurales de madera. En efecto, gran parte de las viviendas del casco histórico fueron edificadas usando un sistema constructivo llamado muros de entramado de madera (Jiménez, 2015), el cual consiste en una estructura conformada por perfiles de madera verticales, horizontales y diagonales unidos entre sí, los cuales en ocasiones son rellenados a posteriori por algún material no-estructural confinante como adobillo, albañilería u otro.

Como cualquier estructura que quiera perdurar en el tiempo, es necesario asegurar una correcta mantención para poder conservar las condiciones de servicio. Lamentablemente, a día de hoy, algunos de los edificios emblemáticos de la ciudad se encuentran en un nivel de deterioro evidente y alarmante, que incluso ha puesto en duda la continuidad de Valparaíso en la lista de patrimonio de la humanidad de la UNESCO (Castillo, 2023). Esto no sólo es un problema para el valor cultural de la comuna,

sino que también para la seguridad de las personas que habitan u ocupan dichos edificios. La idea de restaurar, rehabilitar, o reforzar estas estructuras se hace imperativa. Sin embargo, llegar a soluciones eficientes y poco invasivas es una tarea muy compleja. Para lograr esto, conocer la capacidad actual de la estructura es una variable relevante (Smith, 2021).

La tarea de evaluar la resistencia de una estructura patrimonial es difícil, especialmente las de madera, cuya variabilidad inherente suele ser alta. En estos edificios, se suelen desconocer las condiciones iniciales del material, el historial de intervenciones, la historia de cargas, las condiciones ambientales del pasado, o incluso la especie de la madera. Toda esta incertidumbre hace que, a la hora de querer estimar la resistencia de la madera patrimonial, los resultados puedan verse influenciados (Cavalli et al., 2016). Asimismo, la evaluación estructural de estos edificios en su estado actual requiere del conocimiento del efecto de ataques biológicos sobre la madera, tales como termitas u hongos.

La conservación del patrimonio supone que las intervenciones que se hagan deban ser nulas o lo menos invasivas posibles. Tener certidumbre de la capacidad estructural de los edificios patrimoniales podría permitir minimizar intervenciones, o bien permitir diseños de refuerzos económicamente eficientes y arquitectónicamente compatibles. En Chile, actualmente no se cuenta con una norma oficial que estandarice la forma en la que estas estructuras deban evaluarse. Por su parte, la norma oficial de diseño en madera, la NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014), sigue criterios de diseño según el método de tensiones admisibles: resistencias basadas en el percentil 5% disminuidas por un factor de seguridad. Este tipo de disposiciones altamente conservadoras no son de mucha utilidad al momento de evaluar un edificio patrimonial, pues tienden a subestimar mucho la respuesta estructural, además de no considerar las resistencias asociadas a maderas de crecimiento lento que se utilizaban ampliamente en el pasado (Smith, 2021).

El primer paso para poder evaluar una estructura patrimonial corresponde a la determinación de las propiedades resistentes del material: la caracterización mecánica. La idea es obtener valores de rigidez y resistencia que permitan caracterizar a la madera patrimonial deteriorada como material estructural. Estos datos permiten comprender mejor el comportamiento de sistemas estructurales compuestos como el muro de entramado de madera y sus uniones, y esto, a su vez, a la estructura completa. Uno de los métodos más utilizados para caracterizar mecánicamente un material es la implementación de ensayos destructivos de laboratorio, en donde se estima la curva carga-desplazamiento de probetas de madera bajo distintos estados de carga hasta su falla. Diferentes autores han estudiado este tema enfocado a la madera patrimonial en otros países, como Smith (2021) en Canadá o Poletti (2013) en Portugal. En la ciudad de Valparaíso, en cambio, estudios de este tipo no se han llevado a cabo. Dado que la especie de la madera, además de las condiciones ambientales, influyen en las propiedades resistentes del material (Arriaga et al., 2023), se hace necesario disponer de datos empíricos locales para poder caracterizarlo mecánicamente.

El presente trabajo de investigación se enmarca en el proyecto interno multidisciplinario de la UTFSM, titulado “Manufactura y análisis avanzado del comportamiento estructural y sísmico de las uniones carpinteras existentes en edificios tradicionales de entramado de madera en Valparaíso”. El proyecto es una iniciativa en conjunto con el departamento de Arquitectura y el departamento de Ingeniería Mecánica, y contempla una serie de etapas con miras a la caracterización estructural de los edificios tradicionales de madera en dicha comuna. El proyecto pretende dar un primer paso en la región con el objetivo de determinar las propiedades resistentes de la madera y de los sistemas constructivos más usados en el Valparaíso patrimonial. En particular, esta investigación se encasilla en una primera etapa: la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera en condiciones nuevas y en condición deteriorada. Para lograr este objetivo, se emplea un enfoque 100 % experimental, realizando ensayos destructivos a escala reducida. Las probetas, por su parte, son confeccionadas

con madera de Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii*) y Roble (*Nothofagus obliqua*), las cuales son las especies más comunes en los edificios del casco patrimonial en Valparaíso (Jiménez, 2015). De esta manera, el estudio permitirá comprender de mejor manera los efectos del deterioro en la madera de estas especies sobre su rigidez y resistencia.

A futuro, y en etapas posteriores del proyecto, se espera que con los resultados obtenidos se puedan diseñar sistemas de reforzamiento eficientes y poco invasivos en uniones carpinteras típicas. Además, se pretende poder calibrar modelos numéricos predictivos de estos sistemas estructurales.

El documento aquí presentado comienza con una revisión del marco teórico en la Sección 2, en donde se profundiza en el estado del arte relativo a las propiedades de la madera y a la caracterización mecánica de ella. A continuación, en la Sección 3, se presentan los objetivos de la investigación, para luego proseguir en la Sección 4 con una descripción de la metodología experimental empleada. Posterior a ello, en la Sección 5, se presentan y discuten los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección 6, se indican las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. El Entramado de Madera en los Edificios Patrimoniales de Valparaíso

La arquitectura de los edificios de Valparaíso se vio fuertemente influenciada por la inmigración europea y norteamericana durante la época industrial, la cual trajo consigo nuevas técnicas constructivas acorde a los conocimientos técnicos y científicos de la época. Uno de los sistemas estructurales introducidos más utilizados en Valparaíso durante finales del siglo XIX fue el entramado de madera, el cual a día de hoy perdura en gran parte de los edificios considerados patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. En el caso particular de la ciudad puerto, destacan las casas con uso de maderas de grandes escuadrías y con la utilización del Roble (*Nothofagus obliqua*) y el Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii*) como especies predominantes (Jiménez, 2015).

El sistema de entramado de madera tiene distintas variaciones en el mundo, en función de las escuadrías utilizadas, el tipo de conexiones o la disposición estructural de los entrepisos. Sin embargo, los entramados comparten una configuración básica de elementos de madera unidos entre sí. En general, los elementos verticales (pies derechos) son conectados a los horizontales (soleras), a la vez que se incorporan perfiles diagonales para dar rigidez lateral al muro. Opcionalmente al sistema se le añade un material no-estructural confinante en su interior, como lo puede ser el adobillo, albañilería o incluso listones de madera. Las uniones, por su parte, suelen ser carpinteras y/o con clavos de hierro fundido o clavos industriales, según haya sido la época de su construcción (Jiménez, 2015). A modo ilustrativo se presenta en la Figura 1 un esquema típico del sistema constructivo y un ejemplo local.

Actualmente en Valparaíso existen muchas viviendas de este tipo que se encuentran con un nivel de deterioro alarmante. Muchas veces esto no se ve a simple vista, pues la estructura principal suele estar cubierta con grandes fachadas. La madera de las estructuras patrimoniales, al no estar bien conservada, sufre daños severos debido a la humedad excesiva, hongos o ataques de termitas. En la Figura 2 se puede observar uno de estos casos. En ella se puede apreciar el nivel de daño al que puede llegar a estar una estructura de madera, en donde los pies derechos del entramado ni si quiera tienen soporte a la solera, y en donde la presencia de termitas se hace notar.

La gravedad de esto se intensifica al considerar que estas edificaciones se encuentran fundadas en un territorio de alta amenaza sísmica. Si bien este sistema constructivo ha demostrado tener incluso mejor desempeño sísmico que estructuras modernas de hormigón armado (Poletti, 2013), el tema cambia cuando existen deterioros tan avanzados como este. Asimismo, el hecho de que

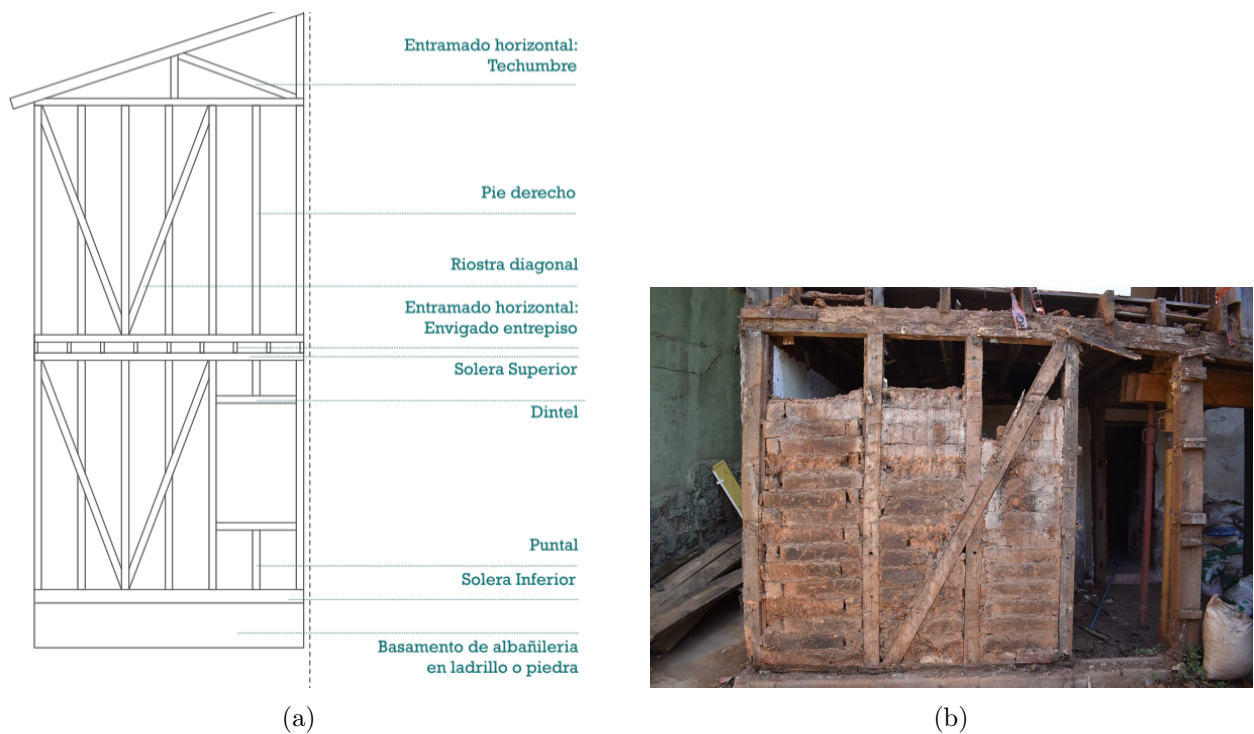


Figura 1: Sistema de entramado de madera: (a) Configuración típica de un entramado tipo *Stud Frame* (Jiménez, 2015) y (b) Fotografía de un muro de entramado de madera en Pasaje Higuera, Cerro Alegre, Valparaíso (10-03-2023).



Figura 2: Fotografías tomadas en Pasaje Higuera, Cerro Alegre, Valparaíso (10-03-2023): (a) Fachada de la Vivienda, (b) Pies derechos destruidos y (c) Pie derecho con daño avanzado por termitas.

estas viviendas históricas hayan acumulado daños por terremotos en años anteriores, la falta de mantenimiento y el envejecimiento progresivo de los materiales hace que la vulnerabilidad de estas estructuras se vea incrementada (Jiménez et al., 2021). El verdadero problema se encuentra en la incertidumbre que existe al respecto: la respuesta estructural no es clara, y la información disponible a la fecha no permite predecir con precisión si estas viviendas cumplen con los estándares mínimos para mantenerse en servicio de forma segura así como están.

## 2.2. Propiedades y Caracterización Mecánica de la Madera Estructural

La Madera estructural posee una serie de características que la hacen diferenciarse de otros materiales usados en la construcción como el acero o el hormigón armado. La principal distinción de la madera es su anisotropía: sus propiedades mecánicas varían significativamente en función de la dirección de la carga con respecto a la dirección de su fibra. En general, la madera estructural aserrada se asume ortotrópica, considerando 3 ejes principales: el longitudinal (o paralelo a las fibras), el radial (o perpendicular a los anillos de crecimiento), y el tangencial (o tangente a los anillos de crecimiento) (Mamlouk & Zaniewski, 2016). Como referencia de lo explicado, en la Figura 3 se muestran los ejes locales con los cuales se suele analizar a la madera aserrada. Por otro lado, la madera ha demostrado ser un material inherentemente variable debido a su crecimiento natural, incluso entre piezas de la misma especie (Smith, 2021). Esto puede generar problemas a la hora de querer caracterizarla con precisión.

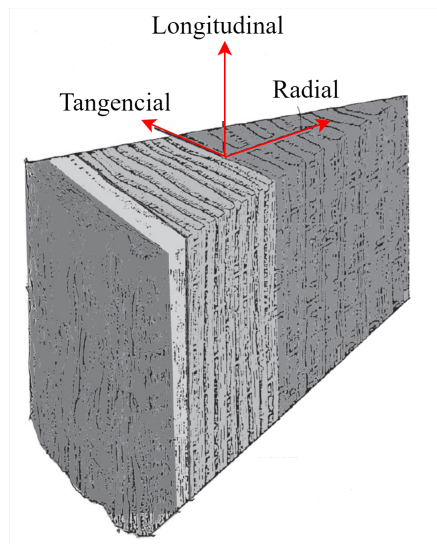


Figura 3: Definición de direcciones principales en la madera. Adaptado de Mamlouk y Zaniewski (2016).

Las características mecánicas corresponden a la resistencia y la rigidez. Debido a la ortotropía de la madera, dichas características deben estudiarse para cada una de las direcciones principales. Por ejemplo, se ha demostrado que la resistencia a tracción en la dirección longitudinal a las fibras es más de 20 veces mayor que su símil en la dirección radial. Asimismo, la resistencia a la tracción se ve más influenciada por la presencia de defectos (como por ejemplo nudos) que la resistencia a compresión (Mamlouk & Zaniewski, 2016). Por su parte, las rigideces elásticas también varían significativamente según sea la dirección de la fibra. Arriaga et al. (2023), en su revisión bibliográfica, indica que

existen ciertas relaciones generales aceptadas por la comunidad para comprender las diferencias en las rigideces. Por ejemplo, para especies coníferas el módulo elástico en dirección longitudinal a las fibras es 20 veces mayor que en la dirección tangencial, mientras que para especies latifoliadas la rigidez longitudinal es 13 veces mayor que en dirección tangencial a las fibras.

Algunas de las características mecánicas más comunes a estimar en la madera son: el módulo de rotura en flexión, el módulo de elasticidad en flexión, la compresión paralela y perpendicular a la fibra, la tracción paralela y perpendicular a la fibra, y el cizalle paralelo a la fibra. Sin embargo, algunas variables han indicado ser más representativas del comportamiento global del material debido al alto grado de correlación que poseen con otras. Algunos de estos parámetros corresponden al módulo de rotura en flexión, el módulo de elasticidad en flexión y la densidad. Generalmente se tiene, además, que a mayor densidad de la pieza, mayor es la resistencia (Poletti, 2013).

El comportamiento esfuerzo-deformación de la madera también cambia significativamente con la dirección de la fuerza. Si bien existe variabilidad, las curvas esfuerzo-deformación marcan ciertas tendencias, indicando en general un comportamiento dúctil en compresión y uno frágil en tracción. Como muestra de ello, se ha evidenciado que los modelos predictivos que mejor se ajustan al comportamiento de la madera incluyen una respuesta lineal inicial y endurecimiento por deformación para cargas de compresión, y un comportamiento lineal elástico inicial y falla frágil para cargas de tracción (Rescalvo et al., 2018).

La alta variabilidad del material hace imprescindible la estandarización de las propiedades mecánicas. Ahora bien, al momento de querer caracterizar a una especie de madera en particular existen distintos métodos. El método clásico que ha sido empleado por diferentes normas en el mundo es la clasificación en grupos estructurales por especies madereras. En este método, se ensayan probetas de madera a escala reducida, sin defectos de ningún tipo. Por temas prácticos de diseño, las normas emplean el valor característico de resistencia del percentil 5% asociado a los resultados de dichos ensayos. No obstante, este método no es suficiente para poder caracterizar piezas de madera reales: la alta variabilidad de este material, en conjunto con la posible presencia de defectos en perfiles de tamaño estructural hace que incluso dentro de una misma especie los valores de resistencia y rigidez cambien significativamente. Es por esto que, además del agrupamiento por especie, se realiza una graduación estructural, en donde las resistencias nominales sin defectos son reducidas por la calidad de la madera (Arriaga et al., 2023). Dicha graduación se suele realizar de dos maneras alternativas, las cuales pueden complementarse entre sí: por inspección visual y por métodos mecánicos. En el primero, se realiza una inspección por personal capacitado en el cual, mediante métodos estandarizados, se clasifica la madera según los daños visibles en un lote. En el segundo, existen distintos métodos de medición que pueden inclusive ser no-destructivos, en el cual se miden directamente las propiedades del material mediante algún tipo de ensayo o artefacto especializado. Además de esta disminución en las propiedades por grado, las normas de diseño aplican factores de seguridad adicionales que permiten utilizar el método de diseño por tensiones admisibles (ASD). En Chile, la norma que agrupa las especies madereras según su resistencia es la NCh1989 (Instituto Nacional de Normalización, 1986f), mientras que las normas que determinan los grados estructurales son la NCh1970/1 (Instituto Nacional de Normalización, 1988a) para especies latifoliadas y la NCh1970/2 (Instituto Nacional de Normalización, 1988b) para las coníferas. Por su parte, la norma que rige el diseño de estructuras de madera es la NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014).

Otra forma de caracterizar las propiedades de la madera estructural, pero que es menos estudiada debido a su complejidad, son los ensayos a escala estructural. En éstos, a diferencia de los ensayos a escala reducida, se usan probetas con un tamaño similar a los utilizados en la práctica. Debido a esto, las probetas presentan defectos propios del material, tales como nudos, grietas, desviación de la fibra, entre otros. Naturalmente, el incremento en la probabilidad de encontrar estos defectos a lo largo

de la probeta hace que su capacidad resistente disminuya, pero al mismo tiempo permite entregar resultados más realistas y aplicables a estructuras reales que aquellos ensayos hechos con probetas artificialmente dispuestas sin defectos (Mamlouk & Zaniewski, 2016). Este tipo de ensayo requiere del uso de mucho material, lo cual puede ser un problema en el caso del estudio de estructuras patrimoniales. Al momento de querer evaluar la capacidad real de una pieza estructural patrimonial, no siempre existe la opción de extraer suficientes muestras como para poder validar los resultados, además del problema ético que representa la remoción de dichas piezas de un lugar con valor histórico (Smith, 2021).

### **2.3. Factores que alteran las propiedades de la Madera**

Como se ha mencionado anteriormente, la madera estructural presenta una alta variabilidad inherente en sus propiedades, asociado principalmente a su crecimiento natural. Sin embargo, la diferencia en sus características también se ve altamente influenciada por la presencia de defectos y otros factores. Entender el efecto de estos factores en la respuesta del material es esencial a la hora de querer estimar sus atributos mecánicos, especialmente si la madera de estudio corresponde a una patrimonial en condición deteriorada (Smith, 2021).

A continuación, se desglosan algunos de los factores que alteran la respuesta estructural de la madera, describiendo su efecto directo o indirecto en su rigidez y resistencia.

#### **2.3.1. Especie**

Sin dudas la especie es el primer filtro que suele hacerse a la madera al momento de definir sus características; por ejemplo, no es lo mismo hablar de roble que de pino. Las especies madereras se separan principalmente en 2 grandes familias: las coníferas y las latifoliadas. Las especies coníferas tienen como característica principal la forma cónica de sus hojas (las cuales no caen en otoño) y su crecimiento rápido. Es por lo mismo que, en general, este grupo de árboles presenta maderas más blandas y menos densas. Las especies latifoliadas, en cambio, tienen hojas que caen al final de su temporada de crecimiento, y suelen tener una madera más densa debido a su lento crecimiento (Mamlouk & Zaniewski, 2016). Un ejemplo de especie conífera corresponde al Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii*), mientras que uno de especie latifoliada es el Roble chileno (*Nothofagus Obliqua*).

Distintas normas del mundo, incluida las chilenas, consideran esta división de familias de especies para el agrupamiento de las maderas según su resistencia. La norma chilena de clasificación visual está dividida en 2 partes: la primera, NCh1970/1 (Instituto Nacional de Normalización, 1988a), para especies latifoliadas; y la segunda, NCh1970/2 (Instituto Nacional de Normalización, 1988b), para especies coníferas. Cada una cuenta con criterios específicos que se adecúan mejor a la familia de árboles. Asimismo, la norma chilena de agrupación de especies, la NCh1989 (Instituto Nacional de Normalización, 1986f), considera también esta separación.

En el caso particular del estudio de estructuras de madera patrimonial, y del desarrollo de intervenciones, el conocimiento de la especie es fundamental y corresponde a un punto de partida básico que da indicios sobre las propiedades estructurales del material (Machado et al., 2019).

#### **2.3.2. Contenido de Humedad**

El contenido de humedad corresponde al porcentaje de masa de agua contenido en un espécimen de madera con respecto a la masa de éste en un estado anhidro (totalmente seco). La madera como material está compuesta por células, las cuales son capaces de absorber agua hasta un cierto límite,

llamado punto de saturación de las fibras (FSP, por sus siglas en inglés); por sobre ese límite, el agua escurre libremente por las paredes de dichas células. El FSP varía según especie, y oscila típicamente entre el 21 % y el 32 % de contenido de humedad. Para la práctica ingenieril, suele asumirse un FSP de 30 % (Mamlouk & Zaniewski, 2016).

El contenido de humedad es uno de los factores más críticos en la madera. Prácticamente todas las propiedades mecánicas varían, muchas veces significativamente, cuando el contenido de humedad lo hace. En el gráfico de la Figura 4 se observa el comportamiento genérico de las propiedades resistentes de la madera a medida que la humedad aumenta en porcentaje. Las resistencias están, a su vez, separadas según la dirección de la fuerza con respecto a la dirección de la fibra.

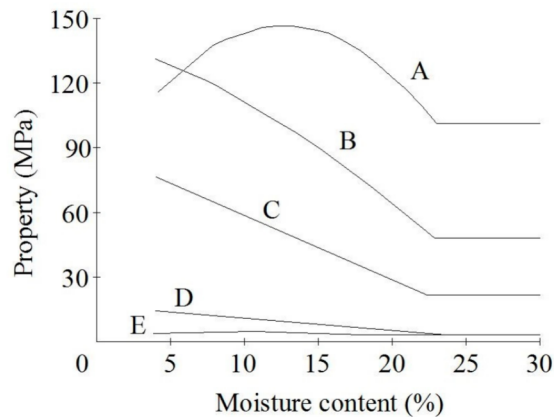


Figura 4: Efecto del contenido de humedad sobre la resistencia de la madera: A—Tracción paralela, B—Flexión, C—Compresión paralela, D—Compresión perpendicular, E—Tracción perpendicular. Extraído de Arriaga et al. (2023).

En el gráfico es posible notar, además, que las propiedades dejan de verse alteradas al llegar al punto de saturación de las fibras.

Las propiedades físicas también varían con la humedad. La madera aumenta su volumen cuando existe mayor saturación de agua, y lo hace en magnitudes diferentes para cada una de las direcciones ortotrópicas de ella hasta llegar al FSP (Mamlouk & Zaniewski, 2016).

Para condiciones asumidas normales de temperatura y humedad relativa del ambiente ( $20 \pm 2$  [°C] y  $65 \pm 5$  %, respectivamente), el contenido de humedad de equilibrio en la madera se acerca a un 12 % (Arriaga et al., 2023). Este valor es asumido por muchas normativas como el contenido de humedad en estado seco de la madera, por lo que en general las propiedades mecánicas son informadas con referencia a este porcentaje. Por ejemplo, la norma chilena de diseño de estructuras de madera, NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014), entrega los valores de tensiones admisibles estandarizadas a un contenido de humedad del 12 %, e incluye un factor de modificación por humedad que cambia las propiedades resistentes del material si la humedad de equilibrio considerada en la zona del diseño es diferente.

Muchas veces ensayar madera en estas condiciones de humedad estandarizadas no es posible, debido al extenso tiempo y cuidados que se requieren para llevar la madera de su estado verde a su estado seco. Es por esto que algunas normas de este tipo también proponen factores de conversión de resultados para poder generar comparación en grandes muestras de probetas. Tal es el caso de la norma NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017b), la cual indica los procedimientos de análisis estadístico requeridos posteriores a la ejecución de ensayos a escala estructural. En ella

se presentan fórmulas que llevan los resultados de los ensayos a valores equivalentes al 12% de contenido de humedad, lo cual permite generar comparaciones consistentes entre resultados.

Un dato interesante a considerar es que algunos estudios experimentales realizados a probetas de madera en flexión han concluido que el módulo de ruptura pareciera verse inalterado por el contenido de humedad si la graduación de la madera es muy baja. En otras palabras, si la probeta está llena de nudos u otros defectos, la resistencia a flexión no variaría si ésta se encuentra más (o menos) húmeda (Arriaga et al., 2023).

### **2.3.3. Densidad**

La densidad ha demostrado ser una variable predominante en las propiedades mecánicas de la madera estructural. Está asociada principalmente a la tasa de crecimiento de los árboles, en donde las especies de crecimiento más lento suelen concentrar sus anillos de forma más compacta. En general se tiene que a mayor densidad, mayor es la resistencia del material, aunque esto no es una regla general que se cumple en todas las especies (Arriaga et al., 2023).

El parámetro de densidad es sensible al contenido de humedad, principalmente debido a que la humedad varía el volumen de las piezas, además de cambiar su masa. Ambas variables están ligadas, y por lo tanto afectan también a las características mecánicas (Arriaga et al., 2023).

### **2.3.4. Nudos**

Los nudos corresponden a los lugares donde crecen las ramas de los árboles. Naturalmente, en esas zonas las fibras se curvan para dar paso a una nueva dirección de crecimiento. Los nudos generan una reducción del área efectiva de la sección del elemento, afectando principalmente a la resistencia a tracción, la cual es un tipo de falla frágil de la madera. Se ha visto que el efecto se produce, más que por la presencia del nudo mismo, debido a la desangulación de las fibras en los alrededores de dicho punto (Arriaga et al., 2023). En la práctica, el efecto de los nudos en la resistencia del material puede contabilizarse de forma analítica con un factor que reduce el área efectiva en tracción (Rescalvo et al., 2018). Asimismo, la presencia de nudos afecta la resistencia a la flexión en las zonas traccionadas (Smith, 2021).

### **2.3.5. Agrietamiento**

Las grietas pueden ocasionarse de muchas formas distintas. Las más comunes en la madera estructural son las grietas longitudinales a la fibra ocasionadas por el proceso de secado. A la fecha, no se ha encontrado una correlación sustantiva que indique que este tipo de grietas afecte la resistencia de la madera. En general, de hecho, las normas de inspección visual en el mundo suelen ser muy tolerantes con este tipo de defecto, aceptando que es un factor poco influyente en la práctica (Arriaga et al., 2023).

