

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA | DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA  
MAGISTER EN REHABILITACIÓN ARQUITECTÓNICA SOSTENIBLE



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA



# **CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS HISTÓRICOS DE VALPARAÍSO, CHILE.**

**EVALUACIÓN DE PIEZAS CON Y SIN DAÑO POR ATAQUE DE TERMITAS  
MEDIANTE APROXIMACIONES EXPERIMENTALES**

**TESIS DE MAGISTER  
VIVIANA ANTONIA GONZÁLEZ GUASTAVINO  
DIRECTORA DE TESIS  
DRA. BELÉN JIMÉNEZ RAMÍREZ  
CO-DIRECTOR DE TESIS  
DR. RAMIRO BAZÁEZ GALLARDO  
2024**







# AGRADECIMIENTOS

*Quiero iniciar expresando mi profundo agradecimiento a todos aquellos que hicieron posible este sueño. Han sido compañeros de viaje constante, fuente de inspiración, apoyo inquebrantable, amor y fortaleza. Quiero dedicar un reconocimiento espacial a Dios, quien siempre ha sido mi guía y fuente de fortaleza para seguir adelante. Agradezco infinitamente a mis padres, cuyo esfuerzo y sacrificio hizo posible mi educación. También a mis abuelos, tíos, tías, primas, primos, amigos y mascotas, quienes siempre estuvieron ahí para animarme en los momentos más difíciles. Su apoyo incondicional, tanto en mi crecimiento personal como académico a lo largo de los años, ha sido invaluable. ¡Los quiero machismo!*

*A mi profesora guía, Belén Jiménez. A pesar de habernos conocido hace poco, nos aventuramos juntas en este gran desafío, y ella tuvo la confianza en nuestras capacidades para lograrlo. Me siento afortunada de haber tenido la oportunidad de colaborar con ella y de haber aprendido de su apasionado enfoque en la arquitectura patrimonial.*

*A mis amigas del magister, Coni y Sofi. Ha sido un verdadero gusto compartir este nuevo proceso con ustedes y haberlas conocido. Su apoyo y compañía han sido invaluable durante este tiempo. Gracias por todo.*

*Por último, me gustaría expresar mi gratitud hacia todos los individuos que colaboraron de manera directa en este proyecto de investigación. A Javier, con quien tuve el privilegio de trabajar en esta fase de la investigación. A todas las personas que nos permitieron acceder a sus casas para poder inspeccionarlas como casos de estudio, sin ustedes, no hubiera sido posible. Además, a Marcela, Vicente, Gerardo, Maximiliano, Rodrigo y Pablo Encinas, quienes dedicaron su tiempo a llevar a cabo los experimentos en el laboratorio. A todo el equipo involucrado en el proyecto y a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron para que pudiéramos completar este trabajo con éxito.*

*Su contribución ha dejado una huella imborrable en mi vida. ¡Gracias de todo corazón!*



## RESUMEN | ABSTRACT

La presente investigación propone un estudio experimental para determinar las propiedades mecánicas de la madera de roble en probetas construidas con madera antigua rescatada de construcciones existentes que utilizan la técnica del tabique-adobillo en el Área Histórica de la ciudad de Valparaíso, Chile. El objetivo principal de este trabajo es evaluar y cuantificar el impacto del daño causado por los insectos xilófagos, como termitas, en la resistencia de la madera, al ser este agente uno de los principales factores de deterioro de la madera en las construcciones de la zona central del país. Asimismo, la investigación busca evaluar si la carga prolongada en la madera, y el paso del tiempo, influye en las propiedades mecánicas y resistencia del material en servicio.

La metodología de trabajo considera un estudio experimental y comparativo entre diferentes tipos de muestras. En primer lugar, se busca comparar la madera de roble antigua versus la madera nueva o comercial de la misma especie. El objetivo es observar y cuantificar las diferencias para dilucidar si existe una tendencia que permita establecer una correlación entre la carga prolongada de la madera, el paso del tiempo y sus propiedades mecánicas. El segundo grupo de muestras corresponde a aquellas con daños ocasionados por el ataque de insectos xilófagos. Para ello se estableció una herramienta para la clasificación visual de las probetas de acuerdo con el grado de daño superficial cuantificado en la zona donde se espera que se produzca el fallo en las probetas. La campaña experimental propuesta en este trabajo proyecta la ejecución de ensayos destructivos convencionales con probetas a escala reducida para determinar las propiedades mecánicas de la madera, considerando los grupos anteriormente descritos, bajo cargas de compresión paralela y perpendicular a la fibra, de tracción perpendicular, cizalle paralelo y flexión estática de acuerdo con las normas chilenas que establecen los métodos y procedimientos para realizar estos ensayos (Instituto Nacional de Normalización, 2018c, 2018d, 2018f, 2018b, 2018e). Por último, se evalúan probetas de pino Oregón nuevas y los resultados se comparan con los de roble nuevo y antiguo, considerando que esta madera se utiliza para rehabilitar edificios históricos en Valparaíso, en reemplazo de piezas gravemente dañadas.

Los resultados del primer grupo (probetas antiguas sin daños vs probetas nuevas) demostraron que la resistencia de la madera de la madera antigua extraída desde edificios históricos se vio reducida en la mayoría de los ensayos respecto a la madera nueva, en porcentajes que varían entre el 11% y el 60%. En particular, la resistencia a la compresión perpendicular de la madera de roble antigua (8.40 MPa) disminuyó un 34% respecto a la nueva (11.87 MPa), y en los ensayos de tracción perpendicular la resistencia de la madera antigua (2.92 MPa) disminuyó en un 41% respecto a la nueva (4.43 MPa). Asimismo, la resistencia al cizalle paralelo de las probetas de madera antigua (4.65 MPa) disminuyó un 60% respecto a las nuevas (8.62 MPa), y la resistencia a la flexión se redujo un 11% entre las probetas de roble antiguo (73.55 MPa) y nuevo (81.97 MPa). De igual forma, el módulo de elasticidad en flexión del roble antiguo (8344.33 MPa) se redujo en un 13% en comparación con la madera nueva (9535.84 MPa). Estos resultados permiten concluir que la carga prolongada de la madera influye negativamente en las variaciones de sus propiedades mecánicas, considerando la resistencia y rigidez. No obstante, la resistencia a la compresión paralela de la madera de roble nuevo disminuyó ligeramente (un 4.8%) respecto a las probetas de roble antiguo, de 43.40 MPa a 41.36 MPa. Este resultado podría considerarse como un valor fuera de la tendencia, y se espera poder aumentar la muestra en este ensayo en específico y conseguir resultados más consistentes.

Por otro lado, el grupo de ensayo de probetas clasificadas según su nivel de ataque por termitas (2) demostró que el daño superficial generado por el ataque de termitas tiene un impacto directo en la pérdida de la capacidad y rigidez de la madera ante diferentes tipos de cargas. La escala de clasificación visual permitió establecer una correlación cuantitativa que es inversamente proporcional entre el nivel de ataque y la pérdida de resistencia en las probetas, corroborando la hipótesis de esta investigación: a mayor nivel de ataque menor resistencia de las piezas. Esto puede indicar que el daño por insectos xilófagos y el uso prolongado de una pieza estructural puede afectar negativamente a la integridad de una estructura de madera, viendo reducida su capacidad de carga y siendo más vulnerable a deformaciones y daños.



## RESUMEN | ABSTRACT

Por último, los resultados de las probetas fabricadas con Pino Oregón comercial demostraron ser menos resistentes que las probetas elaboradas de roble comercial y roble antiguo de edificaciones existentes. Quedando en evidencia que los resultados de los ensayos de compresión paralela en probetas de pino Oregón fueron un 15% y un 11% menos resistentes que las probetas de roble antiguo y roble nuevo respectivamente. Para los ensayos de compresión perpendicular sus resultados mostraron una resistencia inferior en un 27% en comparación con las de roble antiguo y en un 43% en comparación con las de roble nuevo. En cuanto a los ensayos de tracción perpendicular estos demostraron una resistencia inferior en un 27% en comparación con las de roble antiguo y en un 43% en comparación con las de roble nuevo. Respecto a los ensayos de cizalle paralelo estos fueron aproximadamente un 43% menos resistentes que las de roble nuevo, pero un 6% más resistentes que las de roble antiguo. Sobre el módulo de rotura en flexión los resultados para las probetas de pino Oregón mostraron ser un 17% más resistentes que las de roble antiguo, pero un 51% menos resistentes que las de roble nuevo. Por otro lado, la mediana de elasticidad para las probetas de pino Oregón fue de 9400 MPa, lo que muestra que estas probetas son un 12%, más resistentes que las de roble antiguo, pero un 1.4% menos resistentes que las de roble nuevo.

### **PALABRAS CLAVES:**

Sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera y adobe, caracterización mecánica, patologías de la madera, termitas.



## RESUMEN | ABSTRACT

This present research proposes an experimental study to determine the mechanical properties of oak wood in test specimens constructed with old wood rescued from buildings utilizing the tabique-ado-billo technique in the Historic Area of the city of Valparaíso, Chile. The main objective of this work is to evaluate and quantify the impact of damage cause by xylophagous insect, such as termites, on wood resistance, since this agent is one of the main factors of wood deterioration in the central area of the country. Additionally, the research seeks to evaluate if the prolonged load on wood, and the passage of time, influences the mechanical properties and resistance of the material in service.

The methodology involves a comparative study between different types of samples. First, a comparison is made between old oak wood and new or commercially available wood of the same species. The goal is to observe and quantify the differences to establish whether there is a trend that would allow for the correlation between prolonged wood loading and its mechanical properties. The second group of samples corresponds to those with damage caused by the attack of xylophagous insects. For this purpose, a tool was established for the visual classification of the specimens according to the degree of surface damage quantified in the area where failure is expected to occur in the specimens. The experimental campaign proposed in this work projects the execution of conventional destructive tests with reduced scale specimens to determine the mechanical properties of wood, considering the groups previously described, under compression loads parallel and perpendicular to the grain, perpendicular tensile, parallel shear and static bending in accordance with the Chilean standards that establish the methods and procedures to perform these tests (Instituto Nacional de Normalización, 2018c, 2018d, 2018f, 2018b, 2018e). Finally, new Oregon Pine specimens are evaluated and the results are compared with those of new and old Oak, considering that this wood is used to rehabilitate buildings (Instituto Nacional de Normalización, 2018c, 2018d, 2018f, 2018b, 2018e). Finally, new Oregon Pine specimens are evaluated and the results are compared with those of new and old Oak, considering that this wood is used to rehabilitate historic buildings in Valparaiso, replacing severely damaged pieces.

The results of the first group (old undamaged specimens vs. new specimens) showed that the strength of the old wood extracted from historic buildings was reduced in most tests compared to the new wood, with reductions ranging from 11% to 60%. Specifically, the perpendicular compressive strength of the old oak wood (8.40 MPa) decreased by 34% compared to the new wood (11.87 MPa), and in the perpendicular tensile tests, the strength of the old wood (2.92 MPa) decreased by 41% compared to the new wood (4.43 MPa). Similarly, the shear parallel strength of the old wood specimens (4.65 MPa) decreased by 60% compared to the new wood (8.62 MPa), and the flexural strength was reduced by 11% between the old specimens (73.55 MPa) and new ones (81.97 MPa). Likewise, the modulus of elasticity in bending for the old oak (8344.33 MPa) was reduced by 13% compared to new wood (9535.84 MPa). These results indicate that prolonged loading of the wood negatively influences the variations in its mechanical properties, including strength and stiffness. However, the compressive strength parallel to the grain of the new oak wood decreased slightly (by 4.8%) compared to the old oak specimens, from 43.40 MPa to 41.36 MPa. This result could be considered as outlier, and it is expected that increasing the sample size in this specific test will yield more consistent results.

On the other hand, the group of specimens classified according to their level of termite damage (2) demonstrated that the surface damage caused by termite attack directly impact the loss of wood strength and stiffness under different types of loads. The visual classification scale allowed establishing a quantitative correlation that is inversely proportional between the level of attack and the loss of strength in the specimens, confirming the hypothesis of this research: the higher the level of attack, the lower the strength of the pieces. This may indicate that damage by xylophagous insects and the prolonged use of a structural member can negatively affect the integrity of a wood structure, reducing its load capacity and making it more vulnerable to deformation and damage.

Finally, the results of specimens made from commercial Oregon pine proved to be less resistant than specimens made from commercial oak and old oak from existing buildings. It is evident that the results



## RESUMEN | ABSTRACT

of the parallel compression tests on Oregon pine specimens were 15% and 11% less resistant than the old oak and new oak specimens, respectively. For perpendicular compression tests their results showed 27% lower strength compared to old oak and 43% lower strength compared to new oak. As for the perpendicular tensile tests, they showed a 27% lower strength compared to the old oak and 43% lower strength compared to the new oak. Parallel shear tests showed approximately 43% less strength than new oak, but 6% more strength than old oak. Regarding the modulus of rupture in bending, the results for the Oregon pine specimens showed them to be 17% stronger than the old oak specimens, but 51% less strong than the new oak specimens. On the other hand, the median elasticity for the Oregon pine specimens was 9400 MPa, which shows that these specimens are 12% stronger than the old oak specimens, but 1.4% less strong than the new oak specimens.

### **KEYWORDS:**

Traditional timber frame and adobe construction systems, mechanical characterization, wood pathologies, termites.



# INDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	9
ÍNDICE	11
LISTADO DE FIGURAS	14
LISTADO DE TABLAS	21
LISTADO DE ECUACIONES	23
<b>I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>25</b>
1.1 Sistemas constructivos tradicionales de madera en Valparaíso, Chile: antecedentes y estado de conservación actual	27
1.2 Hipótesis	29
1.3 Objetivos de la investigación	30
1.3.1 Objetivo principal	30
1.3.2 Objetivos específicos	30
1.4 Metodología	30
1.4.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica	31
1.4.2 Etapa 2: Estudio de campo y recogida de muestras	31
1.4.3 Etapa 3: Clasificación de las muestras, preparación y construcción de las probetas	32
1.4.4 Etapa 4: Configuración y ejecución del programa experimental	33
1.4.5 Etapa 5: Análisis de los resultados	33
1.5 Esquema de la tesis	33
<b>II. CUERPO DE LA TESIS</b>	
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>37</b>
2.1 Características de la madera estructural	37
2.1.1 Estructura interna de la madera	38
2.1.2 Especies	39
2.1.3 Singularidades y defectos	39
2.1.4 Clasificación de la madera	42
2.1.5 Propiedades mecánicas	43
2.1.6 Densidad	46
2.1.7 Contenido de humedad	47
2.1.8 Duración de la carga	50
2.2 Patologías de la madera	51
2.2.1 Patologías de origen biótico	51
2.2.2 Patologías de origen abiótico	56
2.2.3 Patologías de origen mecánico	56
2.3 Marcos normativos para la caracterización mecánica de la madera mediante ensayos experimentales	57
2.3.1 Normativas nacionales e internacionales	58
2.3.2 Ensayos de compresión paralela	60
2.3.3 Ensayos de compresión perpendicular	62
2.3.4 Ensayos de tracción perpendicular	63

# INDICE DE CONTENIDOS

2.3.5	Ensayo de cizalle paralelo	63
2.3.6	Ensayo de flexión estática	64
2.4	Evaluación de la madera existente en edificios históricos	65
2.4.1	Caracterización mecánica de la madera existente en construcciones histórica	66
2.5	Comentarios finales	71
<b>CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE ENTRAMANDO DE MADERA EN LA CIUDAD DE VALPARAÍSO, CHILE</b>		<b>73</b>
3.1	Contexto histórico y aparición de la arquitectura en madera	73
3.2	El sistema constructivo tabique-adobillo	78
3.2.1	Orígenes y evolución	78
3.2.2	Configuración estructural y constructiva	79
3.2.3	Especies madereras existentes en los entramados de madera tradicionales de Valparaíso	82
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA EL LEVANTAMIENTO DE DATOS Y CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA EXISTENTES EN EDIFICIOS HISTÓRICOS</b>		<b>87</b>
4.1	Diagrama de flujo, etapas y actividades propuestas	87
4.2	Etapas 1: Selección de los casos de estudio	89
4.3	Etapas 2: Levantamiento de información	89
4.3.1	Levantamiento de datos desde inspecciones in situ	89
4.3.2	Ficha técnica para el levantamiento de datos	90
4.3.3	Obtención, clasificación de muestras y mediciones	94
4.3.4	Transporte y almacenamiento	94
4.4	Etapas 3: Ejecución de los ensayos	94
4.4.1	Preparación de las probetas	94
4.4.2	Clasificación de las probetas	95
4.4.3	Ejecución de los ensayos	96
4.5	Etapas 4: Análisis de los resultados	97
<b>CAPÍTULO 5. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA EXTRAÍDA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS EXISTENTES</b>		<b>99</b>
5.1	Programa experimental	99
5.2	Casos de estudio y obtención de muestras	100
5.3	Probetas y matriz de ensayos	103
5.4	Descripción de los ensayos	106
5.4.1	Equipos e instrumentalización	106
5.5	Ejecución de los ensayos: resultados	108
5.5.1	Ensayo de compresión paralela (CPA)	108
5.5.2	Ensayo de compresión perpendicular (CPE)	113
5.5.3	Ensayo de tracción perpendicular (TPE)	118
5.5.4	Ensayo de cizalle paralelo (CZ)	121

# INDICE DE CONTENIDOS

5.5.5	Ensayo de flexión estática	126
5.5.6	Densidad	136
5.6	Conclusiones y análisis comparativo	140
	<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES</b>	<b>143</b>
6.1	Resumen	143
6.2	Principales contribuciones de esta investigación	144
6.3	Comentarios generales y conclusiones	144
6.4	Consideraciones y trabajo futuro	145
III.	BIBLIOGRAFÍA	149
IV.	ANEXOS	157
	Anexo 1	157
	Anexo 2	182
	Anexo 3	187
	Anexo 4	199

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Vivienda afectada por ataque de termitas en el cerro Alegre de Valparaíso: (a) desprendimiento parcial del adobe y desintegración parcial o total de (b) diagonales y (c) soleras.	26
Figura 2. Vivienda afectada por ataque de termitas en el cerro Alegre de Valparaíso: desprendimiento y desintegración parcial o total de (a), (b) y (c) de pies derechos; y (d) soleras.	28
Figura 3. Esquema de la sección de una estructura leñosa: (a) corte y (b) diagrama tridimensional (Mojó & Maldonado, 2001).	38
Figura 4. Efectos de la densidad específica de la madera y variación de las propiedades mecánicas: (a) resistencia a la flexión, compresión paralela para maderas duras y blandas, y módulo de elasticidad en flexión de maderas duras; (b) compresión perpendicular, cizalle y tracción perpendicular en maderas duras y blandas (Kasal, 2004).	39
Figura 5. Esquemas de la composición de maderas (a) gimnospermas y (b) angiospermas (Broto, 2005).	39
Figura 6. Direcciones principales de la madera (Vignote & Martínez, 2006).	40
Figura 7. Nudos en la madera: (a) formaciones en el tronco (Guindos, 2019) y (b) en la madera aserrada (Chan et al., 2002).	41
Figura 8. Deformaciones típicas tras el secado de la madera (Guindos, 2019).	41
Figura 9. Madera de reacción: sección transversal de (a) madera de tensión en latifoliadas y (b) madera de compresión en coníferas (Chan et al., 2002).	42
Figura 10. Bolsas de resina (Chan et al., 2002).	43
Figura 11. Ensayos de compresión paralela en (a) pequeñas probetas de madera y (b) piezas de tamaño estructural (Guindo 2019).	44
Figura 12. Ensayos de compresión en (a) paralela a las fibras y; (b) perpendicular a las fibras.	44
Figura 13. Ensayos de tracción (a) paralela a las fibras y (b) perpendicular a las fibras.	45
Figura 14. Efectos de la flexión estática por una carga puntual.	45
Figura 15. Gráfico de carga v/s deformación para especies de madera (Facultad de ingeniería UNAM, 2018).	46
Figura 16. Efecto del porcentaje de poros y pared celular en la densidad de la madera (Guindos, 2019).	47
Figura 17. Influencia de la densidad en algunas de las propiedades mecánicas más importantes en la madera (Guindos, 2019).	47
Figura 18. 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 (Arriaga et al., 2023).	48
Figura 19. Gráfico de variación de la resistencia con respecto al contenido de humedad (Vignote & Martínez, 2006).	48
Figura 20. Gráfico de la HE típica de la madera según temperatura y HR (Guindos, 2019).	49
Figura 21. Instrumentos de medición (a) xilohigrómetros de conductividad (LME-INFOR) y (b) xilohigrómetros dieléctrico.	49

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 22. Curva de Madison y Eurocódigo: resistencia y duración de carga de la madera (Arriaga et al., 2007).	50
Figura 23. Madera azul por hongos cromógenos (Guindos, 2019).	52
Figura 24. Daños producidos en la madera por hongos de pudrición blanca (Maderame, 2020).	52
Figura 25. Daños producidos por hongos de pudrición parda (Arriaga et al., 2002).	53
Figura 26. Daños producidos por hongos de pudrición blanda (Maderame, 2020).	53
Figura 27. Principales tipos de termitas que atacan la madera: (a) termita de madera subterránea; (b) termita de madera seca y (c) termita húmeda (Guindos, 2019).	53
Figura 28. Tipos de termitas subterráneas: (a) obrera; (b) soldado y (c) alado (Ripa et al., 2004).	54
Figura 29. Tipos de termitas de madera seca: (a) obrera; (b) soldado y (c) alado (Ripa et al., 2004).	54
Figura 30. Tipos de termitas de madera húmeda: (a) obrera; (b) soldado y (c) alado (Ripa et al., 2004).	54
Figura 31. Insectos de ciclo larvario: (a) anóbidos adulto; (b) anóbidos larva. Ataque de escarabajo Anóbidos: (c) daño y (d) corte de madera dañada (Ripa et al., 2004).	55
Figura 32. Ataque de escarabajo Líctidos: (a) lyctus chilensis adulto; (b) lyctus chilensis larva y (c) daños en madera chapada de coihue (Ripa et al., 2004).	55
Figura 33. Ataque Phoracantha semipunctata adulto (Ripa et al., 2004).	55
Figura 34. Ataque de gorgojo: (a) pentarthrun sp. adulto y (b) pentarthrun sp. Larva (Ripa et al., 2004).	54
Figura 35. Patologías mecánicas: (a) aplastamiento de solera inferior de elementos comprimidos en dirección perpendicular a la fibra; (b) viga de madera con fisuras profundas que alcanzan al núcleo de la pieza, comprometiendo su integridad estructural (Lasheras, 2009); (c) rotura por agotamiento de la sección de madera en flexión y presencia de nudos (Salmerón, 2017).	57
Figura 36. Ensayo de compresión paralela. NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c).	61
Figura 37. Ensayo de compresión perpendicular a la fibra. NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d).	62
Figura 38. Ensayos de tracción perpendicular a las fibras: (a) tracción perpendicular tangencial y (b) tracción perpendicular radial. NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f).	63
Figura 39. Ensayo de cizalle paralelo: (a) cizalle radial y (b) cizalle tangencial. NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b).	64
Figura 40. (a) ensayo de flexión estática y (b) cabezal de madera o metal para el ensayo. NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e).	65