### **2.3.6. Ataques de Termitas**

Las termitas son uno de los mayores enemigos de la madera. Estos insectos se alimentan de ella, dejando al elemento estructural en muchas ocasiones en un estado de deterioro muy avanzado. En los edificios patrimoniales de Valparaíso es común ver este tipo de ataques, como los que se vieron anteriormente en las Figuras 2b y 2c en la página 4.

La presencia de las termitas se ve favorecida por la presencia de humedad y con la edad de la madera. En la región de Valparaíso destaca la presencia de 3 especies de este insecto: la Termita

de mueble (*Cryptotermes brevis*), la Termita chilena (*Neotermes chilensis*) y la Termita subterránea (*Reticulitermes flavipes*). La primera especie incrementa su ataque en ciudades cercanas a la costa, en donde el plan de Valparaíso es precisamente uno de los sectores más atacados. La segunda especie, la Termita chilena, es común en edificaciones de más de 10 años, en especial en aquellas que se orientan hacia el mar. Finalmente, la tercera especie (Termita subterránea), tiene la característica de formar colonias bajo tierra, por lo que su control es más complejo. Esta especie se distribuye en Chile principalmente en la región de Valparaíso y es identificable por la formación de grandes galerías y surcos en la madera, dejando rastros de tierra en ellas. Cabe destacar que todas estas especies del insecto afectan al Pino Oregón y al Roble (Ripa et al., 2004). En la Figura 5 se pueden visualizar los daños típicos causados por las termitas anteriormente descritas.

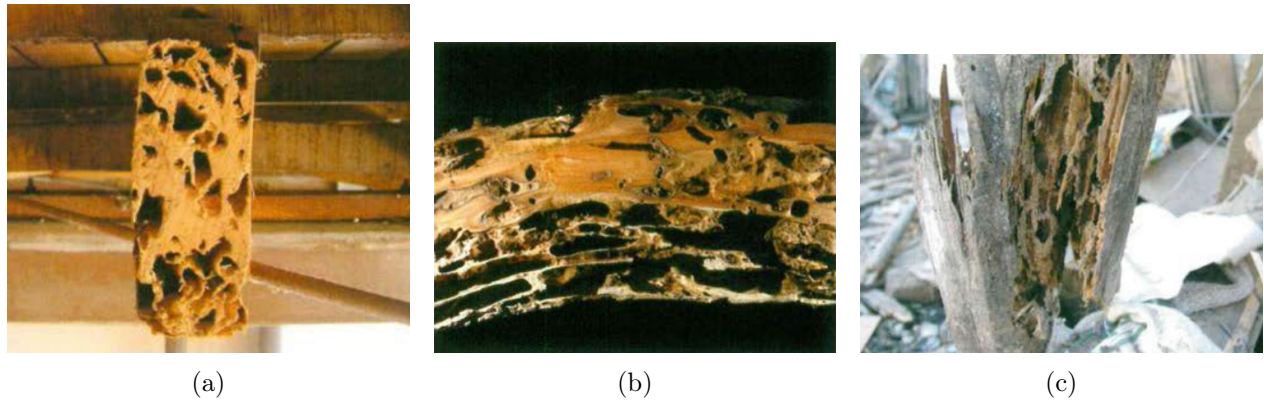


Figura 5: Daños tipo ocasionados por las termitas más comunes en Valparaíso: (a) Roble dañado por Termita de los Muebles, (b) Daño de Termita Chilena en Molle y (c) Viga dañada por Termita Subterránea. Imágenes extraídas de Ripa et al. (2004).

El gran problema estructural del ataque de las termitas es la significativa reducción del área efectiva de la madera, aminorando notoriamente las capacidades resistentes del material. Las normas suelen no aceptar la presencia de este tipo de daños a la hora de graduar la madera. En general, el daño ocasionado por estos insectos se puede subestimar mediante métodos de inspección visual clásicos, pues muchas veces la destrucción interna no se puede ver en toda su magnitud a simple vista (Arriaga et al., 2023). En pos de la seguridad, la madera nueva no puede venderse con daños de insectos; sin embargo, el hecho es que muchas de las estructuras patrimoniales en Valparaíso poseen este tipo de deterioros y actualmente no se tiene suficiente certidumbre de la real capacidad de soporte que logran alcanzar estos elementos dañados.

### 2.3.7. Tamaño

Se ha demostrado que, a mayor tamaño de la pieza estructural de madera, menor es la resistencia obtenida. Esto se asocia principalmente a la probabilidad de encontrar defectos a lo largo de ella, tales como nudos. Dichos defectos favorecen en gran medida la aparición de mecanismos de falla frágiles en el elemento, evitando un desarrollo de ductilidad en el material (Arriaga et al., 2023).

Las estandarizaciones en el mundo para la caracterización mecánica experimental de la madera suelen separarse en 2 grupos: los ensayos a escala reducida y los a escala estructural, justamente para poder considerar este efecto. Asimismo, las normas de diseño en madera hacen utilización en algunos casos de factores de modificación de la respuesta por tamaño. Por ejemplo, la NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014) considera un factor de modificación por altura ( $K_{h,f}$ )

en elementos en flexión y tracción paralela, el cual reduce la resistencia si la altura de la sección es mayor que 50 [mm].

### 2.3.8. Envejecimiento y Duración de Carga

Conocer el efecto de la edad en la madera es especialmente relevante para los ingenieros, pues de ello depende si existe el potencial para reusar piezas o para poder conservarla correctamente en el tiempo. La definición del envejecimiento en la madera no es clara, y varía de autor en autor. Muchas veces el envejecimiento se asocia con la historia de cargas a la que ha estado un elemento estructural, mientras que otras, se vincula netamente al proceso natural del paso del tiempo. Esta discordancia en las definiciones hace que los resultados de distintos estudios experimentales sean difíciles de comparar (Cavalli et al., 2016).

A la hora de estudiar las propiedades de la madera en su condición envejecida existe, usualmente, mucha incertidumbre respecto a diferentes factores, los cuales influyen directamente en los resultados experimentales que se obtengan. Por ejemplo, su origen y condiciones iniciales pueden ser desconocidas; la especie a veces es incierta; la historia de cargas a la que el elemento ha sido sometido es generalmente difícil de estimar; o las condiciones ambientales en el pasado pudieron, o no, haber influido en la resistencia final del material (Cavalli et al., 2016). Esto desemboca en que la variabilidad en las propiedades obtenidas de ensayos en madera envejecida sea grande y mayor que en ensayos con madera nueva (Rescalvo et al., 2018).

Por otro lado, la historia de carga de la madera que lleva muchos años en servicio puede afectar directamente en las propiedades mecánicas de ella. Esto se asocia al efecto de la duración de la carga y al hecho de que tanto la rigidez como la resistencia son dependientes del tiempo. Las propiedades reológicas del material son 2: el *creep* y la relajación. La primera propiedad indica que la madera, bajo una condición de esfuerzo constante, es capaz de generar deformaciones plásticas en periodos largos de tiempo (del orden de meses o años). La segunda, en cambio, que a un nivel constante de deformación en lapsos de tiempo altos, el material puede reducir su tensión interna. Además de esto, se suma la característica de la madera que, a altos niveles de esfuerzo (aproximadamente sobre un 55 % de la capacidad) sostenido en el tiempo, su resistencia decrece con respecto a sus condiciones iniciales (Arriaga et al., 2023).

Esta diferencia en la resistencia en función de la duración de carga es especialmente importante en la madera. Por ejemplo, la norma chilena actual de diseño en madera, la NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014), considera un factor de modificación por duración de carga y entrega pautas cuando se combinan solicitaciones permanentes y eventuales.

Machado et al. (2019), en su artículo, indica que diversos estudios han concluido que el envejecimiento en la madera sería irrelevante en sus propiedades mecánicas, siempre y cuando las cargas en servicio a lo largo de su vida útil hayan sido bajas (bajo el 50 % de su capacidad). En general, se dice que la pérdida de resistencia debido al envejecimiento natural es nula, siempre y cuando no hayan ataques de termitas u hongos. De hecho, Cavalli et al. (2016), en su revisión bibliográfica sobre estudios de madera envejecida, concluyó que no existe evidencia suficiente que respalde una variación en las propiedades mecánicas por el efecto neto de la edad. En resumen, la variabilidad en los resultados de distintos autores es inmensa y en ocasiones discordante.

## 2.4. Importancia de la Caracterización Mecánica en Estructuras Patrimoniales

Las estructuras de madera del Valparaíso patrimonial no fueron construidas utilizando los estrictos códigos de diseño que existen en la actualidad. Más bien, fueron hechas en base a la experiencia y

a las nuevas tecnologías traídas desde el extranjero en la época industrial (Jiménez, 2015). Asimismo, los materiales utilizados difieren en gran medida de los de hoy; por ejemplo, en el uso masificado del roble o de los clavos de hierro fundido.

A día de hoy, existen diversas normas que estandarizan las prácticas de diseño estructural y que indican como se comporta el material y sus respectivos sistemas constructivos. No obstante, estas se enfocan a las prácticas actuales, con tecnologías más nuevas y con el uso masificado de especies de crecimiento rápido bien graduadas y clasificadas para su uso en estructuras. Además, estas normas tienen una filosofía de diseño basada en la seguridad, indicando resistencias correspondientes al percentil 5% y aplicando factores de seguridad que permiten edificar construcciones nuevas con un alto nivel de certidumbre en su correcto funcionamiento. Debido a esto, las normas actuales no son de mucha utilidad a la hora de, por ejemplo, evaluar el nivel de servicio de un edificio en una condición deteriorada; práctica indispensable a la hora de querer tomar decisiones con respecto a si es necesario, o no, intervenir para asegurar o mejorar su desempeño estructural. Las actuales normas de diseño tienden, entonces, a subestimar la real capacidad de una estructura patrimonial existente, lo cual desemboca usualmente en intervenciones altamente ineficientes (y a veces incluso innecesarias) (Smith, 2021).

El gran problema en las viviendas patrimoniales de Valparaíso no es directamente su nivel de deterioro, sino la incertidumbre que se ocasiona debido a ello. Para poder evaluar el estado actual de una estructura patrimonial se requiere estimar la capacidad de esta, considerando a todos los factores que existan en dicho momento y que pudieran influir en el comportamiento del material. A partir de un análisis certero, es posible focalizar los problemas y, por ejemplo, ver si es necesario un reforzamiento enfocado a aumentar la resistencia, la rigidez o la ductilidad de un elemento o conexión en particular. Esto es especialmente importante, considerando que Valparaíso se encuentra en una zona de alta amenaza sísmica. Asimismo, el conocimiento de propiedades mecánicas más cercanas a la realidad permitiría el desarrollo de sistemas de intervención menos invasivos y que permitan mantener el valor histórico del lugar.

El primer paso con miras a la elaboración de sistemas de refuerzo y análisis estructurales en estas edificaciones es la caracterización mecánica de sus materiales en su estado deteriorado. Las propiedades, luego, pueden cruzarse con datos de madera nueva, con el objeto de poder cuantificar el efecto de los deterioros. Disponer de valores locales y orientados al Valparaíso patrimonial permitiría, además, calibrar modelos numéricos y analíticos con mayor precisión. Si bien generar modelos numéricos con madera antigua ha demostrado ser complejo, debido a la alta variabilidad que esta posee (Rescalvo et al., 2018), sin dudas contar con datos fidedignos permitirá reducir la incertidumbre existente con respecto al tema.

### 3. Objetivos

Entendiendo el contexto de Valparaíso, su grave deterioro, y la necesidad de generar información local de las propiedades mecánicas de la madera en su condición dañada, se proponen los objetivos de la investigación.

Se plantea un objetivo general y 3 objetivos específicos. El primero corresponde a la meta global de la investigación, mientras que los segundos corresponden a metas más acotadas que, en conjunto, permiten alcanzar el objetivo general.

- **Objetivo General (OG)**

Determinar las propiedades mecánicas de muestras de madera estructural típica en viviendas

patrimoniales de la comuna de Valparaíso, con y sin daños causados por exposición a agentes patológicos o ambientales, a través de ensayos experimentales.

#### ■ **Objetivos Específicos (OE)**

1. Describir el sistema constructivo de muros de entramado de madera utilizado en edificios patrimoniales de Valparaíso, identificando las especies de madera más usadas y los factores que más influyen en su deterioro estructural.
2. Obtener, a partir de ensayos experimentales, las curvas de carga y deformación en probetas a escala reducida de madera nueva y patrimonial para diferentes estados de carga.
3. Comparar, mediante un análisis estadístico, las propiedades mecánicas de la madera nueva y patrimonial sometida bajo distintas condiciones de carga.

## 4. Programa Experimental

A continuación, se presenta la metodología empleada para llevar a cabo el programa experimental, con miras a la adquisición de datos para su posterior procesamiento. En primer lugar, se detallan los tipos y cantidad de ensayos que se realizan, los lugares de obtención de muestras patrimoniales, las variables relevantes de medición y la manera en que se clasifican las probetas. En segundo lugar, se describe cada ensayo en particular, indicando la forma en que se aplica la carga, las dimensiones de las probetas, entre otros. Finalmente, se muestran los equipos de laboratorio empleados para la ejecución de los ensayos, además de la instrumentación utilizada para la recopilación precisa de las mediciones.

### 4.1. General

Se genera un programa experimental que considera la ejecución de 5 grupos de ensayos a escala reducida. Éstos se realizan bajo diferentes estados de carga que consideran la orientación de la fibra con respecto a la dirección de la carga. En específico, se desarrollan los siguientes ensayos:

- Compresión Paralela a la Fibra
- Compresión Perpendicular a la Fibra
- Tracción Perpendicular a la Fibra
- Cizalle Paralelo a la Fibra
- Flexión Estática

A modo de simplificar la identificación de cada ensayo, se definen abreviaciones para cada uno; estas se observan en la Tabla 1.

Tabla 1: Definición de abreviaciones utilizadas para cada ensayo.

<b>Ensayo</b>	<b>Abreviación utilizada</b>
Compresión Paralela a la Fibra	CPA
Compresión Perpendicular a la Fibra	CPE
Tracción Perpendicular a la Fibra	TPE
Cizalle Paralelo a la Fibra	CZ
Flexión Estática	FL

Las probetas son confeccionadas a partir de piezas estructurales nuevas de madera aserrada de Roble (*Nothofagus Obliqua*) y Pino Oregón (*Pseudotsuga Menziesii*), ambas cepilladas y de escuadría 4" × 4". Adicionalmente, se dimensionan especímenes a partir de perfiles de Roble obtenidos desde distintos edificios patrimoniales de Valparaíso. De esta forma, cada ensayo contempla el estudio de 3 grupos de probetas: Roble Patrimonial, Roble Nuevo y Pino Oregón Nuevo.

Las piezas patrimoniales de roble se extraen desde las viviendas definidas por el proyecto, las cuales al momento de su visita se encontraban en estado de restauración. En total se tienen 3 orígenes, los cuales pueden apreciarse en la Figura 6. Se debe destacar el hecho de que la casa ubicada en Malfatti (Figura 6c) no pertenece al casco patrimonial de Valparaíso. Sin embargo, posee una estructuración, materialidad y estado de deterioro igual a aquellas que sí lo están. Es por esto que se decide considerarla como un equivalente para efectos del análisis de las propiedades mecánicas.



Figura 6: Lugares de Extracción de Muestras en Valparaíso: (a) Vivienda en Pasaje Higuera, Cerro Alegre; (b) Hostal La Casa del Puerto, Almirante Montt, Cerro Alegre; (c) Casa en Malfatti, Cerro Placeres (imagen extraída de Google Maps).

A modo de clasificar los orígenes de las probetas que vengan de piezas patrimoniales, se asigna un código a cada uno de ellos. La nomenclatura usada se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Códigos de origen para las piezas patrimoniales de roble.

<b>Origen de Pieza</b>	<b>Código Asociado</b>
Pasaje Higuera	HIG
Hostal la Casa del Puerto	HOS
Malfatti	MAL

En la Tabla 3 se presenta la matriz general de ensayos, en donde se identifica la cantidad de probetas testeadas en función del grupo de análisis y el tipo de ensayo. Asimismo, en la Tabla 4 se muestra una desagregación de dicha matriz para las probetas patrimoniales de roble, en donde se puede apreciar la cantidad de especímenes ensayados según su origen.

Tabla 3: Matriz de Ensayos a Escala Reducida.

Tipo de Ensayo	Tipo de Probeta			Total
	Patrimonial - Roble	Nueva - Roble	Nueva - Pino Oregón	
<b>CPA</b>	21	6	7	<b>34</b>
<b>CPE</b>	17	6	12	<b>35</b>
<b>TPE</b>	22	6	12	<b>40</b>
<b>CZ</b>	24	8	12	<b>44</b>
<b>FL</b>	17	8	6	<b>31</b>
<b>Total</b>	<b>101</b>	<b>34</b>	<b>49</b>	<b>184</b>

Tabla 4: Matriz de Ensayos a Escala Reducida - Probetas patrimoniales de Roble.

Tipo de Ensayo	Origen de Probeta			Total
	HIG	HOS	MAL	
<b>CPA</b>	6	11	4	<b>21</b>
<b>CPE</b>	7	6	4	<b>17</b>
<b>TPE</b>	10	9	3	<b>22</b>
<b>CZ</b>	10	10	4	<b>24</b>
<b>FL</b>	8	6	3	<b>17</b>
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>18</b>	<b>101</b>

Cada probeta es rotulada con un código único, cuyo objetivo es identificar su origen, la especie y el tipo de ensayo de forma rápida. La estructura tipo de cada código es presentada en la Figura 7.

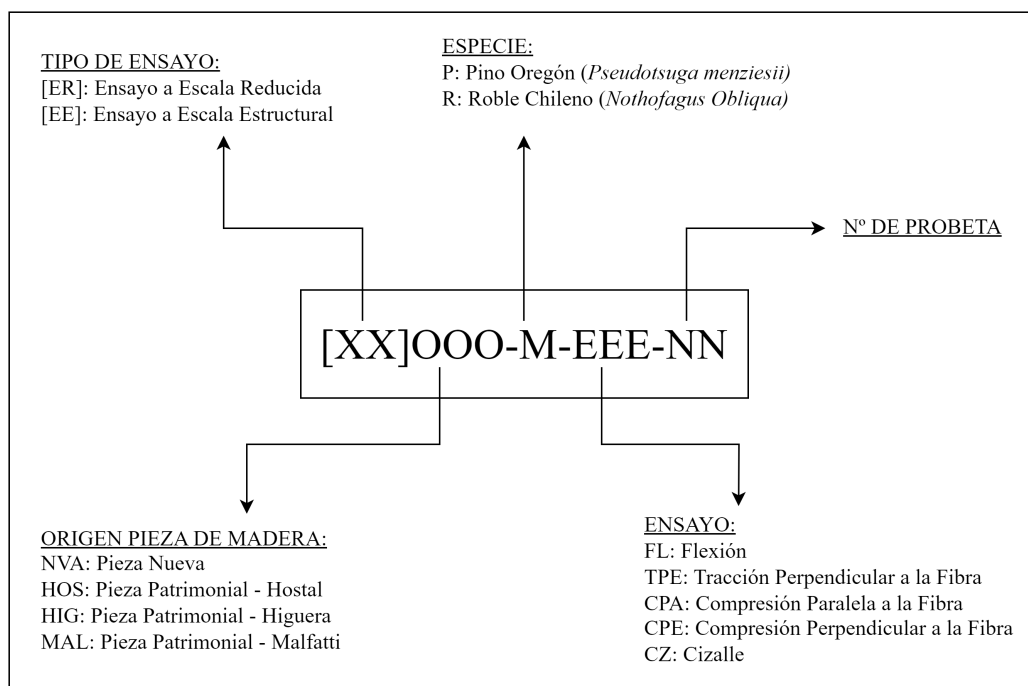


Figura 7: Definición de códigos únicos para el rotulado de probetas.

El procedimiento típico para cada ensayo consiste primero en registrar la geometría, masa, contenido de humedad para cada probeta. Luego, se procede con el ensayo respectivo, recolectando pares de puntos de carga y desplazamiento y generando la curva de comportamiento mecánico. Con dicha información a disposición es posible identificar los puntos de falla de la probeta y del límite de proporcionalidad según sea requerido. A partir de ellos se pueden estimar los valores característicos de resistencia y rigidez para cada una de las muestras. Finalmente, dichos valores son procesados para generar gráficos de análisis estadístico que permitan capturar tendencias, valores medios y dispersiones.

La descripción en detalle de cada ensayo, dimensiones de probetas y variables de salida de interés se presentan en la Sección 4.2. Por otro lado, tanto los equipos de ensayo como la instrumentación utilizada, sus precisiones y modos de uso, se detallan en la Sección 4.3.

A modo de poder cuantificar el efecto del daño causado por las termitas en las probetas patrimoniales, se propone una clasificación de carácter semi-cuantitativo, en donde a cada uno de los especímenes se le asigna un nivel de ataque a partir de la magnitud del daño que pueda medirse en su superficie cercana al plano de falla. Los criterios de clasificación considerados en la presente investigación se pueden ver en la Tabla 5 en la página 17. Dicha tabla se generó en base a una propuesta de Carmona C. y Durán F. (2005), en cuyo artículo identifica distintos grados de deterioro en la madera en función del tipo, extensión y profundidad de los agujeros ocasionados por las termitas. Se ajustaron algunas magnitudes y definiciones para poder calzar las observaciones en las probetas patrimoniales dañadas.

## **4.2. Descripción de los Ensayos**

Cada uno de los ensayos se realiza tomando como referencia base a alguna norma chilena del INN. A partir de ellas se determina la geometría de las probetas y la disposición de fuerzas con respecto a su orientación de la fibra. En la Tabla 6 (ver página 18) se presenta la descripción de cada ensayo, indicando además las variables de salida que se extraen de cada uno.

## **4.3. Equipos e Instrumentación**

Se presentan los equipos utilizados para la ejecución de los ensayos, además de la instrumentación usada para poder medir las diferentes variables relevantes en las probetas, tales como la masa, humedad y geometría. En la Tabla 7 (ver página 19) se puede observar el detalle de los equipos usados en cada uno de los ensayos, sus modelos, descripciones y capacidades de carga. Por otro lado, y a modo ilustrativo, en la Figura 8 (página 20) se muestra la disposición típica de cada tipo de ensayo.

Tabla 5: Clasificación según nivel de ataque por termitas. Escala adaptada de Carmona C. y Durán F., 2005.

Gravedad del Ataque de Termitas <sup>1</sup>	Nivel Asignado	Definición
Sin ataque	0	La probeta no presenta ningún tipo de lesión o ataque superficial <sup>2</sup> debido a termitas.
Ataque Bajo	1	Se debe cumplir alguna de las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ataque superficial menor a 1 [mm] de profundidad y limitado a una extensión máxima de 1/4 de la superficie lateral de la probeta.</li> <li>• Perforaciones<sup>3</sup> puntuales de hasta 5 [mm] de profundidad.</li> </ul>
Ataque Medio	2	Se debe cumplir alguna de las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ataque superficial mayor a 1 [mm] de profundidad afectando a una extensión mayor que 1/4 de la superficie lateral de la probeta pero sin llegar a cubrir la totalidad de la superficie.</li> <li>• Erosión<sup>4</sup> de 1 a 3 [mm] de profundidad en una extensión no mayor a 1/4 de la superficie lateral de la probeta.</li> <li>• Perforaciones puntuales de profundidad mayor a 5 [mm] que no se extiendan en cavernas.</li> </ul>
Ataque Alto	3	Se debe cumplir alguna de las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ataque superficial mayor a 1 [mm] de profundidad que se extiende sobre la totalidad de la superficie lateral de la probeta.</li> <li>• Erosión sobre una extensión superior a 1/4 de la superficie lateral de la probeta.</li> <li>• Ataque penetrante<sup>3</sup> superior a 5 [mm] de profundidad extendiéndose en cavernas dentro de la masa de la probeta y pudiendo llegar a un estado de destrucción muy avanzado.</li> </ul>
<p>1) La aplicabilidad de la Escala de Gravedad por Ataque de Termitas se restringe a las cercanías del plano de falla en el ensayo respectivo; es decir que, si el ataque se concentra en lugares alejados del éste, entonces no son tomados en cuenta.</p> <p>2) Ataque Superficial: Agujeros pequeños que se concentran en un área, o desprendimientos pequeños causados por termitas.</p> <p>3) Perforación o Ataque Penetrante: Agujeros puntuales, profundos y más grandes en comparación a los provocados por el Ataque Superficial.</p> <p>4) Erosión: Surcos y cavernas ocasionadas por las termitas sobre la madera, lo cual puede (o no) generar grietas longitudinales.</p>		

Tabla 6: Descripción de los ensayos a escala reducida.

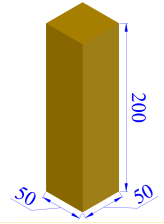
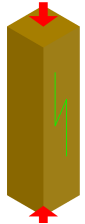
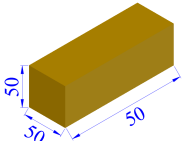
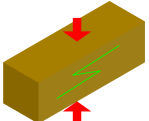
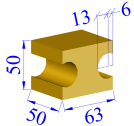

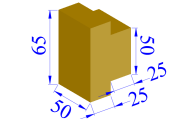
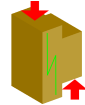
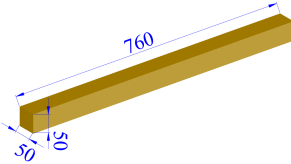
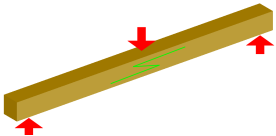



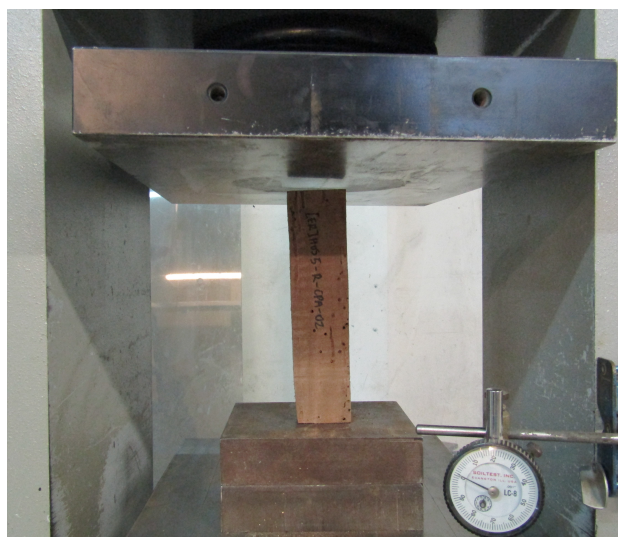
Ensayo	ID	Norma de Referencia	Dimensiones Probeta [mm]	Dirección de Fibra y de Carga	Velocidad Ensayo	Prop. Mec. de Interés
Compresión Paralela	CPA	NCh973.Of86 (Instituto Nacional de Normalización, 1986b)			0.5 [MPa/s]	Resistencia a la Compresión Paralela ( $R_c$ )
Compresión Perpendicular	CPE	NCh974.Of86 (Instituto Nacional de Normalización, 1986c)			0.5 [mm/min]	Resistencia a la Compresión Perpendicular ( $R_{cn}$ )
Tracción Perpendicular	TPE	NCh975.Of86 (Instituto Nacional de Normalización, 1986e)			2.0 [mm/min]	Resistencia a la Tracción Perpendicular ( $R_{tn}$ )
Cizalle Paralelo	CZ	NCh976.Of86 (Instituto Nacional de Normalización, 1986a)			0.5 [mm/min]	Resistencia a la Cizalle Paralelo ( $R_v$ )
Flexión Estática	FL	NCh987.Of86 (Instituto Nacional de Normalización, 1986d)			2.5 [mm/min]	Módulo de Ruptura en Flexión ( $R_f$ ), y Módulo de Elasticidad en Flexión ( $E_f$ )

Tabla 7: Descripción de los equipos usados en los ensayos.

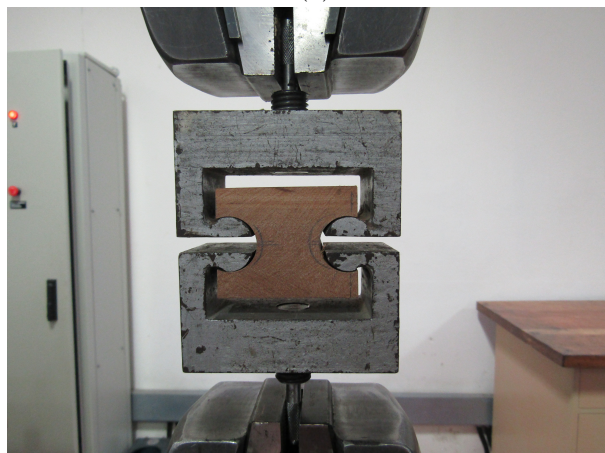
Equipo	Imagen	Ensayos que se realizan en él	Descripción	Capacidad de carga máxima
Instron TTCM-10		CPE, TPE, CZ	Máquina universal de ensayos con resolución de medida de 1 [DaN] y control de desplazamiento del pistón. Sistema de recolección de datos a través de software interno en Windows 2000, el cual permite trazar la curva carga-desplazamiento en tiempo real. El equipo es adaptable para la realización de ensayos a compresión y a tracción.	100 [kN]
Controls 50-C35Z00		CPA	Marco de compresión de utilización general. Sistema de recolección de datos de presión automática con control de velocidad de carga.	3000 [kN]
Controls 50- C1200/8B		FL	Marco de ensayo a flexión universal con transductor de presión y control de desplazamientos. Sistema de adquisición de datos marca Controls modelo 50-C8422/M, el cual registra y traza automáticamente la curva carga-deflexión. Para las deflexiones se conecta un LVDT que registra el movimiento del cabezal.	150 [kN]



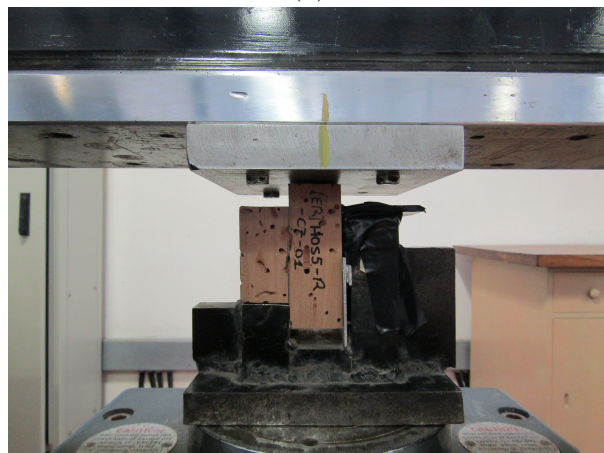
(a)



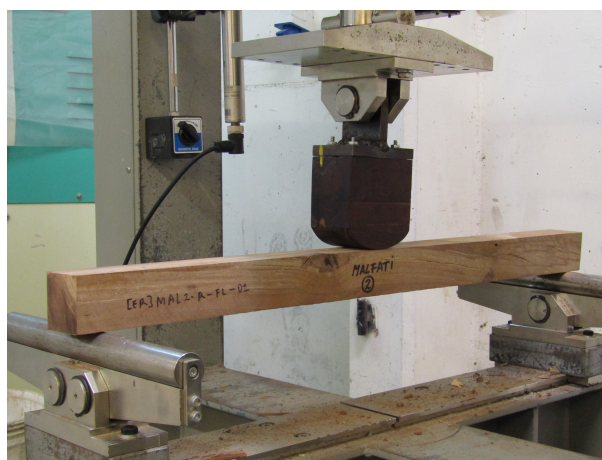
(b)



(c)



(d)



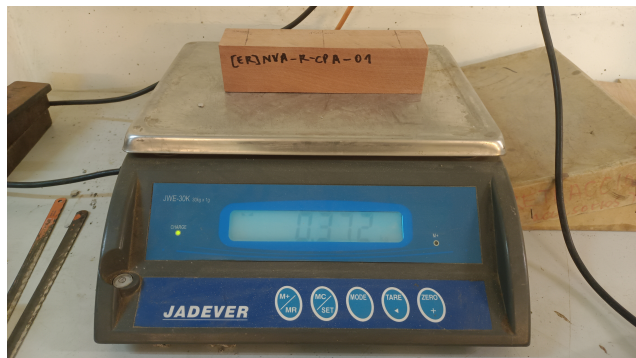
(e)

Figura 8: Disposición típica de los ensayos: (a) CPA, (b) CPE, (c) TPE, (d) CZ, (e) FL.

Con el objetivo de medir la masa de las probetas, se emplea el uso de una balanza con una precisión de 1 [g].

El contenido de humedad, por su parte, es medido mediante el uso de un xilohigrómetro portátil marca Wagner Meters <sup>®</sup> modelo Orion 950, el cual es capaz de medir el porcentaje de humedad al contacto con la madera con una precisión de 0.1 [%]. El instrumento es calibrado según especie ingresando el valor de gravedad específica, luego es puesto encima de la cara superior de la probeta dejando un espacio vacío de al menos 25 [mm] de altura bajo ella. El higrómetro es capaz de medir hasta una profundidad de 3/4", por lo que para una medición más precisa se realizan lecturas en la cara superior e inferior de la probeta para luego promediar dichos valores. Para las especies de análisis en la presente investigación, se utilizan valores de calibración de 0.67 para el Roble Chileno y de 0.48 para el Pino Oregón. En general, el modo de empleo del higrómetro sigue las pautas de la norma chilena NCh2827.Of2003 (Instituto Nacional de Normalización, 2003). En la Figura 9b se muestra el equipo utilizado.

La geometría de las probetas, necesaria para estimar su volumen y áreas de planos de falla, se miden con una precisión de 0.05 [mm] mediante el uso de un pie de metro digital, el cual puede observarse en la Figura 9c.



(a)



(b)



(c)

Figura 9: Instrumentación utilizada para medir variables en probetas: (a) Balanza, (b) Higrómetro portátil Wagner Meters <sup>®</sup> Orion 950., y (c) Pie de metro digital marca Ubermann <sup>®</sup>.

## 5. Resultados y Discusión

En la presente sección se muestran los resultados finales de la campaña experimental, junto con las relaciones utilizadas para llegar a los valores de resistencia y rigidez. Dentro de los siguientes incisos pueden verse, entre otros resultados, las gráficas de dispersión de las propiedades mecánicas agrupadas según tipo de probeta y nivel de daño. Asimismo, y donde sea pertinente, se incluye la relación utilizada para normalizar los valores a un nivel de contenido de humedad igual al 12%, con el objetivo de no sesgar los resultados. Para este fin, se utilizan las ecuaciones calibradas de la norma NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017b). Luego, se discuten los resultados identificando las posibles tendencias y comparando con otros valores en la literatura.

Los resultados detallados de los registros de contenido de humedad, geometría, densidad y rigidez, se encuentran listados en las tablas del Apéndice A (página 52). Por su parte, los resultados en formato de tabla, junto con la estadística descriptiva, se encuentran en el Apéndice B (página 57).

Adicionalmente, en cada sección se proponen formas funcionales que relacionan el daño ocasionado por las termitas con la mediana de resistencia en cada caso. Esto se realiza con el objetivo de generar un primer aporte en la predicción del efecto de este tipo de daño sobre las propiedades mecánicas esperadas en la madera típica del casco patrimonial de Valparaíso.

### 5.1. Ensayo de Compresión Paralela a la Fibra (CPA)

Cada espécimen del ensayo CPA es cargado hasta que la presión ejercida sobre él no pueda seguir aumentando y comience a decaer. El equipo registra directamente la carga máxima,  $Q$ . Luego, para calcular la resistencia a la compresión paralela a las fibras se usa la expresión de la Ecuación (1).

$$R_c = \frac{Q}{\bar{a} \cdot \bar{e}} \quad (1)$$

donde:  $R_c$  es la resistencia a la compresión paralela en [MPa],  $Q$  es la carga máxima registrada en el ensayo en [N],  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos en la probeta [mm], y  $\bar{e}$  es el promedio de los espesores medidos en la probeta en [mm].

Por su parte, para poder comparar dichos valores se ajustan los resultados a un contenido de humedad único e igual al 12%, utilizando los coeficientes de calibración de la norma NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017b), resultando en la Ecuación (2).

$$R_{c,12} = \begin{cases} R_c & , \text{ si } R_c \leq 9.65 \text{ [MPa]} \\ R_c \cdot \left( \frac{9.65 - (34 - 12)}{9.65 - (34 - H)} \right) & , \text{ si } R_c > 9.65 \text{ [MPa]} \end{cases} \quad (2)$$

donde:  $R_{c,12}$  es la resistencia a la compresión paralela normalizada a un 12% de contenido de humedad en [MPa], y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en [%], el cual no puede ser menor a 10% ni mayor a 23%.

En la Figura 10 se condensan todos los resultados obtenidos en formato de *boxplot*, considerando a las probetas tanto con la humedad original al momento del ensayo como con el ajuste para normalizar su valor a un 12%. En general, se puede observar que los especímenes de roble patrimonial alcanzaron, en promedio, un valor de resistencia similar a su contraparte nueva. No obstante, se puede notar una clara disminución en la dispersión de este último grupo. En efecto, para el conjunto patrimonial los resultados normalizados están en un rango comprendido entre los 24.7 [MPa] hasta los 60.5 [MPa], mientras que la agrupación nueva se contuvo entre los 31.9 [MPa] y los 48.1 [MPa]. Por otro lado, se tiene que el grupo de probetas de pino oregón alcanzó una mediana de datos de 37.7 [MPa] para

el caso de humedad normalizada, bastante cercana pero levemente por debajo que las medianas del tipo Patrimonial-Roble (43.4 [MPa]) y Nueva-Roble (41.4 [MPa]).

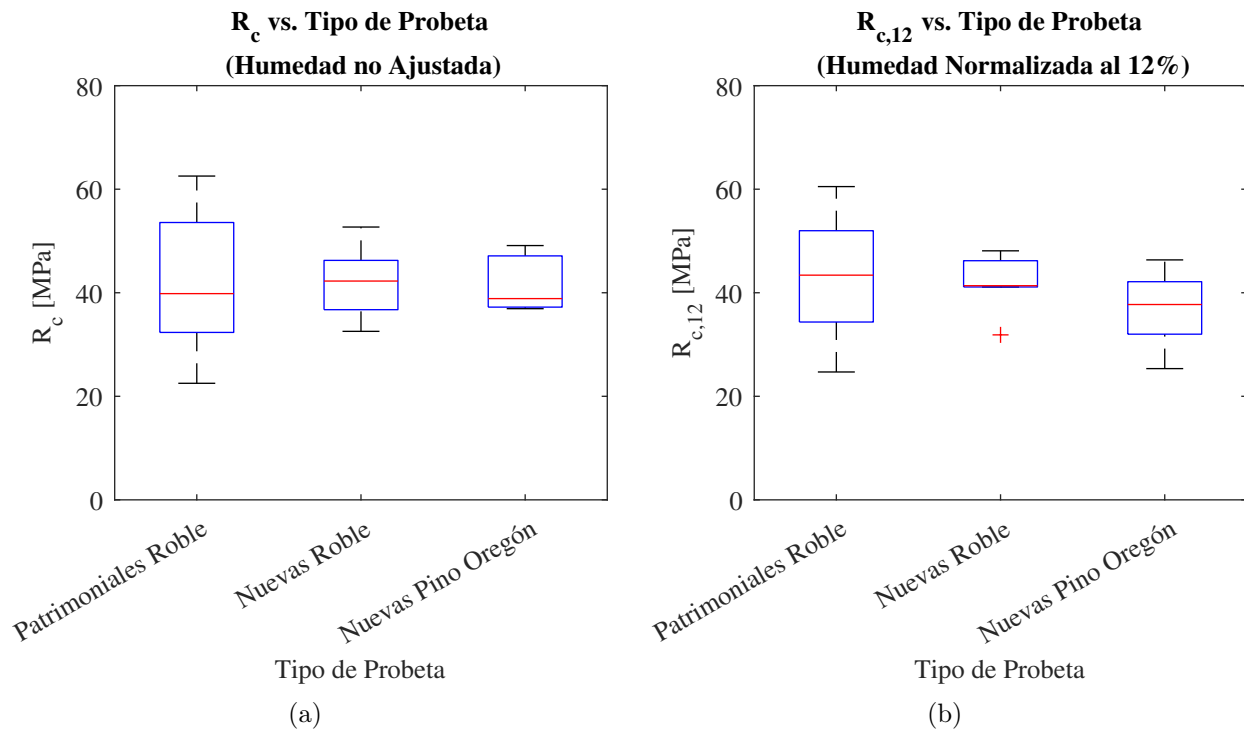


Figura 10: Resistencia a la Compresión Paralela según tipo de probeta: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12%.

Los resultados promedios de las agrupaciones nuevas corresponden a 37.2 [MPa] para pino y 41.7 [MPa] para roble, mientras que sus desviaciones estándar 7.3 y 5.6 [MPa], respectivamente. Al revisar la literatura es posible notar que ambos valores se encuentran dentro del rango esperado. Por ejemplo, el compendio de propiedades de especies forestales de Chile (Hernández C. & Pinilla S., 2010) indica una resistencia a la compresión paralela en estado seco para el pino oregón de 37.2 [MPa], mientras que un informe técnico realizado por el instituto forestal de Chile (INFOR) en donde se ensayaron probetas a escala estructural de esta misma especie (Vásquez V. et al., 2013) arrojó un  $R_c$  medio de 33.4 [MPa] para el grado estructural GS, con una desviación de  $\pm 6.6$  [MPa]. Asimismo, otro informe del INFOR en donde se testearon probetas de roble a escala estructural (Catalán et al., 2020), resultó con un promedio de resistencia a la compresión de 40.3 [MPa] en el grado estructural N<sup>o</sup>2, con desviación estándar de 11.4 [MPa].

En la Figura 11 se presentan todos los resultados de  $R_c$  y  $R_{c,12}$  pero ahora agrupados en función del nivel de daño por termitas identificado según la pauta indicada en la Tabla 5. Se puede observar que, tras realizar los ajustes por humedad, la resistencia a la compresión paralela posee una tendencia clara a disminuir su magnitud a medida que la clasificación de daño aumenta. De hecho, al revisar los valores de las medianas, se aprecia que la resistencia baja desde 57.9 [MPa] hasta 35.2 [MPa], representando una caída del 39% con respecto al valor del nivel 0 (probeta sin daño visible).

A modo de cuantificar la tendencia se ajusta una recta de regresión a las medianas de  $R_{c,12}$  (ver Figura 12). Se puede observar una fuerte correlación lineal en los datos, lo que se traduce en un factor  $R^2$  de 0.958.

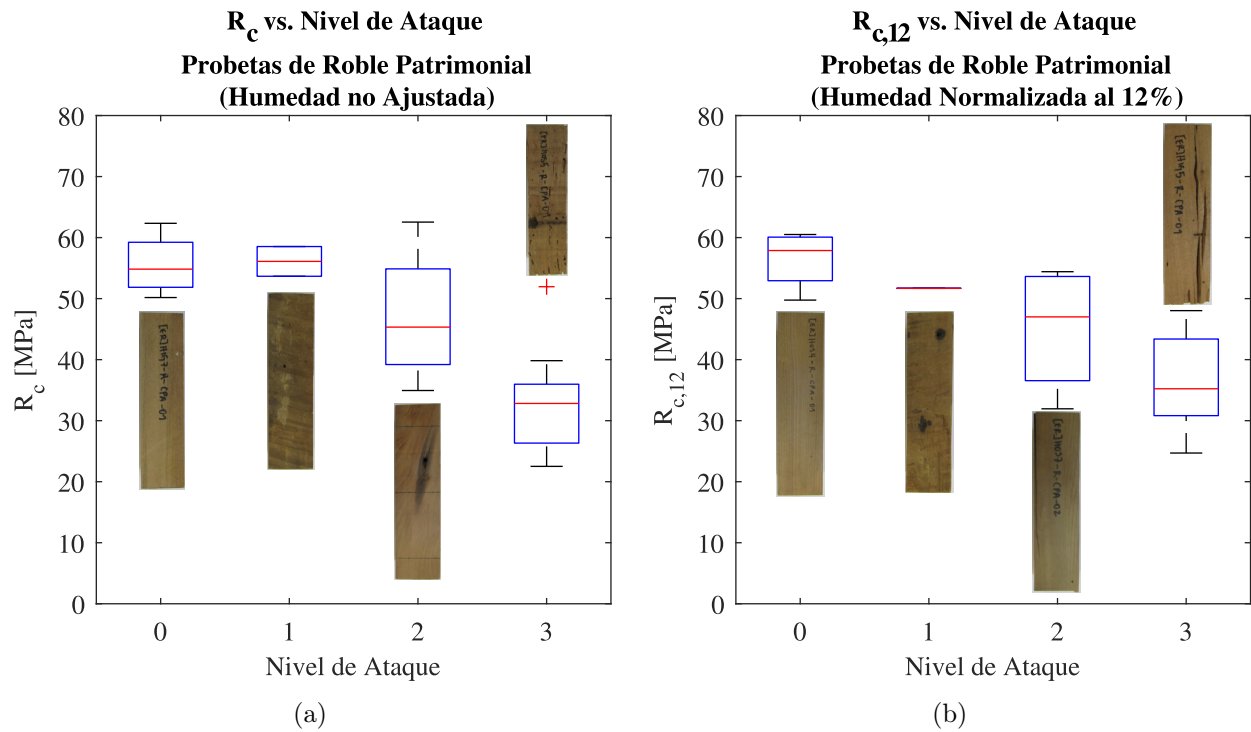


Figura 11: Resistencia a la Compresión Paralela según Nivel de Ataque de termitas: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12%.

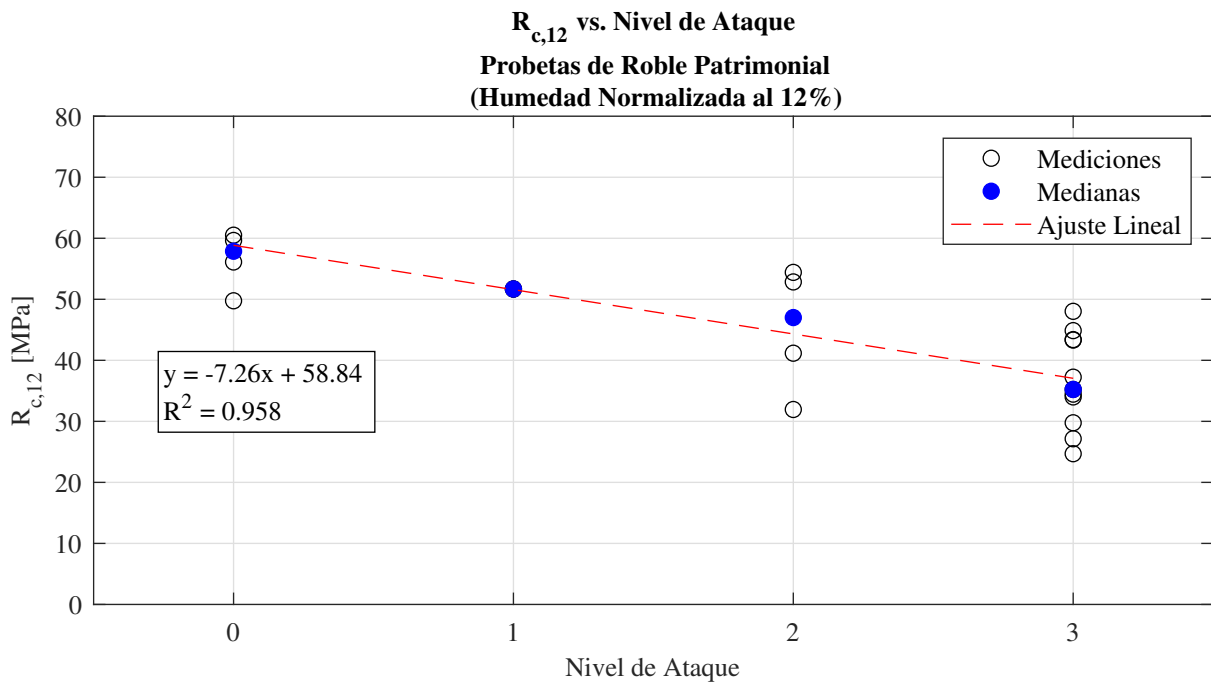


Figura 12: Ajuste de regresión lineal para los resultados de Resistencia a la Compresión Paralela según el nivel de ataque por termitas.

De esta manera, se propone en la Ecuación (3) una expresión empírica en forma funcional, la cual relaciona la resistencia a la compresión paralela esperada con el nivel de ataque observado a partir de la curva de ajuste resultante.

$$R_{c,e} = f_{NA,CPA} \cdot R_{c0} \quad (3)$$

donde:

$$R_{c0} = 58.84 \text{ [MPa]}$$

$$f_{NA,CPA} = \begin{cases} 1.00 & , \text{ si } NA = 0 \\ 0.88 & , \text{ si } NA = 1 \\ 0.75 & , \text{ si } NA = 2 \\ 0.63 & , \text{ si } NA = 3 \end{cases}$$

y donde:  $R_{c,e}$  es la resistencia a la compresión paralela esperada en [MPa],  $f_{NA,CPA}$  es el factor adimensional de reducción de resistencia a compresión paralela por nivel de ataque,  $R_{c0}$  es la resistencia a la compresión paralela sin daño visible por termitas en [MPa], y  $NA$  es el nivel de ataque identificado según la Tabla 5.

Vale destacar que esta expresión es válida solo para maderas de roble evaluadas en edificios patrimoniales de Valparaíso y cuyo contenido de humedad sea igual al 12%. Para otras humedades se debe evaluar el efecto de esta sobre la resistencia. No obstante, si se demuestra que la especie es de roble y que los daños observados por termitas son compatibles con este estudio, entonces se considera válido el uso de esta expresión en otras localidades distintas a Valparaíso. La ecuación no considera la dispersión obtenida en los ensayos, por lo que debe ser usada sólo como una primera aproximación.

## 5.2. Ensayo de Compresión Perpendicular a la Fibra (CPE)

Las probetas son presionadas en su dirección perpendicular a las fibras, registrando los pares de carga y desplazamiento durante la ejecución del ensayo. Se obtienen curvas como las mostradas en la Figura 13, en donde es posible apreciar un comportamiento altamente dúctil y no-lineal. Según los criterios de la norma NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 1986c), se establece un límite de 2.5 [mm] como deformación máxima para la determinación de la falla de la probeta, por lo que los valores de carga máxima,  $Q$ , se extraen en función de ello.

La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra es calculada, para cada probeta, según la Ecuación (4).

$$R_{cn} = \frac{Q}{z \cdot \bar{a}} \quad (4)$$

donde:  $R_{cn}$  es la resistencia a la compresión perpendicular en [MPa],  $Q$  es la carga máxima registrada en el ensayo (o la carga alcanzada a 2.5 [mm] de desplazamiento, la que sea menor) en [N],  $z$  es el ancho de la placa rígida de compresión igual a 50 [mm], y  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos en la probeta en [mm].

Para normalizar el contenido de humedad a un valor del 12%, la resistencia a la compresión perpendicular es ajustada según la Ecuación (5), extraída de la norma chilena NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017b). Como se puede observar, la resistencia normalizada es idéntica a la original, por lo que los resultados no sufren ningún cambio en su magnitud.

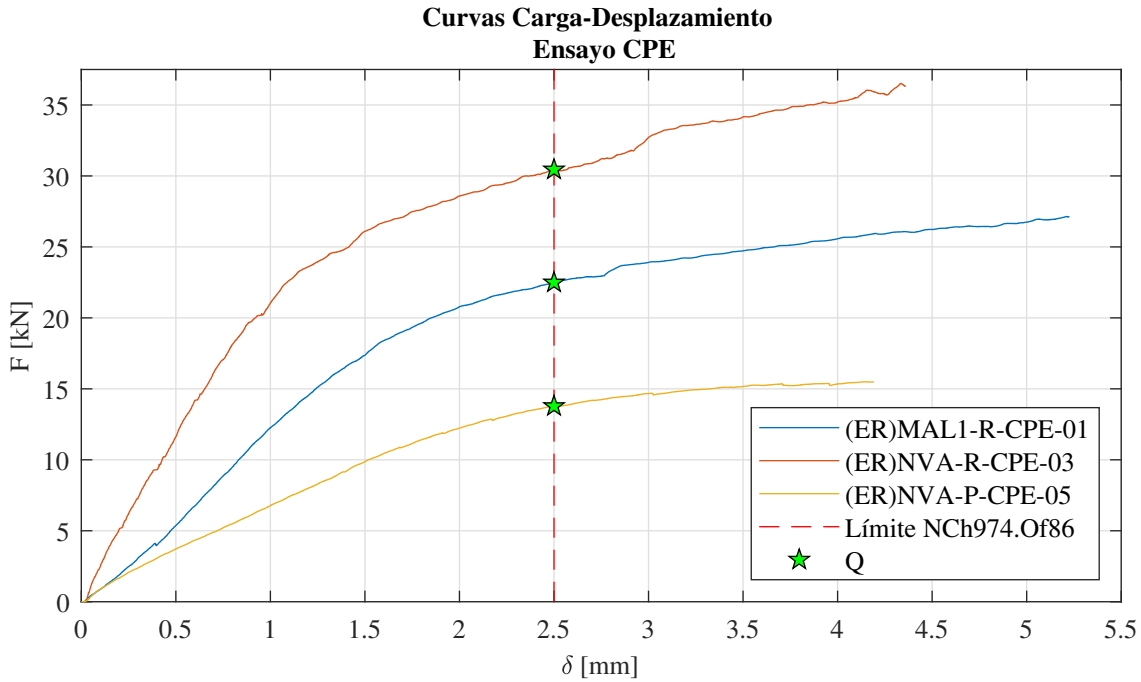


Figura 13: Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de Compresión Perpendicular.

$$R_{cn,12} = R_{cn} \cdot \left( \frac{1.00 - (0 \cdot 12)}{1.00 - (0 \cdot H)} \right) = R_{cn} \quad (5)$$

donde:  $R_{cn,12}$  es la resistencia a la compresión perpendicular normalizada a un 12% de contenido de humedad en [MPa], y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en [%], el cual no puede ser menor a 10% ni mayor a 23%.

En la Figura 14 se presentan los gráficos de dispersión obtenidos para los diferentes grupos de probetas. En primera instancia es posible notar una muy alta variabilidad en los resultados de las probetas patrimoniales de roble, lo cual se condice con la dispersión que existe en los niveles de daño en ellas. El rango entre sus valores extremos alcanza 14.0 [MPa], superior a los 7.4 [MPa] de los especímenes de roble nuevos y los 8.7 [MPa] de sus símiles nuevos de pino oregón. Las probetas de roble nuevas alcanzan, en promedio, una resistencia levemente mayor a las patrimoniales, con una mediana que llega a los 11.9 [MPa] en comparación con los 8.4 [MPa] de estas otras. Por su parte, es interesante notar que las probetas de pino oregón demuestran tener incluso menor resistencia que las muestras dañadas, logrando una mediana de 6.4 [MPa].