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 41. Construcciones históricas de entramado de madera en: (a) Lisboa, Portugal (Poletti, 2013); (b) York, Inglaterra (Lukic et al., 2018); (c) Safranbulo, Turquía (Aktaş, 2017); (d) Lima, Perú (Quinn et al., 2016); y (e) Valparaíso, Chile (Archivo propio).	66
Figura 42. Diferencia porcentual entre la resistencia a la compresión de madera antigua y nueva. Los valores positivos indican una mayor resistencia a la compresión para la madera antigua, y cuando no se indica un valor específico la tendencia se indica como incremento (+) o decremento (-) (Cavalli et al., 2016).	67
Figura 43. Curvas de regresión ajustadas a las muestras estándar y meso (Manchado et al., 2019).	69
Figura 44. Comparación de la resistencia a la compresión con las normas de diseño (Smith, 2021).	69
Figura 45. Gráfico de carga-deformación en probetas según los tres modos de fallo detectados durante el ensayo: tensión, cizalle y compresión (Llana et al., 2023).	70
Figura 46. Fotografía de Rafael Castro y Ordoñez en 1864, construcciones de viviendas en la quebrada de los cerros en Valparaíso.	74
Figura 47 Mapas de Valparaíso: (a) se visualiza el desarrollo urbano en el sector del Almendral, la meseta se encuentra natural, 1838; (b) se visualiza una trama urbana bien definida en los cerros de Valparaíso, 1879; (c) se puede ver la trama urbana completamente consolidada, 1902. Fuente: Cartografía histórica de Valparaíso.	75
Figura 48. Fotografía de Félix LeBlanc. Vista de las construcciones en los cerros vislumbrando una urbanización en crecimiento.	76
Figura 49. Fotografías de viviendas de entramado en madera. (a) vivienda en cerro Alegre, (b) vivienda en cerro Concepción y (c) vivienda en Playa Ancha.	77
Figura 50. Límites de las zonas de protección patrimonial UNESCO en Valparaíso.	78
Figura 51. Diagrama que ilustra una composición típica del sistema box frame (Labine et al., 1980).	79
Figura 52. Proceso de construcción (a) de un sistema de entramado tipo balloon frame y (b) de un sistema de entramado tipo platform frame (O'Brien, 2010).	79
Figura 53. Configuración de un entramado de madera tipo stud frame (Jiménez, 2014).	79
Figura 54. Fotografías de viviendas de entramado de madera en cerro Concepción.	80
Figura 55. Sistema tabique-adobillo (Dávila & Contreras, 2022).	80
Figura 56. Entramado de madera tipo plataforma (independiente de cada planta): (a) muro de entramado del tercer piso y (b) entramado ubicado en subterráneo. Vivienda ubicada en el cerro Alegre.	81
Figura 57. Detalles constructivos. Vivienda Quebrada Verde N° 192 de Playa Ancha, detalle de techumbre. (Waisberg, 1988, p.79).	81

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 58. Tipos de uniones carpintera características de los entramados de Valparaíso: (a) unión ensamble tipo cola de milano (González, 2019)), (b) unión ensamble tipo caja y espiga y (c) ensamble embarbillado (Jiménez, 2014).	81
Figura 59. Unión de caja y espiga en una construcción en el cerro Alegre de Valparaíso. (Jiménez, 2014, p. 57).	82
Figura 60. Tipos de ensamble embarbillado frontal simple: (a) diagrama de unión de techumbre (Arriaga et al., 2011, p. 33) y (b) unión embarbillada ubicada en vivienda en cerro Alegre.	82
Figura 61. Unión cola de Milano: (a) esquema de la unión y (b) detalle de las medidas y como se acopla la unión (González, 2019, p. 127).	82
Figura 62. Anuncios de venta de productos de construcción por comerciantes (Jiménez, 2014, p5. 116).	83
Figura 63. Anuncios de la venta de madera y para la construcción de casa de madera en Valparaíso (Jiménez, 2014, p. 147).	84
Figura 64. Diagrama de flujo del proceso de metodología de levantamiento de datos y caracterización de la madera histórica.	88
Figura 65. Etapa 1: Selección de casos, de la metodología propuesta.	89
Figura 66. Etapa 2: “Levantamiento de información” de la metodología propuesta.	90
Figura 67. Ejemplo de levantamiento de información. Casa en Montealegre 386, cerro Alegre, Valparaíso, Chile. Archivos rescatados desde el Archivo Histórico Patrimonial – oficina de Gestión patrimonial de la Dirección de Obras Municipales de Valparaíso, DOM.: (a) declaración descriptiva y estimativa del inmueble, (b) croquis ilustrativo del emplazamiento del inmueble y (c) especificaciones técnicas.	90
Figura 68. Ficha técnica de recopilación de datos, Sección 1: Información General.	91
Figura 69. Ficha técnica de recopilación de datos, Sección 2: Tipologías constructivas.	92
Figura 70. Ficha técnica de recopilación de datos, Sección 3: Revestimientos.	93
Figura 71. Ficha técnica de recopilación de datos, Sección 4: Patologías en el edificio.	93
Figura 72. Ficha técnica de recopilación de datos, Sección 5: Observaciones.	94
Figura 73. Etapa 3: Ensayos, de la metodología propuesta.	95
Figura 74. Etapa 4: Análisis de los resultados, de la metodología propuesta.	97 197
Figura 75. Plano de emplazamiento los casos de estudio 1 y 2, en la Zona de Amortiguación y caso de estudio 3, en la Zona de Conservación Histórica.	101
Figura 76. Casos de estudio en Valparaíso: (a) vivienda en pasaje Higuera, N° 179, cerro Alegre; (b) Hostal La Casa del Puerto calle Almirante Montt N° 97-107-109, cerro Alegre; (c) vivienda en calle Malfatti N° 585, cerro Placeres.	101

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 77. Caso de estudio calle Higuera N° 179, cerro Alegre: con presencia extrema de ataque de xilófagos (termitas): (a) degradación casi completa de muro de entramado; (b) pie derecho atacado por las termitas; (c) solera superior inexistente ante el daño avanzado por termitas.	102
Figura 78. Caso de estudio calle Almirante Montt N° 97-107-109, cerro Alegre: (a) vista de pies derechos sin su relleno; (b) identificación de unión caja y espiga, sección maderera de 4 x 4".	102
Figura 79. Caso de estudio calle Malfatti N°585, cerro Placeres con daños por (a) y (b) desprendimiento total de abobe; (c) pies derechos atacados por termitas.	103
Figura 80. Probetas (a y b) libres de nudos y defectos: (a) probeta de roble nuevo; (b) probeta de pino Oregón; y (c) probetas de los edificios históricos con defectos de termitas.	104
Figura 81. Definición de códigos únicos para el rotulado de las probetas para los ensayos.	105
Figura 82. Rotulado de las probetas para ensayos de compresión paralela de las especies de (a) roble nuevo; (b) pino Oregón nuevo, y (c) madera antigua de roble.	106
Figura 83. Equipos utilizados para la medición de las probetas: (a) xilohigrómetro dieléctrico; (b) pie de metro digital; (c) balanza.	107
Figura 84. Ensayos de compresión paralela con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.	108
Figura 85. Resistencia a la compresión paralela según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	110
Figura 86. Resistencia a la compresión paralela según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	111
Figura 87. Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados a compresión paralela según el nivel de ataque por termitas.	112
Figura 88. Ensayos de compresión perpendicular con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.	113
Figura 89. Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de compresión perpendicular.	114
Figura 90. Resistencia a la compresión perpendicular según tipo de probeta.	115
Figura 91. Resistencia a la compresión perpendicular según nivel de ataque por termitas.	116
Figura 92. Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados a compresión perpendicular según el nivel de ataque por termitas.	117
Figura 93. Ensayos a tracción perpendicular con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.	118
Figura 94. Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de tracción perpendicular.	118
Figura 95. Resistencia a la tracción perpendicular según tipo de probeta.	119

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 96. Resistencia a la tracción perpendicular según nivel de ataque por termitas.	120
Figura 97. Regresión lineal e intervalos de predicción y media de confianza para los resultados de resistencia a la tracción perpendicular según el nivel de ataque por termitas.	120
Figura 98. Ensayos a cizalle paralelo con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.	122
Figura 99. Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de cizalle paralelo.	122
Figura 100. Resistencia a la cizalle paralelo según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	124
Figura 101. Resistencia a la cizalle paralelo según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	125
Figura 102. Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados a cizalle paralelo según el nivel de ataque por termitas.	126
Figura 103. Ensayos a flexión estática con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.	127
Figura 104. Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de flexión estática.	127
Figura 105. Módulo de rotura en flexión estática según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	129
Figura 106. Módulo de rotura en flexión estática según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	130
Figura 107. Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados del módulo de rotura en flexión según el nivel de ataque por termitas.	130
Figura 108. Módulo de elasticidad en flexión estática según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	133
Figura 109. Módulo de elasticidad en flexión estática según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	134
Figura 110. Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados del módulo de elasticidad en flexión según el nivel de ataque por termitas.	135
Figura 111. Densidad según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	137
Figura 112. Densidad según nivel de ataque de termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.	138
Figura 113. Regresión lineal e intervalos de predicción y media de confianza para los resultados de densidad según el nivel de ataque por termitas.	139
Figura 114. Emplazamiento general.	157

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 115. Planimetría general. Plantas de los diversos niveles, se presenta la nueva propuesta, además de la distribución original de la vivienda. Fuente: U6 arquitectos, 2023	160
Figura 116. Elevaciones de todas las fachadas del inmueble actuales. Fuente: U6 arquitectos, 2023.	161
Figura 117. Elevación pasaje Higuera. Fuente: U6 arquitectos, 2023.	161
Figura 118. Secciones del sistema constructivo entramado de madera, con daño por terminas.	161
Figura 119. Tipo de fundación de albañilería en ladrillo con piedra.	162
Figura 120. Entramado de muro en madera, relleno de adobillos. Piezas madereras de 4x4".	162
Figura 121. Envigado de piso del primer piso, amarrada entre ladrillos de albañilería.	162
Figura 122. Planos del predio: (a) plano simple del predio, propietario Horacio Battle y (b) plano subdivisión del predio en dos quien es dueña principal Ida Hucke viuda de Fonck, el predio en azul es de Carlos Schwarzenberg y el rojo de Ida.	162
Figura 123. Escantillón isométrico fachada principal.	163
Figura 124. Sistema de montaje de los adobillos. Diagrama isométrico.	163
Figura 125. Entramado horizontal del piso. Diagrama isométrico.	163
Figura 126. Emplazamiento general.	164
Figura 127. Planimetría de los diversos niveles del caso de estudio Hostal.	167
Figura 128. Corte A-A', transversal.	167
Figura 129. (a) Patio interior del inmueble y (b) Terraza tercer piso.	168
Figura 130. Fundaciones de piedra y ladrillo, subterráneo del inmueble.	168
Figura 131. Sección maderera de 4" x 4".	168
Figura 132. Escantillón isométrico fachada principal.	169
Figura 133. Sistema de montaje de los adobillos. Diagrama isométrico.	169
Figura 134. Emplazamiento general.	170
Figura 135. Emplazamiento general.	173
Figura 136. Emplazamiento general.	176
Figura 137. Emplazamiento general.	179
Figura 138. Ejemplo de cálculo del módulo de elasticidad en flexión Ef. Caso probeta (ER) HOS2-R-FL-01.	199

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Características típicas del crecimiento de la madera y su efecto en la resistencia (Smith, 2021).	40
Tabla 2. Resumen de las características de las principales familias de coleópteros xilófagos presentes en las maderas en Chile (Ripa et al., 2004).	56
Tabla 3. Tabla comparativa de las normas internacionales, en base a los ensayos destructivos a escala reducida.	60
Tabla 4. Herramienta de clasificación visual de la madera antigua en edificios históricos de acuerdo con la gravedad del daño por ataque de termitas.	96
Tabla 5. Descripción de los ensayos a escala reducida.	104
Tabla 6. Matriz experimental de ensayos a escala reducida.	105
Tabla 7. Distribución de las muestras de acuerdo con el tipo de ensayo y el grado de ataque por termitas.	105
Tabla 8. Descripción de los ensayos y equipamiento de los ensayos a escala reducida.	107
Tabla 9. Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo de Compresión Paralela.	182
Tabla 10. Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Compresión Perpendicular.	183
Tabla 11. Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Tracción Perpendicular.	184
Tabla 12. Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Cizalle Paralelo.	185
Tabla 13. Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Flexión Estática.	186
Tabla 14. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).	187
Tabla 15. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).	187
Tabla 16. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).	188
Tabla 17. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).	188
Tabla 18. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Perpendicular según Tipo de Probeta (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).	189
Tabla 19. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Perpendicular según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).	189
Tabla 20. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Tracción Perpendicular según Tipo de Probeta (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).	190
Tabla 21. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Tracción Perpendicular según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).	190
Tabla 22. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).	191

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 23. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).	191
Tabla 24. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).	192
Tabla 25. Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).	192
Tabla 26. Estadística Descriptiva – Módulo de Rotura en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).	193
Tabla 27. Estadística Descriptiva – Módulos de Rotura en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).	193
Tabla 28. Estadística Descriptiva – Módulos de Rotura en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).	194
Tabla 29. Estadística Descriptiva – Módulos de Rotura en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).	194
Tabla 30. Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).	195
Tabla 31. Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).	195
Tabla 32. Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).	196
Tabla 33. Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).	196
Tabla 34. Estadística Descriptiva – Densidad según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).	197
Tabla 35. Estadística Descriptiva – Densidad según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).	197
Tabla 36. Estadística Descriptiva – Densidad según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).	198
Tabla 37. Estadística Descriptiva – Densidad según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).	198



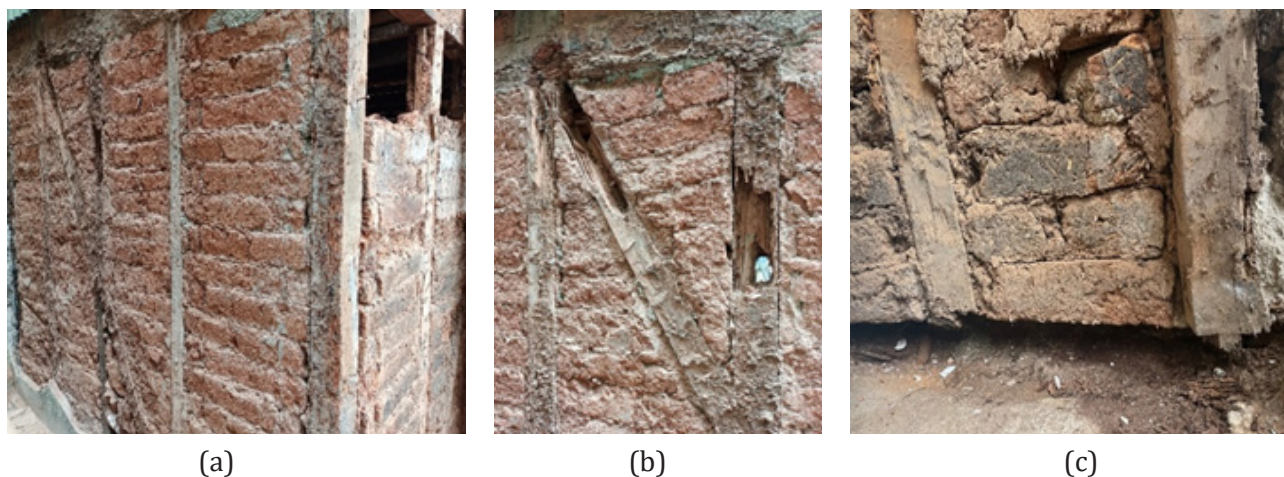


## INTRODUCCIÓN

Los sistemas constructivos tradicionales híbridos que utilizan armazones de entramado de madera rellenos con tierra, albañilería de ladrillo, u otras técnicas, se caracterizan por su reconocido carácter antisísmico en diferentes lugares del mundo tales como Portugal (Poletti, 2013), Italia (Lukic et al., 2018), Turquía (Aktaş, 2017), Perú (Quinn et al., 2016) y Chile (Cisterna & Jorquera, 2016; Jiménez & Pelà, 2023). Algunos ejemplos emblemáticos de este tipo de construcciones en Latinoamérica son la quincha o bahareque, la tierra alivianada, presentes principalmente en Sudamérica y Panamá (Acevedo et al., 2022; Gómez-Patrocínio et al., 2021), y la técnica del tabique-adobillo característica de Valparaíso (Chile), entre otros. En estas construcciones el principal sistema portante se constituye con armazones de madera, un material que es altamente sensible al ataque de diversos agentes patológicos como son los insectos xilófagos, entre los que se encuentran las termitas, insectos que pueden deteriorar parcial o totalmente las estructuras. Según Broto (2005) y Lasheras (1998), los insectos del tipo carcoma o coleópteros (termitas) pueden causar degradaciones considerables en los sistemas constructivos, lo que provoca pérdidas significativas del área resistente de las piezas estructurales y, por tanto, puede afectar gravemente su capacidad de carga y conservación.

Particularmente, en la ciudad de Valparaíso (Chile) las construcciones que utilizan la técnica conocida como tabique-adobillo representan una parte importante del patrimonio construido en madera en el país. No obstante, en la actualidad estas construcciones centenarias experimentan alarmantes procesos de deterioro, fenómenos que se asocian a diferentes factores entre los que destacan el ataque por termitas. De acuerdo con MINVU (2018), ya en 2004 en la región de Valparaíso habían más de 5.000 construcciones dañadas por las termitas, situación que aumenta de forma progresiva. En particular, las termitas del tipo voladoras y subterráneas se han expandido peligrosamente por la región de Valparaíso (MINVU, 2017), siendo las construcciones históricas las más propensas a sufrir daños, debido al daño acumulativo por otras patologías como la humedad, la falta de mantenimiento y protección ante dicha amenaza. Los daños producidos por las termitas son generalizados e inducen a la inestabilidad de los marcos al verse desintegradas las piezas estructurales. Tal como observa en la Figura 1, el daño en el marco también genera el desprendimiento del relleno, en estos casos de bloques de adobillo, al perder la madera la capacidad de confinar las piezas, propiciando el vaciado de los muros.

Las propiedades mecánicas de la madera son altamente variables y dependen de diferentes factores, como el tipo de especie maderera, la localización de los inmuebles, y el estado de conservación de las estructuras, entre otros. Generalmente, la caracterización mecánica de las maderas nuevas (sin

**Figura 1**

Vivienda afectada por ataque de termitas en el cerro Alegre de Valparaíso: (a) desprendimiento parcial del adobe y desintegración parcial o total de (b) diagonales y (c) soleras.

Fuente: elaboración propia.

patologías) que ofrecen las industrias madereras o aquellas liberadas por estudios en torno a los sistemas constructivos contemporáneos, no suelen ser representativas de las características de la madera antigua, existente en edificios históricos (Cisterna & Jorquera, 2016; Ferrada & Berg, 2016; Jiménez, 2014). Es por esta razón que se vuelve imprescindible llevar a cabo estudios para determinar las características mecánicas de la madera antigua, considerando parámetros de estudio como el paso del tiempo y el efecto del daño por diversas patologías de los materiales. Estos estudios permiten generar indicadores para la evaluación y monitoreo de las estructuras en servicio (Hernández & Venegas, 2015).

La presente investigación aborda la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de roble existente en las construcciones históricas del tipo tabique-adobillo en Valparaíso, con el objetivo de determinar el impacto del paso del tiempo y del daño producido por las termitas en las piezas estructurales ante diferentes sollicitaciones estructurales. El estudio se realizó a través de la ejecución de ensayos experimentales destructivos a escala reducida, de acuerdo con las normativas vigentes en Chile para determinar la resistencia a la compresión paralela (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), la compresión perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), la tracción perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), el cizalle paralelo (Instituto Nacional de Normalización, 2018b), y la flexión estática (Instituto Nacional de Normalización, 2018e). La metodología propuesta, de naturaleza cuantitativa y comparativa, incluye la ejecución de ensayos tanto en piezas nuevas como antiguas de la misma especie, con el objetivo de comparar los resultados, determinar el impacto del grado de daño de las maderas y del paso del tiempo de la madera existente con y sin daño por termitas versus la nueva.

Las probetas de material antiguo fueron construidas a partir de piezas estructurales de descarte de madera de roble, obtenidas desde edificaciones históricas de la ciudad de Valparaíso, y fueron clasificadas a partir de una escala de grado de daño que cuantifica de forma cualitativa el ataque superficial por termitas en su plano de falla. Las probetas nuevas fueron construidas con madera de roble y también de pino Oregón, considerando que también existen antecedentes (Cisterna & Jorquera, 2016; Dávila & Contreras, 2022; Eujenio, 2015; Jiménez, 2014) de que es un material que se utilizó en las construcciones históricas, y que en la actualidad se utiliza para la rehabilitación de edificios de entramado de madera. Los ensayos comparativos en probetas de madera nueva y antigua, con y sin daños por termitas, revelaron que, salvo en compresión paralela, la resistencia promedio de la madera de roble antiguo fue menor que la obtenida para la madera de roble nueva. Además, se observó que la resistencia y el módulo de elasticidad disminuyeron con el incremento

del daño por termitas. A pesar de esto, la madera de roble antiguo afectada por termitas mostró mejor resistencia promedio que las probetas nuevas de pino Oregón.