Se puede observar que los promedios de los grupos "nuevos" presentan magnitudes menores que los esperados, mientras que las dispersiones se mantienen en un rango comparable con la literatura. Por ejemplo, Catalán et al. (2019) en una campaña experimental realizada en el Instituto Forestal de Chile con probetas de pino oregón a escala estructural, obtuvieron un valor promedio de  $R_{cn}$  igual a 9.7 [MPa] y una desviación estándar de 2.7 [MPa], en contraposición con los 7.0 [MPa] y 2.8 [MPa] respectivos del presente trabajo. Por otro lado, otro estudio idéntico en la misma institución, pero para probetas de roble (Catalán et al., 2020), indica un promedio de  $R_{cn}$  de 16.5 [MPa] y una desviación estándar de 3.4 [MPa], a diferencia de los resultados obtenidos en esta investigación de

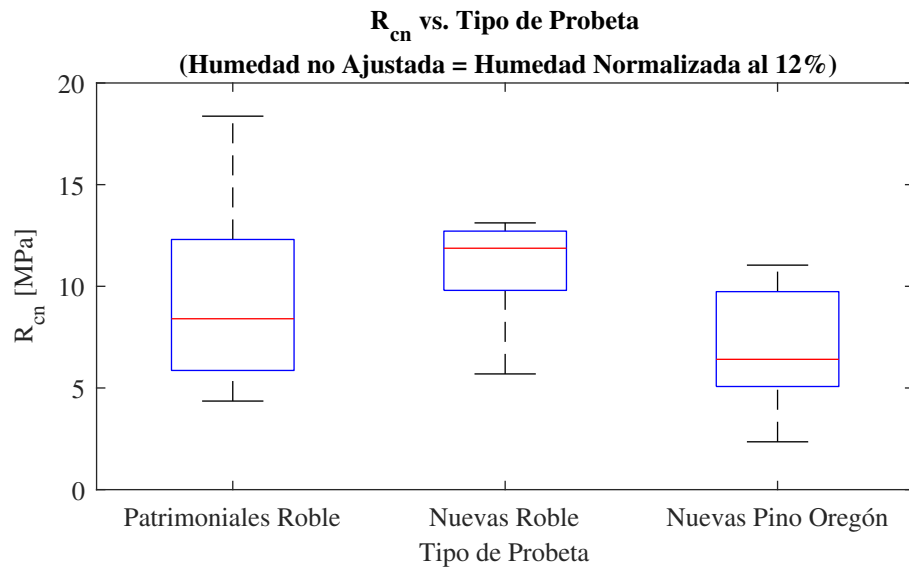


Figura 14: Resistencia a la Compresión Perpendicular según tipo de probeta.

10.8 [MPa] y 2.8 [MPa], respectivamente. Esta diferencia podría deberse, entre otros factores, al limitado tamaño muestral del presente trabajo en comparación a los demás citados, a una diferencia en las condiciones de crecimiento local de los árboles, o bien a procesos de secado menos elaborados que los que se usan en la industria maderera. Sin embargo, la demostración de estas hipótesis cae fuera del alcance del presente trabajo.

En la gráfica de la Figura 15 se aprecia la desagregación de las resistencias obtenidas en probetas patrimoniales de roble, agrupadas en función del nivel de ataque por termitas identificado según los criterios de la Tabla 5.

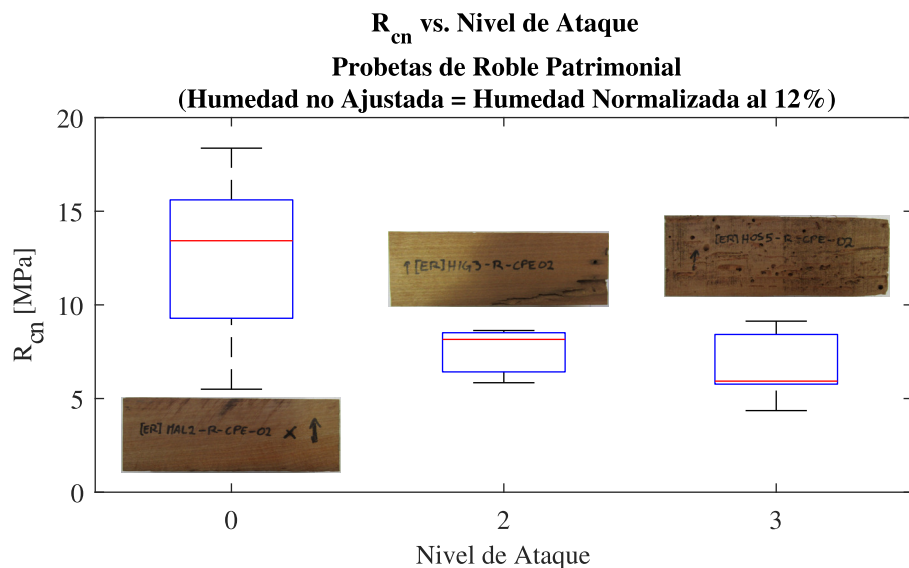


Figura 15: Resistencia a la Compresión Perpendicular según Nivel de Ataque por termitas.

Se puede ver que las piezas clasificadas con un nivel 0 (sin daño) resultaron en una dispersión

más amplia que las otras categorías, alcanzando un rango de datos de 12.9 [MPa] y un coeficiente de variación de 35.2%. Asimismo, aquellas clasificadas con un nivel 2 poseen una resistencia levemente mayor, en promedio, que las probetas más deterioradas, con un 50% de los especímenes bajo 8.2 [MPa], en contraposición con los 5.9 [MPa] de aquellas en el nivel 3. Si bien no fue posible reconocer ningún espécimen dentro del nivel 1, si se puede notar una tendencia a la baja en la resistencia a medida que el daño incrementa. Sin embargo, es necesario reconocer que se necesitan más datos para poder confirmar esta afirmación con un mayor grado de confiabilidad.

Con el objeto de determinar una expresión que permita predecir  $R_{cn,12}$  a partir del nivel de ataque, se aplica una regresión lineal a las medianas observadas. Dicho resultado se puede ver en la Figura 16, en donde el factor de correlación  $R^2$  alcanza un valor de 0.998, indicando un buen ajuste de la curva. Sin embargo, es necesario reiterar que no se observaron probetas en el grupo de nivel de ataque 1, por lo que la recta de regresión podría estar sesgada.

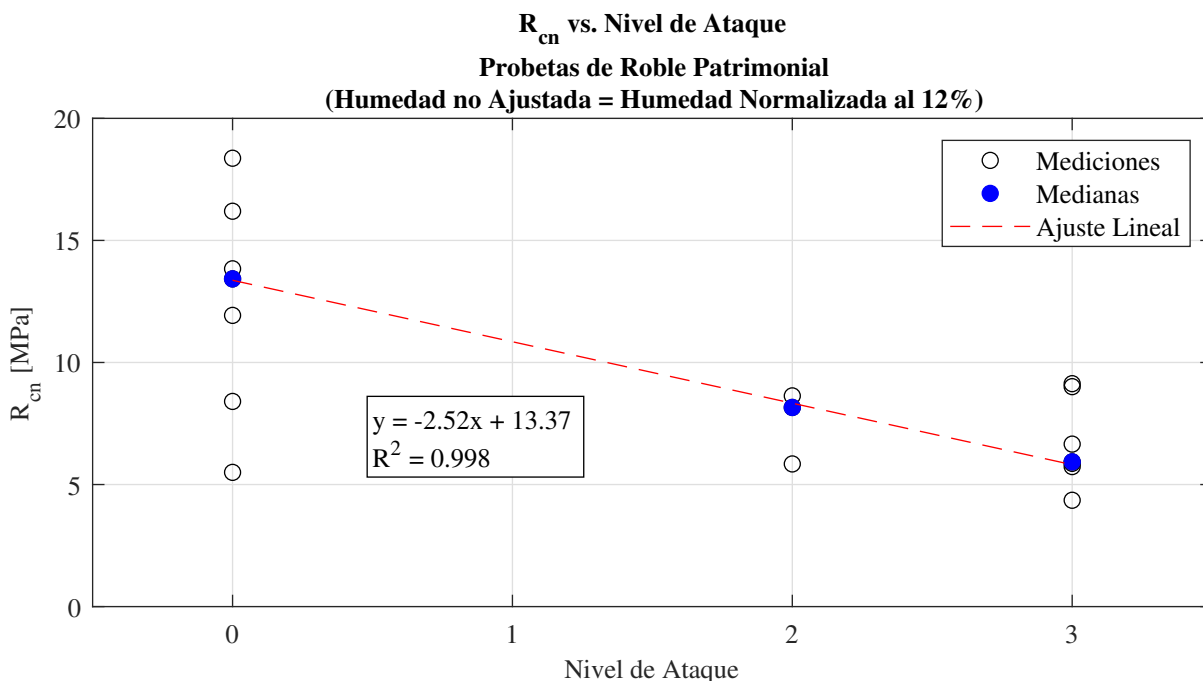


Figura 16: Ajuste de regresión lineal para los resultados de Resistencia a la Compresión Perpendicular según el nivel de ataque por termitas.

Se plantea la expresión empírica de la Ecuación (6) a partir de la información de la curva de regresión. Con ella, se puede predecir la resistencia a la compresión perpendicular esperada en viviendas patrimoniales de Valparaíso en función del nivel de ataque por termitas. La expresión propuesta es válida para cualquier contenido de humedad, según lo revisado en la Ecuación (5). Sin embargo, y dado que la expresión no abarca la variabilidad observada en los ensayos, su aplicación debe limitarse solo a una estimación preliminar. Vale destacar que si bien la ecuación está calibrada para edificaciones en Valparaíso, es posible extrapolar los resultados a otras localidades si se demuestra que la materialidad es la misma y si el daño es causado por agentes xilófagos similares.

Resulta importante señalar el hecho de que la resistencia esperada sin ataque visible por termitas,  $R_{cn0}$ , se acerca un poco más al promedio reportado por la literatura para probetas sin daño (16.5 [MPa]). Sin embargo, esta aun queda con una magnitud un 19% menor.

$$R_{cn,e} = f_{NA,CPE} \cdot R_{cn0} \quad (6)$$

donde:

$$R_{cn0} = 13.37 \text{ [MPa]}$$

$$f_{NA,CPE} = \begin{cases} 1.00 & , \text{ si } NA = 0 \\ 0.81 & , \text{ si } NA = 1 \\ 0.62 & , \text{ si } NA = 2 \\ 0.43 & , \text{ si } NA = 3 \end{cases}$$

y donde:  $R_{cn,e}$  es la resistencia a la compresión perpendicular esperada en [MPa],  $f_{NA,CPE}$  es el factor adimensional de reducción de resistencia a compresión perpendicular por nivel de ataque,  $R_{cn0}$  es la resistencia a la compresión perpendicular sin daño visible por termitas en [MPa], y  $NA$  es el nivel de ataque identificado según la Tabla 5.

### 5.3. Ensayo de Tracción Perpendicular a la Fibra (TPE)

Cada muestra de ensayo es traccionada hasta inducir la falla en dirección perpendicular a la fibra. Para cada una de ellas se registra la curva carga-desplazamiento. Algunos ejemplos de estas curvas se presentan en la Figura 17, en donde se puede comprobar el comportamiento frágil del material para esta configuración de carga. De cada registro se extrae el valor de carga máxima,  $Q$ , con la cual se procede a calcular la tensión de rotura.

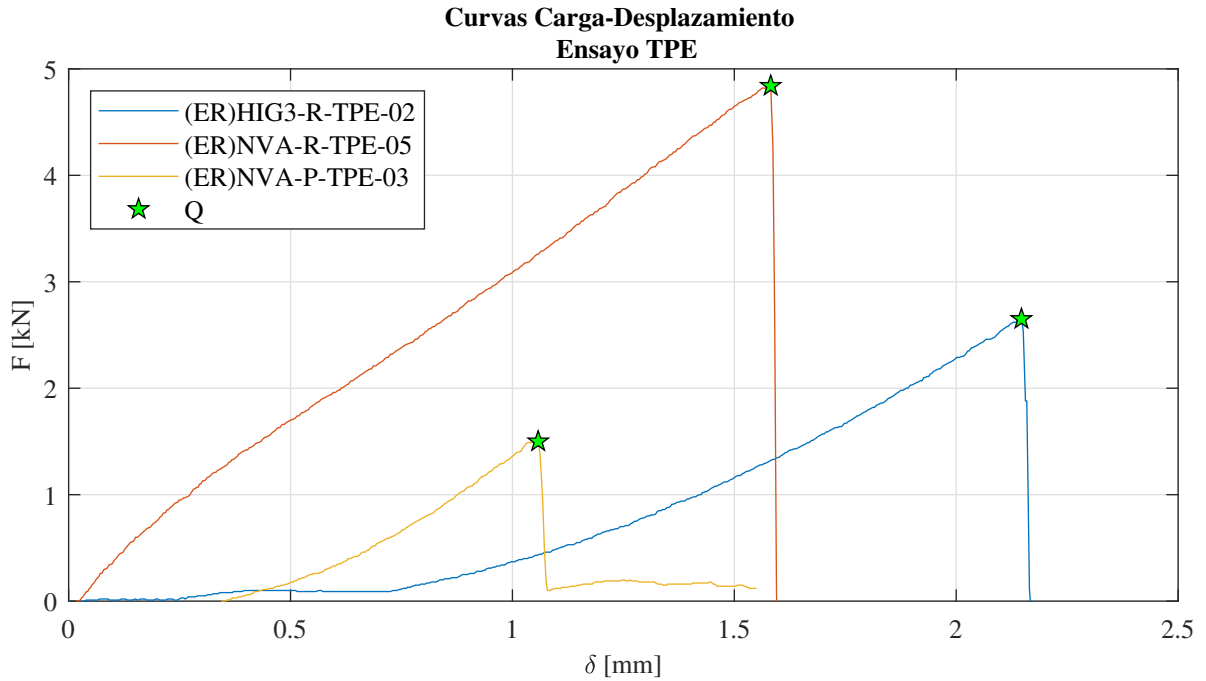


Figura 17: Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de Tracción Perpendicular.

La resistencia a la tracción perpendicular a la fibra se calcula, para cada ensayo, según la Ecuación (7).

$$R_{tn} = \frac{Q}{\bar{l} \cdot \bar{a}} \quad (7)$$

donde:  $R_{tn}$  es la resistencia a la tracción perpendicular en [MPa],  $Q$  es la carga máxima registrada en el ensayo en [N],  $\bar{l}$  es el promedio de las alturas medidas del plano de falla de la probeta en [mm], y  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos en el plano de falla de la probeta en [mm].

La norma de referencia usada para tipificar la humedad no explicita factores de ajuste para este ensayo en particular. Al igual que el caso del ensayo de compresión perpendicular, se asume que la humedad no genera variaciones significativas en la respuesta de estos especímenes, por lo que se determina que los resultados medidos son equivalentes a si estos hubieran sido recolectados de probetas a un contenido de humedad del 12%.

En la Figura 18 se pueden ver los gráficos *boxplot* que representan la dispersión de los resultados obtenidos para la resistencia. Se puede observar una gran variabilidad en los resultados obtenidos de las probetas patrimoniales de roble, en donde el rango va desde los 0.04 [MPa] hasta los 7.7 [MPa], superando en ambas cotas a los otros 2 grupos. Por su parte, los especímenes de pino oregón alcanzaron la dispersión mínima dentro de estos 3 grupos, con un rango de datos de 2.5 [MPa]. Al igual que para el caso de compresión perpendicular, se aprecia una tendencia que indica que, en términos medios, la resistencia de las probetas de roble nuevas es mayor a la de las patrimoniales, mientras que las nuevas de pino oregón caen por debajo de las magnitudes obtenidas para los especímenes dañados. Se obtiene que el percentil 50 de cada uno de ellos es de 2.9 [MPa] para patrimoniales, 3.7 [MPa] para nuevas de roble, y 1.1 [MPa] para las nuevas de pino.

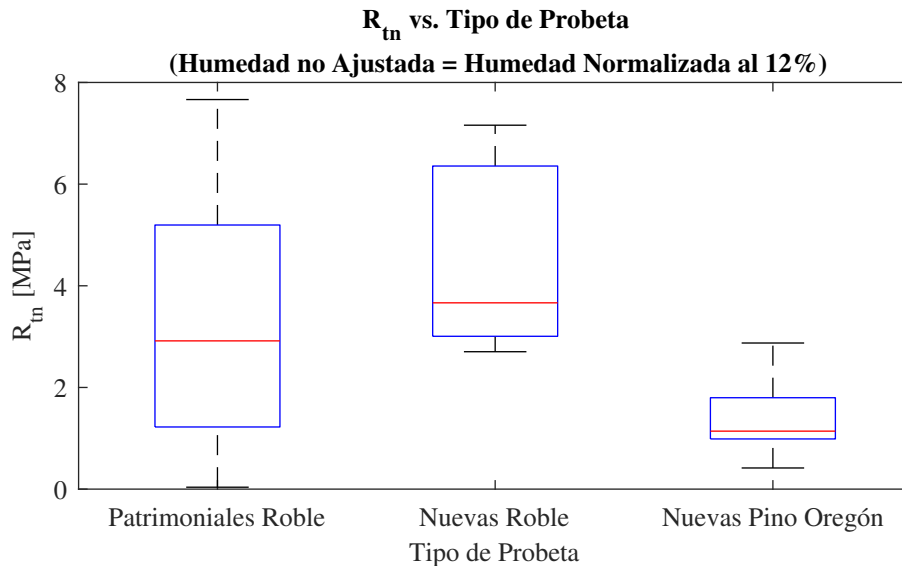


Figura 18: Resistencia a la Tracción Perpendicular según tipo de probeta.

Al comparar los resultados con la literatura es posible notar ciertas cosas. Por un lado, según el compendio de propiedades de las maderas de especies forestales de Chile (Hernández C. & Pinilla S., 2010), la resistencia a tracción perpendicular media del roble es de 6.1 [MPa], mientras que la del pino oregón de 1.2 [MPa] (dirección radial). El primer valor es mayor que el resultado promedio en esta investigación, donde se alcanzó una resistencia  $R_{tn}$  de 4.4 [MPa], pero con una desviación estándar de 1.9 [MPa]. Por otro lado, la media obtenida para el pino oregón se parece bastante a la registrada en el compendio, llegando a una magnitud de 1.4 [MPa] con desviación de 0.7 [MPa].

Nuevamente, la variabilidad natural de la madera podría estar sesgando los resultados del roble nuevo (lo cual se observa en la desviación estándar obtenida), y al considerar un espacio muestral mayor se podrían ver resultados más cercanos a la literatura. No obstante, corroborar esta u otra hipótesis no está dentro del alcance de esta investigación.

A continuación, en la Figura 19, se presentan los resultados de resistencia a tracción perpendicular para las probetas patrimoniales de roble, agrupados según el nivel de ataque de la Tabla 5.

Se puede apreciar una clara correlación entre nivel de daño por termitas y resistencia a la tracción perpendicular: a medida que el nivel de daño aumenta, la resistencia disminuye. La mediana de resultados baja desde un valor igual a 6.2 [MPa] en el nivel de ataque 0, hasta 1.2 [MPa] en el nivel máximo. Nuevamente puede observarse una dispersión mayor en el grupo de nivel 0 (sin daño), el cual presenta un rango de resistencias que llega a los 4.7 [MPa]. Es importante recalcar que el nivel de daño 1 agrupó sólo 2 probetas, lo cual es un factor a considerar en la validez de estos resultados.

En la Figura 20 se ajusta una recta a las medianas obtenidas de  $R_{tn,12}$  con la intención de poder cuantificar el efecto del daño por termitas sobre esta resistencia en particular. Como puede verse, la curva de regresión se ajusta muy bien a los datos, arrojando un coeficiente  $R^2$  de 0.948.

A partir de esta relación entre resistencia y nivel de ataque se formula una expresión que permite predecir dicha variable en función de una evaluación visual (Ecuación (8)). La propuesta es válida en todo el rango de humedades, solo en piezas estructurales de roble en edificios patrimoniales de Valparaíso. La ecuación omite la variabilidad de resultados, por lo que se recomienda usarla sólo como una aproximación inicial. Se destaca el hecho que, si bien la expresión aplica en Valparaíso, ésta se puede usar en otras localidades si se demuestra que la especie y el daño causado por termitas es similar.

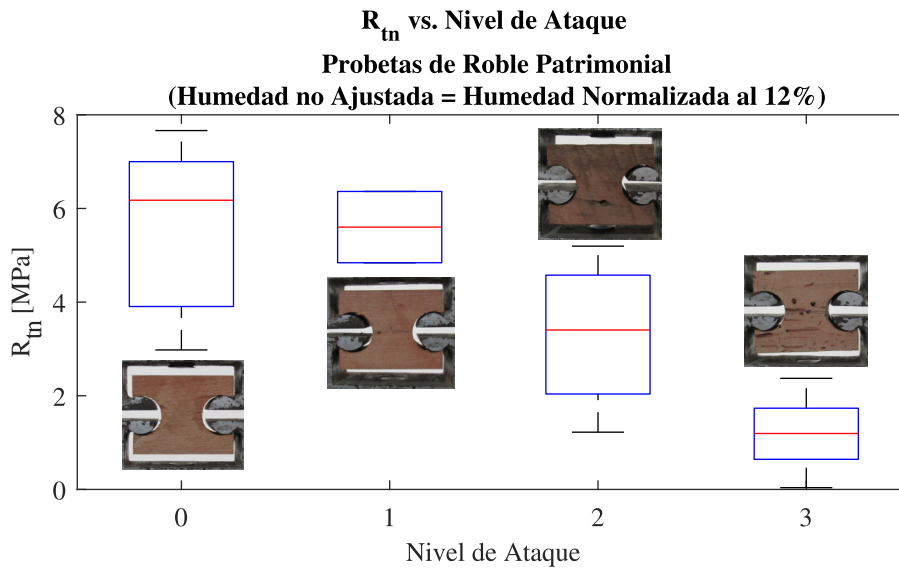


Figura 19: Resistencia a la Tracción Perpendicular según Nivel de Ataque por Termitas.

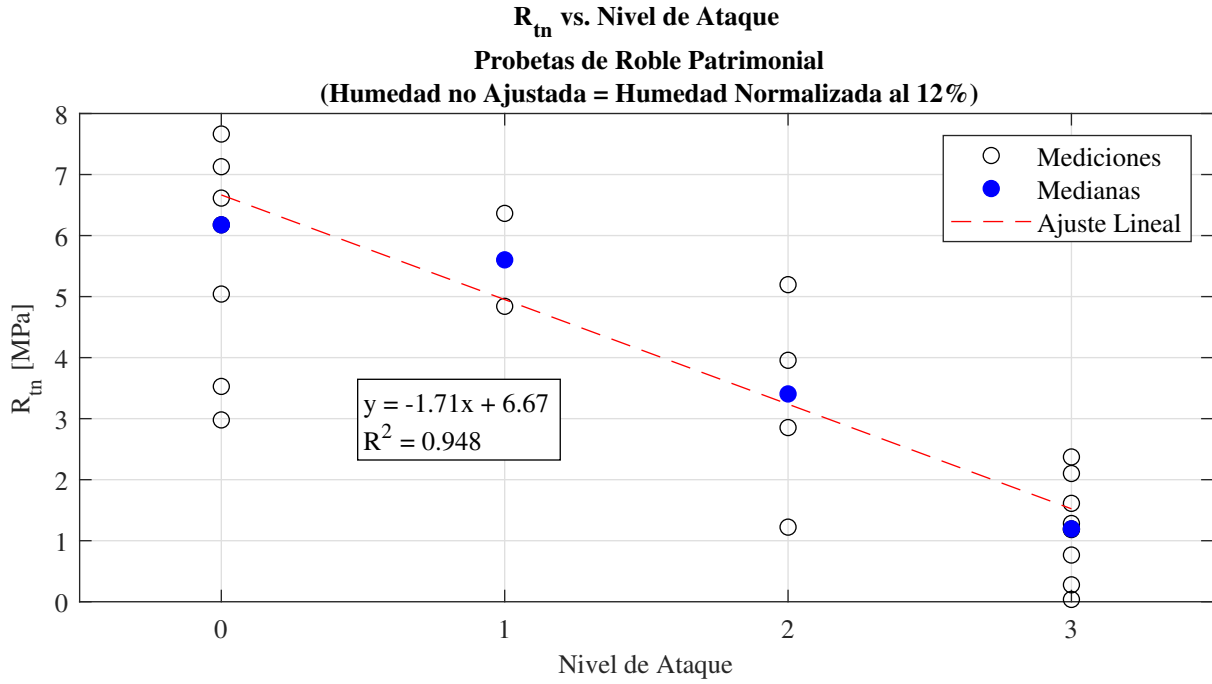


Figura 20: Ajuste de regresión lineal para los resultados de Resistencia a la Tracción Perpendicular según el nivel de ataque por termitas.

$$R_{tn,e} = f_{NA,TPE} \cdot R_{tn0} \quad (8)$$

donde:

$$R_{tn0} = 6.67 \text{ [MPa]}$$

$$f_{NA,TPE} = \begin{cases} 1.00 & , \text{ si } NA = 0 \\ 0.74 & , \text{ si } NA = 1 \\ 0.49 & , \text{ si } NA = 2 \\ 0.23 & , \text{ si } NA = 3 \end{cases}$$

y donde:  $R_{tn,e}$  es la resistencia a la tracción perpendicular esperada en [MPa],  $f_{NA,TPE}$  es el factor adimensional de reducción de resistencia a tracción perpendicular por nivel de ataque,  $R_{tn0}$  es la resistencia a la tracción perpendicular sin daño visible por termitas en [MPa], y  $NA$  es el nivel de ataque identificado según la Tabla 5.

Es interesante notar que el resultado obtenido de resistencia a tracción normal esperada sin daño visible,  $R_{tn0}$ , tiene una magnitud mucho más cercana a la literatura (6.1 [MPa]) que el promedio del grupo de roble nuevo (4.4 [MPa]).

#### 5.4. Ensayo de Cizalle Paralelo a la Fibra (CZ)

Las probetas de cizalle son cargadas de tal forma de poder inducir un plano de falla de cizalle en dirección paralela a las fibras. Para cada espécimen, se registran los pares carga-desplazamiento obtenidos, resultando en curvas de comportamiento como las que se ven en la Figura 21. El comportamiento del material para este caso es similar a los observados para el ensayo TPE, en donde se aprecia una falla abrupta y frágil. Al igual que en casos anteriores, se extrae el valor de carga máxima,  $Q$ , con el cual se estima la resistencia mecánica.

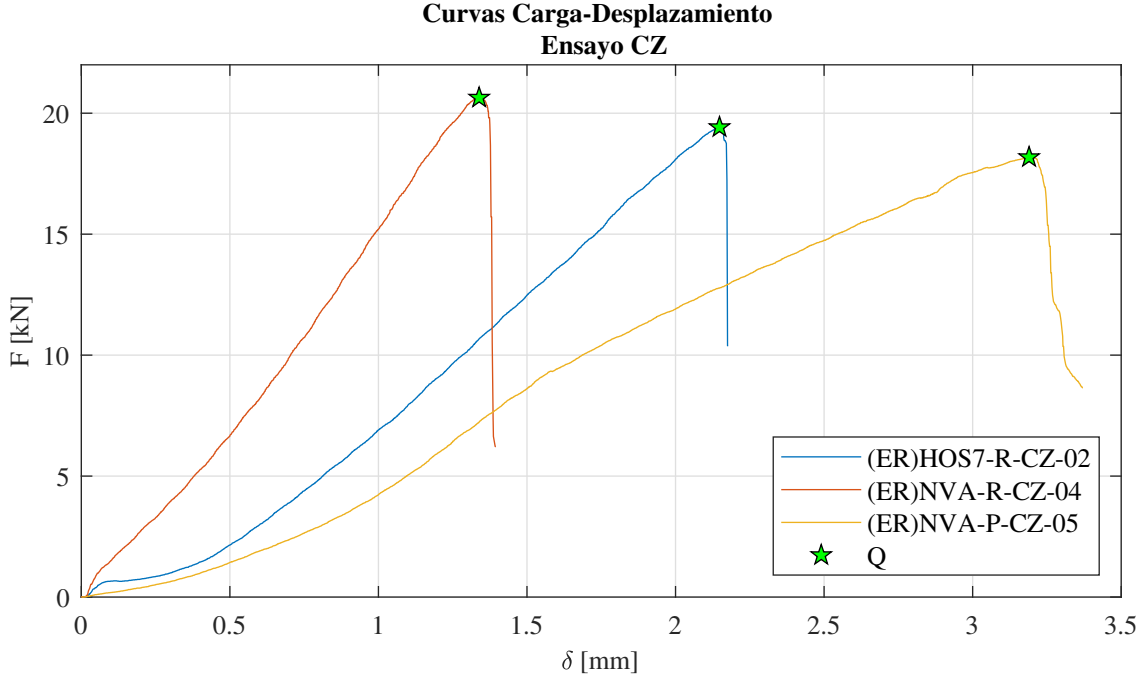


Figura 21: Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de Cizalle Paralelo.

La resistencia al cizalle paralelo a la fibra se estima a partir de la relación indicada en la Ecuación (9).

$$R_v = \frac{Q}{\bar{h} \cdot \bar{e}} \quad (9)$$

donde:  $R_v$  es la resistencia al Cizalle paralelo en [MPa],  $Q$  es la carga máxima registrada en el ensayo en [N],  $\bar{h}$  es el promedio de las alturas medidas del plano de falla de la probeta en [mm], y  $\bar{e}$  es el promedio de los anchos medidos en el plano de falla de la probeta en [mm].

Los resultados son normalizados a un contenido de humedad del 12% utilizando los coeficientes de ajuste de la norma NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017b), resultando en la Ecuación (10).

$$R_{v,12} = R_v \cdot \left( \frac{1.33 - (0.0167 \cdot 12)}{1.33 - (0.0167 \cdot H)} \right) \quad (10)$$

donde:  $R_{v,12}$  es la resistencia a la compresión perpendicular normalizada a un 12% de contenido de humedad en [MPa], y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en [%], el cual no puede ser menor a 10% ni mayor a 23%.

Los valores calculados y sus dispersiones según el tipo de probeta se pueden visualizar en los gráficos de la Figura 22. En la Figura 22a se ven los resultados sin la humedad normalizada, mientras que en la Figura 22b los valores ajustados según la Ecuación (10). Como puede observarse, las gráficas no varían significativamente, lo cual se condice con el acondicionamiento de las probetas a un contenido de humedad cercano al 12 %.

En los gráficos se puede apreciar que, en términos medios, la resistencia al cizalle paralelo normalizada por contenido de humedad para el roble se ve fuertemente afectada por su condición patrimonial, haciendo que los resultados de estas probetas sea bastante menor a los de sus símiles nuevos (medias iguales a 4.7 [MPa] y 8.6 [MPa], respectivamente). La dispersión, por su parte, es similar tanto en probetas patrimoniales como nuevas, con rangos de 9.1 [MPa] y 9.0 [MPa], respectivamente. Por otro lado, los especímenes de pino oregón presentan una variabilidad menor, alcanzando un rango de solo 5.3 [MPa]. Asimismo, estas probetas logran valores de resistencia similares al grupo patrimonial.

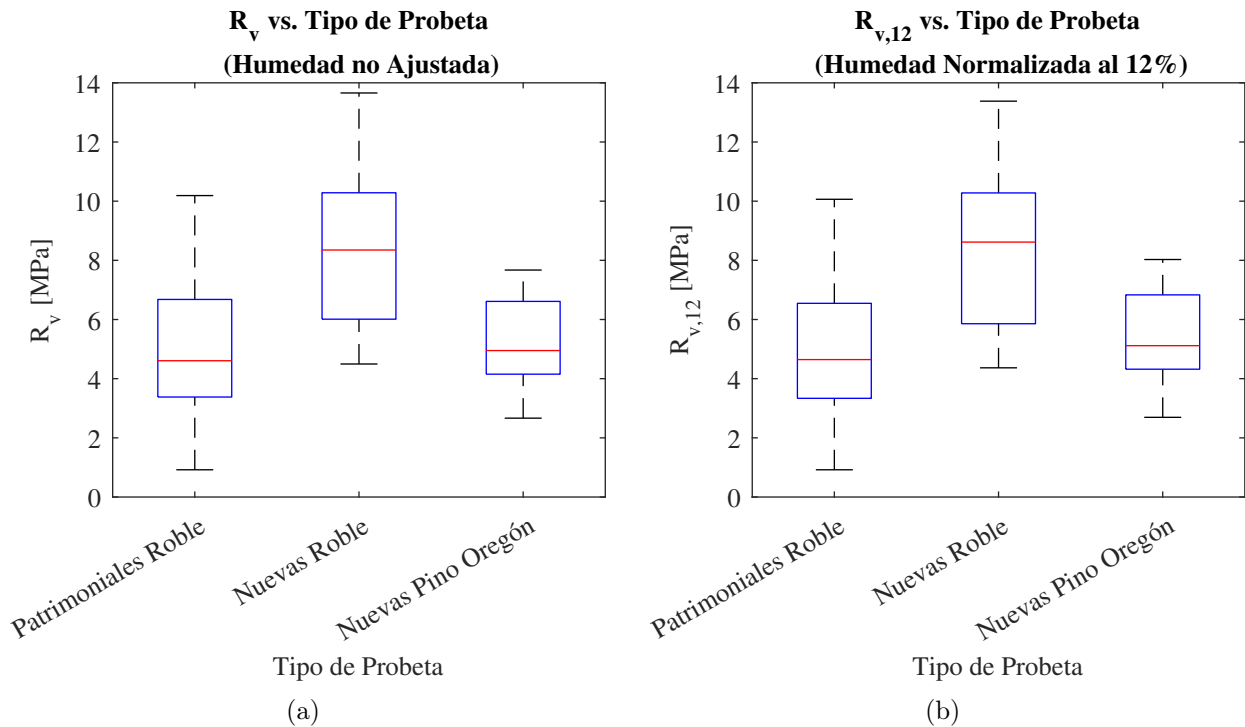


Figura 22: Resistencia al Cizalle Paralelo según tipo de probeta: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12 %.

Las medias obtenidas para el pino oregón se condicen muy bien con los resultados del Instituto Forestal de Chile, en su informe de ensayos a escala estructural en probetas clasificadas visualmente (Catalán et al., 2019). La resistencia estimada en el presente proyecto alcanzó los 5.4 [MPa] con una desviación de  $\pm 1.6$  [MPa], situando a los especímenes justo entre los grupos estructurales GS y G1 de dicho informe. Por su parte, el valor medio calculado para el roble llega a 8.4 [MPa] con una desviación estándar de 3.0 [MPa], superando en un 21.7% al obtenido en el informe técnico respectivo de probetas de roble del Instituto Forestal (Catalán et al., 2020) (6.9 [MPa] y desviación de 1.1 [MPa] para el grado estructural N<sup>o</sup>1). Cabe destacar que ambos estudios realizados por el INFOR contaron con un tamaño de muestra significativamente mayor que el disponible en este

estudio.

La resistencia al cizalle paralelo en función del nivel de ataque de termitas se presenta en la Figura 23, tanto para valores directos como para aquellos normalizados por contenido de humedad. Es interesante ver que, a diferencia de los resultados para otro tipo de cargas, la resistencia al cizalle pareciera no estar influenciada por la porosidad ocasionada por las termitas. A priori no es posible determinar una tendencia en los resultados a medida que el nivel de ataque aumenta. Sin embargo, los niveles de ataque 1 y 2 solo contemplaron un grupo de 2 y 1 probeta, respectivamente. Esto podría sesgar las conclusiones finales, considerando la alta variabilidad que existe naturalmente en la madera sumado a los efectos del daño sobre el material. Destaca, además, la alta dispersión del grupo de probetas que se encontraba en buen estado (nivel 0), cuyo rango alcanzó los 9.1 [MPa] y su coeficiente de variación un 49.9%.

A modo de poder demostrar la poca correlación obtenida entre nivel de ataque y resistencia al cizalle paralelo, se ajusta una recta de regresión a las medianas de  $R_{v,12}$  (ver Figura 24). Como es posible ver, la correlación lineal es nula, y la recta tiende a una horizontal.

De esta manera, no es posible plantear una ecuación empírica que permita relacionar el nivel de daño observado con la resistencia al cizalle paralelo,  $R_{v,12}$ , usando los resultados de este trabajo.

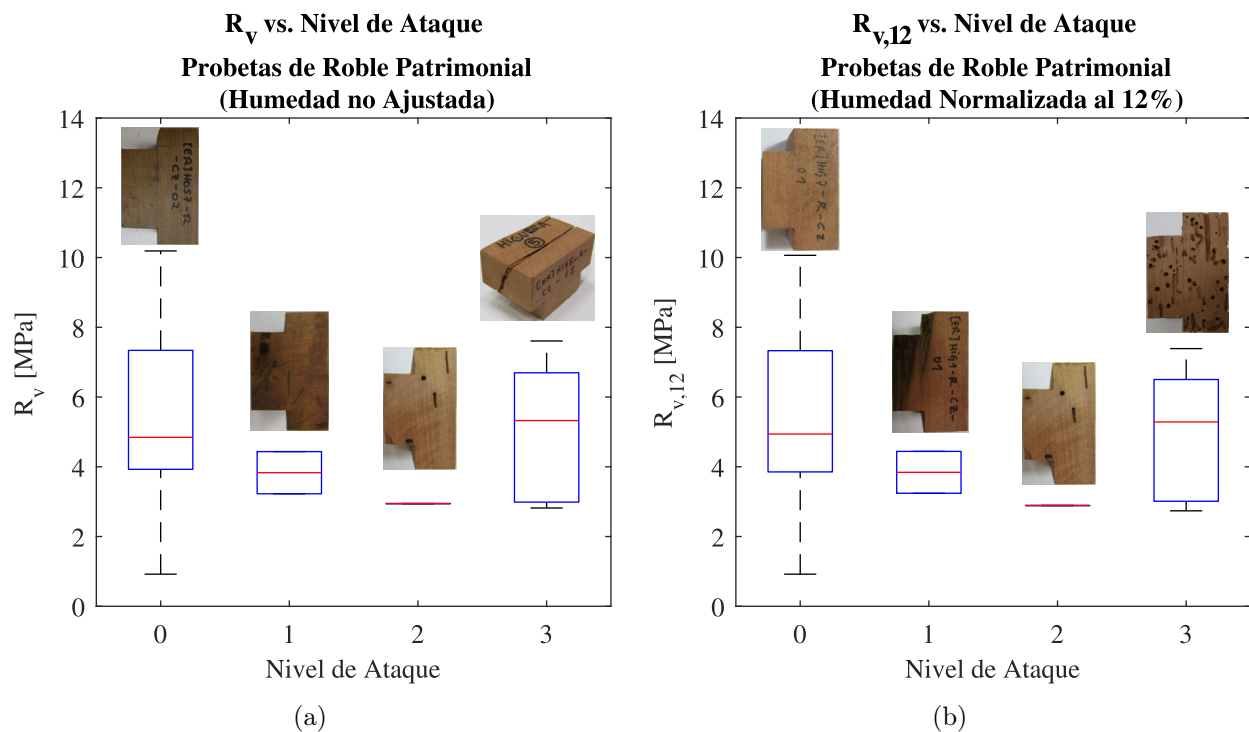


Figura 23: Resistencia al Cizalle Paralelo según Nivel de Ataque de termitas: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12%.

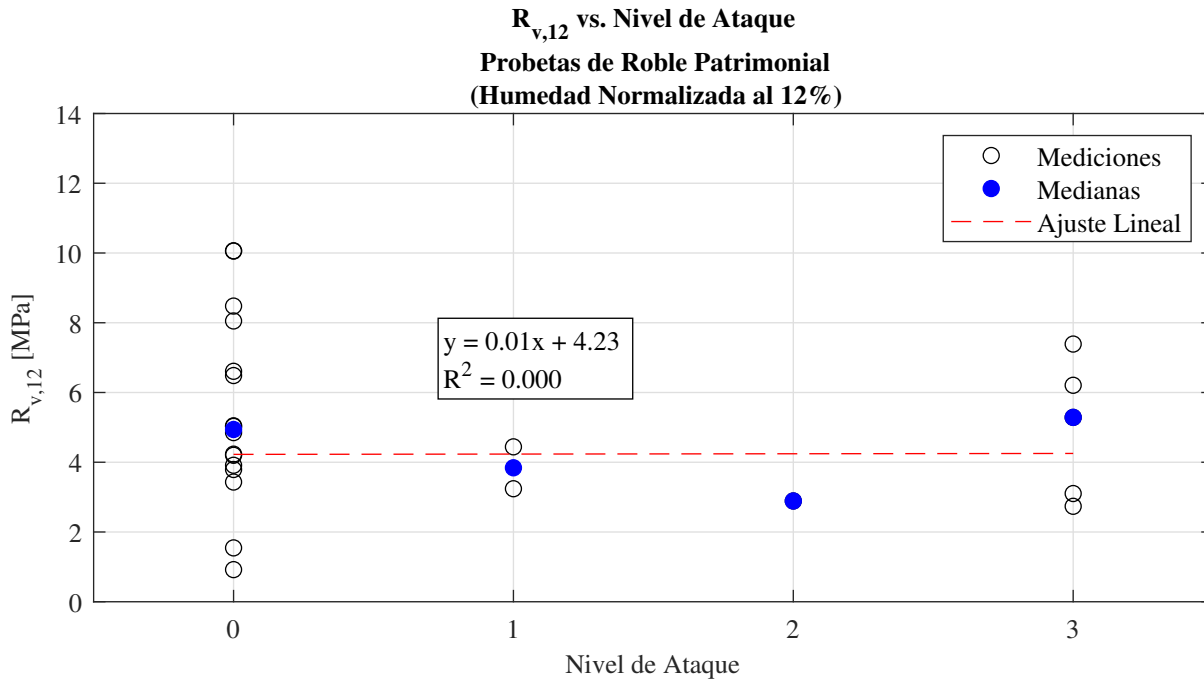


Figura 24: Ajuste de regresión lineal para los resultados de Resistencia al Cizalle Paralelo según el nivel de ataque por termitas.

### 5.5. Ensayo de Flexión Estática (FL)

Las probetas de flexión son cargadas a 3 puntos con una fuerza concentrada a la mitad de la luz. De esta manera, se registra tanto la magnitud de ella como la deflexión producida en el tiempo que dura el ensayo. En la Figura 25 se observan tres ejemplos de esto, en donde se aprecia un comportamiento lineal-elástico en el rango inicial, con una posterior caída en la rigidez cuando las deflexiones aumentan. Finalmente, la falla producida es frágil, dejando en algunos casos cierto grado de resistencia residual. Para cada curva se identifica el valor de carga máxima  $Q$  con el cual es posible obtener la resistencia en flexión. Notar que al inicio de todas las curvas el equipo de ensayo ocasiona un salto de fuerza de aproximadamente 1 [kN]. Para efectos de cálculo de resistencia, se asume que dicha fuerza se transmite efectivamente a la probeta. Para más detalles sobre esto se recomienda ver el Apéndice C.

En el ensayo de flexión estática se calculan dos propiedades mecánicas: el módulo de rotura y el módulo de elasticidad en flexión. A continuación, sus resultados se informan en dicho orden.

El módulo de rotura en flexión se calcula según la expresión indicada en la Ecuación (11).

$$R_f = \frac{3Q \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (11)$$

donde:  $R_f$  es el módulo de rotura en flexión en [MPa],  $Q$  es la carga máxima registrada en el ensayo en [N],  $L$  es la luz del ensayo igual a 700 [mm],  $b$  es el ancho de la probeta medida a la mitad de la luz en [mm], y  $h$  es la altura de la probeta medida a la mitad de la luz en [mm].

Los resultados son ajustados a un contenido de humedad del 12 % para evitar sesgos y poder comparar correctamente. Utilizando los factores de ajuste de la norma NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017b) se llega a la relación de la Ecuación (12).

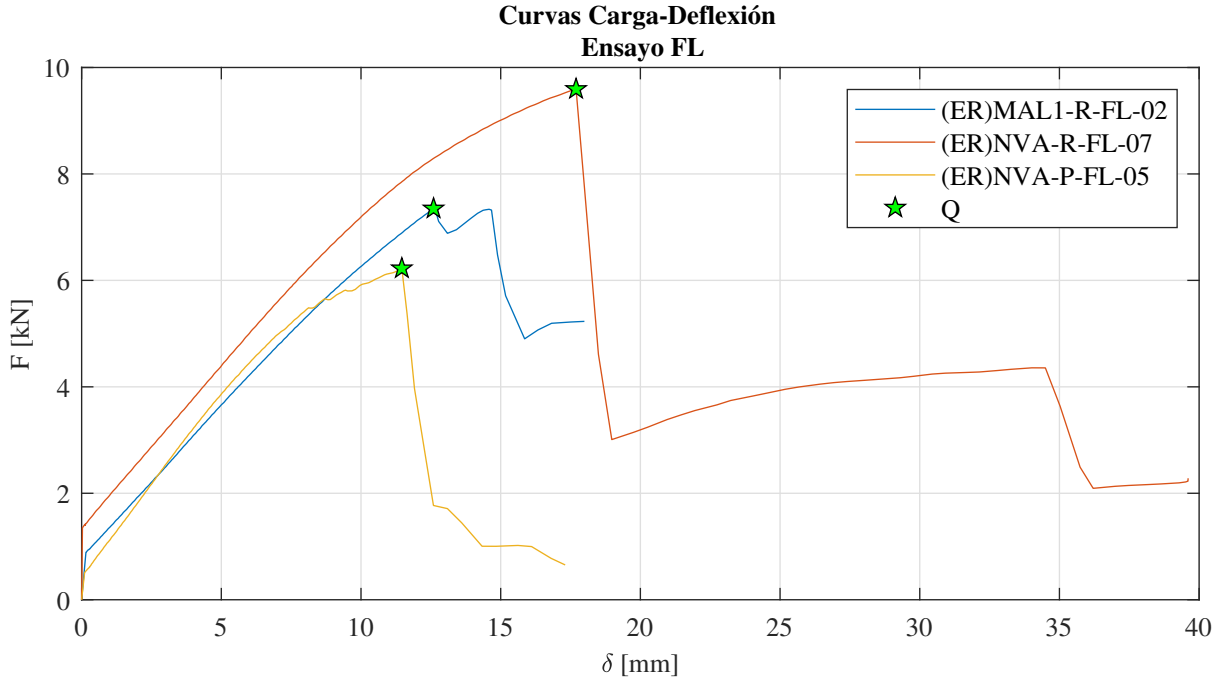


Figura 25: Ejemplos de mediciones carga-deflexión para el ensayo de Flexión Estática.

$$R_{f,12} = \begin{cases} R_f & \text{si } R_f \leq 16.6 \text{ [MPa]} \\ R_f \cdot \left( \frac{16.65 - (40 \cdot 12)}{16.65 - (40 \cdot H)} \right) & \text{si } R_f > 16.6 \text{ [MPa]} \end{cases} \quad (12)$$

donde:  $R_{f,12}$  es el módulo de rotura en flexión normalizado a un 12% de contenido de humedad en [MPa], y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en [%], el cual no puede ser menor a 10% ni mayor a 23%.

En la Figura 26 se puede ver la distribución de los resultados de  $R_f$  separados por tipo de probeta, tanto para el caso directo como para el de contenido de humedad normalizado. De la Figura 26b se pueden extraer algunas observaciones interesantes. En primer lugar, se aprecia que la dispersión de resistencias en el grupo patrimonial es notoriamente mayor que en los otros dos; de hecho, el rango de datos del primer grupo llega a 101.0 [MPa], mientras que en los otros solamente a 60.7 [MPa] (Nuevas Roble) y 27.7 [MPa] (Nuevas Pino Oregón). En segundo lugar, se obtienen, en promedio, valores del módulo de rotura más altos en los especímenes nuevos de roble que en los patrimoniales, lo cual tiene sentido considerando que la agrupación patrimonial posee mucha variabilidad debido a sus deterioros. En esta línea, se informan los siguientes valores de medianas para cada tipo de probeta: 73.6 [MPa] para las patrimoniales de roble, 82.0 [MPa] para las nuevas de roble, y 51.9 [MPa] para las nuevas de pino oregón.

En cuanto a los valores obtenidos de las probetas en condición nueva, se puede afirmar que estos se encuentran dentro del rango esperado y acordes a lo informado en la literatura. Por ejemplo, en este programa experimental el promedio de módulo de rotura en especímenes de roble nuevo fue de 85.9 [MPa] con desviación estándar de 18.4 [MPa], mientras que en un informe técnico del Instituto Forestal de Chile (INFOR) donde se evaluó la resistencia a flexión en probetas a escala estructural se obtuvo una media de 78.2 [MPa] con desviación de  $\pm 15.8$  [MPa], correspondiente a un Grado N<sup>o</sup>1 en clasificación visual (Catalán et al., 2020). Asimismo, el compendio de propiedades de

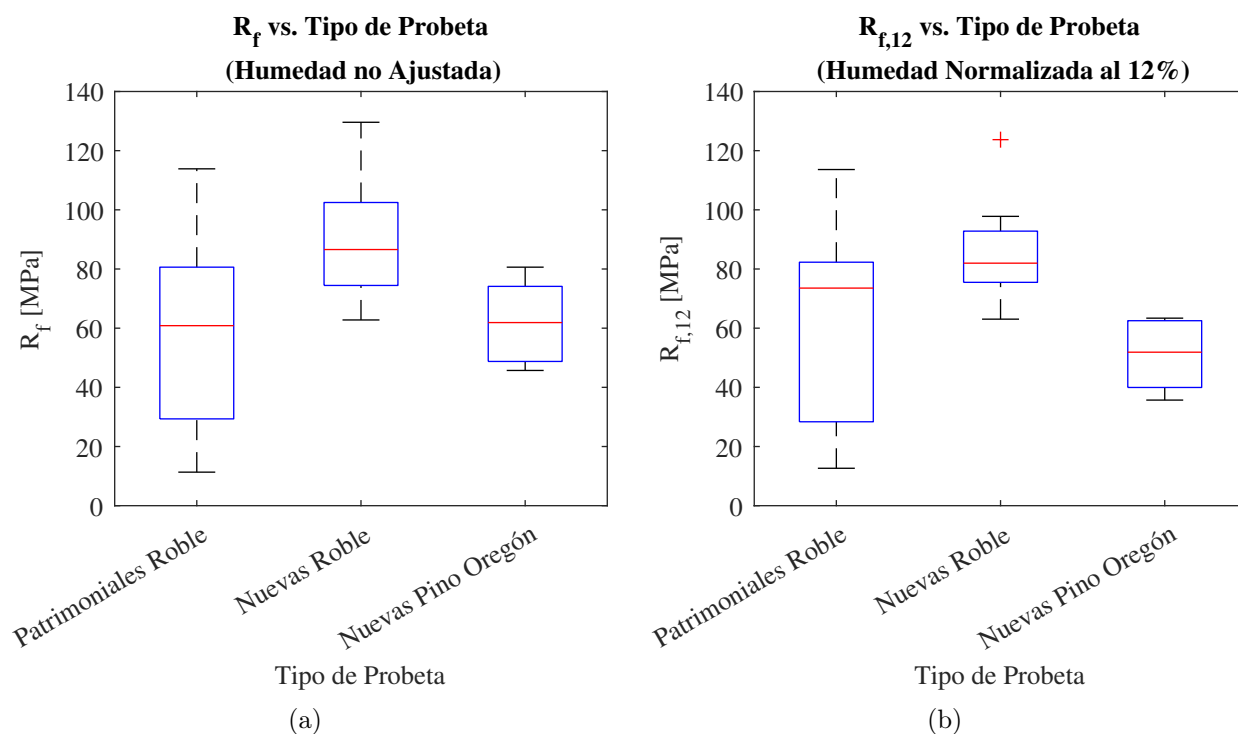


Figura 26: Módulo de Rotura en Flexión según tipo de probeta: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12%.

especies nativas de Chile informa un valor de módulo de rotura a flexión de 82.0 [MPa] para el roble (Hernández C. & Pinilla S., 2010). Como puede verse, la diferencia no es más que el 9%, lo cual es bajo considerando la variabilidad inherente del material. Por otro lado, el promedio obtenido en esta investigación para el pino oregón alcanzó los 50.9 [MPa] y una desviación estándar de 12.8 [MPa], el cual es comparable a la media registrada por el INFOR en un programa experimental realizado a probetas de esta especie, en donde se obtuvo una magnitud igual a 52.8 [MPa] con desviación de  $\pm 15.6$  [MPa] para el grado GS (Vásquez V. et al., 2013).

La resistencia en flexión de los especímenes de roble patrimonial, separados según su nivel de daño identificado según la Tabla 5, puede verse en los gráficos de la Figura 27. Se puede apreciar que, si bien las dispersiones son altas en cada nivel, la tendencia es clara: las muestras reducen su módulo de rotura conforme a un incremento en su daño debido a termitas. En términos medios, el módulo de rotura bajó desde aproximadamente 92 [MPa] en los primeros 2 niveles hasta cerca de los 30 [MPa] en el último nivel de daño. Se destaca la alta variabilidad de los resultados en el nivel de ataque 3, en donde el coeficiente de variación llega a 65.3% y se identifica un valor anómalo máximo. Finalmente, se hace el alcance de que en el nivel 0 (sin daño) sólo calificó una probeta; esto es importante, pues con un solo dato no es posible analizar bien el comportamiento del grupo.

Se realiza un análisis más profundo al caso de  $R_{f,12}$  en función del nivel de daño por termitas. Para ello se genera un ajuste lineal a las medianas de los resultados, para así verificar la correlación entre ambas variables. En la Figura 28 se observa el ajuste, en donde se aprecia una fuerte correlación entre el módulo de ruptura y el nivel de ataque, lo cual se resume en un factor  $R^2$  de 0.756. Si bien el valor de  $R^2$  no es tan alto como en los otros casos de carga, se hace presente el hecho de que para el nivel de ataque 0 solo se registra 1 probeta, lo cual podría sesgar el resultado final.

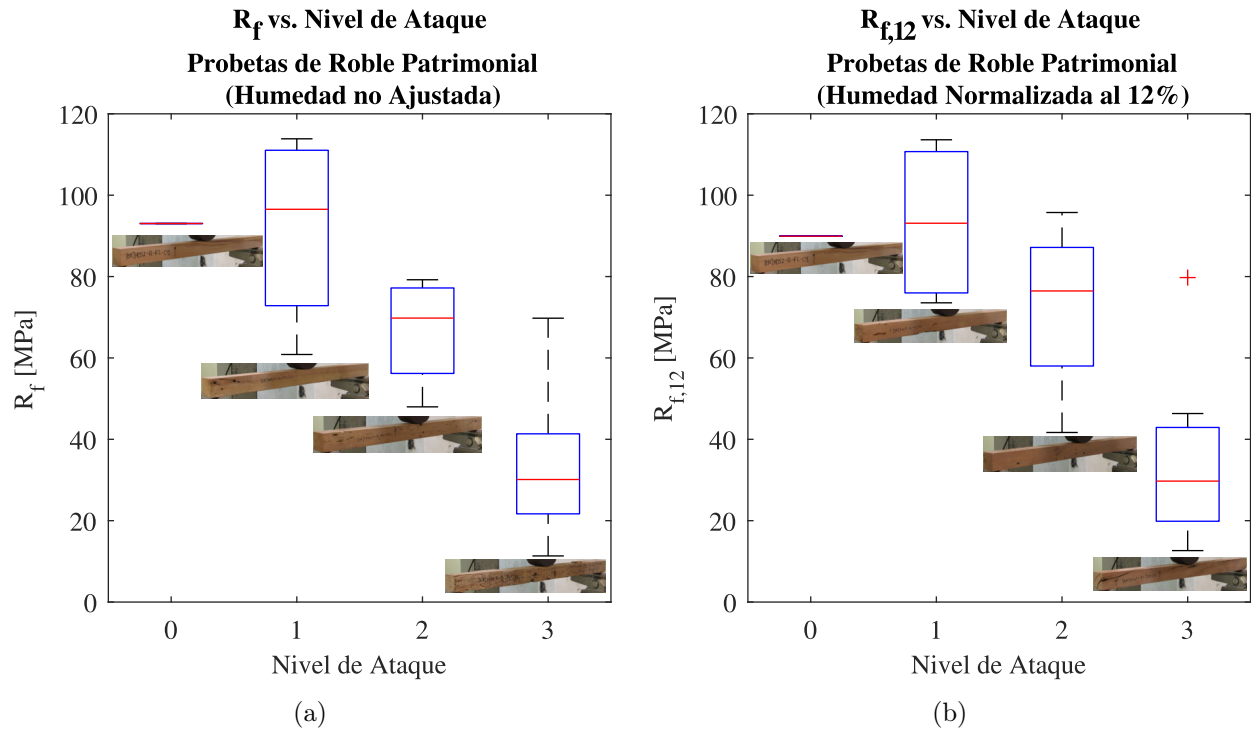


Figura 27: Módulo de Rotura en Flexión según Nivel de Ataque de termitas: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12 %.