### **1.1 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE ENTRAMADO DE MADERA EN VALPARAÍSO, CHILE: ANTECEDENTES Y ESTADO DE CONSERVACIÓN ACTUAL**

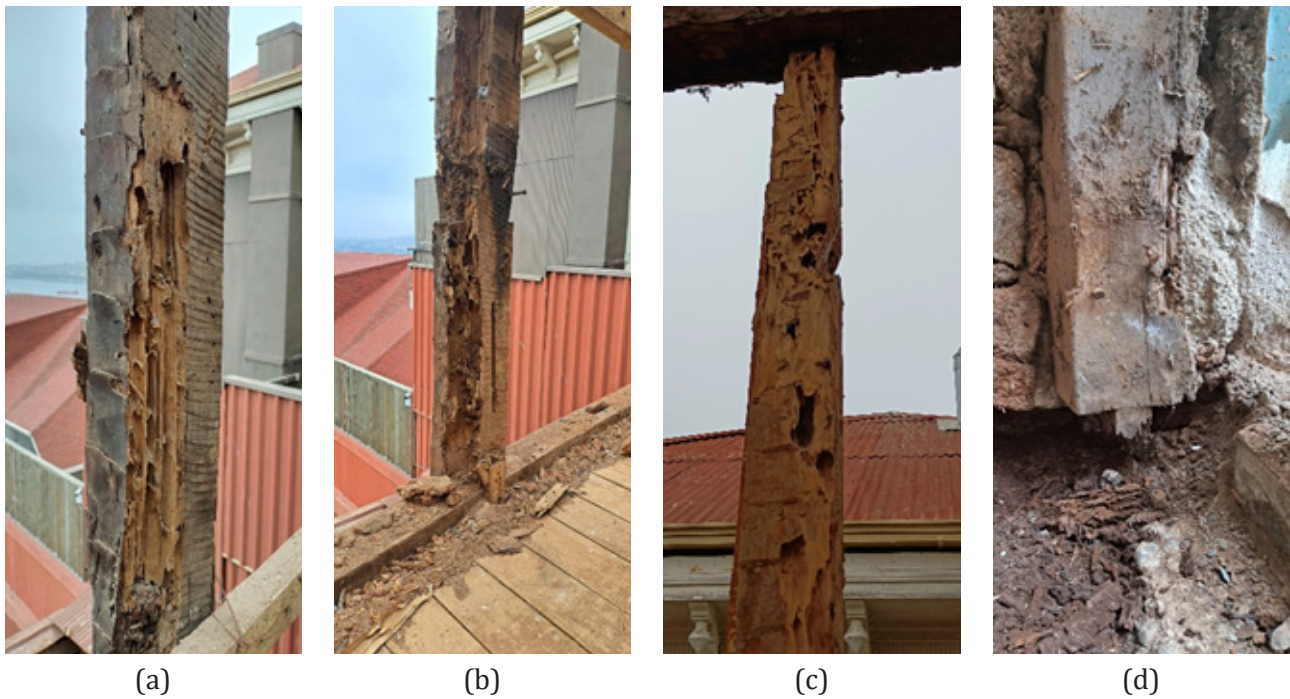
El área histórica de la ciudad de Valparaíso (Chile), alberga numerosas construcciones tradicionales de entramado de madera que representan parte importante del patrimonio construido en el país. Estas edificaciones se levantaron en algunos de los cerros más importantes de la ciudad, entre mediados del siglo XIX y comienzos del XX, delineando un paisaje urbano singular que contribuyó a la declaración del casco histórico como Sitio de Patrimonio Mundial por la UNESCO en 2003.

La configuración de los barrios que albergan construcciones precursoras de entramado de madera surge en el contexto de un importante fenómeno migratorio que coincidió con el máximo apogeo de la ciudad-puerto, y fue principalmente en los cerros Alegre y Concepción donde la construcción con madera adquirió gran preponderancia. Aunque el sistema constructivo de entramado de madera desarrollado en Valparaíso presenta claras similitudes con sistemas tradicionales o arquetípicos conocidos globalmente como balloon, platform y stud frame (Jiménez, 2015), en Valparaíso se requirieron soluciones constructivas innovadoras para sortear los obstáculos de construir en pendiente y en un territorio altamente sísmico. Estas solicitaciones locales obligaron a los inmuebles a adaptarse a la topografía de Valparaíso, otorgando una morfología identitaria a las construcciones que prevalece hasta el día de hoy (Duarte & Zúñiga, 2007)

En la actualidad, muchas de estas construcciones históricas están expuestas a amenazas de diversas fuentes, como son los sismos, incendios y deslizamientos de tierra, grafiti vandálico, entre otros, y muestran un evidente deterioro producto de la acción de agentes patológicos biológicos, especialmente debido al ataque de termitas (Martínez, 2023; MINVU, 2018). La grave condición de deterioro actual de los edificios patrimoniales de entramado de madera resalta la urgencia de generar conocimiento técnico y planes de acción para abordar los procesos de restauración, rehabilitación y reforzamiento de dichas estructuras, considerando su relevancia histórica, social y cultural. En este contexto, es importante resaltar la aplicación de principios apropiados y modernos para la conservación del patrimonio en madera, que considera como un factor clave reconocer la vulnerabilidad de las estructuras de madera debido a los potenciales daños por descomposición y degradación de la madera como material, debido a factores ambientales, climáticos y causadas por hongos e insectos como las termitas, entre otros (ICOMOS, 1999).

Asimismo, ICOMOS (1999) recomienda inspeccionar, registrar y documentar las estructuras de madera, considerando sus condiciones actuales antes de realizar cualquier tipo de intervención, realizando un buen diagnóstico, con el objetivo de ejecutar intervenciones informadas que permitan no subestimar a las estructuras, y realizar intervenciones removibles, mínimas y siguiendo las técnicas tradicionales. El documento también sugiere elegir técnicas de reparación o reemplazo parcial, cuando las piezas dañadas puedan ser recuperadas (ver Figura 2).

En este contexto, los estudios que abordan el análisis estructural de las construcciones históricas de madera generalmente requieren una base sólida

**Figura 2**

Vivienda afectada por ataque de termitas en el cerro Alegre de Valparaíso: desprendimiento y desintegración parcial o total de (a), (b) y (c) de pies derechos; y (d) soleras.

Fuente: elaboración propia.

de conocimiento técnico sobre las construcciones. En este sentido, es primordial disponer de datos cuantitativos que permitan, por ejemplo, caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales en sus diferentes estados de conservación, y así comprender con precisión el estado de deterioro de los elementos estructurales. No obstante, en Chile y específicamente en la ciudad de Valparaíso, existen escasos registros e investigaciones que aborden el estudio de las propiedades mecánicas y del estado de conservación de las estructuras históricas de entramado en madera. La mayoría de estos estudios se enfocan en la caracterización histórico-constructiva de dichas tipologías (Bustos, 2023; Eujenio, 2015; Gil, 2017; González, 2019; Jiménez, 2014; Salazar, 2014; Waisberg, 1988).

Por ejemplo, Jiménez (2015) detalló aspectos arquitectónicos y constructivos de esta tipología a través de pesquisas bibliográficas y estudios de casos. En un estudio posterior, Jorquera & Cisternas (2016) se centraron en la caracterización cualitativa del sistema constructivo, con énfasis en el uso del adobillo como material de relleno y en las características antisísmicas del sistema completo. Más recientemente, Dávila & Contreras (2022) publicaron una investigación sobre la misma técnica, conocida como “tabique-adobillo”, donde enfatizan en el estudio del origen del sistema de relleno de los marcos con adobillos, que plantean como original de la ciudad. Jorquera (2022), también integró a los edificios de entramados de madera de Valparaíso en su publicación “Patrimonio chileno construido en tierra”, abordando el estudio desde la caracterización del sistema constructivo. Por otro lado, Bustos (2023) incluyó en su investigación una propuesta metodológica para identificar caracterizar y registrar los procesos patológicos en las tipologías constructivas históricas del puerto de Valparaíso, incluyendo a los edificios de entramado de madera.

Similarmente, otros autores se han enfocado en el estudio del comportamiento sísmico de esta tipología constructiva, desde aproximaciones cualitativas y cuantitativas. Por ejemplo, Jiménez et al., (2018), Jiménez et al. (2021) y Jiménez & Pelà (2023) aplicaron diversos enfoques para su análisis, integrando enfoques para la caracterización cualitativa de los sistemas constructivos según sus características antisísmicas a través de un estudio taxonómico (Jiménez et al., 2018), el estudio de la vulnerabilidad sísmica a escala urbana, aplicando métodos híbridos (Jiménez et al., 2021), y la carac-

terización del comportamiento sísmico, a través de modelos de simulación numérica (Jiménez & Pelà, 2023). Este último estudio resalta que la falta de datos experimentales de los sistemas constructivos de entramado de madera en Valparaíso, incluyendo la caracterización mecánica del material, sesga los resultados y el alcance de los estudios propuestos, y sugiere avanzar en el desarrollo de estos.

Los planes de acción dirigidos a la intervención y rescate del patrimonio histórico en madera deben considerar estudios de caracterización mecánica de los materiales que configuran sus elementos resistentes. En el caso de los edificios de Valparaíso, es fundamental comenzar por la madera. Esta información permitirá derivar estudios más avanzados que integren herramientas como la modelación computacional o simulación numérica para estimar el comportamiento de estructuras completas, o aplicar técnicas de reforzamiento y reparación de piezas estructurales con mayor seguridad y precisión. Asimismo, se podrán desarrollar marcos metodológicos para evaluar el grado de daño de la madera, seguir inspeccionando los edificios a través de métodos no destructivos, y entender su impacto global en las estructuras.

Con base en lo anterior, esta investigación busca caracterizar las propiedades mecánicas de la madera existente en edificios tradicionales de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso, y determinar el grado de daño ocasionado por termitas en la resistencia del material a través de la ejecución de ensayos destructivos convencionales a escala reducida. Para este propósito, se propone obtener muestras estructurales de edificaciones históricas de la ciudad de Valparaíso (extraídas de piezas de descarte en obras de rehabilitación) con diferentes grados de daño y deterioro por dicha patología. Se espera conseguir piezas de madera de especies de roble, al ser la especie más común de dichos edificios según diversas publicaciones (Dávila & Contreras, 2022; Gil, 2017; Jiménez, 2014; Jorquera, 2014, 2022; Jorquera & Cisternas, 2016).

La presente investigación busca comprender el impacto del deterioro de la madera debido al ataque de termitas y el paso del tiempo, en términos de resistencia y rigidez del material, en probetas sometidas a ensayos de esfuerzos de compresión, tracción, cizalle y flexión a escala reducida. Además, se plantea responder las siguientes preguntas de investigación: ¿cómo varían las propiedades mecánicas de la madera existente respecto a la madera nueva de la misma especie?; ¿cómo influye el envejecimiento y el deterioro por ataque de termitas en la resistencia y rigidez del material?; ¿cómo influye la especie de la madera en las propiedades resistentes del material en el contexto patrimonial de Valparaíso?; y por último ¿qué efectos de deterioro se pueden observar en la resistencia y rigidez de la madera de roble existente en edificios históricos, en comparación con el roble y pino Oregon comercial?

Este trabajo se enmarca en el desarrollo del Proyecto Interno Multidisciplinario USM 2022-2023, financiado por la Dirección General de Investigación, Innovación y Emprendimiento de la misma institución, titulado “Manufactura y análisis avanzado del comportamiento estructural y sísmico de las uniones carpinteras existentes en edificios tradicionales de entramado de madera en Valparaíso” (código PI\_M\_2022\_03), dirigido por integrantes de los departamentos de Arquitectura, Ingeniería Mecánica y Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María.

## 1.2 HIPÓTESIS

Las propiedades mecánicas de las piezas madereras que configuran los edificios tradicionales de entramado en Valparaíso se ven afectadas por el daño ocasionado por agentes patológicos de origen biótico, principalmente por el ataque de insectos xilófagos (termitas). El grado de daño de los elementos estructurales tiene una relación directa e inversamente proporcional con la disminución de la resistencia y rigidez de la madera ante la acción de esfuerzos de flexión, cizalle, tracción y compresión.

Además, las piezas se ven afectadas por otros factores, que tienen que ver con el paso del tiempo y el historial de carga, que ocasionan la pérdida de las propiedades resistentes del material debido a procesos como la degradación de la estructura interna.

En la actualidad, la madera degradada por insectos xilófagos, incluso con afectación parcial, suele ser reemplazada por maderas nuevas de diferentes especies, debido al desconocimiento de su capacidad residual. Generalmente, se utilizan piezas nuevas de especies diferentes a las utilizadas en la obra original, donde se destaca el uso de madera de Pino Oregón.

## 1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Determinar las propiedades mecánicas de la madera de roble estructural presente en las construcciones tradicionales de entramado de madera en Valparaíso y evaluar cuantitativamente la correlación entre el grado de daño causado por las termitas y otros factores como el paso del tiempo en la variación de su resistencia y rigidez. Asimismo, se busca analizar las características mecánicas de la madera de pino Oregón, material utilizado en la rehabilitación de este tipo de estructuras,

La evaluación del envejecimiento de ambas maderas permitirá establecer recomendaciones para la conservación y refuerzos de las estructuras.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La presente investigación busca alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar la tipología constructiva tabique-adobillo mediante un estudio de campo e inspección de casos de estudio.
- Obtener piezas estructurales de descarte para la elaboración de probetas destinadas a la realización de ensayos experimentales con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. Se contempla la construcción de probetas utilizando madera nueva de la misma especie que la recuperada de edificios históricos.
- Determinar las propiedades mecánicas de la madera nueva de pino Oregón, especie maderera comúnmente empleada en la rehabilitación de construcciones tradicionales en Valparaíso, con el objetivo de comparar sus propiedades con la madera de roble nueva y antigua sin daños
- Ejecutar ensayos experimentales a escala reducida según los marcos establecidos en la normativa chilena.
- Determinar el módulo de elasticidad y densidad de la madera desde los ensayos de flexión, tabular y analizar los datos obtenidos en los ensayos experimentales.

- Comparar los resultados obtenidos, y correlacionar el impacto del grado de daño y del paso del tiempo en la madera, estimando los valores máximos de carga y deformación ante esfuerzos de compresión, tracción, cizalle y flexión.

## 1.4 METODOLOGÍA

La metodología propuesta en esta investigación es del tipo experimental y cuantitativa, y considera la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera de roble existente en edificios históricos, y de madera nueva de roble y pino Oregón. Esta campaña experimental considera la evaluación de la resistencia ante esfuerzos de compresión, tracción, cizalle y flexión en probetas a escala reducida de acuerdo con los procedimientos y métodos descritos en la normativa chilena. La metodología propuesta se compone de cinco etapas:

- Etapa 1: Revisión bibliográfica
- Etapa 2: Estudio de campo y obtención de muestras.
- Etapa 3: Clasificación de las muestras y preparación de las probetas
- Etapa 4: Ejecución del programa experimental (ensayos experimentales convencionales a escala reducida)
- Etapa 5: Análisis de los resultados

A continuación, se describe cada una de estas etapas y las actividades que involucran:

### 1.4.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La metodología propuesta considera una primera etapa de revisión bibliográfica de la literatura publicada en áreas del conocimiento atingentes a esta investigación. El propósito de esta revisión es trabajar en la construcción del estado del arte en relación con los estudios que abordan la caracterización mecánica de la madera estructural nueva y existente en edificios históricos mediante ensayos experimentales convencionales regulados en marcos normativos nacionales e internacionales. Además, se considera la revisión de campañas experimentales documentadas en artículos de investigación y libros, tesis de grado, magister y doctorado.

Asimismo, se establece realizar una revisión archivística (por ejemplo, en el Archivo Histórico y la Dirección de Obras de la Municipalidad de Valparaíso (DOM)), con la finalidad de recuperar información histórica sobre los sistemas constructivos de entramado de madera existentes en edificios históricos de Valparaíso, objetos de estudio en esta investigación. Por último, se considera la revisión de documentos oficiales y de las normativas nacionales e internacionales que rigen los ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera a escala reducida.

### 1.4.2 ETAPA 2: ESTUDIO DE CAMPO Y RECOGIDA DE MUESTRAS

La segunda etapa de esta investigación considera un estudio de campo en la ciudad de Valparaíso con el objetivo de inspeccionar diferentes casos de estudio y recolectar muestras para la construcción de probetas para ejecutar los ensayos propuestos. Los edificios patrimoniales inspeccionados serán seleccionados en función de la posibilidad de acceder al interior y de realizar una inspección visual del entramado de madera (sin revestimientos), así como de obtener muestras de madera estructural descartada. Para posibilitar

el cumplimiento de los criterios anteriores, se prevé la selección de edificios que estén siendo intervenidos estructuralmente.

En las tareas de obtención de muestras, se prioriza el rescate de piezas estructurales que cumplan la función de pies derechos, soleras o riostras diagonales de 4" x 4", de cualquier especie y con o sin daño ocasionado por termitas. Las piezas obtenidas desde los inmuebles se clasificarán in situ, según su procedencia y rol estructural, y se trasladarán al Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO), del departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María. Las piezas serán almacenadas aisladas de otras estructuras de madera por la posible presencia de insectos termitas que pudieran infestar el recinto.

En esta etapa, se considera realizar un levantamiento de datos generales y detallados de los casos de estudio, abarcando los siguientes aspectos: año de construcción, uso, antecedentes del inmueble (se buscará información respecto a la construcción en la dirección de obra municipal (DOM) para obtener planos y especificaciones técnicas), configuración geométrica, estructural y material, modificaciones posteriores, estado de daño y conservación, entre otros. Este levantamiento se llevará a cabo utilizando una ficha de recopilación de datos que se desarrollará preliminarmente al estudio de campo, basada en diversas referencias bibliográficas sobre la construcción de herramientas similares. Además, se incluirá la ejecución de un levantamiento fotográfico y geométrico (planimetría) de los casos inspeccionados, así como un registro descriptivo de las lesiones observadas in situ.

### **1.4.3 ETAPA 3: CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS, PREPARACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PROBETAS**

Una vez que las piezas de madera nuevas y rescatadas se encuentren en el laboratorio, se clasifican para optimizar la construcción de las probetas. Considerando que el número de muestras obtenidas será diverso y finito, se requiere cubicar el material disponible considerando una preclasificación del estado daño para obtener, en la medida de lo posible, una muestra homogénea de especímenes para todos los ensayos proyectados.

La construcción de probetas se realizar de acuerdo con lo descrito en las normativas chilenas que regulan los métodos para ejecutar ensayos de compresión paralela (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), compresión perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), tracción perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), cizalle paralelo (Instituto Nacional de Normalización, 2018b) y flexión estática (Instituto Nacional de Normalización, 2018e), todos a escala reducida.

Después de elaborar un inventario, clasificar, etiquetar, y preparar las probetas, de acuerdo con su origen y destino, se debe proceder con la medición y registro de su la geometría, masa, y contenido de humedad bajo los lineamientos de la normativa NCh968 (Instituto Nacional de Normalización, 1986b). Esta normativa establece que las muestras destinadas a las probetas deben mantenerse en un ambiente con condiciones controladas de temperatura ( $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa ( $65 \pm 2\%$ ) con el objetivo de, y en caso de que se encuentren en estado verde, alcanzar gradualmente un contenido de humedad aproximado al 12%. Estos cuidados son fundamentales para minimizar la frecuencia e intensidad de la aparición de grietas y rajaduras que podrían originarse por el secado. Las mediciones de humedad se deben registrar una vez por semana usando un xilohigrómetro portátil o similar.

Una vez registradas las probetas, se considera un segundo proceso de clasificación, de acuerdo con el grado de daño ocasionado por termitas en las probetas existentes extraídas de piezas rescatadas de edificios históricos. Para esto, se utiliza como referencia el método propuesto por Carmona C. & Durán F. (2005), que clasifica el nivel de deterioro de la madera en cuatro grados: sin ataque (0), bajo ataque (1), medio ataque (2) y alto ataque (3). El objetivo de esta clasificación cualitativa es ponderar el grado de daño observado y su afectación a la probeta en términos del área lesionada o afectada por el daño, de acuerdo con la extensión y profundidad de los agujeros provocados por las termitas. En esta investigación se convinieron magnitudes y definiciones, para poder ajustar las observaciones en las probetas extraídas de edificios patrimoniales que son objeto de estudio.

#### **1.4.4 ETAPA 4: CONFIGURACIÓN Y EJECUCIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL**

La cuarta etapa de la metodología implica la configuración y ejecución del programa experimental para determinar las propiedades mecánicas de la madera estructural, considerando las probetas de madera existente y nueva de las especies bajo estudio. Se proyecta la ejecución de los siguientes ensayos convencionales: compresión paralela (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), compresión perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), tracción perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), cizalle paralelo (Instituto Nacional de Normalización, 2018b) y flexión estática (Instituto Nacional de Normalización, 2018e). Los ensayos deben ser ejecutados en laboratorios capacitados en los procedimientos descritos por las normas chilenas correspondientes. Es fundamental que estos laboratorios cuenten con el equipamiento adecuado, como prensas hidráulicas, máquinas de ensayo universal y dispositivos de medición de precisión para asegurar la exactitud de los resultados.

En paralelo a la realización de los ensayos, se lleva a cabo un registro fotográfico y descriptivo de cada ensayo, y se lleva un registro de anotaciones en las probetas que muestran anomalías como nudos, presencia de termitas o grietas, primordialmente de las probetas confeccionadas con madera extraída de los edificios históricos. Los datos obtenidos de estos ensayos se emplean para crear tablas y gráficos en Excel y MATLAB que representen a la relación resistencia v/s desplazamiento de cada probeta y ensayo.

#### **1.4.5 ETAPA 5: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

La etapa 5 de la metodología considera el despliegue y análisis de los resultados obtenidos en la Etapa 4. Los análisis previstos buscarán, primero, comparar los resultados obtenidos desde los ensayos de la madera nueva versus la madera antigua, sin daños, donde el objetivo es determinar y cuantificar si el paso del tiempo impacta en la variación de las propiedades mecánicas de la madera. Por otro lado, se pretende estudiar cuantitativamente la correlación existente entre el grado de daño de la madera debido al daño generado por ataques de termitas, y la disminución de las propiedades mecánicas, con énfasis en su resistencia y módulo de elasticidad para cada tipo de ensayo.

El objetivo principal de este análisis es correlacionar el grado de daño de las probetas, determinado desde una clasificación visual y cualitativa, con la variabilidad de la resistencia y módulo de elasticidad del material dañado. Asimismo, se pretende comparar los resultados obtenidos con los valores de las propiedades mecánicas de la madera de las mismas especies publicados en la literatura por el Instituto Forestal (INFOR) y otros autores (Catalán et

al., 2020; G. Hernández & Pinilla, 2010; Vásquez et al., 2013), con el objetivo de discutir los resultados y respaldar la validez de los resultados de esta investigación.