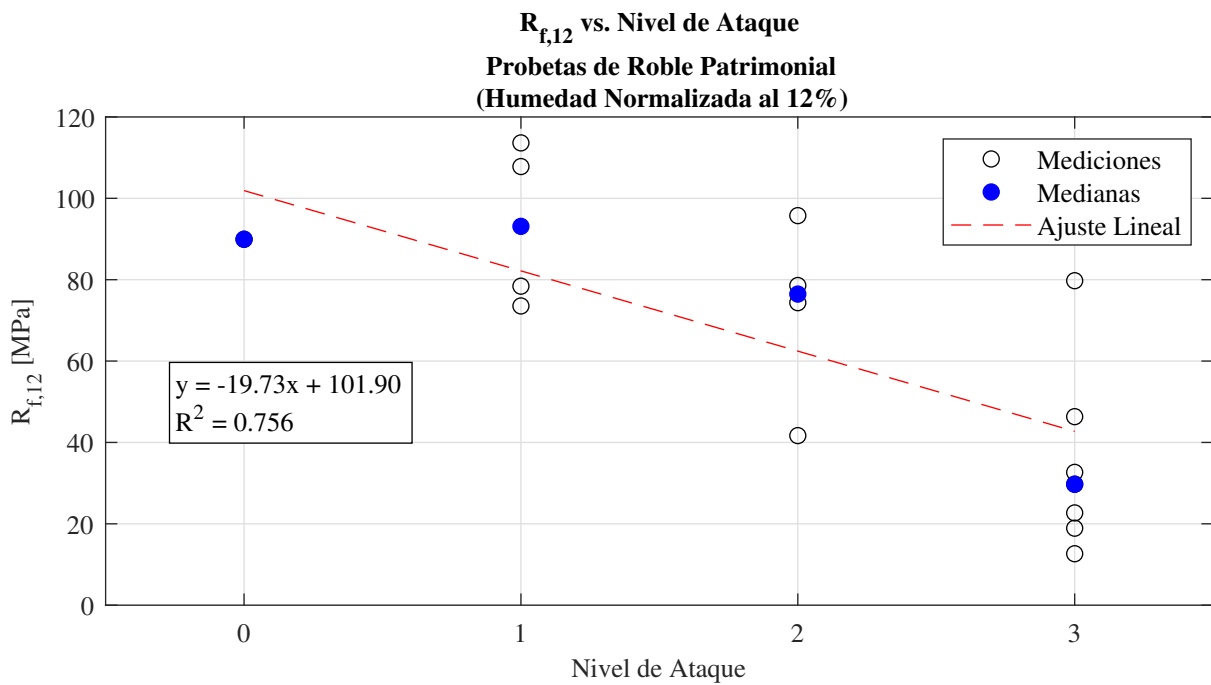


Figura 28: Ajuste de regresión lineal para los resultados de Módulo de Rotura en Flexión según el nivel de ataque por termitas.

Como una primera aproximación predictiva, se postula una ecuación en forma funcional que permite identificar el módulo de ruptura esperado a partir de una clasificación de nivel de ataque por termitas (Ecuación (13)). Notar que esta expresión no toma en cuenta la dispersión, y es válida para un contenido de humedad igual al 12 % y sólo para piezas de roble patrimonial de Valparaíso. Para otras humedades se deberá buscar un factor de modificación compatible. Por otro lado, se considera razonable el uso de esta expresión en otras localidades fuera de Valparaíso, siempre y cuando la especie sea roble y los efectos del daño por las termitas sea similar a los de este trabajo de investigación.

$$R_{f,e} = f_{NA,FL} \cdot R_{f0} \quad (13)$$

donde:

$$R_{f0} = 101.90 \text{ [MPa]}$$

$$f_{NA,FL} = \begin{cases} 1.00 & , \text{ si } NA = 0 \\ 0.81 & , \text{ si } NA = 1 \\ 0.61 & , \text{ si } NA = 2 \\ 0.42 & , \text{ si } NA = 3 \end{cases}$$

y donde:  $R_{f,e}$  es el módulo de ruptura en flexión esperado en [MPa],  $f_{NA,FL}$  es el factor adimensional de reducción de resistencia a flexión por nivel de ataque,  $R_{f0}$  es el módulo de ruptura sin daño visible por termitas en [MPa], y  $NA$  es el nivel de ataque identificado según la Tabla 5.

El módulo de elasticidad en flexión (rigidez elástica en flexión), se estima a partir de las curvas carga-deflexión de los ensayos. En cada curva se traza una recta tangente en la zona lineal elástica, con lo cual se identifica el punto de límite de proporcionalidad en donde se pasa al rango no-lineal. Utilizando dichos valores, y considerando que existe una fuerza inicial transmitida por el equipo de ensayo de aproximadamente 1 [kN], se emplea la Ecuación (14) para estimar la rigidez en flexión. Una descripción más detallada del método y consideraciones empleadas, junto con un ejemplo, se presenta en el Anexo C (página 69). En este anexo, además, se plantean hipótesis del origen del salto inicial en fuerza ocasionado por el equipo de ensayo.

$$E_f = \frac{(P_{lp} - P_0) \cdot L^3}{4 \cdot (\delta_{lp} - \delta_0)bh^3} \quad (14)$$

donde:  $E_f$  es el módulo de elasticidad en flexión en [MPa],  $P_{lp}$  es la carga registrada en el límite de proporcionalidad en [N],  $P_0$  es la carga inicial del equipo en [N],  $\delta_{lp}$  es la deflexión registrada en el límite de proporcionalidad en [mm],  $\delta_0$  es la deflexión inicial del equipo en [mm],  $L$  es la luz del ensayo igual a 700 [mm],  $b$  es el ancho de la probeta medida a la mitad de la luz en [mm], y  $h$  es la altura de la probeta medida a la mitad de la luz en [mm].

De igual manera que para el módulo de rotura, los resultados de cada muestra de madera son normalizados según su contenido de humedad medido. Para ello se utiliza la relación indicada en la Ecuación (15).

$$E_{f,12} = E_f \cdot \left( \frac{1.857 - (0.0237 \cdot 12)}{1.857 - (0.0237 \cdot H)} \right) \quad (15)$$

donde:  $E_{f,12}$  es módulo de elasticidad en flexión normalizado a un 12 % de contenido de humedad en [MPa], y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en [%], el cual no puede

ser menor a 10 % ni mayor a 23 %.

Los resultados de módulo elástico en flexión y sus distribuciones se presentan en formato *boxplot* en la Figura 29, en donde se distinguen los 3 grupos de análisis. En la Figura 29a están los valores directos, mientras que en la 29b aquellos normalizados a un contenido de humedad igual al 12 %. En este último caso, es interesante poder comparar las medianas de cada agrupación. Los especímenes de tipo patrimonial registraron una mediana de 8344 [MPa], los nuevos de roble 9536 [MPa] y los nuevos de pino 9400 [MPa]. Se puede ver que estas magnitudes son muy cercanas entre sí, especialmente en las agrupaciones nuevas, indicando que las rigideces elásticas, en general, fueron similares. Destaca, también, la poca dispersión en las probetas de pino, cuyo rango se movió sólo entre 9013 y los 10803 [MPa]. La muestra patrimonial fue la que mayor rango obtuvo (12199 [MPa]), concordante con la alta variedad en los estados de cada probeta.

Las rigideces promedio obtenidas en esta investigación se encuentran un poco por debajo de los reportados en la literatura, aunque siempre dentro del rango esperado. A modo de ejemplo, la media de  $E_{f,12}$  alcanzada para el roble fue de 10351 [MPa] con una desviación estándar de 1922 [MPa], aproximadamente un 7 % menor que el indicado en el trabajo realizado por el INFOR en probetas a escala estructural, en cuya campaña llegaron a un promedio de 11111 [MPa] y una desviación de 1668 para el Grado N°2 (Catalán et al., 2020). De igual forma, la rigidez media resultante en el presente trabajo, pero para pino oregón, fue de 9732 [MPa] con desviación de  $\pm 759$  [MPa], un 5 % menor que los que se obtuvieron en el INFOR para un grado G1 (Catalán et al., 2019) (10229 [MPa], con desviación estándar de 1665 [MPa]). De cualquier manera, considerando que la madera es un material inherentemente variable (lo cual se observa en las desviaciones de los diferentes estudios), y que los resultados están influenciados por el tamaño muestral, se puede decir que los resultados obtenidos se encuentran muy cerca de lo esperado.

Los resultados de rigidez de las probetas patrimoniales de roble se ven en la Figura 30 agrupadas por su nivel de daño, tanto una condición de ensayo como para una de humedad equivalente del 12 %. Se puede ver que los resultados son similares a los del  $R_f$ , destacando una tendencia a disminuir la rigidez a medida que la porosidad de los especímenes crece. En promedio, la rigidez elástica varía su magnitud desde cerca de 12000 [MPa] en los primeros dos grupos, hasta un valor de 5000 [MPa] en el tercer nivel. Nuevamente se recalca el hecho de que el grupo de nivel 0 solo contempla una probeta, lo cual complica el análisis en dicha categoría.

Similar a lo realizado en el caso del módulo de ruptura, se genera una regresión lineal a las medianas medidas del módulo de elasticidad. El resultado de dicho ajuste se observa en la Figura 31. La correlación obtenida entre  $E_{f,12}$  y el nivel de ataque es fuerte, alcanzando un valor de  $R^2$  igual a 0.741. Nuevamente, y al igual que en el caso de  $R_{f,12}$ , se hace hincapié en que la ausencia de más datos en la clasificación 1 podría estar sesgando los resultados del ajuste.

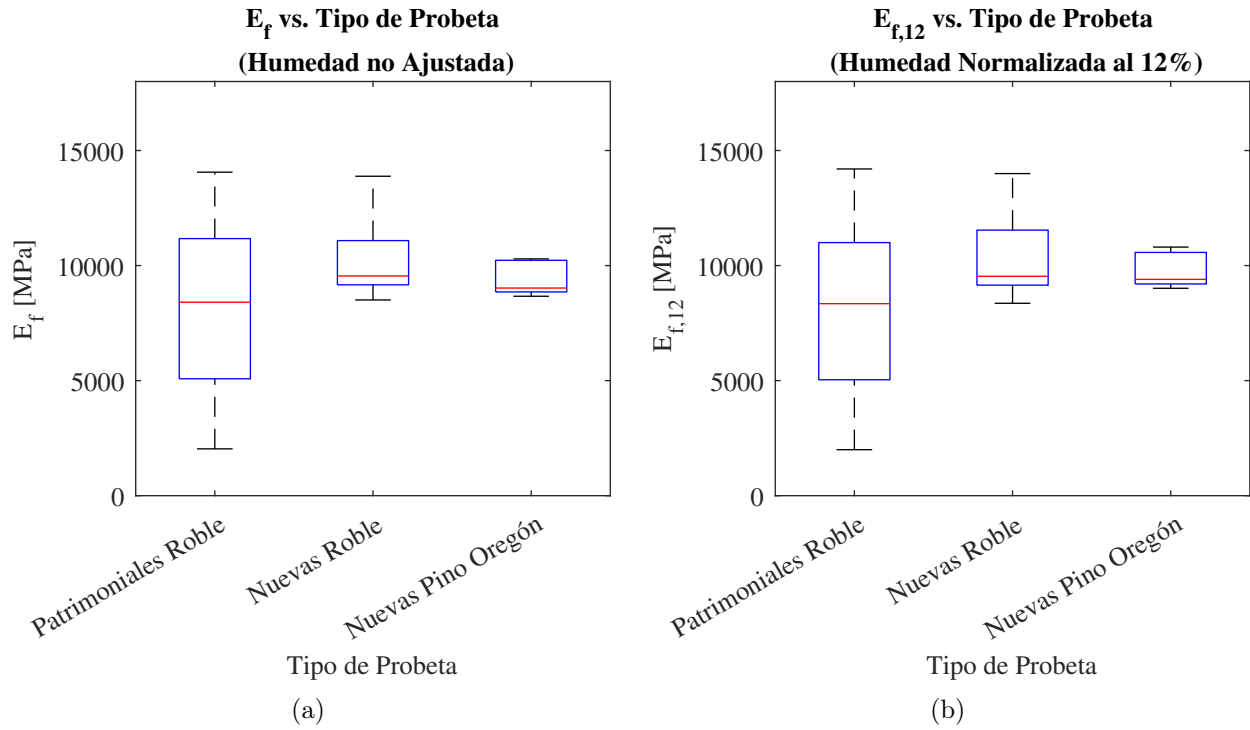


Figura 29: Módulo de Elasticidad en Flexión según tipo de probeta: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12%.

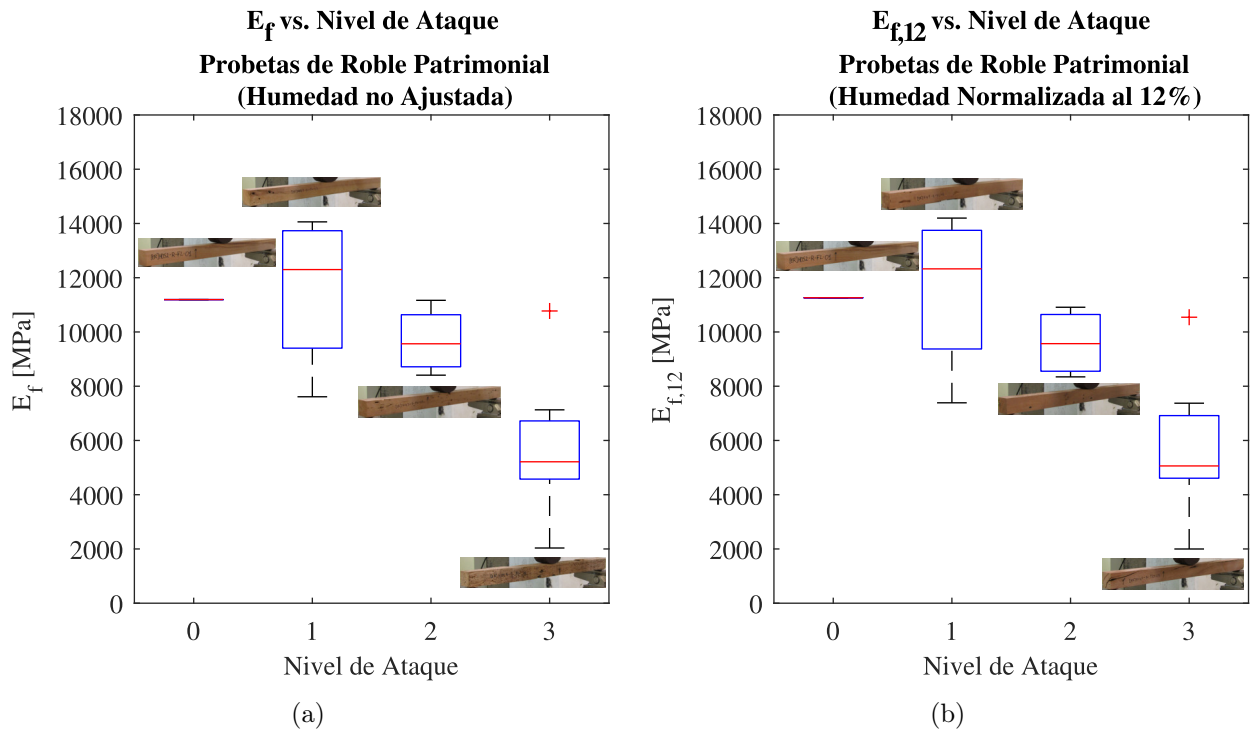


Figura 30: Módulo de Elasticidad en Flexión según Nivel de Ataque de termitas: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12%.

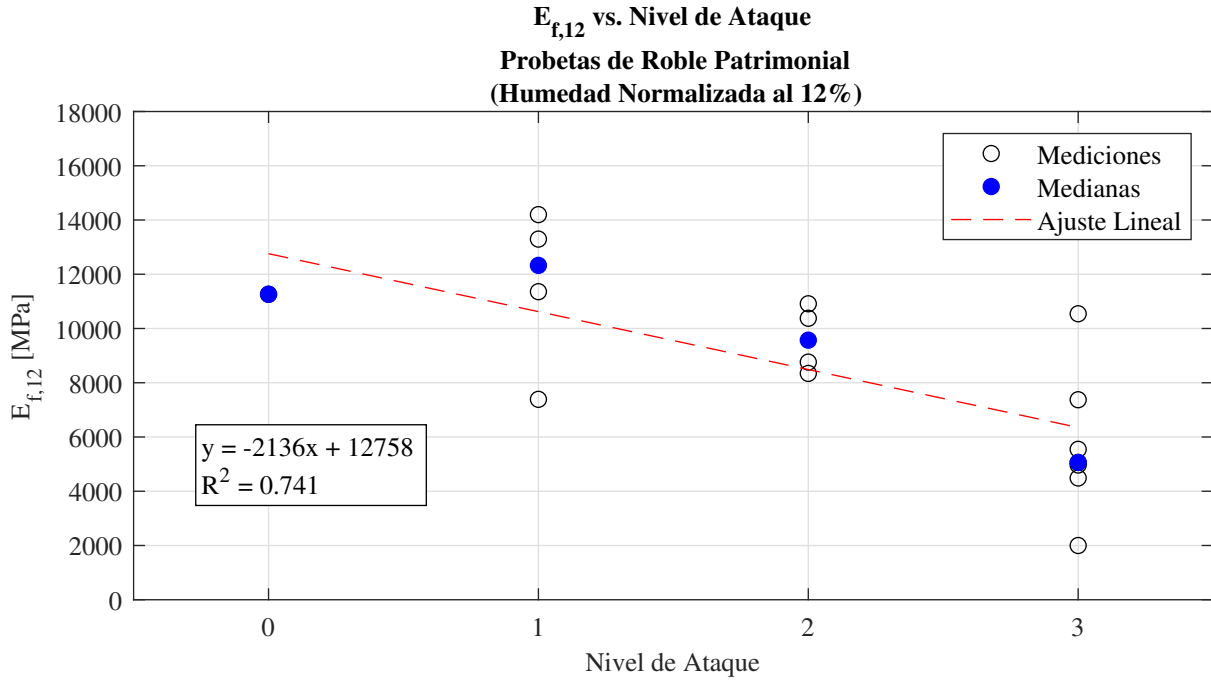


Figura 31: Ajuste de regresión lineal para los resultados de Módulo de Elasticidad en Flexión según el nivel de ataque por termitas.

Se presenta una formulación empírica en la Ecuación (16), la cual permite conocer la rigidez elástica esperada de una pieza estructural a partir de una clasificación del nivel de daño por termitas.

$$E_{f,e} = g_{NA,FL} \cdot E_{f0} \quad (16)$$

donde:

$$E_{f0} = 12758 \text{ [MPa]}$$

$$g_{NA,FL} = \begin{cases} 1.00 & , \text{ si } NA = 0 \\ 0.83 & , \text{ si } NA = 1 \\ 0.67 & , \text{ si } NA = 2 \\ 0.50 & , \text{ si } NA = 3 \end{cases}$$

y donde:  $E_{f,e}$  es el módulo de elasticidad en flexión esperado en [MPa],  $g_{NA,FL}$  es el factor adimensional de reducción de rigidez en flexión por nivel de ataque,  $E_{f0}$  es el módulo de elasticidad sin daño visible por termitas en [MPa], y  $NA$  es el nivel de ataque identificado según la Tabla 5.

La Ecuación (16) sólo es válida para la especie de roble en edificaciones patrimoniales de Valparaíso, y sólo para un contenido de humedad del 12%. Para humedades distintas se deberá generar el ajuste pertinente. En caso de considerar el uso de esta ecuación fuera de los cerros de Valparaíso, se deberá comprobar que la especie sea la misma, y que los efectos del daño por agentes patológicos sea similar a los presentados en este documento. La expresión, al no incorporar la dispersión registrada en los ensayos, debe emplearse meramente como un punto de partida.

## 5.6. Densidad

La densidad de las muestras de madera son calculadas de manera global para todos los ensayos realizados. Para este fin se utiliza la Ecuación (17).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (17)$$

donde:  $\rho$  es la densidad de la probeta al momento del ensayo en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $m$  es la masa registrada en  $[\text{kg}]$ , y  $V$  es el volumen calculado con la geometría medida en la probeta respectiva en  $[\text{m}^3]$ .

Cada resultado es ajustado a un contenido de humedad estándar del 12% para poder comparar valores. Se utiliza la expresión de la norma NCh3028/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2017a), la cual puede verse en la Ecuación (18).

$$\rho_{12} = \rho \cdot \left( \frac{1.12}{1 + \frac{H}{100}} \right) \quad (18)$$

donde:  $\rho_{12}$  es la densidad normalizada a un 12% de contenido de humedad en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en  $[\%]$ .

Los valores obtenidos para cada grupo de análisis se pueden observar en la Figura 32.

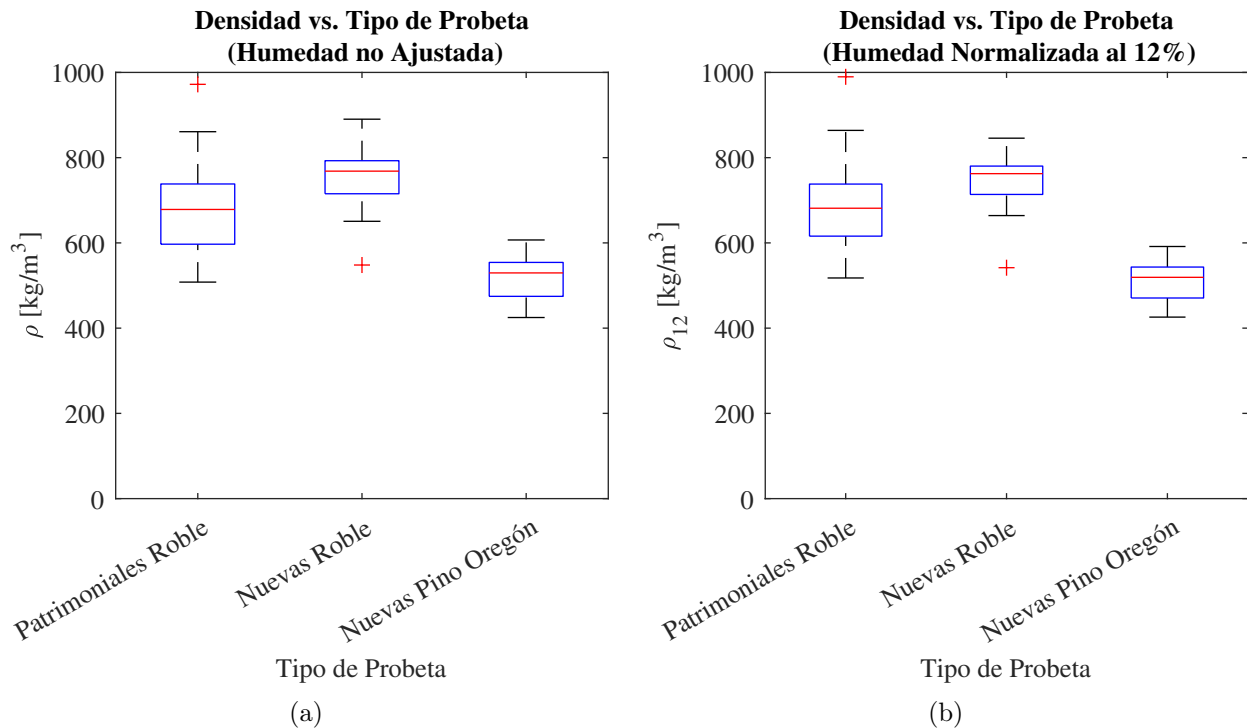


Figura 32: Densidad según tipo de probeta: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12%.

Es interesante notar que, en promedio, los especímenes de roble nuevos obtuvieron valores levemente mayores que los patrimoniales. En efecto, la mediana del grupo patrimonial (humedad

normalizada) alcanza los 681 [kg/m<sup>3</sup>], mientras que para las probetas nuevas, 762 [kg/m<sup>3</sup>]. Esto indica una reducción del 10.6 % considerando al percentil 50, pero no considera la dispersión que hay en los resultados. Se puede observar que las densidades medidas en los especímenes patrimoniales se distribuyen en un rango levemente mayor (472 [kg/m<sup>3</sup>]), que las nuevas (304 [kg/m<sup>3</sup>]). Por su parte, la dispersión de las probetas de pino oregón nuevas es más acotada, moviéndose en un rango de tan solo 166 [kg/m<sup>3</sup>].

Al comparar con la literatura, se puede ver que las magnitudes del roble nuevo obtenidas en esta investigación son más altas que las esperadas. De hecho, el Instituto Forestal de Chile (INFOR) reporta un valor promedio de 625 [kg/m<sup>3</sup>] con desviación estándar de 74 [kg/m<sup>3</sup>] (Catalán et al., 2020) y el compendio de propiedades de especies forestales de Chile uno de 624 [kg/m<sup>3</sup>] (Hernández C. & Pinilla S., 2010), mientras que el presente programa experimental llegó a registrar un promedio de densidad al 12 % de 747 [kg/m<sup>3</sup>] con desviación de  $\pm 60$  [kg/m<sup>3</sup>]. Esta diferencia podría deberse a muchos factores, como por ejemplo el origen de las piezas de madera, o bien al tamaño muestral empleado. Por otro lado, un resultado similar, pero más leve, es el caso del pino oregón. En esta investigación el valor medio de densidad llega a los 509 [kg/m<sup>3</sup>] con una desviación estándar igual a 42 [kg/m<sup>3</sup>], el cual es también mayor a los que pueden observarse en otros trabajos o informes. A modo de ejemplo, el INFOR en su informe técnico de ensayos a escala estructural para esta especie reporta un valor de densidad normal de 463 [kg/m<sup>3</sup>] con desviación de  $\pm 48$  [kg/m<sup>3</sup>] (Catalán et al., 2019), mientras que el compendio mencionado anteriormente una magnitud de 408 [kg/m<sup>3</sup>] (Hernández C. & Pinilla S., 2010).

La desagregación de los resultados de densidad en función del nivel de ataque por termitas identificado en probetas patrimoniales se puede ver en las Figuras 33a (mediciones directas) y 33b (humedades normalizadas).

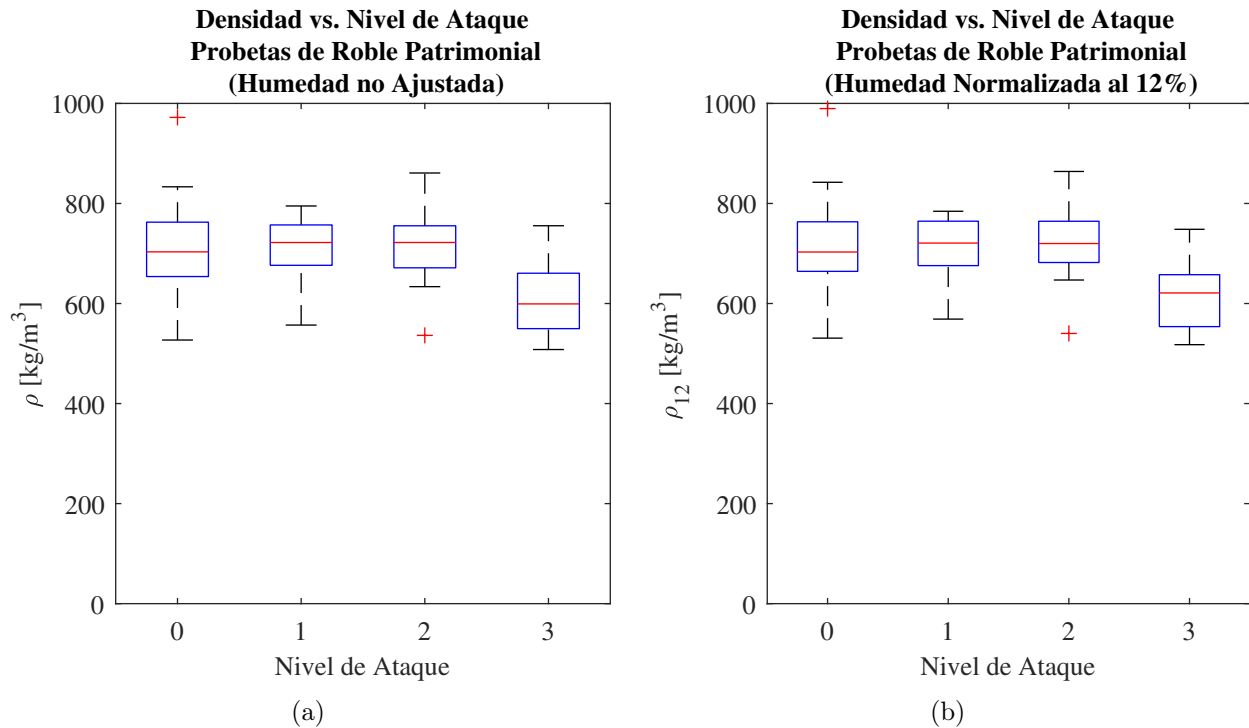


Figura 33: Densidad según Nivel de Ataque de termitas: (a) Resultados directos, y (b) Resultados ajustando el contenido de humedad de las probetas al 12 %.

A priori no es posible identificar ninguna tendencia en los resultados como para asegurar que el nivel de daño influye en esta propiedad física. Es más, las medianas de densidades se mantienen cercanas a 720 [kg/m<sup>3</sup>] a excepción del nivel 3, en donde la densidad asociada al percentil 50 baja a 624 [kg/m<sup>3</sup>]. Las dispersiones, en general, son parecidas, obteniendo coeficientes de variación que van desde 9.5 % a 12.1 %.

A modo de comprobar la falta de correlación entre la variable densidad y la escala de ataque por termitas, se ajusta una recta de regresión lineal a los resultados obtenidos. En la Figura 34 se observa el ajuste lineal hecho a las medianas, en donde se puede apreciar un coeficiente  $R^2$  de 0.450. Dicho valor no permite concluir que exista una correlación clara entre el daño por termitas y  $\rho_{12}$ . De esta forma, no se justifica aproximar una ecuación predictiva para esta variable.

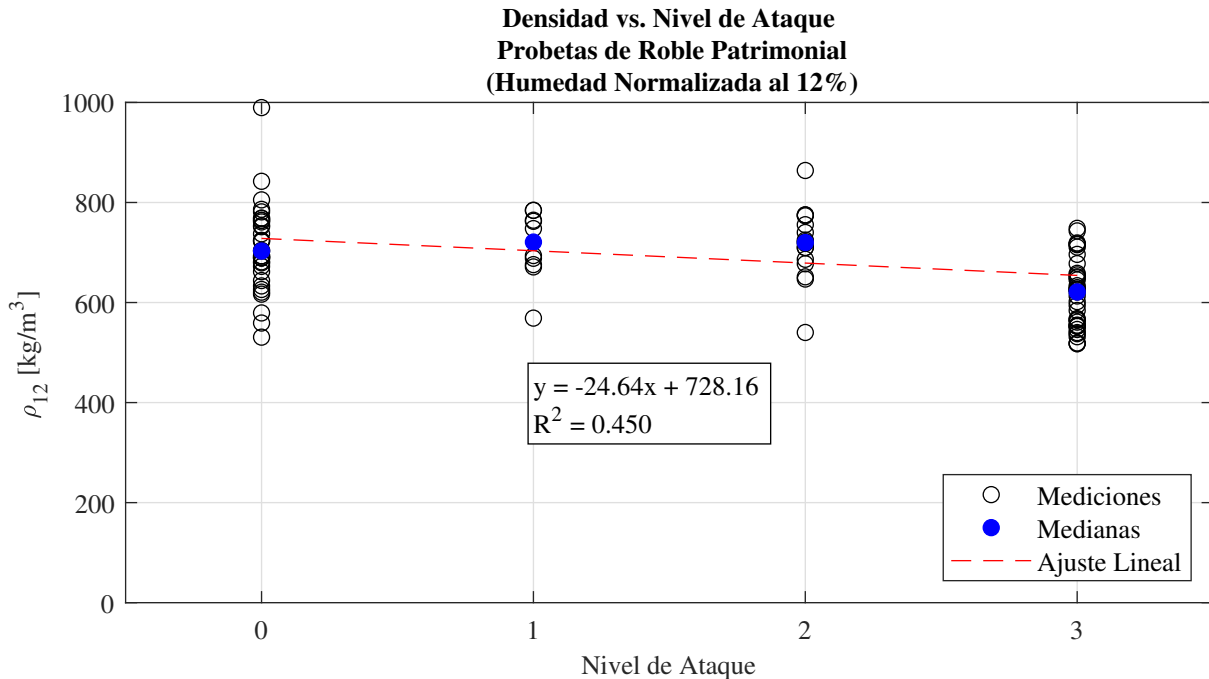


Figura 34: Ajuste de regresión lineal para los resultados de Densidad según el nivel de ataque por termitas.

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

Finalizado el programa experimental, es posible identificar una serie de conclusiones a partir de la evidencia empírica que se ha obtenido. En particular, se pueden identificar ideas tanto a partir del análisis de los resultados, como de los aportes que este trabajo de investigación deja a la posteridad.

En cuanto al análisis de los resultados experimentales de la presente investigación, se determinan ciertas tendencias globales de comportamiento mecánico en la madera dañada con respecto a la nueva. En efecto, éstos arrojaron algunas conclusiones interesantes las cuales, a modo de síntesis, se presentan a continuación:

- En general, las propiedades mecánicas obtenidas en las probetas de roble patrimonial tendieron a ser, en términos medios, menores que en los especímenes de roble nuevos. Para las resistencias

se registran reducciones en las medianas que van desde los 10.3 % (FL) hasta los 46.1 % (CZ) en el caso más evidente; el único ensayo que no evidenció una disminución en la mediana de resistencias fue CPA, cuyo grupo patrimonial superó en un 4.9 % a su símil nuevo. En cuanto a la rigidez a flexión, su mediana en la agrupación patrimonial fue un 12.5 % menor que en la nueva. Finalmente, la densidad normalizada también resultó ser un 10.6 % menor en las probetas de tipo patrimonial respecto a las nuevas.

- La dispersión obtenida en las probetas de tipo roble-patrimonial fueron notoriamente mayores que en los otros dos grupos de análisis, lo cual se condice con la variabilidad existente en el estado de deterioro de dichas piezas. Lo anteriormente expuesto puede evidenciarse al comprobar que todos los coeficientes de variación en el grupo patrimonial superaron a los grupos de roble y pino nuevo.
- En general, se observa una tendencia a disminuir la magnitud de las propiedades mecánicas a medida que el nivel de daño por termitas identificado es mayor. De hecho, tanto las resistencias a compresión paralela, compresión perpendicular y tracción perpendicular, como el módulo de rotura y el módulo elástico en flexión presentaron este efecto de manera evidente. Contraintuitivamente, los resultados obtenidos para la resistencia al cizalle paralelo no lograron captar una correlación entre ambas variables. De manera similar, la densidad normalizada tampoco logró suficiente correlación como para poder indicar con certeza una relación con el daño por termitas.

Asimismo, se destacan algunos hechos que deja el programa experimental. A continuación, se enlistan algunos de ellos:

- Se ha generado una primera base de datos empírica de propiedades mecánicas para la madera patrimonial de Valparaíso, lo cual permite dar un primer paso hacia una evaluación estructural más precisa y menos incierta. De igual manera, se rescata que dicha base de datos no sólo contempla resultados estadísticos para maderas nuevas, sino que también para el material en una condición deteriorada por ataque de termitas.
- Se propone una escala de daño por termitas de carácter semi-cuantitativo (Tabla 5), la cual permite identificar la gravedad del deterioro en la madera debido al ataque de insectos a partir de una evaluación objetiva de las caras de la pieza.
- Se plantean una serie de ecuaciones empíricas en forma funcional, las cuales permiten predecir la propiedad mecánica esperada (mediana) a partir de una evaluación del nivel de ataque por termitas, la que podría inclusive hacerse in situ. Dichas expresiones corresponden a un primer paso de cara a la predicción de propiedades mecánicas en madera patrimonial de Valparaíso, y se deben usar con cautela y siempre dentro del alcance de las mismas. En particular, se proponen expresiones para la resistencia a la compresión paralela (Ecuación (3)), resistencia a compresión perpendicular (Ecuación (6)), resistencia a tracción perpendicular (Ecuación (8)), módulo de rotura en flexión (Ecuación (13)), y módulo de elasticidad en flexión (Ecuación (16)). Se recomienda ver el alcance de cada una para mayor detalle sobre su uso.

En línea con todo lo anteriormente dicho, se reconoce la necesidad de seguir investigando en esta materia. El presente trabajo sólo corresponde al punto de partida en cuanto a la caracterización mecánica experimental de la madera patrimonial de Valparaíso, y se espera que futuros trabajos puedan complementar las conclusiones que aquí se han expuesto. De esta manera, a continuación se indican algunas recomendaciones que podrían servir de ayuda a investigadores futuros:

- Se reconoce el hecho de que la muestra de probetas aquí ensayadas fue bastante acotada en comparación con otros programas experimentales. Esto resultó en casos donde los grupos de análisis sólo contaron con 1 ó 2 resultados, lo cual dificulta el correcto estudio del comportamiento del material y su variabilidad. A modo de evitar sesgos que podrían existir en los resultados de este trabajo, se recomienda ampliar la muestra, incorporando más especímenes tanto nuevos como con daño.
- Considerando la variabilidad inherente de la madera, en caso de poder ampliar la base de datos de propiedades mecánicas en condición dañada, se sugiere ver la posibilidad de incorporar la incertidumbre a las ecuaciones predictivas.
- Si bien se entiende que la recolección de piezas patrimoniales es complejo, se sugiere, de ser posible, realizar el mismo análisis estadístico por nivel de ataque a una muestra de probetas de pino oregón patrimoniales. Se extiende esta recomendación a otras especies que puedan ser comunes en el casco patrimonial de Valparaíso.
- Se aconseja comparar los resultados obtenidos en este trabajo con otros métodos de evaluación no-destructivos, con el objetivo de complementar opciones no invasivas de intervención patrimonial.
- Se indica la opción de complementar la escala de daño por termitas propuesta en la Tabla 5 con otros factores que influyen en la resistencia y rigidez mecánica de la madera, como por ejemplo nudos, hongos o grietas.

## Agradecimientos

El presente trabajo es fruto de un largo y arduo camino, lleno de experiencias y de gente que me ha ayudado a perseguir mis objetivos. Quisiera agradecer a aquellas personas que me han forjado y que, de un modo u otro, han contribuido en mi desarrollo académico y personal a través de estos años.

A mis padres, quienes con su esfuerzo financiaron mi educación, y que con su apoyo incondicional me han motivado a continuar cultivando lo que me gusta. La verdad no hay palabras que puedan describir lo mucho que les estoy agradecido.

A mi polola, Javi. Gracias infinitas por tu compañía, cariño y apoyo, especialmente en mis momentos más difíciles. No hay persona que entienda lo mucho que esto significa para mí como tu lo haces. Gracias por motivarme día a día a sacar lo mejor de mí.

A todo mi grupo de amigos, en quienes siempre puedo confiar para lo que sea. Por siempre estar, muchas gracias.

A mi profesor guía, Ramiro Bazález. Valoro enormemente su cercanía, confianza y disposición, incluso en temas más allá de esta investigación. Me siento afortunado de haber podido trabajar con usted. Cuente conmigo en lo que necesite.

A mis profesoras del colegio que impulsaron mis capacidades desde temprana edad, guiándome a mi etapa universitaria. Frau Cristina, Frau Vidal y Frau Karina, ustedes son una parte importante en mi desarrollo profesional.

Finalmente, quisiera agradecer a todas las personas que participaron directamente en este trabajo de investigación. A Viviana, con quien desarrollé esta parte del proyecto. A Marcela, Vicente y Gerardo, quienes prestaron su tiempo para poder llevar a cabo los ensayos en el laboratorio. A todo el equipo del proyecto y a toda la gente que de alguna forma u otra contribuyó a que pudiéramos sacar adelante los objetivos.

Este trabajo también es suyo. Muchísimas gracias.

## Referencias

- Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forests*, *14*, 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>
- Carmona C., R., & Durán F., A. (2005). Eficacia de preservantes en madera pinus radiata D. Don, frente al ataque de termitas subterráneas (*reticulitermes esperus*). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, *7*, 27-36. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48570104>
- Castillo, J. C. (2023). Unesco revisará estado de Valparaíso a 20 años de ser declarado Patrimonio de la Humanidad. *ADN*. <https://www.adnradio.cl/nacional/2023/07/02/unesco-revisara-estado-de-valparaiso-a-20-anos-de-ser-declarado-patrimonio-de-la-humanidad.html>
- Catalán, J. L., Vásquez, L. V., Hernández, G. C., Fernández Parra, M., Troncoso Cancino, L., Elgueta, P. M., Campos, R. P., Mardones Díaz, P., Reyes Riquelme, C., & Padilla Reyes, J. (2019). *Tensiones admisibles de la madera aserrada estructural de Pino oregón (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) clasificada visualmente*. Instituto Forestal (Chile). <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/29196>
- Catalán, J. L., Vásquez, L. V., Hernández, G. C., Reyes Riquelme, C., Padilla Reyes, J., Elgueta, P. M., Troncoso Cancino, L., Campos, R. P., & Mardones Díaz, P. (2020). *Tensiones admisibles de la madera aserrada estructural de roble (Nothofagus obliqua (Mirb.) Oerst.) con clasificación visual*. Instituto Forestal (Chile). <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/29908>
- Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., & Sousa, H. S. (2016). A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. *Construction and Building Materials*, *114*, 681-687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001>
- Hernández C., G., & Pinilla S., J. C. (2010). *Propiedades de la madera de especies forestales nativas y exóticas en Chile*. Instituto Forestal (Chile). INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/18505>
- Instituto Nacional de Normalización. (1986a). *Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de cizalle paralelo a las fibras (NCh976.Of86)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986b). *Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión paralela (NCh973.Of86)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986c). *Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión perpendicular (NCh974.Of86)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986d). *Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de flexión estática (NCh987.Of86)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986e). *Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de tracción perpendicular (NCh975.Of86)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986f). *Maderas - Agrupamiento de especies madereras según su resistencia - Procedimiento (NCh1989.Of86 Mod.88)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1988a). *Maderas - Parte 1: Especies latifoliadas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh1970/1.Of88)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1988b). *Maderas - Parte 2: Especies coníferas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh1970.Of88)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). *Calibración y uso de xilohigrómetros portátiles (NCh2827.Of2003)*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2014). *Madera - Construcciones en Madera - Cálculo (NCh1198.Of2014)*.

- Instituto Nacional de Normalización. (2017a). *Madera estructural - Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia - Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural (NCh3028/1.Of2017)*. Instituto Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Normalización. (2017b). *Madera estructural - Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia - Parte 2: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas en tamaño estructural (NCh3028/2.Of2017)*.
- Jiménez, M. B. (2015). *Los entramados tradicionales de madera en los cerros Alegre y Concepción: Caracterización histórica y técnica de las viviendas de finales del siglo XIX y comienzos del XX*. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/2303>
- Jiménez, M. B., Saloustros, S., & Pelà, L. (2021). Seismic vulnerability index method for hybrid timber–masonry structures. Numerical calibration and application to the city of Valparaíso, Chile. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103185>
- Machado, J. S., Pereira, F., & Quilhó, T. (2019). Assessment of old timber members: Importance of wood species identification and direct tensile test information. *Construction and Building Materials*, 207, 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.168>
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2016). *Materials for civil and construction engineers* (4.<sup>a</sup> ed.). Pearson Education.
- Poletti, E. (2013). *Characterization of the seismic behaviour of traditional timber frame walls*. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/28845>
- Rescalvo, F. J., Valverde-Palacios, I., Suarez, E., & Gallego, A. (2018). Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. *Composite Structures*, 186, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.078>
- Ripa, R., Luppichini, P., Krecek, J., Lenz, M., & Creffield, J. W. (2004). *Termitas y otros insectos xilófagos en Chile: especies, biología y manejo* (R. Ripa & P. Luppichini, Eds.; INIA La Cruz). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura.
- Smith, N. (2021). *Material Characterization of Wood in Historic Structures*. <https://doi.org/10.22215/etd/2021-14652>
- UNESCO. (2003). *Historic Quarter of the Seaport City of Valparaíso*. <https://whc.unesco.org/en/list/959/>
- Vásquez V., L., Campos P., R., Elgueta M., P., González R., M., & Hernández C., G. (2013). *Grados estructurales de la madera aserrada de Pino oregón clasificada visualmente*. Instituto Forestal (Chile). INFOR. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/20480>

## A. Apéndice 1: Tablas de Registro de Datos de Probetas

A continuación, se presentan los registros de las mediciones realizadas a las probetas. Asimismo, en las tablas siguientes se muestra la clasificación por nivel de daño asignado a cada una de ellas.

Tabla 8: Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo de Compresión Paralela.

ID	Humedad	Densidad	a	e	Nivel de Ataque
[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[-]
(ER)NVA-R-CPA-01	13.2	793	48.85	47.83	NVA-R
(ER)NVA-R-CPA-02	12.3	715	48.43	48.85	NVA-R
(ER)NVA-R-CPA-03	11.6	798	48.03	46.63	NVA-R
(ER)NVA-R-CPA-04	11.3	756	48.58	48.10	NVA-R
(ER)NVA-R-CPA-05	10.8	657	48.95	46.50	NVA-R
(ER)NVA-R-CPA-06	13.7	765	49.00	48.92	NVA-R
(ER)NVA-P-CPA-01	14.8	546	49.42	49.65	NVA-P
(ER)NVA-P-CPA-02	12.2	456	49.80	49.70	NVA-P
(ER)NVA-P-CPA-03	14.2	518	49.62	49.55	NVA-P
(ER)NVA-P-CPA-04	11.9	429	49.77	49.57	NVA-P
(ER)NVA-P-CPA-05	18.3	580	50.07	50.10	NVA-P
(ER)NVA-P-CPA-06	11.8	425	50.15	50.33	NVA-P
(ER)NVA-P-CPA-07	12.7	492	49.52	49.38	NVA-P
(ER)MAL1-R-CPA-01	11.2	622	51.48	50.72	3
(ER)MAL2-R-CPA-01	13.8	787	52.22	51.97	2
(ER)MAL2-R-CPA-02	13.6	795	51.52	51.80	1
(ER)MAL3-R-CPA-01	13.3	790	48.87	47.50	0
(ER)HIG4-R-CPA-01	10.8	747	50.62	49.63	2
(ER)HIG4-R-CPA-02	12.1	711	51.05	49.58	3
(ER)HIG5-R-CPA-01	8.1	599	50.73	51.13	3
(ER)HIG5-R-CPA-02	9.3	611	49.75	49.32	3
(ER)HIG5-R-CPA-03	8.4	582	50.83	51.17	3
(ER)HIG7-R-CPA-01	9.3	602	50.57	50.13	0
(ER)HOS1-R-CPA-01	13.1	783	49.98	49.98	2
(ER)HOS2-R-CPA-01	13.9	755	50.28	50.30	3
(ER)HOS3-R-CPA-01	8.9	549	50.03	48.67	3
(ER)HOS3-R-CPA-02	9.9	509	50.18	50.32	3
(ER)HOS4-R-CPA-01	10.8	655	49.08	49.02	0
(ER)HOS5-R-CPA-01	10.4	553	51.27	49.48	3
(ER)HOS5-R-CPA-02	11.1	535	49.88	49.20	3
(ER)HOS5-R-CPA-03	9.9	508	50.22	50.07	3
(ER)HOS7-R-CPA-01	13.5	699	49.57	46.80	0
(ER)HOS7-R-CPA-02	12.7	722	51.63	50.63	2
(ER)HOS7-R-CPA-03	12.5	691	49.78	49.93	1

Tabla 9: Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Compresión Perpendicular.

ID	Humedad	Densidad	a	Nivel de Ataque
[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[-]
(ER)HOS7-R-CPE-01	12.6	728	50.10	0
(ER)HOS5-R-CPE-01	11.4	535	49.45	3
(ER)HOS5-R-CPE-02	11.5	551	52.25	3
(ER)MAL1-R-CPE-01	10.7	638	49.93	3
(ER)MAL2-R-CPE-01	12.9	812	47.38	0
(ER)MAL2-R-CPE-02	13.6	732	51.50	0
(ER)HIG1-R-CPE-01	16.1	736	50.83	2
(ER)HIG3-R-CPE-01	9.6	644	50.23	3
(ER)HIG3-R-CPE-02	9.7	634	50.90	2
(ER)HOS4-R-CPE-01	12.5	727	48.00	0
(ER)HIG5-R-CPE-01	9.3	570	48.95	3
(ER)HIG5-R-CPE-02	9.7	556	49.55	3
(ER)HOS1-R-CPE-01	14.1	731	52.80	3
(ER)HOS3-R-CPE-01	11.2	527	54.93	0
(ER)HIG5-R-CPE-03	9.6	637	49.38	2
(ER)HIG7-R-CPE-01	9.9	609	49.95	0
(ER)MAL3-R-CPE-01	13.8	780	48.00	0
(ER)NVA-P-CPE-01	14.8	501	49.10	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-02	14.9	607	49.78	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-03	14.6	546	50.90	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-04	15.5	574	50.43	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-05	12.6	453	48.20	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-06	15.5	572	49.33	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-07	13.3	449	49.65	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-08	15	540	49.08	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-09	15.4	549	49.10	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-10	13.9	471	50.03	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-11	13.3	464	49.50	NVA-P
(ER)NVA-P-CPE-12	15.3	551	49.35	NVA-P
(ER)NVA-R-CPE-01	15.7	786	47.55	NVA-R
(ER)NVA-R-CPE-02	14.2	680	49.03	NVA-R
(ER)NVA-R-CPE-03	15.8	803	47.90	NVA-R
(ER)NVA-R-CPE-04	13.3	773	49.00	NVA-R
(ER)NVA-R-CPE-05	16.7	803	46.93	NVA-R
(ER)NVA-R-CPE-06	14.4	752	47.68	NVA-R

Tabla 11: Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo de Cizalle Paralelo.

ID	Humedad	Densidad	h	e	Nivel de Ataque
[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[-]
(ER)HOS5-R-CZ-01	11.5	552	51.83	52.00	3

(ER)HOS5-R-CZ-02	13.3	524	52.13	51.45	3
(ER)HOS7-R-CZ-01	12.1	676	51.48	49.85	1
(ER)HOS7-R-CZ-02	13.5	690	52.85	46.68	0
(ER)HOS7-R-CZ-03	13.6	703	51.30	47.93	0
(ER)MAL1-R-CZ-01	10.4	624	52.40	51.90	0
(ER)MAL1-R-CZ-02	10.9	620	51.73	51.73	0
(ER)MAL2-R-CZ-01	13	771	50.23	50.05	0
(ER)MAL2-R-CZ-02	12.8	770	50.78	49.35	0
(ER)HOS3-R-CZ-01	9.8	548	52.25	41.78	0
(ER)HOS3-R-CZ-02	12	579	53.03	49.58	0
(ER)HIG1-R-CZ-01	12.3	673	50.83	51.05	1
(ER)HIG1-R-CZ-02	12.6	693	50.48	51.40	0
(ER)HIG3-R-CZ-01	10.7	678	47.48	50.00	2
(ER)HIG3-R-CZ-02	9.5	635	47.58	50.35	3
(ER)HIG4-R-CZ-01	11.6	758	47.25	50.65	0
(ER)HIG4-R-CZ-02	11.3	764	47.53	50.48	0
(ER)HOS4-R-CZ-01	10.5	742	50.90	49.75	0
(ER)HIG5-R-CZ-01	7.8	590	49.55	49.88	3
(ER)HIG5-R-CZ-02	7.8	572	49.83	50.13	3
(ER)HOS2-R-CZ-01	11.1	697	49.53	50.48	0
(ER)HOS2-R-CZ-02	15.2	809	47.73	47.95	0
(ER)HIG7-R-CZ-01	10	972	50.63	49.80	0
(ER)HIG7-R-CZ-02	9.7	631	50.55	49.60	0
(ER)NVA-P-CZ-01	15.5	518	49.68	48.43	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-02	14.6	572	50.08	49.53	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-03	13.4	499	50.65	49.05	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-04	15	577	50.70	50.73	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-05	13	460	50.60	50.60	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-06	14.5	541	50.28	47.68	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-07	15.7	547	50.33	49.83	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-08	15	538	50.83	49.55	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-09	15	545	50.45	49.35	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-10	13.7	465	50.28	49.48	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-11	12.8	450	49.13	50.03	NVA-P
(ER)NVA-P-CZ-12	12.7	457	50.63	49.58	NVA-P
(ER)NVA-R-CZ-01	10.4	784	48.68	49.13	NVA-R
(ER)NVA-R-CZ-02	9.5	684	47.93	49.10	NVA-R
(ER)NVA-R-CZ-03	11.1	773	48.35	48.53	NVA-R
(ER)NVA-R-CZ-04	17.9	890	48.73	48.68	NVA-R
(ER)NVA-R-CZ-05	10.6	733	47.83	48.08	NVA-R
(ER)NVA-R-CZ-06	10.0	796	47.88	48.70	NVA-R
(ER)NVA-R-CZ-07	12.9	777	47.63	49.43	NVA-R
(ER)NVA-R-CZ-08	9.3	718	47.60	47.80	NVA-R

Tabla 10: Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo de Tracción Perpendicular.