## 1.5 ESQUEMA DE LA TESIS

Además del presente capítulo introductorio, esta tesis se divide en seis capítulos siendo su organización la siguiente:

El Capítulo 2, titulado “Estado del arte” aborda la revisión de la literatura, incluyendo el estudio de normativas internacionales y nacionales que definen los métodos para determinar las propiedades mecánicas de la madera a través de ensayos experimentales a escala reducida, además de revisar los estudios y publicaciones existentes que aborden estudios similares a los que se esperan realizar en este trabajo, específicamente, aquellos aplicados al estudio de la madera estructural y existente en edificios históricos.

El Capítulo 3, titulado “Sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso, Chile”, presenta detalles contextuales e histórico-constructivos de las estructuras de entramado de madera existentes en los edificios históricos de Valparaíso, incluyendo descripciones técnica y constructiva del sistema estructural y sus principales componentes.

El Capítulo 4, titulado “Metodología para el levantamiento de datos y caracterización de la madera existente en edificios históricos” detalla la metodología propuesta para abordar las tareas de búsqueda y levantamiento de información desde diferentes casos de estudio. Esto incluye la recolección de muestras de madera existente en los edificios estudiados para la posterior preparación de las probetas y ejecución en los ensayos.

El Capítulo 5, titulado “Determinación de las propiedades mecánicas de la madera extraída de edificios históricos existentes”, incluye la descripción, configuración y matriz de ensayos para llevar a cabo el estudio mecánico de la madera nueva y antigua, recuperada de los casos de estudio. También despliega los resultados obtenidos y su análisis a través de gráficos, tabulaciones y descripciones.

Finalmente, el Capítulo 6, titulado “Conclusiones y consideraciones finales” expone una serie de comentarios finales y conclusiones derivadas de la investigación de acuerdo con los resultados obtenidos. También, se describen las proyecciones en cuanto al trabajo futuro que se desprende de los aprendizajes y resultados de esta investigación.





## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo aborda la construcción del estado del arte, donde, mediante la revisión bibliográfica, se busca establecer el contexto actual del problema de investigación a través de la recopilación y análisis de diversas contribuciones académicas y científicas, como los aportes de Guindos (2019), Record (2018), Ripa et al. (2004), Monjé & Maldonado (2001), entre otros. Al delinear el panorama actual de la disciplina, se buscó reconocer las aportaciones previas e identificar las oportunidades que motivaron la presente investigación.

La estructura de este capítulo se divide en cuatro partes, donde el apartado 2.1 aborda la revisión y descripción de las principales características de la madera estructural, comprendiendo desde la descripción de la estructura interna del material (apartado 2.1.1), las especies (apartado 2.1.2), singularidades y defectos (apartado 2.1.3), clasificaciones (apartado 2.1.4), propiedades mecánicas y físicas (densidad y contenido de humedad) (apartados 2.1.5, 2.1.6 y 2.1.7), y duración de la carga (apartado 0). Posteriormente, en la Sección 2.2, el capítulo aborda el estudio de las patologías de la madera, incluyendo las de origen biótico (termitas y hongos) (apartado 2.2.1), abiótico (apartado 2.2.2) y mecánico (apartado 2.2.3). A continuación, el apartado 2.3 se enfoca en describir detalladamente los métodos y procedimientos que integran los marcos normativos que regulan la ejecución de ensayos destructivos a escala reducida para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera estructural. El apartado aborda una revisión exhaustiva de las normas nacionales e internacionales (apartado 2.3.1), específicamente de los ensayos de compresión paralela (apartado 2.3.2), compresión perpendicular (apartado 2.3.3), tracción perpendicular (apartado 2.3.4), cizalle paralelo (apartado 2.3.5) y flexión estática (apartado 2.3.6). Finalmente, el capítulo integra una revisión de diversos estudios que abordan la caracterización mecánica de la madera existente en edificaciones históricas (apartado 2.4). Finalmente, el apartado 2.5, expone los comentarios finales y conclusiones de la revisión bibliográfica del capítulo.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA ESTRUCTURAL

El término “madera estructural” se refiere a las piezas de madera de sección transversal circular, rectangular o cuadrada, cepilladas o calibradas en sus caras y cantos, que se utilizan como componentes principales de una edificación (vigas, columnas, pilares, etc.), y que se puede identificar por su capacidad mecánica, condición de humedad, durabilidad natural, especie y origen (Wagner, 2009). Estas piezas de madera pueden agruparse según su capacidad para resistir cargas en las categorías comprendidas en la clasificación estructural, cuyo propósito de aplicación será meramente estructural.

Su clasificación implica la ejecución de un proceso de medición de los elementos madereros a través del cual se define el valor mínimo de resistencia para piezas de una determinada calidad, independientemente del origen de la muestra.

Al ser la madera uno de los materiales más antiguos en la historia de la construcción, su usabilidad y la forma como es manipulado ha ido experimentando una serie de cambios con el transcurso del tiempo. De acuerdo con Monjé & Maldonado, (2001), la madera se ha sometido a tres esfuerzos básicos a lo largo de los años (compresión, tracción y flexión), lo que ha permitido el uso de estructuras reticuladas a base de elementos lineales ocupando su forma original. De esa manera, el material de madera se puede encontrar hoy en día en pilares y vigas, forjados unidireccionales y cerchas.

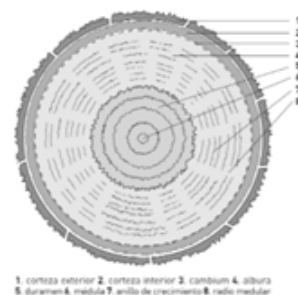
En relación con sus propiedades físicas, la razón entre su resistencia y densidad es uno de sus atributos más característicos, ya que la madera alcanza uno de los máximos valores entre los materiales conocido por el hombre. J.E. Gordon en "The new science of strong materials" (Gordon & Ball, 2006) menciona que la resistencia de la madera a tracción es de 4 a 5 veces mayor a la del acero común (López et al., 2004a). Por ello, la madera sigue siendo un material muy utilizado en la construcción, incidiendo, por su uso, en una tala indiscriminada de árboles jóvenes, de madera más propensa a ser blanda y menos resistente a los ataques bióticos y abióticos, conllevando a una escasez de esta materia prima.

Los estudios propedéuticos para caracterizar la madera estructural en la etapa de construcción son relevantes e implican comprender las características físicas, singularidades y defectos del material que pueden afectar positiva o negativamente las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de la madera. Algunos aspectos relevantes en este campo son el tipo de especie, su estructura interna, las singularidades de la madera que involucra los defectos del tronco, la inclinación de las fibras, las fisuras y deformaciones, los ataques biológicos, y las propiedades físicas, como la densidad y la humedad.

Actualmente, y a modo de observación, los procesos normados que guían los estudios hacia la caracterización de la madera estructural se enfocan exclusivamente en la madera nueva, aserrada o dimensionada, evidenciándose poco interés en estudios que ajusten estos procedimientos al análisis de piezas extraídas de edificios patrimoniales, quedando un espacio para la investigación en dichas estructuras históricas considerando la posibilidad de desplegar mejores estrategias de conservación, restauración e intervención sostenibles en el tiempo, a través del análisis experimental.

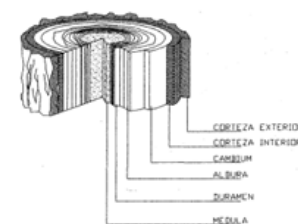
### 2.1.1 ESTRUCTURA INTERNA DE LA MADERA

La estructura interna de la madera está compuesta por células alargadas, traqueidas y radios leñosos (ver Figura 3) cuyas paredes celulares contienen celulosa en 40% a 50%, hemicelulosa en 20% a 30% y lignina en 20% a 30%. Las principales características de la madera tales como la longitud de las fibras, la densidad de la madera, la orientación de las microfibrillas y su composición química, pueden afectar y variar significativamente las propiedades mecánicas de la madera. Asimismo, el comportamiento de la madera puede variar dependiendo de su densidad, característica que se vincula directamente con el espesor de la pared celular del material. Por ejemplo, el incremento del espesor de la pared celular de la madera se puede traducir en un incremento de la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras entre un 70% y un 83% (Kasal, 2004). En la Figura 4 se puede observar cómo influ-



1. corteza exterior 2. corteza interior 3. cambium 4. albura  
5. duramen & medula 7. anillo de crecimiento 8. radio medular

(a)



(b)

**Figura 3**  
Esquema de la sección de una estructura leñosa: (a) corte y (b) diagrama tridimensional (Mojó & Maldonado, 2001).

ye el peso específico en las propiedades mecánicas de diferentes especies de madera sometidas a distintos ensayos, mostrando las diferencias existentes entre las maderas duras y las maderas blandas, y una relación entre las muestras aproximadamente lineal, demostrando que las maderas duras presentan capacidades superiores a las de las maderas blandas.

### 2.1.2 ESPECIES

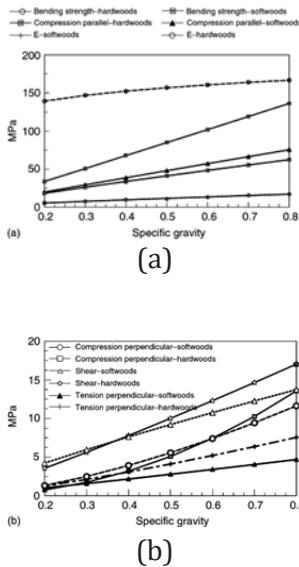
La madera se puede obtener de dos categorías de árboles: las angiospermas y las gimnospermas (ver Figura 5). Las angiospermas (ver Figura 5a) tienen una estructura interna mucho más compleja y pertenecen a especies frondosas o latifoliadas. Estos árboles tienen hojas caducas (en su mayoría), flores y frutos. La diferencia fundamental en su estructura celular radica en la ausencia o presencia de unas células denominadas vasos, que están especializadas en el transporte de savia. Las maderas extraídas de este tipo de árboles son duras y se caracterizan por presentar una composición leñosa más compleja en comparación con las maderas coníferas. Estas maderas suelen ser poco porosas, lo que las hace difíciles de impregnar; además, contienen extractos como glúcidos y algunas son especialmente ricas en taninos, lo que puede dar lugar a manchas grises o negras en el acabado si no se tratan adecuadamente (Broto, 2005; Guindos, 2019). Además de las normas internacionales (ASTM D143, 2000; Internacional Organization for Standardization, 2017; Normalización Española, 2013), la norma chilena NCh1970/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2017c) considera la clasificación de las especies madereras según su resistencia a partir de una clasificación visual para especies latifoliadas.

El segundo grupo de maderas pertenece a las plantas gimnospermas (ver Figura 5b). En este grupo se encuentran las especies coníferas, árboles y arbustos cuyas hojas siempre son verdes y presentan una forma de aguja o escama, con una estructura mucho más primitiva y simple principalmente compuesta por células traqueidas. (Broto, 2005; Guindos, 2019). Las maderas extraídas de este tipo de árboles son blandas, tienden a no tener poros en la superficie, pero poseen canales para expulsar resinas. Este tipo de maderas es ampliamente utilizado en los sectores de la construcción y la carpintería, destacando la madera de pino debido a su gran abundancia, fácil manipulación y adquisición (compra y venta). La norma chilena NCh1970/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017e), considera la clasificación de las especies por agrupamiento de las maderas según su resistencia de acuerdo con una categorización visual para especies coníferas.

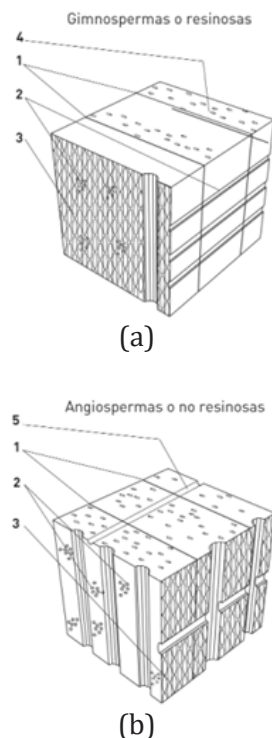
### 2.1.3 SINGULARIDADES Y DEFECTOS

Las singularidades y defectos de la madera pueden ser relevantes y determinantes en las propiedades mecánicas del material. Este tipo de defectos pueden ser ocasionados por el crecimiento del árbol, o pueden presentarse por el cultivo y producción de la madera y por su exposición al medioambiente. Debido a la presencia de defectos o particularidades, la madera es considerada un material no homogéneo (Arriaga et al., 2023; Kasal, 2004; Martín et al., 2002; Montero García-Andrade, 2013).

Una de las propiedades de la madera que la vuelve un material difícil de caracterizar es su anisotropía, que hace que las propiedades mecánicas varíen significativamente en función de la dirección de la carga con respecto a la dirección de su fibra. La madera estructural aserrada se asume como material ortótropo (propiedades mecánicas o térmicas únicas e independientes

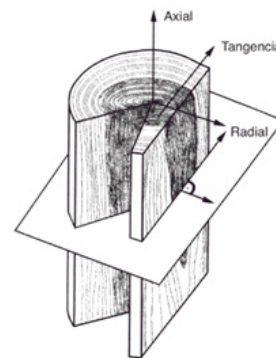


**Figura 4**  
Efectos del peso específico de la madera y variación de las propiedades mecánicas: (a) resistencia a la flexión, compresión paralela para maderas duras y blandas, y módulo de elasticidad en flexión de maderas duras; (b) compresión perpendicular, cizalle y tracción perpendicular en maderas duras y blandas (Kasal, 2004).



**Figura 5**  
Esquemas de la composición de maderas (a) gimnospermas y (b) angiospermas (Broto, 2005).

en tres dimensiones perpendiculares entre sí), y puede variar según el eje sobre el que se aplique el esfuerzo (Arriaga et al., 2023). Estas direcciones en las que puede generarse la carga respecto a la fibra pueden ser de tres tipos: axiales (paralelo a las fibras y ejes del árbol), donde la madera presenta mejores propiedades; radial (perpendicular a los anillos de crecimiento), al cortar el eje del árbol en el plano transversal desde el interior hacia el exterior del tronco; y tangencial (tangente a los anillos de crecimiento), esto es, perpendicular al eje del árbol (Vignote & Martínez, 2006) (ver Figura 6).



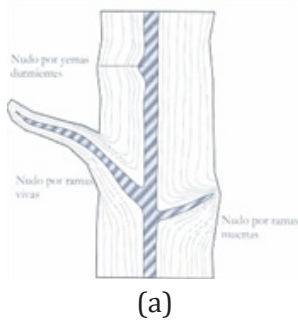
**Figura 6**  
Direcciones principales de la madera (Vignote & Martínez, 2006).

Las propiedades de la madera son muy variables debido a su crecimiento natural, lo que puede provocar cambios significativos incluso en piezas de una sola especie, o en piezas existentes en condición deteriorada al querer estimar su resistencia y rigidez (Smith, 2021). Esta variabilidad se debe a las características de crecimiento y a los posibles defectos de clasificación. La Tabla 1 describe las características típicas del crecimiento de la madera y su efecto en la resistencia de acuerdo con la investigación desarrollada por Smith (2021), incluyendo aspectos como fisuras, nudos, brea, entre otros, donde se especifica el impacto que cada uno tiene sobre la resistencia del material. Por ejemplo, la presencia de nudos reduce la resistencia a la tracción y a la flexión, mientras que la deformación puede provocar concentraciones de tensión.

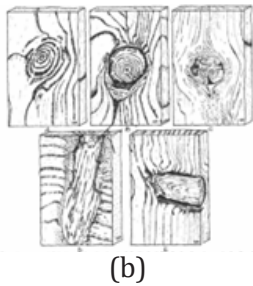
**Tabla 1** Características típicas del crecimiento de la madera y su efecto en la resistencia (Smith, 2021).

Características	Descripción	Efecto de la fuerza
Fisura	Separación de la madera a través de los anillos de crecimiento o dentro de ellos	Reducción menor de la resistencia al corte longitudinal.
Nudos	Parte encapsulada de la rama, la cual puede estar suelta o tensa.	Reducción de la resistencia a la tracción y a la flexión.
Brea (resina)	Acumulación de resina en la madera.	Perdida menor de resistencia debido a la reducción de la sección transversal.
Grietas	Separación longitudinal de las fibras a lo largo de la pieza.	Reducción menor de la resistencia al corte longitudinal.
Inclinación del grano	Ángulo entre las fibras de madera y eje neutro de la pieza.	Reducción de la resistencia a la tracción y al corte.
Divisiones (splits)	Separación a través de una pieza de madera en la superficie opuesta o adyacente.	Reducción de la resistencia longitudinal y al corte.
Manchas	Variación del color natural de la madera.	Sin efecto sobre la resistencia.
Madera deteriorada	Deterioro debido a la pudrición.	Pérdida menor de la resistencia debido a la reducción de la sección transversal.
Madera faltante	Madera faltante en los bordes de la pieza.	Pérdida menor de la resistencia debido a la reducción de la sección transversal.
Deformación	Desviación de la superficie plana.	Puede provocar concentraciones de tensión.

Según Guindos (2019), los nudos son un defecto importante a considerar cuando se da uso estructural a la madera. Esto se debe a que pueden variar negativamente las propiedades mecánicas del material, afectando principalmente su resistencia a la tracción, induciendo fallas de tipo frágil en la madera. Los nudos son el defecto natural y el más común en la madera dado que se originan como resultado del desprendimiento de las ramas del tronco principal (Chan et al., 2002; Guindos, 2019; Rescalvo et al., 2018). La presencia de nudos también influye en la resistencia a la flexión de las piezas en áreas sujetas a tracción (Smith, 2021). El artículo de Rescalvo et al. (2018) evaluó



(a)



(b)

**Figura 7**

Nudos en la madera: (a) formaciones en el tronco (Guindos, 2019) y (b) en la madera aserrada (Chan et al., 2002).

el comportamiento mecánico de vigas de madera antigua (*pinus sylvestris*) reforzadas con polímeros de fibra de carbono (CFRP). Las vigas reforzadas con CFRP mostraron mejoras significativas en la capacidad de carga. Sin embargo, con respecto a la variabilidad en la calidad de la madera subraya que se debe considerar cuidadosamente los defectos, como los nudos. Estos defectos pueden ser contabilizados analíticamente mediante un factor que reduce el área afectiva en la tracción, lo que permite una predicción más precisa de la resistencia del material. La Figura 7 muestra la interrupción y desviación de las fibras que genera la presencia de un nudo, en el tronco (Figura 7a) y en la madera aserrada (Figura 7b).

Es importante diferenciar que existen dos tipos de nudos: los sanos y los muertos. Los primeros corresponden a ramas vivas que no presentan rasgos de deterioro ni pudriciones, mientras que los segundos pueden suponerse como un agregado de madera sin continuidad con el material, y por ello pueden resultar más desfavorables en la reducción de resistencia. Es muy importante considerar esta clasificación en el uso estructural de la madera con nudos, por el efecto negativo de las propiedades mecánicas del material. No obstante, cabe señalar que muchas veces las normativas no distinguen entre nudos sanos y muertos ante el proceso de clasificación por resistencia (Guindos, 2019).

Otra singularidad de la madera que puede afectar significativamente su comportamiento estructural y la variación de las propiedades mecánicas de la madera es la inclinación de las fibras, condición que se vincula con la alineación de las fibras en relación con el eje longitudinal de la pieza. Guindos (2019) explica al respecto que las mayores resistencias y rigideces de las piezas se logran cuando las fibras se alinean con el eje longitudinal, y que la madera aserrada de árboles con crecimiento de las células con forma de espiral tiende a afectar negativamente. El autor también señala que las desviaciones locales de la orientación de las fibras, especialmente alrededor de los nudos, pueden causar defectos desfavorables.

Las fisuras y deformaciones que se encuentran en la constitución interna de la madera y en los procesos de producción y exposición del medioambiente son defectos que se originan debido a la contracción de la madera en sus tres ejes o direcciones principales (Guindos, 2019). Los efectos principales de la contracción es la pérdida de agua impregnada en las paredes celulares de la madera por debajo del punto de saturación de las fibras, contracción que suele ser mayor en la dirección tangencial que en la radial. Este tipo de fenómenos produce generalmente deformaciones no deseadas ocasionando rajaduras y torceduras durante el proceso de secado (ver Figura 8). Aunque este efecto puede variar para las diferentes especies. Según Guindos (2019), las deformaciones no provocan variaciones en las propiedades mecánicas, pero sí excentricidades que pueden exceder los límites permitidos, pudiendo las fisuras afectar a las piezas sometidas a flexión y compresión que a las que son sometidas a tracción paralelas a las fibras.

**Figura 8**

Deformaciones típicas tras el secado de la madera (Guindos, 2019).

Las maderas de reacción se pueden definir como aquellas que se forman como reacción del árbol ante los esfuerzos anormales que se presentan cuando el árbol crece inclinado, y son consideradas como maderas defectuosas. Algunos autores (Arriaga et al., 2023; Chan et al., 2002; Guindos, 2019) también relacionan este fenómeno con los movimientos del crecimiento del fuste y las ramas como sucede en el caso de las especies latifoliadas o frondosas se genera la madera de tensión o tracción, siendo la primera de ellas la de mayor importancia para el uso estructural del material (ver Figura 9a). En las coníferas se genera la madera de compresión (ver Figura 9b). La madera de compresión presenta anillos de crecimiento con un mayor ancho de leño

tardío, lo que se traduce en una mayor densidad de la madera y una mayor inclinación de las microfibrillas en la capa media de la pared secundaria de la madera, lo cual da lugar a un comportamiento similar al de la madera juvenil que se encuentra cercana a la médula (Chan et al., 2002; Guindos, 2019).

Los ataques biológicos también se consideran como singularidades, pudiendo llegar a afectar el comportamiento estructural de la madera, lo cual se relaciona principalmente con el ataque de hongos e insectos xilófagos (por ejemplo, las termitas) que degradan la madera. Si bien algunos ataques de este tipo de agentes se producen en el árbol, la mayoría de ellos ocurren cuando las estructuras están en servicio, relacionados directamente con el grado de exposición al medioambiente, la durabilidad de la madera natural y su nivel de protección. Cuando la madera aserrada viene atacada desde el árbol, esta se encuentra limitada en los métodos de clasificación por resistencia (Guindos, 2019). En la normativa chilena se clasifican las maderas según su resistencia, dividiendo las especies en familias para su posterior agrupación. En este contexto, existen dos partes de la norma de clasificación visual: la primera es la NCh1970/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2017d), que se enfoca en la clasificación de especies latifoliadas, y la segunda es la NCh1970/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017f), que se ocupa de la clasificación de especies coníferas, cada parte establece criterios específicos que se adaptan mejor a la familia de árboles a la que pertenecen. La norma chilena de agrupación de especies, la NCh1989 (Instituto Nacional de Normalización, 2017b) también incluye este tipo de clasificación.

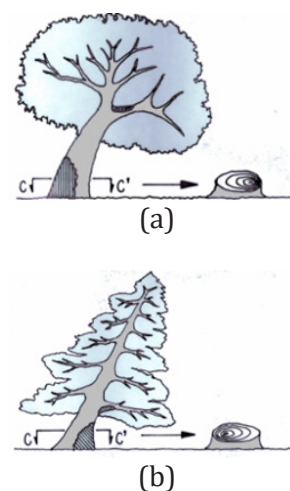
Otras singularidades que pueden afectar el comportamiento de la madera son las imperfecciones o los daños producidos durante el aserrado de las piezas que pueden causar gemas o aristas faltantes. De acuerdo con Guindos(2019) este tipo de defectos no afectan la respuesta mecánica del material, pero sí pueden implicar una reducción del área resistente de las piezas (sección transversal), que a la larga sí afecta su capacidad estructural.

Por otro lado, pueden darse singularidades como las bolsas de resina, que se forman cuando las cavidades alargadas llenas de resina entre los anillos anuales del árbol, principalmente en las coníferas y en especial en el pino, llegan a contener grandes porciones de esta sustancia. Este tipo de resina puede dificultar diversos procesos de la industria de la madera como el aserrado y también puede disminuir la resistencia mecánica, como el área sujeta a esfuerzos, en corte paralelo y tensión perpendicular a las fibras. Si la resina se filtra desde estas bolsas puede llegar a dañar la superficie de las piezas, lo que complica el acabado y la aplicación de adhesivos, sin embargo, este problema puede evitarse secando la madera en una estufa para que la resina se cristalice (Chan et al., 2002) (ver Figura 10).

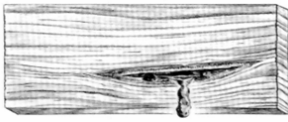
#### 2.1.4 CLASIFICACIÓN DE LA MADERA

Existen diversas alternativas para clasificar la madera estructural según su capacidad resistente. La selección de uno u otro método dependerá de los recursos disponibles, los alcances de la investigación y la precisión que se espera obtener en los resultados (Vásquez et al., 2019). Dos de los métodos más reconocidos a nivel mundial son la clasificación mecánica y la clasificación visual.

La clasificación mecánica consiste en la evaluación a través de diferentes procedimientos que analizan la capacidad de cada pieza de madera para asociar un grado de calidad estructural. Para clasificar las piezas, se estudia su capacidad de resistir cargas aplicadas, siendo algunas de las categorías más



**Figura 9**  
Madera de reacción: sección transversal de (a) madera de tensión en latifoliadas y (b) madera de compresión en coníferas (Chan et al., 2002).



**Figura 10**  
Bolsas de resina (Chan et al., 2002).

comunes: la resistencia a la compresión, a la flexión, al corte y a la tracción. Para clasificar las piezas por su rigidez se considera la capacidad de la madera para resistir deformaciones bajo cargas aplicadas, comparando el módulo de elasticidad (MOE), el coeficiente de Poisson y la rigidez torsional. Para obtener estos datos, se suelen realizar ensayos experimentales normados en la documentación legal emitida nacional e internacionalmente (Koca, 2019).

En Chile, la selección, obtención y acondicionamiento de las muestras y probetas para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas se rige por la norma NCh968 (Instituto Nacional de Normalización, 1986b). Por otro lado, la norma NCh969 (Instituto Nacional de Normalización, 2018a) ofrece lineamientos para determinar las propiedades mecánicas y las condiciones generales para los ensayos. Las directrices para ejecutar los ensayos a escala reducida para la caracterización mecánicas del material se detallan en diferentes normas, de acuerdo con el tipo de ensayo a realizar: la norma de compresión paralela NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), la norma de compresión perpendicular NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), la norma de tracción perpendicular NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), la norma de cizalle paralelo NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b) y la norma de flexión estática NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e),

Existen otros métodos utilizados para la clasificación mecánica de la madera, como los métodos de vibración, ultrasonido y rayos X, que se basan en la evaluación de las propiedades mecánicas y la calidad estructural de la madera. Cabe mencionar, que cada país ha definido diferentes estándares de clasificación para las maderas. En Chile destacan la NCh1970/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2017c), la cual determina las características mínimas que deben cumplir las maderas de especies latifoliadas destinadas a un uso estructural mediante una la clasificación visual, cualquiera que sea su contenido de humedad; y la NCh1970/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017e), la cual establece los requisitos mínimos que deben cumplir las maderas de especies coníferas de uso estructural, mediante un procedimiento visual, estableciendo que sea madera seca (humedad  $\leq 20\%$ ).

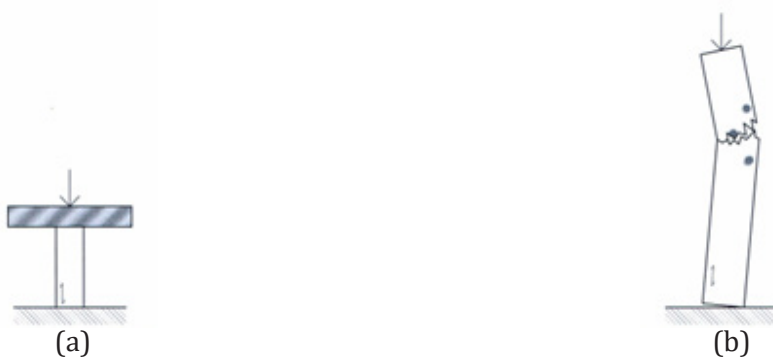
La clasificación visual de la madera se realiza mediante la inspección visual de las piezas, evaluando, a través de la apariencia del material, diferentes características que pueden llegar a reducir la resistencia de la madera como el tamaño de los nudos, las grietas, las deformaciones, el ataque de xilófagos (termitas) y la presencia de hongos, entre otros. Para llevar a cabo la clasificación en esta línea se cuenta con una variedad de documentos, libros, manuales, entre otras publicaciones elaborados por diferentes autores (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Jorquera, 2022; Lasheras, 2009; López et al., 2004b; Monjé & Maldonado, 2001; Vásquez et al., 2019), los cuales pueden facilitar la clasificación y la determinación del proceso a seguir. Esta clasificación también se puede utilizar para identificar los defectos y el tipo de patología que presenta la madera afectando su calidad y resistencia estructural.

### 2.1.5 PROPIEDADES MECÁNICAS

Uno de los métodos más utilizados para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la madera son los ensayos experimentales. La caracterización mecánica de la madera se refiere al estudio y análisis de las diferentes propiedades del material, relacionadas con su comportamiento estructural. Las propiedades mínimas imprescindibles para determinar a través de ensayos de madera estructural varían en cada país, y entre las más importantes se destacan la resistencia a la compresión paralela, compresión perpendicular,

tracción perpendicular, cizalle paralelo y flexión (Record, 2018). En Chile, existen normas publicadas por el Instituto Nacional de Normalización que establecen los métodos y procedimientos para ejecutar dichos ensayos. Todas las normas se basan en lineamientos internacionales (ASTM D143, 2000; Estándar Australiano, 2010c; Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007d, 2007e, 2007c, 2007b, 2007a) asegurando la estandarización de los procesos.

Generalmente, los ensayos que se ejecutan para determinar las propiedades mecánicas de la madera se realizan en dos escalas, utilizando probetas de pequeñas dimensiones (ver Figura 11a) y probetas estructurales (ver Figura 11b) (Guindos, 2019). En los ensayos de escala reducida las probetas deben estar libres de defectos, mientras que en las de tamaño estructural, sí se considera la influencia de las singularidades propias de la madera (Guindos 2019). A continuación, se describen cada uno de los ensayos considerando únicamente los que utilizan probetas a escala reducida, que son los que se implementarán en esta investigación.



**Figura 11**  
Ensayos de compresión paralela en (a) probetas de madera a escala y (b) piezas de tamaño estructural (Guindo 2019).

La resistencia a la compresión se obtiene a través de ensayos donde se aplica una compresión axial simple sobre probetas libres de defectos (Guindos, 2019). Esta carga se puede aplicar en dirección paralela (ver Figura 12a) o perpendicular a las fibras, en la cara radial (ver Figura 12b). De este tipo de ensayos se puede determinar el Módulo de Ruptura (MOR), la tensión límite de proporcionalidad y el módulo de elasticidad (MOE).



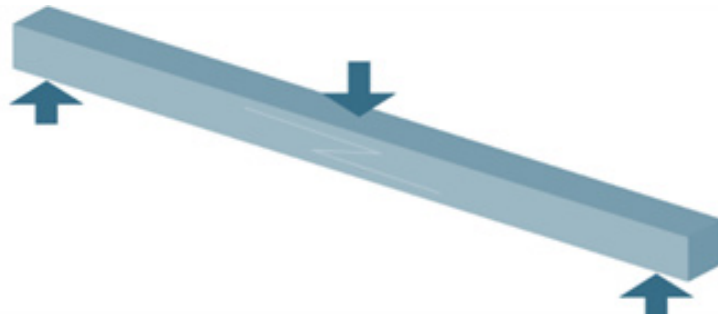
**Figura 12**  
Ensayos de compresión en (a) paralela a las fibras y; (b) perpendicular a las fibras.

La resistencia a tracción se determina aplicando cargas opuestas sobre la probeta en dirección paralela a las fibras ( Figura 13a) y aplicando cargas perpendiculares tangenciales o perpendiculares radiales a la fibra, como se muestra en la Figura 13b.



**Figura 13**  
Ensayos de tracción (a) paralela a las fibras y (b) perpendicular a las fibras.

La resistencia a flexión estática se determina de forma experimental aplicando una carga axial puntual en el centro de la cara superior de una viga. La prueba consiste en un ensayo a flexión común de 3 puntos, realizado en probetas a escala reducida libres de defectos, tal como se muestra en la Figura 14. En este tipo de ensayos se mide la deflexión máxima en el punto medio de la viga hasta la rotura. Posteriormente, se determina el momento (tensión) de ruptura y el módulo de elasticidad a flexión (MOE).



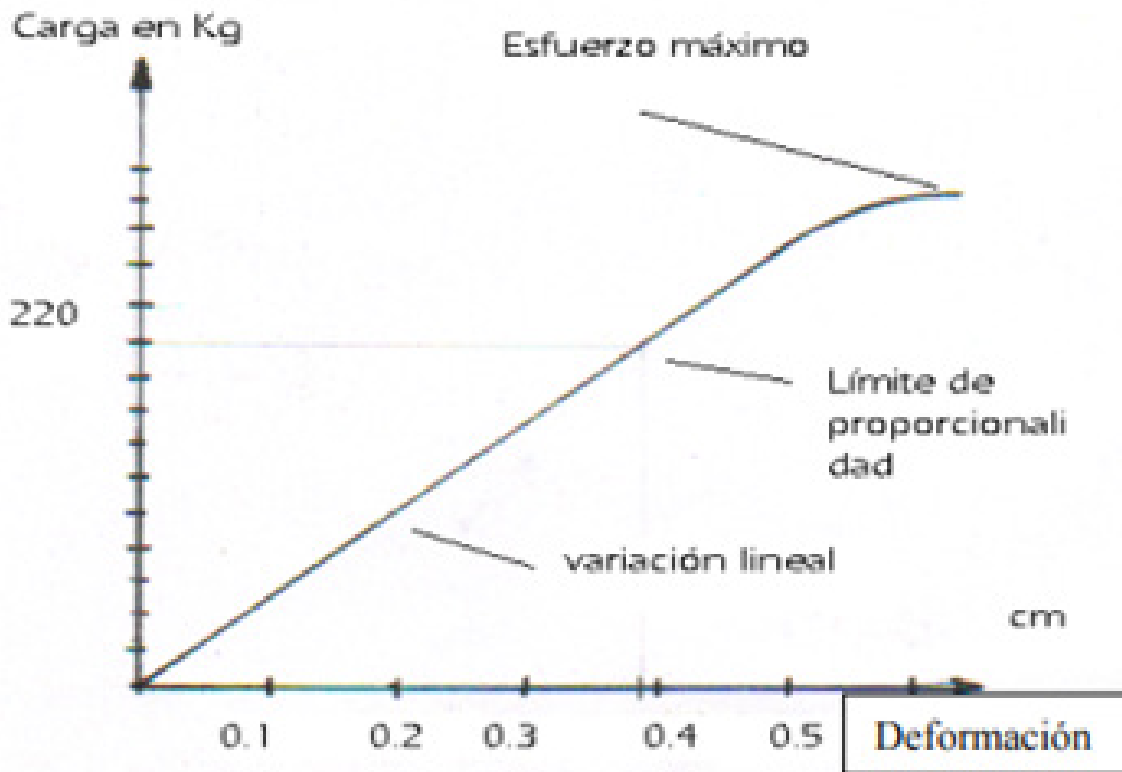
**Figura 14**  
Efectos de la flexión estática por una carga puntual.

El módulo de elasticidad o Young (MOE) se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria de la madera. Este valor varía según la dirección de la carga aplicada, siendo mayor en tracción, donde presenta un rango variable que oscila entre los 1200 MPa y 7000 MPa. Sin embargo, en compresión este valor puede disminuir hasta 30 veces. Cabe mencionar que el efecto del paso del tiempo en la madera puede variar según la especie. Por ejemplo, en un análisis de especímenes a escala y claros de keyaki (*Zelkova serrata*, makino) e hinoki (*Chamaecyparis obtusa*, Siebold y Zucc), realizado por Kohara (1955), se observó una reducción del MOE de aproximadamente el 30 % en el caso de la primera especie, en contraste, se registró un aumento del MOE para la segunda especie durante los primeros 300 años (Cavalli et al., 2016). Por otro lado, los autores Arriaga et al. (2023) plantearon que existen relaciones generales aceptadas por la comunidad para comprender las diferencias de las rigideces. Un ejemplo de ello es que en las especies latifoliadas la rigidez longitudinal es 13 veces mayor que su dirección tangencial a las fibras, mientras que para las especies coníferas el módulo elástico en dirección tangencial es menor que en la dirección longitudinal a las fibras (20 veces mayor).

En relación con la resistencia, el estudio realizado por Cavalli et al. (2016) da cuenta de la complejidad que implica comparar las propiedades mecánicas de la madera antigua y la madera nueva, debido a la incertidumbre que existe sobre las propiedades y el efecto de diferentes factores como la duración de carga y el estado de conservación. En su estudio Cavalli et al. (2016) presenta y analiza los resultados de varias investigaciones que comparaban las propiedades mecánicas de elementos de madera con diferentes niveles de antigüedad. Concluye que, aunque la mayoría de los trabajos coinciden en que la resistencia a la flexión (MOR) y la rigidez (MOE) permanecen sin cambios con el tiempo, o disminuyen de una manera poco significativa, los resultados

no siempre son concordantes debido a las diferencias en los enfoques de investigaciones y a las dificultades para realizar ensayos en la madera antigua.

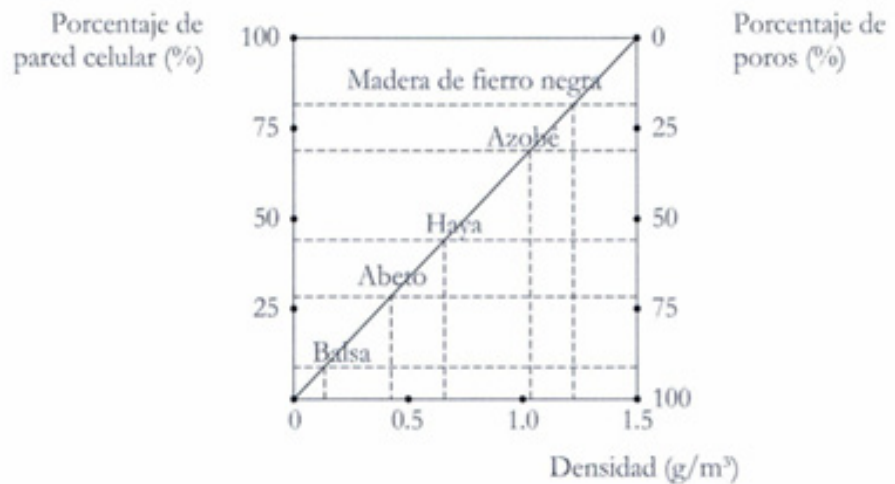
Es preciso destacar el concepto de límite elástico en la madera dentro de la estructura interna, que se define como la relación entre el esfuerzo y la unidad de superficie en la cual la deformación aumenta más rápido que la carga que se aplica (Facultad de ingeniería UNAM, 2018). Este esfuerzo necesario para llevar al material al límite elástico, que también se conoce como límite de proporcionalidad, y que representa la carga máxima que el material puede soportar sin experimentar deformaciones permanentes. La Figura 15 muestra el gráfico carga versus deformación para la madera.



**Figura 15**  
Gráfico de carga v/s deformación para especies de madera (Facultad de ingeniería UNAM, 2018).

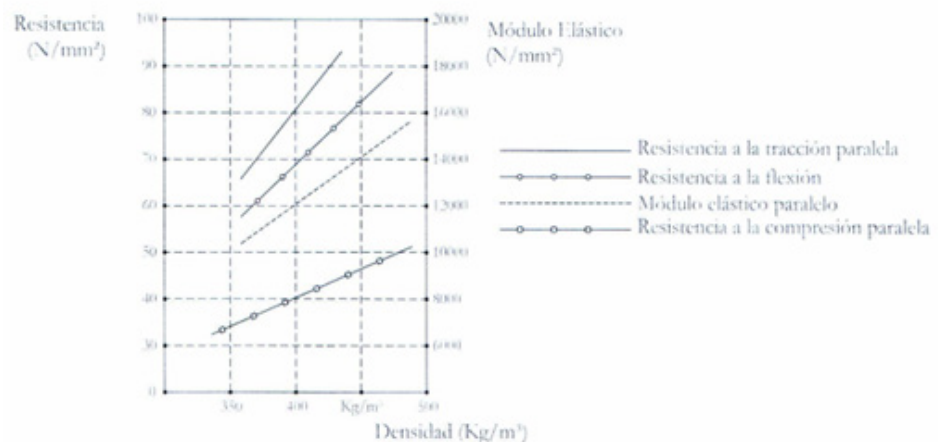
### 2.1.6 DENSIDAD

La densidad es una propiedad de la materia definida como el cociente entre la masa y el correspondiente volumen aparente, que, en el caso específico de la madera, fluctúa entre  $110 \text{ kg/m}^3$  y  $1300 \text{ kg/m}^3$  por la influencia de la porosidad. Las especies de elevada porosidad, como las maderas de rápido crecimiento, se acercan al primer valor ( $110 \text{ kg/m}^3$ ); mientras que las maderas tropicales o de mayor dureza presentan una densidad más cercana al segundo valor ( $1300 \text{ kg/m}^3$ ) (ver Figura 16). La densidad aparente de la madera que configura las paredes celulares de la madera puede alcanzar un valor aproximado de  $1500 \text{ kg/m}^3$ , excluyendo los vacíos (Guindos, 2019). De acuerdo con Guindos (2019), la densidad está correlacionada positivamente con la mayoría de las propiedades mecánicas de la madera, así como con la mayoría de los materiales, y es un parámetro indicativo de la resistencia y la rigidez del material.



**Figura 16**  
Efecto del porcentaje de poros y pared celular en la densidad de la madera (Guindos, 2019).

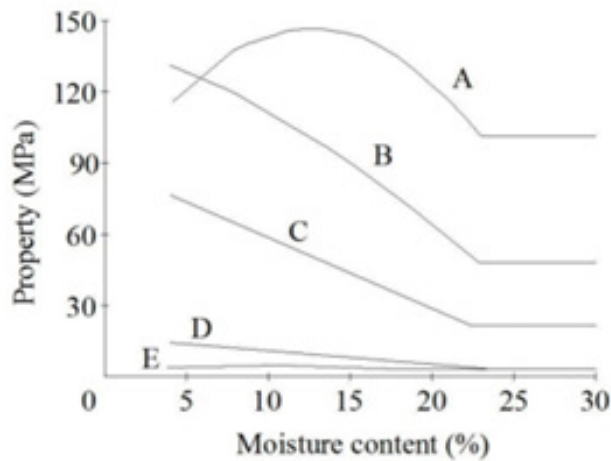
La Figura 17 demuestra la importancia de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) de la madera como un factor determinante de sus propiedades mecánicas ( $\text{MPa} = \text{N/mm}^2$ ), proporcionando una guía visual y cuantitativa para entender como la densidad influye en la resistencia y rigidez de la madera. En Chile, la medición de la densidad de la madera se calcula según los métodos descritos en la norma NCh 176/2 (Instituto Nacional de Normalización, 1986a), que establece la densidad nominal, la densidad básica (relación de masa anhidra y volumen verde) y la densidad de referencia. Esta última se divide en dos: la densidad normal que es utilizada en condiciones climáticas normales, y la densidad anhidra que es aplicable a la madera secada en horno.



**Figura 17**  
Influencia de la densidad en algunas de las propiedades mecánicas más importantes en la madera (Guindos, 2019).

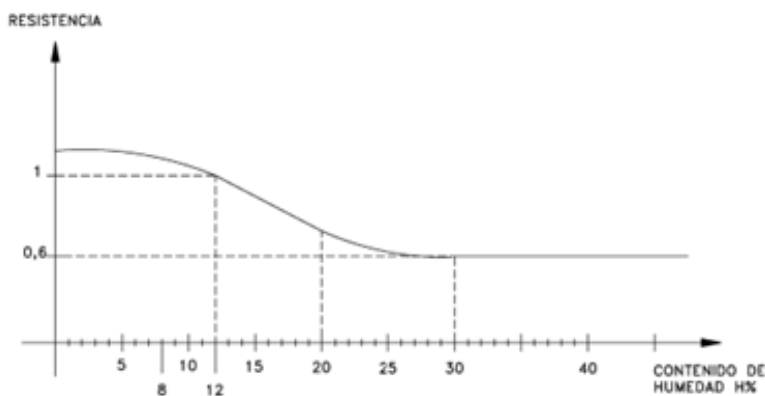
### 2.1.7 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad en la madera hace referencia a la cantidad de agua presente en el material, removible físicamente, y a la masa de la madera seca (anhidra) que la contiene, expresada en porcentaje. Numéricamente se expresa como el cociente entre estos dos valores (Guindos 2019). La presencia de agua en la madera se manifiesta ocupando los espacios celulares e intercelulares, pudiendo en ambos casos eliminarse por medios físicos. La Figura 16 muestra el comportamiento típico de las propiedades resistentes de la madera a medida que aumenta el contenido de humedad en términos porcentuales. Además, se puede observar en el gráfico que las resistencias están segregadas de acuerdo con la dirección de la fuerza en relación con la orientación de las fibras (ver Figura 18).