<b>ID</b>	<b>Humedad</b>	<b>Densidad</b>	<b>l</b>	<b>a</b>	<b>Nivel de Ataque</b>
<b>[-]</b>	<b>[%]</b>	<b>[kg/m3]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[-]</b>
(ER)HOS5-R-TPE-01	9.3	539	52.25	27.43	3
(ER)HOS5-R-TPE-02	10.5	546	49.53	25.45	3
(ER)HOS5-R-TPE-03	10.2	556	49.73	25.73	3
(ER)HOS7-R-TPE-01	11.7	752	48.15	27.30	0
(ER)HOS7-R-TPE-02	11.6	687	51.75	26.03	0
(ER)MAL1-R-TPE-01	11	649	50.33	24.15	3
(ER)MAL2-R-TPE-01	10.7	754	49.43	24.08	1
(ER)MAL2-R-TPE-02	11.6	861	49.60	27.63	2
(ER)HOS3-R-TPE-01	11.2	536	51.38	24.20	2
(ER)HIG1-R-TPE-01	13.4	725	51.20	26.50	3
(ER)HIG1-R-TPE-02	12.1	749	51.08	27.33	3
(ER)HIG3-R-TPE-01	9.6	706	49.65	25.28	2
(ER)HIG3-R-TPE-02	10.1	707	49.60	25.43	3
(ER)HIG4-R-TPE-01	10.6	764	50.05	25.10	2
(ER)HIG4-R-TPE-02	10.9	757	50.50	25.18	1
(ER)HOS4-R-TPE-01	12	737	51.43	30.15	0
(ER)HIG5-R-TPE-01	8	607	50.05	26.48	3
(ER)HIG5-R-TPE-02	8.3	605	50.05	25.95	3
(ER)HOS2-R-TPE-01	11.4	689	48.18	24.88	0
(ER)HOS2-R-TPE-02	10.8	833	46.78	27.45	0
(ER)HIG7-R-TPE-01	8.9	661	49.48	25.20	0
(ER)HIG7-R-TPE-02	8.9	654	49.38	25.88	0
(ER)NVA-P-TPE-01	14.8	558	48.73	27.23	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-02	14.6	583	48.68	30.55	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-03	13.5	530	48.45	27.53	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-04	13.7	574	48.53	28.83	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-05	12.7	459	50.45	26.60	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-06	14.8	573	50.85	27.25	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-07	12.6	476	50.00	25.48	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-08	14	541	49.70	25.55	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-09	13.7	557	48.90	26.13	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-10	14.2	517	49.60	27.08	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-11	14.2	558	49.65	25.93	NVA-P
(ER)NVA-P-TPE-12	12.5	482	49.80	26.05	NVA-P
(ER)NVA-R-TPE-01	13.3	548	49.60	25.73	NVA-R
(ER)NVA-R-TPE-02	9.1	651	48.73	27.48	NVA-R
(ER)NVA-R-TPE-03	12.9	771	49.28	26.68	NVA-R
(ER)NVA-R-TPE-04	9.7	761	48.65	26.80	NVA-R
(ER)NVA-R-TPE-05	9.3	790	47.55	26.50	NVA-R
(ER)NVA-R-TPE-06	11.4	795	48.53	26.15	NVA-R

Tabla 12: Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo de Flexión Estática.

<b>ID</b>	<b>Humedad</b>	<b>Densidad</b>	<b>b</b>	<b>h</b>	<b>Nivel de Ataque</b>	<b>Ef</b>
<b>[-]</b>	<b>[%]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[-]</b>	<b>[MPa]</b>
(ER)HIG1-R-FL-01	13.8	721	50.58	50.70	2	10104
(ER)HIG1-R-FL-02	14.2	664	49.85	50.20	3	7129
(ER)HIG1-R-FL-03	15.8	741	51.50	49.93	3	4682
(ER)HIG4-R-FL-01	12.7	789	49.93	49.58	1	14059
(ER)HIG4-R-FL-02	11.5	744	50.00	49.38	1	13406
(ER)HIG3-R-FL-01	10.5	730	50.18	46.98	2	11166
(ER)HIG3-R-FL-02	10.6	669	50.40	49.35	3	10774
(ER)HIG7-R-FL-01	9.8	664	49.93	50.05	2	9025
(ER)MAL2-R-FL-02	11.5	722	50.83	51.50	2	8407
(ER)HOS5-R-FL-01	9.4	519	51.23	51.25	3	5214
(ER)HOS5-R-FL-03	10.8	540	52.13	50.55	3	2035
(ER)MAL1-R-FL-01	11.3	629	50.48	51.20	3	4540
(ER)MAL1-R-FL-02	9.7	557	50.63	50.05	1	7611
(ER)HOS2-R-FL-01	12.4	707	49.93	49.88	0	11194
(ER)HOS3-R-FL-01	9.8	543	50.00	48.50	N/A	2309
(ER)HOS4-R-FL-01	12.6	700	48.15	51.00	3	5495
(ER)HOS7-R-FL-01	13.0	700	51.05	51.40	1	11195
(ER)NVA-P-FL-01	14.05	512	51.85	51.23	NVA-P	9053
(ER)NVA-P-FL-02	14.15	553	50.95	50.43	NVA-P	10230
(ER)NVA-P-FL-03	15.25	534	51.68	51.53	NVA-P	8995
(ER)NVA-P-FL-04	14.5	484	50.90	51.28	NVA-P	8855
(ER)NVA-P-FL-05	14.55	525	51.95	50.80	NVA-P	8667
(ER)NVA-P-FL-06	15.15	528	50.83	50.78	NVA-P	10290
(ER)NVA-R-FL-01	12.8	685	47.43	47.80	NVA-R	9246
(ER)NVA-R-FL-02	10.85	726	46.78	48.28	NVA-R	8506
(ER)NVA-R-FL-03	11.95	774	47.68	47.13	NVA-R	9113
(ER)NVA-R-FL-04	11.05	679	49.55	49.78	NVA-R	9852
(ER)NVA-R-FL-05	14.8	763	47.33	47.65	NVA-R	11880
(ER)NVA-R-FL-06	12.55	835	47.25	47.68	NVA-R	13882
(ER)NVA-R-FL-07	14.4	797	45.68	47.95	NVA-R	10291
(ER)NVA-R-FL-08	11.85	685	50.08	49.48	NVA-R	9213

## B. Apéndice 2: Estadística Descriptiva de Resultados

En el presente apéndice se presentan, en formato de tabla, los resultados de las propiedades mecánicas mostradas como gráficos en la sección 5. En específico, se indica: el número de probetas en cada grupo, los valores máximos y mínimos, la mediana, el cuartil 1 (Q1) y 3 (Q3), el rango entre valores extremos y el rango intercuartil (RIC). Adicionalmente se incluye el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV).

Tabla 13: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	21	6	7
Máximo	[MPa]	62.54	52.69	49.11
Q3	[MPa]	53.57	46.25	47.12
Mediana	[MPa]	39.83	42.26	38.87
Q1	[MPa]	32.34	36.73	37.22
Mínimo	[MPa]	22.51	32.54	36.92
Rango	[MPa]	40.03	20.15	12.19
RIC	[MPa]	21.23	9.52	9.90
Promedio	[MPa]	42.08	42.12	41.59
Desv. Est.	[MPa]	12.98	7.41	5.36
CV	[%]	30.9	17.6	12.9

Tabla 14: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad Normalizada al 12 %).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	21	6	7
Máximo	[MPa]	60.50	48.10	46.35
Q3	[MPa]	51.98	46.19	42.13
Mediana	[MPa]	43.40	41.36	37.73
Q1	[MPa]	34.35	41.11	32.00
Mínimo	[MPa]	24.70	31.86	25.35
Rango	[MPa]	35.80	16.24	21.00
RIC	[MPa]	17.63	5.08	10.13
Promedio	[MPa]	43.42	41.67	37.22
Desv. Est.	[MPa]	10.81	5.63	7.26
CV	[%]	24.9	13.5	19.5

Tabla 15: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Compresión Paralela según Nivel de Ataque por termitas (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	4	2	4	11
Máximo	[MPa]	62.34	58.53	62.54	51.95
Q3	[MPa]	59.23	58.53	54.87	35.97
Mediana	[MPa]	54.83	56.10	45.33	32.82
Q1	[MPa]	51.86	53.66	39.20	26.33
Mínimo	[MPa]	50.18	53.66	34.94	22.51
Rango	[MPa]	12.16	4.87	27.60	29.44
RIC	[MPa]	7.37	4.87	15.67	9.64
Promedio	[MPa]	55.54	56.10	47.04	32.83
Desv. Est.	[MPa]	5.14	3.44	11.54	8.50
CV	[%]	9.3	6.1	24.5	25.9

Tabla 16: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Compresión Paralela según Nivel de Ataque por termitas (Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	4	2	4	11
Máximo	[MPa]	60.50	51.69	54.41	48.03
Q3	[MPa]	60.07	51.69	53.63	43.37
Mediana	[MPa]	57.88	51.69	47.01	35.23
Q1	[MPa]	52.94	51.68	36.56	30.83
Mínimo	[MPa]	49.76	51.68	31.94	24.70
Rango	[MPa]	10.74	0.01	22.47	23.33
RIC	[MPa]	7.13	0.01	17.07	12.54
Promedio	[MPa]	56.50	51.69	45.09	36.56
Desv. Est.	[MPa]	4.88	0.01	10.57	7.63
CV	[%]	8.6	0.0	23.44	20.9

Tabla 17: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Compresión Perpendicular según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada = Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	17	6	12
Máximo	[MPa]	18.37	13.12	11.04
Q3	[MPa]	12.30	12.71	9.74
Mediana	[MPa]	8.40	11.87	6.41
Q1	[MPa]	5.86	9.80	5.07
Mínimo	[MPa]	4.36	5.69	2.35
Rango	[MPa]	14.01	7.43	8.69
RIC	[MPa]	6.44	2.91	4.67
Promedio	[MPa]	9.23	10.84	7.01
Desv. Est.	[MPa]	4.11	2.78	2.84
CV	[%]	44.5	25.7	40.6

Tabla 18: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Compresión Perpendicular según Nivel de Ataque por termitas (Humedad no Ajustada = Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	7	0	3	7
Máximo	[MPa]	18.37	-	8.63	9.13
Q3	[MPa]	15.61	-	8.51	8.42
Mediana	[MPa]	13.42	-	8.16	5.93
Q1	[MPa]	9.29	-	6.42	5.77
Mínimo	[MPa]	5.50	-	5.84	4.36
Rango	[MPa]	12.87	-	2.79	4.77
RIC	[MPa]	6.32	-	2.09	2.65
Promedio	[MPa]	12.52	-	7.54	6.67
Desv. Est.	[MPa]	4.41	-	1.49	1.78
CV	[%]	35.2	-	19.8	26.6

Tabla 19: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Tracción Perpendicular según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada = Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	22	6	12
Máximo	[MPa]	7.66	7.16	2.87
Q3	[MPa]	5.2	6.36	1.80
Mediana	[MPa]	2.92	3.66	1.14
Q1	[MPa]	1.22	3.01	0.99
Mínimo	[MPa]	0.038	2.70	0.42
Rango	[MPa]	7.62	4.46	2.45
RIC	[MPa]	3.98	3.35	0.81
Promedio	[MPa]	3.38	4.43	1.38
Desv. Est.	[MPa]	2.40	1.87	0.71
CV	[%]	70.9	42.2	51.8

Tabla 20: Estadística Descriptiva - Resistencia a la Tracción Perpendicular según Nivel de Ataque por termitas (Humedad no Ajustada = Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	7	2	4	9
Máximo	[MPa]	7.66	6.36	5.20	2.37
Q3	[MPa]	7.00	6.36	4.58	1.73
Mediana	[MPa]	6.18	5.60	3.40	1.19
Q1	[MPa]	3.91	4.84	2.04	0.64
Mínimo	[MPa]	2.98	4.84	1.22	0.038
Rango	[MPa]	4.68	1.52	3.98	2.33
RIC	[MPa]	3.09	1.52	2.54	1.09
Promedio	[MPa]	5.59	5.60	3.31	1.20
Desv. Est.	[MPa]	1.80	1.08	1.69	0.77
CV	[%]	32.2	19.2	51.0	64.1

Tabla 21: Estadística Descriptiva - Resistencia al Cizalle Paralelo según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	24	8	12
Máximo	[MPa]	10.19	13.66	7.67
Q3	[MPa]	6.68	10.28	6.61
Mediana	[MPa]	4.61	8.35	4.95
Q1	[MPa]	3.38	6.01	4.15
Mínimo	[MPa]	0.92	4.50	2.67
Rango	[MPa]	9.27	9.16	5.00
RIC	[MPa]	3.30	4.27	2.46
Promedio	[MPa]	5.10	8.43	5.23
Desv. Est.	[MPa]	2.41	3.05	1.57
CV	[%]	47.2	36.1	30.0

Tabla 22: Estadística Descriptiva - Resistencia al Cizalle Paralelo según Tipo de Probeta (Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	24	8	12
Máximo	[MPa]	10.06	13.38	8.03
Q3	[MPa]	6.55	10.28	6.83
Mediana	[MPa]	4.65	8.62	5.12
Q1	[MPa]	3.34	5.86	4.32
Mínimo	[MPa]	0.92	4.37	2.69
Rango	[MPa]	9.14	9.01	5.34
RIC	[MPa]	3.21	4.42	2.51
Promedio	[MPa]	5.08	8.41	5.41
Desv. Est.	[MPa]	2.43	3.03	1.64
CV	[%]	47.8	36.1	30.2

Tabla 23: Estadística Descriptiva - Resistencia al Cizalle Paralelo según Nivel de Ataque por termitas (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	16	2	1	5
Máximo	[MPa]	10.19	4.43	-	7.61
Q3	[MPa]	7.34	4.43	-	6.69
Mediana	[MPa]	4.84	3.83	2.94	5.32
Q1	[MPa]	3.93	3.23	-	2.99
Mínimo	[MPa]	0.92	3.23	-	2.82
Rango	[MPa]	9.27	1.20	-	4.79
RIC	[MPa]	3.41	1.20	-	3.70
Promedio	[MPa]	5.42	3.83	2.94	5.04
Desv. Est.	[MPa]	2.65	0.85	-	2.09
CV	[%]	49.0	22.3	-	41.4

Tabla 24: Estadística Descriptiva - Resistencia al Cizalle Paralelo según Nivel de Ataque por termitas (Humedad Normalizada al 12 %).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	16	2	1	5
Máximo	[MPa]	10.06	4.44	-	7.39
Q3	[MPa]	7.33	4.44	-	6.50
Mediana	[MPa]	4.94	3.84	2.89	5.29
Q1	[MPa]	3.85	3.24	-	3.01
Mínimo	[MPa]	0.92	3.24	-	2.74
Rango	[MPa]	9.14	1.20	-	4.65
RIC	[MPa]	3.48	1.20	-	3.49
Promedio	[MPa]	5.42	3.84	2.89	4.94
Desv. Est.	[MPa]	2.70	0.85	-	2.00
CV	[%]	49.9	22.1	-	40.4

Tabla 25: Estadística Descriptiva - Módulo de Rotura en Flexión según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	17	8	6
Máximo	[MPa]	113.86	129.59	80.62
Q3	[MPa]	80.62	102.48	74.13
Mediana	[MPa]	60.85	86.58	61.89
Q1	[MPa]	29.34	74.44	48.75
Mínimo	[MPa]	11.34	62.78	45.71
Rango	[MPa]	102.52	66.81	34.91
RIC	[MPa]	51.28	28.04	25.38
Promedio	[MPa]	57.91	89.92	62.17
Desv. Est.	[MPa]	31.78	21.86	15.08
CV	[%]	54.9	24.3	24.3

Tabla 26: Estadística Descriptiva - Módulo de Rotura en Flexión según Tipo de Probeta (Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	17	8	6
Máximo	[MPa]	113.62	123.72	63.39
Q3	[MPa]	82.30	92.80	62.52
Mediana	[MPa]	73.55	81.97	51.88
Q1	[MPa]	28.36	75.49	39.96
Mínimo	[MPa]	12.65	63.05	35.69
Rango	[MPa]	100.97	60.67	27.70
RIC	[MPa]	53.94	17.31	22.56
Promedio	[MPa]	60.04	85.91	50.89
Desv. Est.	[MPa]	33.15	18.36	12.76
CV	[%]	55.2	21.4	25.1

Tabla 27: Estadística Descriptiva - Módulo de Rotura en Flexión según Nivel de Ataque por termitas (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	1*	4	4	7
Máximo	[MPa]	-	113.86	79.21	69.77
Q3	[MPa]	-	111.04	77.2	41.34
Mediana	[MPa]	93.04	96.53	69.79	30.12
Q1	[MPa]	-	72.85	56.19	21.68
Mínimo	[MPa]	-	60.85	47.98	11.34
Rango	[MPa]	-	53.01	31.23	58.43
RIC	[MPa]	-	38.19	21.01	19.66
Promedio	[MPa]	93.04	91.94	66.69	33.83
Desv. Est.	[MPa]	-	24.24	13.96	18.91
CV	[%]	-	26.4	20.9	55.9
* Se excluye una probeta del análisis debido a que, si bien no presetaba daño por termitas, su modo de falla se vio fuertemente influenciada por una grieta central.					

Tabla 28: Estadística Descriptiva - Módulo de Rotura en Flexión según Nivel de Ataque por termitas (Humedad Normalizada al 12 %).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	1*	4	4	7
Máximo	[MPa]	-	113.62	95.75	79.75
Q3	[MPa]	-	110.71	87.16	42.91
Mediana	[MPa]	89.93	93.11	76.46	29.73
Q1	[MPa]	-	75.98	58.02	19.86
Mínimo	[MPa]	-	73.55	41.68	12.65
Rango	[MPa]	-	40.07	54.07	67.10
RIC	[MPa]	-	34.73	29.14	23.05
Promedio	[MPa]	89.93	93.35	72.59	34.67
Desv. Est.	[MPa]	-	20.29	22.59	22.63
CV	[%]	-	21.7	31.1	65.3
* Se excluye una probeta del análisis debido a que, si bien no presetaba daño por termitas, su modo de falla se vio fuertemente influenciada por una grieta central.					

Tabla 29: Estadística Descriptiva - Módulo de Elasticidad en Flexión según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	17	8	6
Máximo	[MPa]	14059	13882	10290
Q3	[MPa]	11173	11085	10230
Mediana	[MPa]	8407	9549	9024
Q1	[MPa]	5081	9163	8855
Mínimo	[MPa]	2035	8506	8667
Rango	[MPa]	12024	5376	1623
RIC	[MPa]	6092	1922	1375
Promedio	[MPa]	8138	10248	9348
Desv. Est.	[MPa]	3668	1790	719
CV	[%]	45.1	17.5	7.7

Tabla 30: Estadística Descriptiva - Módulo de Elasticidad en Flexión según Tipo de Probeta (Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	17	8	6
Máximo	[MPa]	14198	13998	10803
Q3	[MPa]	10999	11540	10572
Mediana	[MPa]	8344	9536	9400
Q1	[MPa]	5037	9149	9202
Mínimo	[MPa]	1999	8361	9013
Rango	[MPa]	12199	5637	1790
RIC	[MPa]	5962	2391	1370
Promedio	[MPa]	8124	10351	9732
Desv. Est.	[MPa]	3670	1922	759
CV	[%]	45.2	18.6	7.8

Tabla 31: Estadística Descriptiva - Módulo de Elasticidad en Flexión según Nivel de Ataque por termitas (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	1*	4	4	7
Máximo	[MPa]	-	14059	11166	10774
Q3	[MPa]	-	13733	10635	6721
Mediana	[MPa]	11194	12300	9564	5214
Q1	[MPa]	-	9403	8716	4575
Mínimo	[MPa]	-	7611	8407	2035
Rango	[MPa]	-	6448	2759	8739
RIC	[MPa]	-	4330	1919	2146
Promedio	[MPa]	11194	11568	9676	5696
Desv. Est.	[MPa]	-	2909	1216	2704
CV	[%]	-	25.1	12.6	47.5
* Se excluye una probeta del análisis debido a que, si bien no presetaba daño por termitas, su modo de falla se vio fuertemente influenciada por una grieta central.					

Tabla 32: Estadística Descriptiva - Módulo de Elasticidad en Flexión según Nivel de Ataque por termitas (Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	1*	4	4	7
Máximo	[MPa]	-	14198	10911	10543
Q3	[MPa]	-	13747	10644	6917
Mediana	[MPa]	11261	12327	9569	5061
Q1	[MPa]	-	9373	8553	4608
Mínimo	[MPa]	-	7388	8344	1999
Rango	[MPa]	-	6810	2567	8544
RIC	[MPa]	-	4374	2091	2309
Promedio	[MPa]	11261	11560	9599	5711
Desv. Est.	[MPa]	-	3023	1239	2658
CV	[%]	-	26.2	12.9	46.5
* Se excluye una probeta del análisis debido a que, si bien no presetaba daño por termitas, su modo de falla se vio fuertemente influenciada por una grieta central.					

Tabla 33: Estadística Descriptiva - Densidad según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	101	34	49
Máximo	[kg/m3]	972	890	607
Q3	[kg/m3]	738	793	554
Mediana	[kg/m3]	678	768	530
Q1	[kg/m3]	597	715	475
Mínimo	[kg/m3]	508	548	425
Rango	[kg/m3]	464	342	182
RIC	[kg/m3]	141	78	79
Promedio	[kg/m3]	670	750	519
Desv. Est.	[kg/m3]	93	64	47
CV	[%]	13.8	8.5	9.1

Tabla 34: Estadística Descriptiva - Densidad según Tipo de Probeta (Humedad Normalizada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales - Roble	Nuevas - Roble	Nuevas - Pino Oregón
N Probetas	[-]	101	34	49
Máximo	[kg/m3]	990	846	592
Q3	[kg/m3]	738	780	543
Mediana	[kg/m3]	681	762	519
Q1	[kg/m3]	616	714	471
Mínimo	[kg/m3]	518	542	426
Rango	[kg/m3]	472	304	166
RIC	[kg/m3]	122	66	72
Promedio	[kg/m3]	673	747	509
Desv. Est.	[kg/m3]	88	60	42
CV	[%]	13.1	8.0	8.3

Tabla 35: Estadística Descriptiva - Densidad según Nivel de Ataque por termitas (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	35	10	16	39
Máximo	[kg/m <sup>3</sup> ]	972	795	861	755
Q3	[kg/m <sup>3</sup> ]	763	757	755	661
Mediana	[kg/m <sup>3</sup> ]	703	722	722	599
Q1	[kg/m <sup>3</sup> ]	654	676	671	550
Mínimo	[kg/m <sup>3</sup> ]	527	557	536	508
Rango	[kg/m <sup>3</sup> ]	445	238	325	247
RIC	[kg/m <sup>3</sup> ]	109	81	84	111
Promedio	[kg/m <sup>3</sup> ]	707	714	714	610
Desv. Est.	[kg/m <sup>3</sup> ]	88	71	75	74
CV	[%]	12.4	9.9	10.5	12.2

Tabla 36: Estadística Descriptiva - Densidad según Nivel de Ataque por termitas (Humedad Normalizada al 12 %).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
N Probetas	[-]	35	10	16	39
Máximo	[kg/m <sup>3</sup> ]	990	784	864	748
Q3	[kg/m <sup>3</sup> ]	763	765	764	658
Mediana	[kg/m <sup>3</sup> ]	703	721	720	621
Q1	[kg/m <sup>3</sup> ]	664	676	682	554
Mínimo	[kg/m <sup>3</sup> ]	531	569	540	518
Rango	[kg/m <sup>3</sup> ]	459	215	324	230
RIC	[kg/m <sup>3</sup> ]	99	89	82	104
Promedio	[kg/m <sup>3</sup> ]	709	714	717	617
Desv. Est.	[kg/m <sup>3</sup> ]	86	68	72	69
CV	[%]	12.1	9.5	10.0	11.2

### C. Apéndice 3: Criterio de Cálculo del Módulo de Elasticidad

En el presente apéndice se detallan los criterios utilizados a la hora de calcular la rigidez elástica de las probetas.

El procedimiento consiste en trazar una recta tangente en el gráfico carga-deflexión obtenido del ensayo respectivo. Una vez hecho esto, se identifica el par de puntos del límite de proporcionalidad,  $\delta_{lp}$  y  $P_{lp}$ , los cuales se ubican en el lugar donde la recta deja de ser lineal. Adicionalmente se localiza el par de puntos de carga inicial del equipo,  $\delta_0$  y  $P_0$ , el cual corresponde al salto de fuerza que se produce al momento en que éste hace contacto con la probeta. Dicha carga al comienzo tiene un valor cercano a 1 [kN] y no solo se evidenció en todos los ensayos de flexión realizados en este programa experimental, sino que también en campañas anteriores en donde se testearon probetas de otras materialidades, como por ejemplo de hormigón armado. Tras un análisis y validación de resultados con la literatura, se determinó que la carga inicial existe y no puede despreciarse. Sin embargo, no puede considerarse al momento de calcular la rigidez elástica, pues es una carga tomada por el equipo de ensayo, mas no de la probeta. Se plantea la hipótesis que la carga inicial corresponde a una primera transmisión de fuerzas en el sistema interno del equipo, el cual se asienta al hacer contacto con la probeta al inicio.

Con los puntos previamente mencionados, junto con las propiedades geométricas de los ensayos, se procede a calcular el módulo de elasticidad utilizando la ecuación correspondiente.

A modo de ejemplo, en la Figura 35 se pueden visualizar los puntos característicos de la curva para el ensayo de Flexión Estática realizado a la probeta (ER)HOS2-R-FL-01.

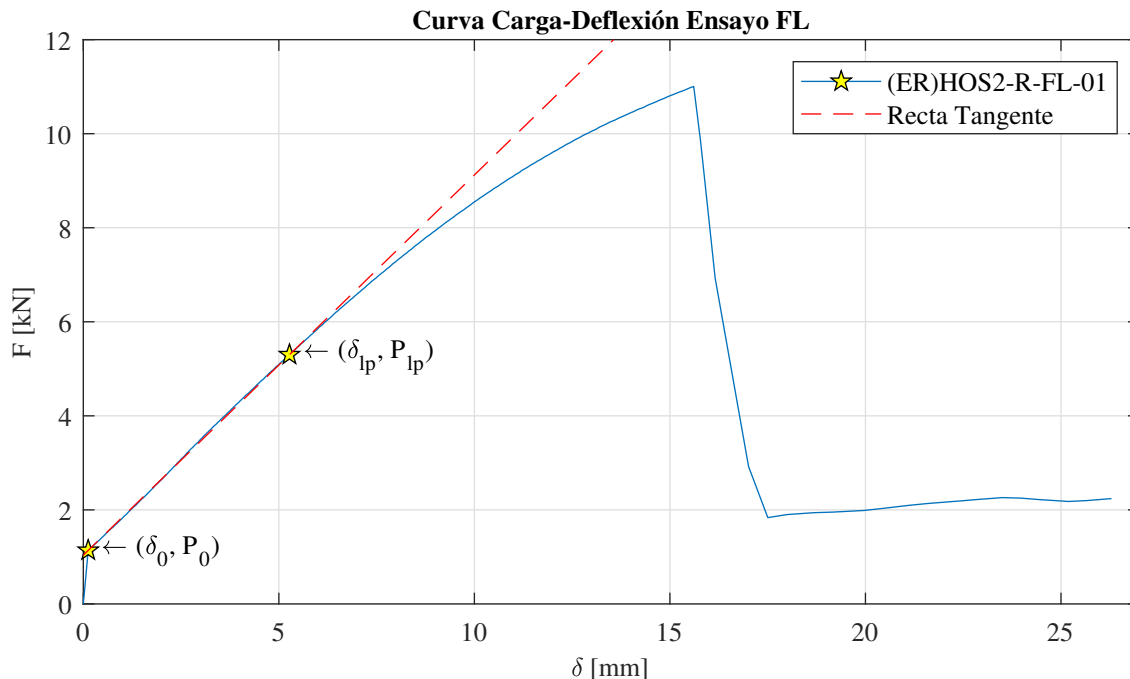


Figura 35: Ejemplo del procedimiento empleado para el cálculo del Módulo de Elasticidad en Flexión,  $E_f$ . Caso probeta (ER)HOS2-R-FL-01.