**Figura 18**  
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 (Arriaga et al., 2023).

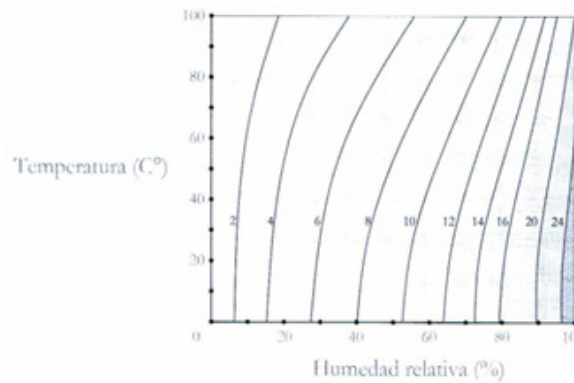
La Figura 19 muestra la influencia de la humedad de la madera en los valores de resistencia mecánica. Aunque la influencia de la humedad varía con el esfuerzo y no es lineal, se puede indicar que un aumento de 1 % en el porcentaje de humedad genera una disminución de la resistencia entre el 1.5 y el 2%. También se puede apreciar que la resistencia al 12% de humedad es 1, al 20% es aproximadamente 0.7 y al 0% es 1.15 (Vignote & Martínez, 2006, p. 125). Lo anterior, dicho en otras palabras, significa que la humedad en la madera tiene un impacto significativo en la variación de los valores de la resistencia.



**Figura 19**  
Gráfico de variación de la resistencia con respecto al contenido de humedad (Vignote & Martínez, 2006).

En la actualidad existen varios métodos para medir el contenido de humedad de la madera. Uno de ellos es el método de secado en estufa descrito en la norma chilena NCh176/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2019), el cual es aplicable a maderas con cualquier nivel de humedad y así determinar el contenido de humedad en lotes de piezas de madera. Este contenido de humedad se determina mediante la pérdida de masa de la muestra al secarse hasta alcanzar una masa constante. El punto de saturación de las fibras (PSF), que puede variar entre el 28% y el 32% según la especie de madera, depende, además, de la temperatura y humedad relativa del ambiente (Guindos, 2019).

La Figura 20 muestra la humedad de equilibrio interno (HE) en que se encuentra la madera a diferentes temperaturas y niveles de humedad relativa ambiental, condición debido a la cual deriva el punto de saturación de las fibras (PSF), dado que a partir de este punto el agua es extraída de las paredes celulares. Esto, a su vez, modifica las paredes celulares y provoca variaciones en las dimensiones y en el comportamiento resistente y elástico de las piezas de madera. En consecuencia, a medida que el contenido de humedad desciende por debajo de este punto, se produce una reducción en las dimensiones y un aumento general en las propiedades de resistencia y rigidez de la madera (Guindos, 2019).



**Figura 20**

Gráfico de la HE típica de la madera según temperatura y HR (Guindos, 2019).

La normativa NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014) establece el valor de las tensiones admisibles estandarizadas considerando un contenido de humedad del 12%. Además, esta norma dispone de un factor de modificación por humedad que altera las propiedades resistentes del material si la humedad de equilibrio considerada en el lugar del diseño es desigual. Esto se debe tener en cuenta para asegurar que las probetas sean representativas de la pieza de madera y así poder obtener resultados precisos en la determinación del contenido de humedad del material. Luego se debe enfriar la probeta hasta que alcance la temperatura ambiente en un desecador y se debe pesar nuevamente, de esa manera, finalmente, se obtiene el contenido de humedad  $H$ ; expresado en porcentaje con una aproximación de 0.1%, utilizando la Ecuación (1):

$$H = \frac{(m1 - m2)}{m2} * 100 \quad (1)$$



(a)



(b)

**Figura 21**

Instrumentos de medición (a) xilohigrómetros de conductividad (LME-IN-FOR) y (b) xilohigrómetros dieléctrico.

donde  $m1$  es igual a la masa de la probeta antes del secado en g, y  $m2$  es igual a la masa de la probeta después del secado, en g.

Una forma práctica y rápida de medir y controlar el contenido de humedad en la madera, y en productos manufacturados a base de madera, es mediante el uso de xilohigrómetros portátiles (Figura 21). Estos instrumentos permiten medir los parámetros eléctricos y compararlos con una curva de calibración para obtener una medición indirecta del contenido de humedad. Tanto el uso como la calibración de este equipo están regulados por la norma chilena NCh2827 (Instituto Nacional de Normalización, 2020) de Calibración y Uso de Xilohigrómetros Portátiles, la cual señala que en el país se pueden utilizar dos tipos de xilohigrómetros portátiles: xilohigrómetros de conductividad (ver Figura 21a) y xilohigrómetros dieléctricos (ver Figura 21b). Ambos tipos se deben calibrar con respecto al contenido de humedad determinado a través del método directo que indica la norma NCh176/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2019).

Los xilohigrómetros dieléctricos se caracterizan por que su modo de respuesta es la admitancia o capacidad. Estos equipos poseen electrodos de contacto de superficie y escalas de lectura graduadas en unidades arbitrarias. Estos instrumentos responden principalmente a la capacitancia (constante dieléctrica) del material que se está midiendo. Cabe mencionar que las mediciones de los xilohigrómetros dieléctricos son significativamente afectadas por la densidad relativa de la especie, y el rango de contenido de humedad que miden va desde 0% hasta el punto de saturación de las fibras de 32% NCh176/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2019).

### 2.1.8 DURACIÓN DE LA CARGA

La madera es un material con comportamiento elástico-plástico, lo que significa que puede exhibir tanto deformaciones elásticas como plásticas bajo la aplicación de cargas mecánicas. En el rango elástico, la madera se deforma de manera reversible: si se retira la carga, la deformación desaparece. Sin embargo, si la carga supera cierto límite, la deformación se vuelve plástica y permanente, es decir, la madera no recupera su forma original al retirar la carga (Sotomayor, 2015).

Una característica única de este material es su capacidad para soportar esfuerzos prolongados, lo que afecta su resistencia con el tiempo. La Figura 22 presenta la curva de relación entre la carga y la resistencia adoptada por Eurocódigo 5 (EC5). Esta figura muestra cómo la resistencia de la madera varía en función del tiempo de duración de las cargas, indicando que la madera se vuelve menos resistente a medida que pasa el tiempo.

El artículo de Argüelles & Arriaga (2003) analiza como la duración de la carga afecta la resistencia de la madera. En su estudio compara los resultados de los ensayos realizados por Madsen y Barret en 1976, lo cuales mostraron que el efecto de la duración de la carga es menos pronunciado en la madera comercial en comparación con la madera libre de defectos. Concluye que la influencia de la duración de la carga varía según la calidad de la madera. En la madera de baja calidad, los nudos provocan concentraciones de tensiones que pueden causar ruptura bajo cargas de corta duración. Sin embargo, bajo cargas de larga duración, estas tensiones disminuyen debido a un comportamiento viscoso, mejorando el rendimiento de la madera de baja calidad en comparación con la de alta calidad (Foschi & Barrett, 1982; Johns & Madsen, 1982). Es importante no confundir estos efectos con la fatiga del material ni con el envejecimiento de la estructura. Cavalli et al. (2016) en su revisión demuestra que las propiedades mecánicas del material no solo se ve afectada por los fenómenos naturales como el envejecimiento sino también por otros factores como la duración de carga, el estado de conservación y la presencia de daños.

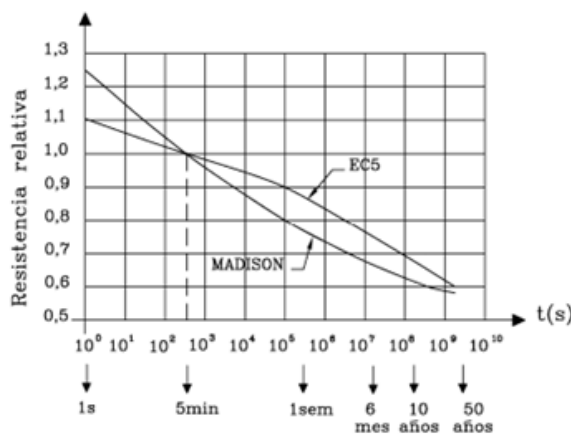


Figura 22  
Curva de Madison y Eurocódigo: resistencia y duración de carga de la madera (Arriaga et al., 2007).

Guindos (2019) agrega que, si durante 10 años se aplica un esfuerzo constante, la madera puede fallar con una carga de flexión correspondiente al 60% del agotamiento observado con una carga de corta duración. Por este motivo que la resistencia y rigidez de la madera deben ser medidas en un tiempo de referencia y modificarla en función de la duración de carga, debido a esto es que los ensayos mecánicos de la madera suelen durar únicamente 3-5 minutos para evitar el efecto reológico.

La madera muestra cierto comportamiento fluido, es decir que a pesar de ser un sólido presenta una tendencia a mostrar ciertas cualidades que son similares a las propiedades de los fluidos. Las propiedades reológicas de la madera son: el creep y la relajación, que en concreto la madera tiene a fluir y relajarse. El primero consta de cargas permanentes en la madera, capaz de generar una deformación lineal elástica en periodos largos de tiempo. El segundo son las deformaciones constantes durante largo tiempo y el material puede disminuir su tensión interna (Guindos, 2019). Debido a lo anterior, la norma NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014) plantea un factor de modificación por duración de carga y entrega pautas cuando se combinan sollicitaciones permanentes o eventuales.

## 2.2 PATOLOGÍAS DE LA MADERA

La definición de la palabra patología proviene de las raíces griegas pathos y logos, y se refiere al estudio de enfermedades. En el ámbito de la construcción se habla de patologías de las edificaciones o constructivas, refiriéndose a la ciencia que examina los problemas constructivos que pueden surgir en los edificios con el tiempo o durante su construcción, evaluando su origen, proceso, causas, evolución, síntomas, y estado (Broto, 2005). Las patologías deben ser estudiadas en relación con su origen, manifestación física y tratamiento. Es importante destacar que el orden de los problemas es inverso, es decir, se debe comenzar observando la lesión hasta llegar a su origen o causa, determinando síntomas, lo cual permitirá establecer una estrategia de reparación y desarrollar la hipótesis de prevención (Broto, 2005).

### 2.2.1 PATOLOGÍAS DE ORIGEN BIÓTICO

En la actualidad, existen múltiples investigaciones que abordan estudios sobre las patologías de origen biótico de la madera (Arriaga et al., 2002; Broto, 2005; Bustos, 2023; Guindos, 2019; S. Hernández, 2019; Lasheras, 2009; López et al., 2004a; Monjé & Maldonado, 2001; Ripa et al., 2004; Weaver, 2003). Estas patologías se asocian, en su mayoría, al ataque de organismos xilófagos de diferentes especies, que varían de un territorio a otro y según los climas alrededor del mundo. Normalmente estos organismos atacan, debilitan y degradan la madera ya que la utilizan como alimento o morada. Los organismos xilófagos pueden clasificarse en (i) hongos xilófagos, (ii) hongos cromógenos y moho, (iii) hongos de pudrición, e (iv) insectos. A continuación, se describen brevemente cada una de las clases mencionadas.

Los hongos xilófagos son organismos vegetales con células muy primitivas que se alimentan de elementos muertos o de forma parasitaria de sustancias de otros animales o vegetales con los que conviven. Se suele ver en la superficie de la madera, en forma de micelios o de cuerpos de fructificación, por diversos factores como la decoloración anormal que puede presentar, el olor a pudrición, el reblandecimiento de la consistencia de la madera y el agrietamiento de esta. La presencia de hongos en la madera puede ir acompañada de la degradación del material o de la presencia de insectos xilófagos (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; S. Hernández, 2019; Monjé & Maldonado, 2001).

Para poder alimentarse, el hongo más desarrollado se introduce en la madera mediante las hifas (células muy finas que solo son visibles al microscopio). Durante el tiempo que las hifas comienzan a crecer se denominan micelio, y son las mismas que, en determinadas circunstancias, se transforman en los cuerpos de fructificación (parte visible del hongo). Este hongo se reproduce desprendiendo esporas, de tal forma que puede trasladarse median-

te el viento o los animales (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Monjé & Maldonado, 2001). Los hongos son dependientes de la humedad y necesitan un medio húmedo de entre 18% y 20% para hacer viable su vida en la madera. Por ello toda madera que contenga valores superiores a estos estará expuesta al ataque de hongos; pero si, por el contrario, su valor es inferior, el ataque no podrá desarrollarse.

Los hongos xilófagos pueden ser de dos tipos. Los primeros, son los mohos y hongos cromógenos, y los segundos los hongos de pudrición, que se subdividen a su vez en tres categorías: hongos de pudrición blanca o fibrosa, hongos de pudrición parda o cúbica y hongos de pudrición blanda. Si bien estos organismos no son peligrosos, se deben tener en observación, dado que crean las condiciones necesarias para su desarrollo (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Monjé & Maldonado, 2001).

Los hongos cromógenos y mohos son organismos incoloros que crecen en la madera, ocupando sus cavidades celulares y superficie. Estos organismos se alimentan de los espacios vacíos que encuentran en la madera, pero no causan daño ni debilitamiento en la estructura celular, ni reducen la resistencia de la madera, por lo que desde una perspectiva estructural del material son considerados inofensivos. Estos hongos se alimentan de las sustancias de reserva contenidas en las células de albura de la madera, que son las células vivas. Se puede identificar su presencia por el cambio de coloración que producen en la madera, la cual se torna en general de un color azulado; aunque la madera también puede adquirir un color rojizo, amarillo o verdoso y puede ser detectado cuando la superficie se oscurece formando una especie de pelusilla (proliferaciones algodonosas) transparente o con tonalidades que van desde el color blanco hasta el negro (ver Figura 23). Este tipo de hongos atacan tanto a las especies latifoliadas como a las coníferas (Arriaga et al., 2002; Broto, 2005; Guindos, 2019; Inat, 2011; López et al., 2004a; Monjé & Maldonado, 2001).



**Figura 23**  
Madera azul por hongos cromógenos (Guindos, 2019).

Los hongos de pudrición son organismos que se alimentan de la pared celular y son capaces de destruir los componentes básicos elementales del esqueleto leñoso de la madera, la cual pierde resistencia y densidad de forma severa. Este fenómeno impide la aplicación de productos porque el material se desintegra fácilmente. En la fase inicial no es fácil reconocer la presencia de este hongo, dado que las hifas permanecen ocultas en su interior. A medida que avanza la pudrición la madera comienza a perder peso y a cambiar de color. En su fase final el hongo causa la destrucción total de la estructura de la madera y provoca la pérdida completa de sus propiedades mecánicas (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; López et al., 2004a; Monjé & Maldonado, 2001).

De la subdivisión de los hongos de pudrición, el primero es el grupo de los hongos de pudrición blanca o fibrosa. Estos hongos se alimentan de la lig-



**Figura 24**  
Daños producidos en la madera por hongos de pudrición blanca (Maderame, 2020).

nina, dejando residuos de fibras de celulosa blancas o muy claras. La madera atacada suele ser de especies coníferas, ya que tienen un mayor contenido de lignina. A menudo, el daño causado por este hongo en la madera se denomina de pudrición corrosiva o fibrosa, la cual se puede observar en la Figura 24 (Arriaga et al., 2002; López et al., 2004a; Monjó & Maldonado, 2001).



**Figura 25**  
Daños producidos por hongos de pudrición parda (Arriaga et al., 2002).



**Figura 26**  
Daños producidos por hongos de pudrición blanda (Maderame, 2020).

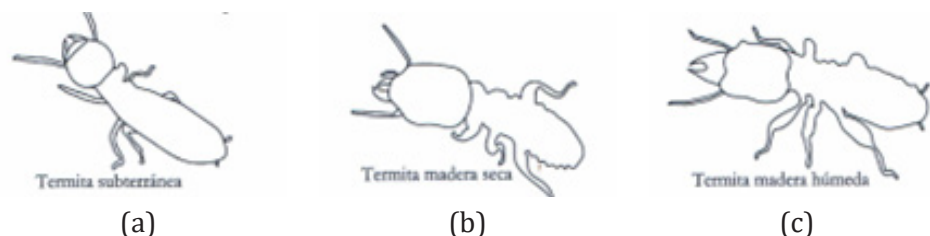
El segundo grupo corresponde a los hongos de pudrición parda o cubica. Este tipo de hongo causa afectaciones más graves y peligrosas para la madera, ya que se alimentan de celulosa y hemicelulosa, descomponiendo de todos los elementos de la pared celular. Como resultado, el hongo deja un residuo de color marrón oscuro y tiende a agrietarse inicialmente en su forma longitudinal, luego de forma transversal y finalmente en la tercera dimensión. Una vez que el material se seca, se agrieta formando una estructura de pequeños cubos que se desintegran entre los dedos como polvo fino. En la Figura 25 se puede ver el ataque inicial de estos hongos, lo que favorece, a su vez, el ataque de insectos de ciclo larvario (Arriaga et al., 2002; López et al., 2004a; Monjó & Maldonado, 2001).

Y el tercer grupo de esta categoría corresponde a los hongos de pudrición blanda. Estos hongos inferiores desarrollan sus hifas en el interior de la pared celular de la madera, donde atacan la celulosa de pared secundaria, que adquiere un color marrón. Esta pudrición se origina en condiciones de humedad extremas, falta de luz y ventilación; también se desarrollan en ambientes saturados de humedad como sótanos u otros lugares en contacto con el terreno o el agua. La madera se reblandece desde la superficie hacia el interior, pero el daño solo se percibe cuando el ataque está muy avanzado y es irreversible, como se aprecia en la Figura 26. (Arriaga et al., 2002; Broto, 2005).

La presencia de insectos en la madera, como las termitas se caracterizan por las perforaciones que realizan en su interior. Hasta la fecha se reconoce la existencia de numerosos insectos que destruyen la madera, pero en este apartado solo se hace referencia a aquellos que afectan en la madera estructural.

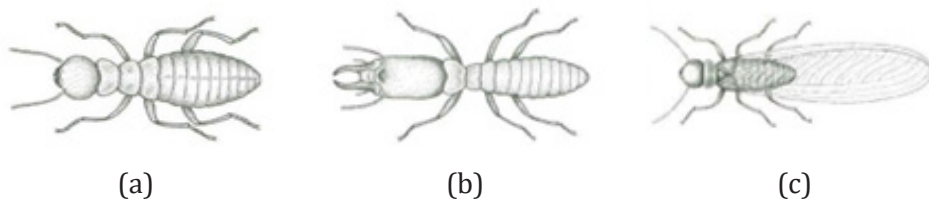
Los insectos sociales o isópteros (termitas) se reconocen como aquellos que no tienen ciclo larvario, pero presentan una estructura social (son obreras, soldados y reproductores) y al llegar a la etapa adulta no abandonan la madera que habitan, por lo que es difícil detectarlas. Existen tres tipos de termitas que son importantes en este estudio por las afectaciones que causan en los materiales de madera, las cuales se pueden observar en la Figura 27. (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004).

**Figura 27**  
Principales tipos de termitas que atacan la madera: (a) termita de madera subterránea; (b) termita de madera seca y (c) termita húmeda (Guindos, 2019).



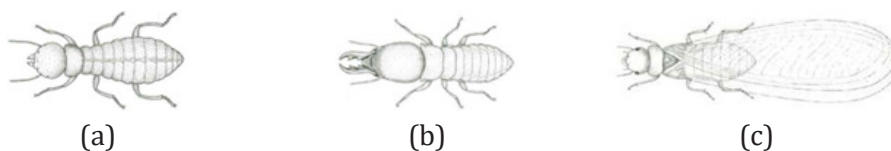
La Figura 27a muestra el aspecto de las termitas subterráneas (*Reticulitermes flavipes*) que son las más comunes y las que causan mayor daño en la madera. Estas se desarrollan y se mantienen bajo tierra con sus colonias creando orificios subterráneos y transitando por las fisuras de las fundaciones, haciendo túneles a lo largo del sentido de la fibra de la madera, por lo que es complejo verlas en la superficie, y se vuelve necesario detectarlas a través de dispositivos de ultrasonidos o microondas. En algunas épocas del año las termitas aladas, tipo de termitas subterráneas de edad reproductora, buscan establecer nuevas colonias. Este tipo de termita suele verse en abundancia en

zonas cálidas y en maderas con un alto contenido de humedad. La Figura 28 muestra el aspecto de los diferentes tipos de termitas subterráneas en diferentes etapas de su ciclo de vida (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004).



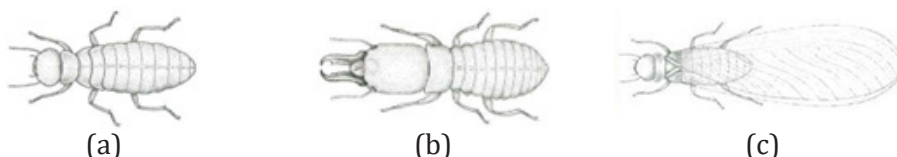
**Figura 28**  
Tipos de termitas subterráneas: (a) obrera; (b) soldado y (c) alado (Ripa et al., 2004).

Por otro lado, las termitas de madera seca (*Neotermes chilensis*) (ver Figura 27b), también conocidas como termitas chilenas, atacan maderas con un contenido de humedad moderada hasta extremadamente bajo, no necesitan estar en contacto con el suelo ni con otra fuente de humedad, y se establecen en el interior de la madera en galerías formando amplios espacios limpios (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004). En la Figura 29 se esquematiza el aspecto de este tipo de insectos.



**Figura 29**  
Tipos de termitas de madera seca: (a) obrera; (b) soldado y (c) alado (Ripa et al., 2004).

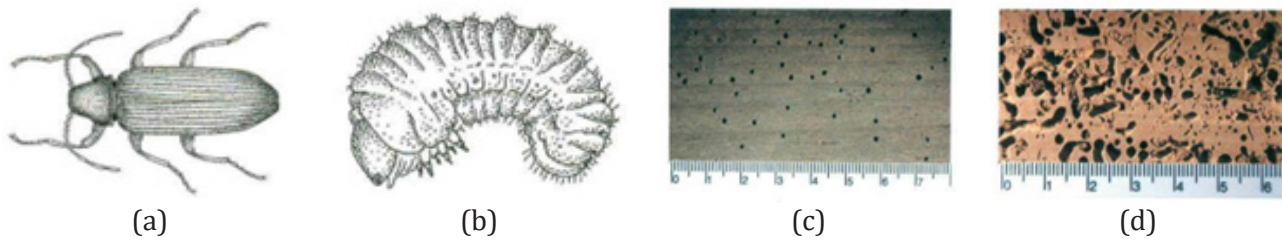
Otro tipo de isópteros son las termitas de madera húmeda (*Porotermes quadricollis*) (ver Figura 27c). Estas termitas son difíciles de combatir dado que las colonias se encuentran en el interior de la madera. Por lo general se encuentran en maderas afectadas por hongos y muy húmedas, así como en árboles muertos o en estado de pudrición. Estas termitas no requieren estar en contacto con el suelo y el daño que causan es menor por las afectaciones que pueden ocasionar los otros tipos de termitas (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004). En la Figura 30 se muestran este tipo de isópteros.



**Figura 30**  
Tipos de termitas de madera húmeda: (a) obrera; (b) soldado y (c) alado (Ripa et al., 2004).

Por otro lado, están los insectos de ciclo larvario. En esta categoría se reconocen los anóbidos o carcomas (*anobiidae*). Los comúnmente denominados carcomas (ver Figura 31a y Figura 31b) atacan a las maderas secas de especies coníferas y latifoliadas, alimentándose de la celulosa y la lignina. Suelen encontrarse en medios con un contenido de humedad promedio entre el 13% y el 30%. El residuo que dejan estos escarabajos es un o serrín producido fino, arenoso y palpable al tacto. La madera ya atacada contiene orificios de salida de entre 1 mm a 2 mm de diámetro (ver Figura 31c y Figura 31d) conocidos como tiro de munición. Siendo originarios de Europa, en Chile se encuentran de la V a la X región (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004).

Los insectos conocidos como líctidos o polillas (*Lyctida*) son considerados los verdaderos “escarabajos pulverizadores de postes” (ver Figura 32a y Figura 32b), se alimentan del almidón contenido en la pared celular cuyo contenido de humedad varía entre el 8% y el 32%, y realizan galerías de 1 mm de diámetro produciendo un fino polvo de serrín (ver Figura 32c). Comúnmente estos líctidos atacan maderas duras y nuevas que tienen un contenido de humedad superior al 32%, lo que hace que el material pierda sus propiedades

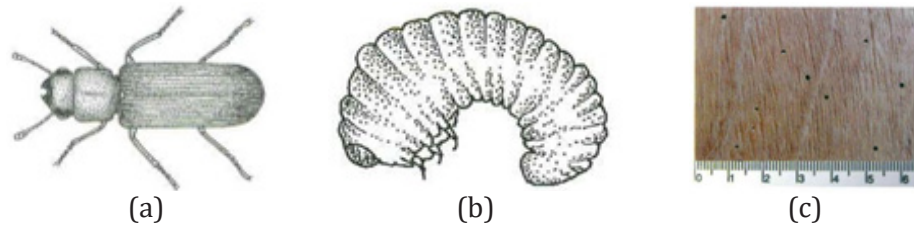
**Figura 31**

Insectos de ciclo larvario: (a) anóbidos adulto; (b) anóbidos larva. Ataque de escarabajo Anóbidos: (c) daño y (d) corte de madera dañada (Ripa et al., 2004).

mecánicas con el tiempo. Se manifiestan en maderas de viviendas más comunes y se encuentran ampliamente distribuidos en Estados Unidos, Canadá, Nueva Zelanda y Australia. En Chile se encuentran dos especies, *Lyctus chilensis* y *Lyctus brunneus*, ambas son poco frecuentes y se pueden encontrar en la V y X región (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004).

**Figura 32**

Ataque de escarabajo Líctidos: (a) *lyctus chilensis* adulto; (b) *lyctus chilensis* larva y (c) daños en madera chapada de coihue (Ripa et al., 2004).

**Figura 33**

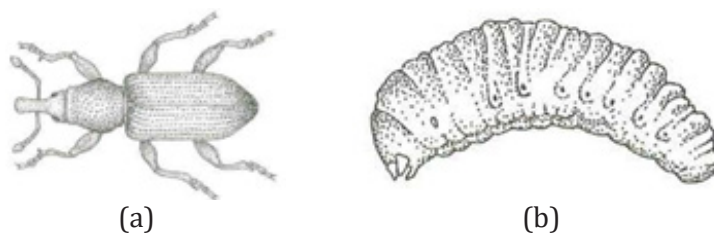
Ataque *Phoracantha semipunctata* adulto (Ripa et al., 2004).

Los isópteros conocidos como cerambícidos o carcoma grande (Cerambycidae) pertenecen a una de las familias más importantes de escarabajos, denominados “escarabajo de cuernos largos” (ver Figura 33). Se alimentan de almidón, azúcares y sustancias albuminoideas que se encuentran en la madera, y necesitan de un contenido de humedad superior al 20%. En general prefieren la madera recién cortada o árboles decadentes o moribundos, por lo que pueden causar serios daños estéticos y estructurales en el material, viven como larvas en las maderas (tanto coníferas como latifoliadas) dejando orificios en la corteza y produciendo aserrín granular o fibroso. El *Phoracantha semipunctata* (o *fabricius*) es originario de Australia, pero fue introducido en África a finales del siglo XVII, en Chile fue adquirido desde Argentina y actualmente se encuentra distribuido desde la III región hasta la IX región (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004).

Los del tipo curculiónidos o gorgojo (Curculionidae) son coleópteros (ver Figura 34) que atacan la madera semi o totalmente descompuesta por la acción de hongos de pudrición, y son conocidos comúnmente como gorgojos. Las galerías que producen estas especies son superficiales y le dan a la madera un aspecto de labrado. Por lo general los orificios que hacen sobre el material tienen diámetros aproximados de 1 mm. En Chile se encuentran dos especies: *Pentarthrum huttoni* (Wollaston) y *Pentarthrum castaneum* (Blanchard), ambos se localizan entre la II región hasta la XI región, pero son más frecuentes y abundantes en Australia y Nueva Zelanda (Arriaga et al., 2002; Guindos, 2019; Ripa et al., 2004).





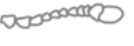

**Figura 34**

Ataque de gorgojo: (a) *pentarthrum* sp. adulto y (b) *pentarthrum* sp. Larva (Ripa et al., 2004).



La Tabla 2 muestra un resumen de las características de las principales familias de coleópteros xilófagos presentes en la madera en Chile elaborado por Ripa et al. (2004). Se comparan las familias anobiidae, lyctidae y curculio-

**Tabla 2** Resumen de las características de las principales familias de coleópteros xilófagos presentes en las maderas en Chile (Ripa et al., 2004).

Características	Anobiidae	Lyctidae	Curculionidae
Dibujo			
Tamaño del insecto (mm)	3 a 6	2 a 7	3 a 5
Forma del insecto	Cilíndrica	Aplanada	Cilíndrica cabeza aguzada
Ubicación de cabeza	Bajo el tórax	Delante del tórax	Delante del tórax
Antenas dibujo			
Lugar ovipostura	Grietas	Grietas y poros	Galerías
Diámetro de orificios de salida (mm)	1 a 2	2	1
Presencia de polvos en galerías	No	Si	No

nidae, detallando aspectos como el tamaño y forma del insecto, la ubicación de la cabeza, la forma de las antenas, entre otros.

### 2.2.2 PATOLOGÍAS DE ORIGEN ABIÓTICO

Las patologías de origen abiótico son aquellas causadas por factores o agentes no vivos, y comúnmente se pueden clasificar en dos tipos: agentes climáticos y fuego. Los agentes climáticos son cruciales en el deterioro de la madera, y en este proceso el agua es uno de los factores más perjudiciales, ya que favorece el ataque de agentes bióticos, como los hongos cromógenos y algunos xilófagos. Además, la exposición a la luz solar provoca cambios en la coloración de la madera que inicialmente adquiere un color marrón y luego se torna de un color grisáceo. Esto se debe a que la radiación ultravioleta degrada los componentes de la madera comenzando por la lignina, lo que resulta en la pérdida de sus propiedades resistentes y se manifiesta en el oscurecimiento de la madera (fotodegradación). Por lo tanto, si la madera está expuesta tanto al agua lluvia como a la luz solar, es más probable que se forme moho en su superficie, dado que estos factores actúan en conjunto para acelerar el deterioro del material (Guindos, 2019; Monjó & Maldonado, 2001).

El comportamiento de la madera frente al fuego es un proceso complejo desde el punto de vista químico y físico. Sin embargo, desde una perspectiva mecánica, es más directo y sencillo. El principal desafío radica en prever cómo reaccionará químicamente la madera para entender sus implicaciones mecánicas y determinar su resistencia estructural durante un incendio. A menudo se piensa erróneamente que la madera es insegura en incendios, pero su seguridad depende realmente de su resistencia al fuego, no de su capacidad para arder. Esta resistencia se evalúa en función del tiempo que la madera conserva ciertas propiedades cruciales, como su estabilidad mecánica bajo carga normal, su capacidad para resistir llamas, su aislamiento térmico y su falta de emisión de gases tóxicos o inflamables (Guindos, 2019, p. 379).

### 2.2.3 PATOLOGÍAS DE ORIGEN MECÁNICO

En este apartado se describen los daños de naturaleza mecánica en la madera, es decir, los relacionados con la pérdida de resistencia, rigidez, sobrecarga y desgaste de la estructura. Las causas de estos daños pueden ser variados y van desde esfuerzos excesivos en un elemento estructural hasta errores en la construcción, accidentes o la falta de mantenimiento a lo largo del tiempo. Esto puede dar lugar a deformaciones en la edificación, e incluso

al colapso parcial o total de las estructuras construidas en maderas. (Monjó & Maldonado, 2001).

Entre las lesiones mecánicas se diferencian cuatro tipos: flechas por la flexión de elementos horizontales, pandeos por esfuerzos de compresión que sobrepasan la capacidad de deformación, desplomes por empujes horizontales sobre la cabeza de elementos verticales, y alabeos por causa directa de la rotación generada por esfuerzos horizontales. Estas lesiones dan origen, a su vez, a la aparición de lesiones secundarias como fisuras, grietas y desprendimientos (Broto, 2005).

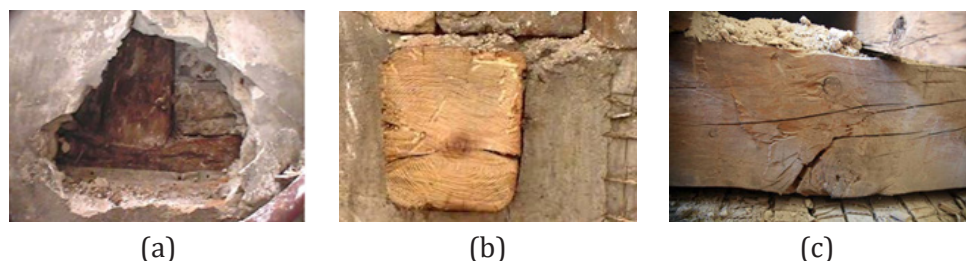
La Figura 35a muestra el aplastamiento de una solera debido a una sobrecarga. Este tipo de deformaciones en un edificio, comúnmente construido en madera, son a menudo causados por el paso del tiempo y la exposición prolongada a cargas superiores a las previstas por el diseño original. Las sobrecargas pueden resultar de varios factores, incluyendo la acumulación de materiales, cambios de uso del edificio, o incluso la humedad y el deterioro biológico que debilitan la madera. Habitualmente, las lesiones comienzan o son visibles en las zonas más rígidas del edificio, como menciona Lasheras (2009).

La Figura 35b muestra una viga con fisuras profundas afectando su integridad estructural. Las fisuras en las vigas de madera pueden originarse por diversas causas, incluyendo tensiones internas, cargas excesivas, defectos naturales en la madera como nudos y grietas preexistentes, o procesos de secado inadecuados. Estas fisuras pueden comprometer la capacidad de la viga para soportar cargas, aumentando el riesgo de fallas estructurales. La presencia de fisuras profundas es una señal de alarma que indica la necesidad de una evaluación y una intervención de la viga afectada para mantener la seguridad del edificio, como comenta Lasheras (2009) y Monjó & Maldonado (2001).

Finalmente, la Figura 35c presenta una rotura de viga en flexión, causada por la presencia de nudos. Los nudos son imperfecciones naturales en la madera que se originan de la unión de las ramas al tronco. Estos defectos pueden debilitar significativamente la madera, especialmente en áreas sometidas a flexión. Cuando una viga se somete a fuerzas de flexión, los nudos actúan como puntos de concentración de tensiones, lo que puede llevar a la formación de grietas y, eventualmente a la rotura. Este tipo de falla es común en estructuras de maderas envejecidas, donde el material ha sido sometido a cargas repetidas durante largos períodos, como menciona Monjó & Maldonado (2001).

**Figura 35**

Patologías mecánicas: (a) aplastamiento de solera inferior de elementos comprimidos en dirección perpendicular a la fibra; (b) viga de madera con fisuras profundas que alcanzan al núcleo de la pieza, comprometiendo su integridad estructural (Lasheras, 2009); (c) rotura por agotamiento de la sección de madera en flexión y presencia de nudos (Salmerón, 2017).



### 2.3 MARCO NORMATIVOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA MEDIANTE ENSAYOS EXPERIMENTALES

En la actualidad, existen diversos marcos normativos que regulan la ejecución de ensayos experimentales convencionales para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera mediante pruebas destructivas, tanto

en el contexto nacional como internacional. Este apartado se centra en la revisión y comparación de esos marcos, y de la bibliografía publicada en relación con la caracterización de la madera mediante ensayos experimentales con probetas de tamaño pequeño que determinen la resistencia a la compresión perpendicular y paralela a las fibras, a la tracción perpendicular, al cizalle paralelo, y a la flexión estática de la madera estructural. Asimismo, esta sección incluye la revisión de estudios que aborden la caracterización mecánica de la madera existente en edificios históricos, con el objetivo de evaluar el impacto del daño por termitas y otros agentes patológicos en su resistencia.

### 2.3.1 NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Las pruebas destructivas mediante ensayos experimentales de la madera estructural (vigas, columnas, pilares, etc.) permiten evaluar sus propiedades mecánicas y la resistencia de las piezas ante diferentes solicitaciones o cargas. Existen diferentes tipos de ensayos para determinar la resistencia de las piezas, así como su deformación, densidad, módulo de elasticidad y durabilidad. Estos incluyen ensayos de durabilidad natural, ensayos de durabilidad artificial o acelerada, y pruebas mecánicas y físicas. Estos métodos aseguran que las piezas mantengan sus propiedades mecánicas y resistencia a lo largo del tiempo bajo diversas condiciones (Internacional Organization for Standardization, 2011; Normalización Española, 2016a). Para obtener resultados confiables, estos ensayos deben ser realizados en laboratorios certificados o especializados, siguiendo las normativas y los estándares existentes garantizando así la precisión de los resultados y su comparabilidad con estudios previos validados.

Uno de los estándares más reconocidos a nivel internacional que regula la realización de ensayos destructivos para la caracterización mecánica de la madera estructural dentro del ámbito europeo es el Comité Técnico de Normalización (CEN/TC) y las organizaciones que agrupa. Entre estas organizaciones cabe destacar el papel del comité CEN/TC 124 que está a cargo de regir las cuestiones relacionadas con el material normalizador de los productos que se usan en el mercado estructural, determinando los aspectos cualitativos de los productos (normas armonizadas) como los aspectos de ensayo y clasificación. También es importante mencionar el rol del comité CEN/TC 250 “Eurocódigos Estructurales”, el cual, en lo referido a la madera, estableció lo que se conoce como “Eurocódigo 5” (EN, 1997) que es un sistema de cálculo basado en los principios de los elementos finitos y determina los valores característicos de la resistencia, la elasticidad y la densidad de la madera, en lugar de valorar únicamente las tensiones básicas para caracterizar el material como se hacía hasta el momento de su aprobación. Este marco normativo presenta varios documentos que permiten al investigador entender los requerimientos generales de los ensayos UNE-EN 14081-1 (Normalización Española, 2020), así como clasificar la madera por resistencia con la norma UNE-EN 14081-2 (Normalización Española, 2023a).

Según el Eurocódigo 5 (EN, 1997), la caracterización mecánica se entiende como la determinación de varias propiedades del material relacionadas con su comportamiento estructural. Entre las propiedades que determina, tal como se define en la norma UNE-EN 338 (Normalización Española, 2016b), está la asignación de las clases de resistencia como son: la resistencia a la flexión, el MOE longitudinal en flexión y la densidad. Otras propiedades importantes para el uso de la madera que determina la norma UNE-EN 338 (Normalización Española, 2016b) son la resistencia al cizalle y el MOE en corte, la resistencia a la tracción y compresión perpendicular y paralela. La norma UNE-EN 384 (Normalización Española, 2023b) presenta una guía para deter-

minar los valores característicos y las propiedades mecánicas de la madera y la densidad, y en la UNE-EN 408 (Normalización Española, 2012) se determinan algunas propiedades físicas y mecánicas que establece el comité CEN/TC 124. Ambas normas establecen las metodologías para caracterizar mecánicamente una madera.

Otros estándares son los que determina la Internacional Organization for Standardization (ISO). En particular, la norma ISO 13910 (Internacional Organization for Standardization, 2014) establece los métodos y procedimientos para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada de tamaño estructural a través de ensayos convencionales. Por otro lado, la ISO 13061 (Internacional Organization for Standardization, 2017) establece los métodos de ensayo para probetas pequeñas de la madera clara y los requisitos generales para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) es la organización internacional de desarrollo de normas más importantes del mundo, la cual se encarga de redactar las normas relativas a los métodos de ensayos, las especificaciones, las definiciones, las prácticas, y las clasificaciones relacionadas con la madera. En el contexto norteamericano, la ASTM D198 (ASTM International, 2015) determina los métodos de evaluación de la madera a escala estructural, mientras que la ASTM D143 (ASTM D143, 2000) la complementa, presentando una guía para determinar las propiedades de resistencia relacionadas con la madera mediante ensayos de escala reducida. Los ensayos que son considerados en esta última norma son aquellos que determinan la resistencia de la madera ante esfuerzos de flexión estática, compresión paralela, compresión perpendicular a la fibra, flexión de impacto, dureza, cizalle paralelo a la fibra, tensión paralela y perpendicular.

Del mismo modo, el conjunto de Normas Bolivianas de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (NB/COPANT), ofrecen los métodos y procedimientos para ejecutar ensayos de compresión paralela NB/COPANT 464 (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007a), compresión perpendicular NB/COPANT 466 (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007b), cizalle paralelo NB/COPANT 463 (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007e), y cizalle paralelo NB/COPANT 463 (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007e) mediante ensayos de escala reducida. Estas últimas normas fueron usadas como base para la creación de las normas chilenas de ensayos a escala reducida como la NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), la NCh 974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), la NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), la NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b) y la NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e), que se consideran para la ejecución de los ensayos de compresión paralela, compresión perpendicular a las fibras, tracción perpendicular, cizalle paralelo y flexión estática, respectivamente.

En el contexto australiano, la normativa AS/NZS 4063-1 (Estándar Australiano, 2010a) establece los requerimientos generales para utilizar los métodos de ensayo para determinar las propiedades estructurales de la madera, y la AS/NZS 4063-2 (Estándar Australiano, 2010b) establece los procedimientos y requisitos para la evaluación de los valores característicos de las propiedades estructurales de la madera.

Por otro lado, cabe mencionar que los estándares norteamericanos y los europeos se han utilizado como base para crear diversas normas chilenas. La Tabla 3 proporciona una comparación de diferentes normas internacionales aplicables a ensayos destructivos realizados a escala reducida. Se enumeran

**Tabla 3** Tabla comparativa de las normas internacionales, en base a los ensayos destructivos a escala reducida.

Tipos de ensayos	Normas					
	ASTM D 143 (ASTM D143, 2000)	ASTM D 198 (ASTM International, 2015)	ISO 13910 (Internacional Organization for Standardization, 2014)	ISO 13061:1 (Internacional Organization for Standardization, 2017)	UNE-EN 338 (Normalización Española, 2016b)	AS/NZS 4063:1 (Estándar Australiano, 2010c)
Compresión paralela	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Compresión perpendicular	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tracción perpendicular	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cizalle paralelo	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flexión estática	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ensayo escala reducida	✓	✗	✗	✓	✗	✗

los tipos de ensayos y las normas correspondientes que los regulan. Cada celda marcada indica la aplicabilidad de la norma a un tipo específico de ensayo.

Actualmente, el Instituto Nacional de Normalización (INN) es el organismo a cargo del estudio y la preparación de las normas técnicas a nivel nacional. Además, el INN adopta recomendaciones de otros organismos de normalización en el ámbito internacional como la International Organization for Standardization (ISO) y la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT). Junto con el INN, otras entidades como la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), el Instituto Forestal (INFOR) y el Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDEM) participan en el estudio y la realización de las respectivas normas chilenas.

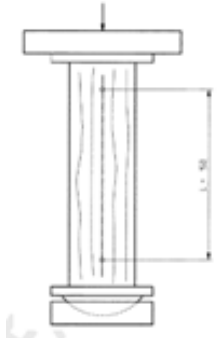
Concretamente, las normas de diseño de los principales procedimientos de ensayos en probetas a escala reducida utilizados en Chile para la caracterización destructiva de la madera se basan en las normas norteamericanas ASTM D143 (2000) y las NB/COPANT (Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 1972). De esta manera, las normas NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), NCh 974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), la NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b) y la NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e) hacen referencia al documento norteamericano para determinar las propiedades relacionadas con la madera y evaluar la resistencia del material.

A continuación, se describen algunos de los ensayos destructivos más comunes para caracterizar la madera a nivel nacional e internacional.

### 2.3.2 ENSAYOS DE COMPRESIÓN PARALELA

Los ensayos de compresión paralela (ASTM D143, 2000; Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007a; Instituto Nacional de Normalización, 2018c) permiten determinar las propiedades resistentes y la rigidez de la madera cuando se somete a una carga de dirección paralela a las fibras. Para ejecutar este tipo de ensayos se utilizan equipos que apliquen cargas de forma continua en toda la probeta hasta que se produzca el fallo. Durante el desarrollo de las pruebas se registran las deformaciones y las cargas máximas conseguidas por las muestras para evaluar su comportamiento estructural ante dicho esfuerzo.

Para el ensayo de compresión paralela a las fibras de la madera según la norma NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), se deben uti-



**Figura 36**  
Ensayo de compresión paralela.  
NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c).

lizar probetas de tamaño 50 x 50 x 200 mm medidos con una precisión de  $\pm 0.3\%$ . Estas probetas no deben presentar fallas ni defectos y deben tener su eje longitudinal paralelo a la dirección de la fibra, como se muestra en la Figura 36. En este tipo de ensayos se deben calcular dos propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad (MOE) el cual, mide la rigidez de la madera y se calcula a partir de la pendiente de la curva tensión-deformación en la región elástica del ensayo y la tensión máxima o de ruptura (MOR), por su parte, mide la tensión máxima que la madera puede soportar antes de fallar bajo compresión. Este valor se determina aplicando una carga a la probeta hasta que se produce la falla, y luego dividiendo la carga máxima por el área de la sección transversal de la probeta. En ambos extremos se debe medir el ancho  $a$  y el espesor  $e$  de la probeta, y en el centro se aplicará una carga continua con una velocidad del cabezal de la máquina de 0.6 mm/min sin variar más del 25%. Todas las unidades de medida se expresan en Megapascal (MPa).

Para determinar la tensión de compresión paralela de cada probeta en el límite de proporcionalidad,  $f_{c,lp}$ , se utiliza la Ecuación (2), donde  $P_{lp}$  es la carga en el límite de proporcionalidad,  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos y  $\bar{e}$  es el promedio de los espesores medidos.

$$f_{c,lp} = \frac{P_{lp}}{\bar{a} \cdot \bar{e}} \quad (2)$$

En cada probeta la tensión máxima o de ruptura de compresión paralela  $R_c$  se determina mediante el desarrollo de la Ecuación (3):

$$R_c = \frac{Q}{\bar{a} \cdot \bar{e}} \quad (3)$$

donde  $Q$  es la carga máxima,  $\bar{a}$  es el mismo promedio de los anchos medidos y  $\bar{e}$  es el mismo promedio de los espesores medidos que aparecen en la Ecuación (2).

Para determinar el MOE de cada probeta en compresión paralela  $E_c$  se utiliza la Ecuación (4):

$$E_c = \frac{P_{lp} \cdot L}{\sigma_{lp} \cdot \bar{a} \cdot \bar{e}} \quad (4)$$

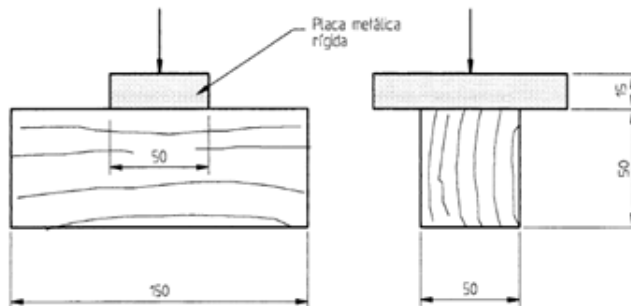
donde  $L$  es el tramo central de la probeta de 150 mm de longitud, en la cual se han medido las deformaciones,  $\sigma_{lp}$  es la deformación límite de proporcionalidad,  $P_{lp}$  es la carga en el límite de proporcionalidad que aparece en la Ecuación (2) y, asimismo,  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos y  $\bar{e}$  es el promedio de los espesores medidos.

Es importante considerar un tamaño adecuado de muestras para obtener resultados estadísticamente significativos. Según la norma NCh968 (Instituto Nacional de Normalización, 1986b), y siguiendo las recomendaciones de las normas internacionales (ASTM D143, 2000; Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007a), se sugiere utilizar un mínimo de 20 a 30 probetas para asegurar la validez de los resultados. Un correcto tamaño de la muestra permitirá llegar a conclusiones más categóricas a la hora de realizar análisis estadísticos. Esta consideración no solo aplica para los ensayos de compresión paralela, sino para todos lo que se explican a continuación.

### 2.3.3 ENSAYOS DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR

Los ensayos de compresión perpendicular a las fibras (ASTM D143, 2000; Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007b; Instituto Nacional de Normalización, 2018d) permiten evaluar las propiedades resistentes de la madera ante sollicitaciones de carga en dicha dirección. Estos ensayos consisten en aplicar una carga puntual y continua sobre una cara radial de la probeta en dirección perpendicular hasta que se produzca el fallo o, en su defecto, una deformación máxima de 2.5 mm (ver Figura 37). Durante el ensayo se registran las deformaciones y las cargas hasta que se obtenga una deformación total del material por compresión igual a 2.5 mm o hasta que la probeta falle. Los resultados obtenidos tras la evaluación de cada espécimen permiten estimar el comportamiento estructural de la madera ante esfuerzos de compresión perpendicular.

Según la norma NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d) de ensayo de compresión perpendicular a las fibras, las dimensiones de las probetas deben ser paralelepípedos rectos de 50 x 50 x 150 mm, medidos con una precisión de  $\pm 0.3\%$ , teniendo en cuenta las mismas consideraciones que para los ensayos de compresión perpendicular. Respecto al procedimiento del ensayo, se debe aplicar una carga en forma continua con una velocidad del cabezal de la máquina de 0.3 mm/min, no variando más allá de un 25%, sobre una placa metálica dispuesta en la cara radial superior de la probeta (ver Figura 37). La deformación vertical se debe medir procurando una precisión de 0.002 mm para cargas progresivas, con intervalos de carga elegidos, para que las lecturas que así se obtengan permitan determinar el límite proporcional. Se deben tomar lecturas de carga y deformación hasta obtener una deformación total por compresión igual a 2.5 mm, después de lo cual se suspenderá el ensayo. Se debe registrar como carga máxima  $Q$  para la cual se obtiene la falla de la probeta o en su defecto, una deformación de 2.5 mm.



**Figura 37**  
Ensayo de compresión perpendicular a la fibra. NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d).

La tensión unitaria de compresión perpendicular de cada probeta en el límite de proporcionalidad  $f_{c,lp}$  se determina mediante la Ecuación (5), donde  $P_{lp}$  es la carga en el límite de proporcionalidad,  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos de la probeta y  $z$  es el ancho de la placa metálica rígida que es igual a 50 mm.

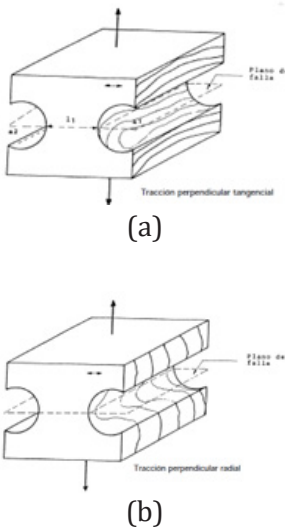
$$f_{c,lp} = \frac{P_{lp}}{z \cdot \bar{a}} \quad (5)$$

A cada probeta se le debe aplicar una tensión máxima o de rotura de compresión perpendicular  $R_{cn}$  que se determina mediante la Ecuación (6), donde  $Q$  es la carga máxima para la cual se obtiene la falla de la probeta o, en su defecto, una deformación de 2.5 mm;  $z$  es el ancho de la placa metálica rígida que es igual a 50 mm y  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos de la probeta.

$$R_{cn} = \frac{Q}{z \cdot \bar{a}} \quad (6)$$

### 2.3.4 ENSAYOS DE TRACCIÓN PERPENDICULAR

Los ensayos a tracción perpendicular a las fibras (ASTM D143, 2000; Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007e; Instituto Nacional de Normalización, 2018f) evalúan la resistencia de las probetas hasta que el plano de falla sea tangente a los anillos de crecimiento de la madera para cargas aplicadas en dirección perpendicular. Para este tipo de ensayos se utilizan equipos que aplican una carga continua por toda la probeta hasta alcanzar el punto de falla (ver Figura 38). Mientras se realiza el ensayo se registra la carga máxima que se obtiene al fallar la probeta y su tensión máxima que será la carga por unidad de superficie que es necesaria para provocar la falla de la probeta.



**Figura 38**  
Ensayos de tracción perpendicular a las fibras: (a) tracción perpendicular tangencial y (b) tracción perpendicular radial. NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f).

De acuerdo con la norma NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), para los ensayos de tracción perpendicular describen los métodos para determinar la capacidad resistente de la madera, tanto en el plano de falla tangente a los anillos de crecimiento (tracción perpendicular tangencial), como en el plano perpendicular a los anillos de crecimiento de las probetas (tracción perpendicular radial, tal como se muestra la Figura 38a y Figura 38b, respectivamente). Para estos ensayos, se determina la tensión máxima a tracción perpendicular y la carga máxima por unidad de superficie necesaria para provocar la falla, expresadas en Megapascal (MPa). Las probetas deben ser de paralelepípedos rectos de 50 x 50 x 63 mm, medidos con una precisión de  $\pm 0.3\%$ , y perforados de la forma indicada en la Figura 38, con el propósito de producir un plano de falla por tracción de 25 x 50 mm. Además, se debe medir el largo  $l$  y el ancho  $a$  de la menor superficie que se debe someterá a tracción, tomando al menos dos medidas en los extremos de dicha superficie. La carga debe aplicarse de forma continua y con una velocidad del cabezal de la máquina de 2.5 mm/min.

La Ecuación (7) se utiliza para determinar la tensión máxima de tracción perpendicular de cada probeta  $R_{tn}$ , donde  $Q$  es la carga que se obtiene de la falla de la probeta,  $\bar{l}$  es el promedio de las medidas de altura del plano de falla de la probeta y  $\bar{a}$  es el promedio de las medidas del ancho del plano de falla de la probeta.

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

### 2.3.5 ENSAYOS DE CIZALLE PARALELO

Los ensayos de cizalle paralelo a las fibras (ASTM D143, 2000; Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007c; Instituto Nacional de Normalización, 2018b) permiten determinar la resistencia a la tensión máxima que presenta la madera ante las cargas que se le aplican en dirección paralela. Para este tipo de ensayos se utilizan equipos que aplican una carga puntual y continua en la probeta hasta que se produce el fallo, como se muestra en la Figura 39. Durante el ensayo se utilizan equipos que registran tanto las cargas máximas como las deformaciones obtenidas por las muestras, resultados con los que se evalúa el comportamiento estructural del material ante esfuerzos de cizalle paralelo.

La norma NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b), que regula los ensayos de cizalle paralelo a las fibras, establece los métodos para evaluar la resistencia al corte en las probetas con el plano de falla perpendicular a los anillos de crecimiento (cizalle radial) (ver Figura 39a) y en probetas con el plano de falla tangente a los anillos de crecimiento (cizalle tangencial) (ver Figura 39b). En estos ensayos, las probetas se cargan para generar un plano de falla por cizalle. Esto significa que la carga aplicada se orienta de manera que provoca tensiones de cizalle en el material, llevando a la formación de un plano de falla paralelo a la dirección de la carga aplicada. Las dimensiones de las probetas deben ser paralelepípedos rectos de 50 x 50 x 65 mm, medidas con una precisión de  $\pm 0.3\%$ . Además, se debe medir la altura  $h$  y el ancho  $e$  de la superficie que se debe someterá a cizalle, tomando al menos dos mediciones en los extremos de dicha superficie. En el ensayo se aplica una carga de forma puntal y gradual con una velocidad de cabezal de la máquina de 0.6 mm/min.

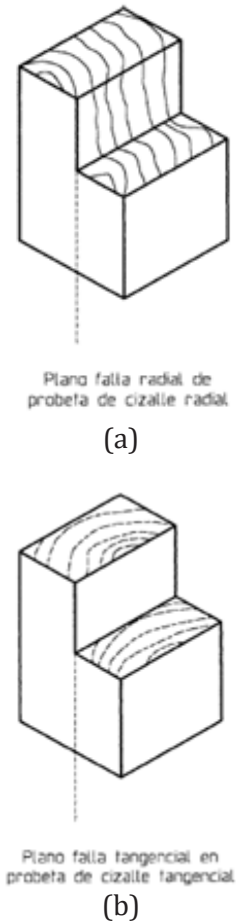
La Ecuación (8) se emplea para determinar la tensión máxima de cizalle paralelo de cada probeta  $R_v$ , donde  $Q$  es la carga que se obtiene de la falla de la probeta,  $\bar{h}$  es el promedio de las medidas de altura del plano de falla de la probeta y  $\bar{e}$  es el promedio de las medidas del ancho del plano de falla de la probeta.

$$R_v = \frac{Q}{\bar{h} \cdot \bar{e}} \quad (8)$$

### 2.3.6 ENSAYOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA

Los ensayos a flexión estática (ASTM D143, 2000; Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, 2007d; Instituto Nacional de Normalización, 2018e) evalúan la resistencia y la rigidez que presenta la madera ante las cargas que se le aplican en dirección longitudinal. Para realizar este tipo de ensayos se utilizan equipos que aplican una carga puntal y gradual en el centro de un elemento (viga) hasta que se produce el fallo (ver Figura 40). Durante el ensayo se utilizan equipos que registran las deformaciones y cargas máximas alcanzadas por el espécimen. Estos resultados permiten determinar el comportamiento estructural del material ante los esfuerzos de flexión que realiza para soportar la carga.

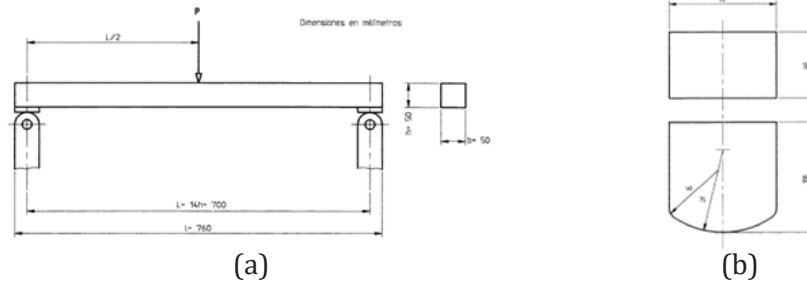
Las disposiciones contenidas en la norma NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e) para ejecutar los ensayos de flexión estática describen los métodos para determinar la resistencia y rigidez de la pieza sometida a esfuerzos de flexión, donde se debe calcular el módulo de ruptura como medida de la máxima capacidad resistente que tiene la probeta, y el módulo de elasticidad (MOE) que define la resistencia a la deflexión de la probeta (deformación vertical). Las tensiones y los módulos se deben expresar en Megapascal (MPa). Las dimensiones de las probetas deben ser paralelepípedos rectos de 50 x 50 x 760 mm, medidas con una precisión de  $\pm 0.3\%$ , que no deben presentar fallas ni defectos (ver Figura 40a). Además, se debe medir el ancho  $b$  y la altura  $h$  de la probeta en el centro de longitud  $l$ , procurando apoyar la probeta para que sus extremos sean capaces de seguir los efectos de la deflexión, usando un cabezal de madera o metal (ver Figura 40b). Por tanto, se aplica una carga gradual y puntal de velocidad de 2.5 mm/min.



**Figura 39**  
 Ensayo de cizalle paralelo: (a) cizalle radial y (b) cizalle tangencial. NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b).

Figura 40

(a) ensayo de flexión estática y (b) cabezal de madera o metal para el ensayo. NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e).



La Ecuación (9) se utiliza para determinar la tensión unitaria de flexión ( $f_{lp}$ ) de cada probeta en el límite de proporcionalidad. Donde,  $P_{lp}$  es la carga en el límite de proporcionalidad,  $L$  es la luz del ensayo,  $b$  es el ancho de la probeta y  $h$  es la altura de la probeta.

$$f_{lp} = \frac{3P_{lp} \cdot L}{2b h^2} \quad (9)$$

La determinación del módulo de ruptura a flexión,  $R_f$ , para cada probeta se realiza mediante la Ecuación (10), donde  $Q$  es la carga máxima obtenida,  $L$  es la luz del ensayo,  $b$  es el ancho de la probeta y  $h$  es la altura de la probeta.

$$R_f = \frac{3Q \cdot L}{2b h^2} \quad (10)$$

Finalmente, para determinar el MOE a flexión,  $E_f$ , se utiliza la Ecuación (11), donde  $P_{lp}$  es la carga en el límite de proporcionalidad,  $\delta_{lp}$  es la deflexión en el límite de proporcionalidad,  $L$  es la luz del ensayo,  $b$  es el ancho de la probeta y  $h$  es la altura de la probeta.

$$E_f = \frac{P_{lp} \cdot L^3}{4 \cdot \delta_{lp} b h^3} \quad (11)$$

## 2.4 EVALUACIÓN DE LA MADERA EXISTENTE EN EDIFICIOS HISTÓRICOS

En las últimas décadas los estudios sobre la evaluación estructural y la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera en edificaciones históricas han cobrado especial relevancia. Esto se debe a la creciente necesidad de determinar mediante evaluaciones empíricas la vulnerabilidad estructural y el riesgo que presentan estas edificaciones de sufrir daños frente a diversas amenazas, así como a la notoria necesidad y urgencia de implementar soluciones de mitigación de riesgos.

Varios autores han llevado a cabo investigaciones (Horie, 2002; Kranitz et al., 2016; Llana et al., 2023; Machado et al., 2019) que pretenden abordar el estudio de las propiedades mecánicas de la madera existente en estructuras históricas, algunos de los cuales se centran en los factores que afectan la caracterización de las propiedades mecánicas como el paso del tiempo, los daños sísmicos y el factor de crecimiento lento de las maderas, entre otros. Y otros autores, abordan el tema desde la necesidad de rehabilitación y reutilización de piezas de madera para la reparación de edificios históricos. Este último grupo de investigaciones usualmente incluyen ensayos en maderas existentes, rescatadas de edificios históricos, con el fin de mitigar problemas, encontrar soluciones y permitir intervenciones mínimas; o bien diseñar refuerzos eficientes y compatibles con la arquitectura de las construcciones históricas (Horie, 2002; Kranitz et al., 2016; Llana et al., 2023).

Aunque en Chile no existe aún una norma oficial que establezca procedimientos para evaluar las estructuras históricas, si se cuenta con la norma NCh1198 (Instituto Nacional de Normalización, 2014) que proporciona una guía exhaustiva para el diseño de estructuras de madera, asegurando que los materiales y métodos utilizados cumplan con los estándares nacionales de calidad y seguridad. Incluye consideraciones detalladas sobre cómo las cargas y condiciones ambientales pueden afectar la integridad estructural, y establece procedimientos claros para la fabricación, montaje y evaluación de componentes de madera en las construcciones. No obstante, este enfoque tiende a ser muy conservador, lo que limita su utilidad al momento de evaluar edificaciones patrimoniales, pues la norma no tiene en cuenta las resistencias de la madera de crecimiento lento utilizadas comúnmente en dichas estructuras.

### 2.4.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA EXISTENTE EN CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS

Los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera se definen como métodos constructivos que mediante la conexión de elementos lineales y esbeltos conforman estructuras adecuadas y capaces de soportar esfuerzos de compresión, tracción, flexión y corte, sin requerir refuerzos de otro tipo (Barros & Sarabia, 2016). Este tipo de sistemas han sido ampliamente utilizados alrededor del mundo, especialmente en países propensos a los terremotos tales como Portugal (Poletti, 2013), Inglaterra (Lukic et al., 2018), Turquía (Aktas, 2017), Perú (Quinn et al., 2016) y Chile (Cisterna & Jorquera, 2016; Jiménez & Pelà, 2023), como muestra la Figura 41. El uso de esta técnica se debe en parte a su reconocido carácter antisísmico, que ha permitido que muchas estructuras patrimoniales se preserven hasta el día de hoy. Pese a su alto valor constructivo, la madera como material estructural es sensible al ataque agentes patológicos que pueden deteriorar parcial o totalmente las estructuras. Como se describió en la Sección 2.2.1, entre los agentes que causan los daños más severos se encuentran los factores ambientales y los insectos xilófagos, como las termitas y los hongos.

Conocer las propiedades mecánicas y el estado de conservación de la madera antigua en servicio es fundamental para determinar la fiabilidad de las estructuras existentes, y proponer estrategias de mitigación de riesgos efectivas y precisas. Autores como Lourenço (2005) y Weaver (2003) consideraron la importancia de disponer de conocimiento técnico sobre el comportamiento de los materiales y las estructuras, siendo fundamental para derivar estrategias de mantención que favorecieran la conservación de dichas estructuras. En este contexto, se utilizaron métodos experimentales, tanto destructivos como no destructivos, para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera, tales como la resistencia, densidad, contenido humedad, y rigidez de los materiales, entre otras.

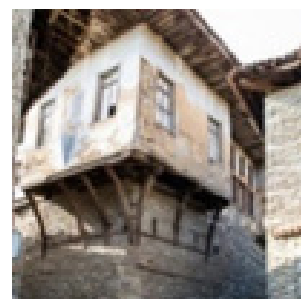
Las propiedades mecánicas de la madera son muy variables y dependen de diferentes factores, como la especie maderera, la localización de los inmuebles, el estado de uso y conservación de las estructuras, entre otros. Generalmente, las bases de datos que registran las características mecánicas de la madera nueva (por ejemplo, del Instituto Forestal, industrias, investigaciones, etc.) no son representativas de las de la madera antigua, por lo que resulta imprescindible llevar a cabo estudios para conocer y analizar variables objetivas y comparables, cuantitativas y cualitativas, y de forma particular, para las tipologías constructivas que se estén analizando. Asimismo, disponer de este tipo de bases teóricas permiten formar un sistema de indicadores para la evaluación y monitoreo de las estructuras existentes (Hernández & Venegas, 2015). Sin embargo, en la actualidad, existen escasas investigaciones que



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 41**  
Construcciones históricas de entramado de madera en: (a) Lisboa, Portugal (Poletti, 2013); (b) York, Inglaterra (Lukic et al., 2018); (c) Safranbulu, Turquía (Aktas, 2017); (d) Lima, Perú (Quinn et al., 2016); y (e) Valparaíso, Chile (Archivo propio).

aborden el estudio del comportamiento mecánico de la madera existente en edificios patrimoniales (Carmona & Durán, 2005; Cavalli et al., 2016; Kranitz et al., 2016; Llana et al., 2023; Machado et al., 2019; Smith, 2021) A continuación, se describen algunas investigaciones que abordan el tema a través de estudios experimentales.

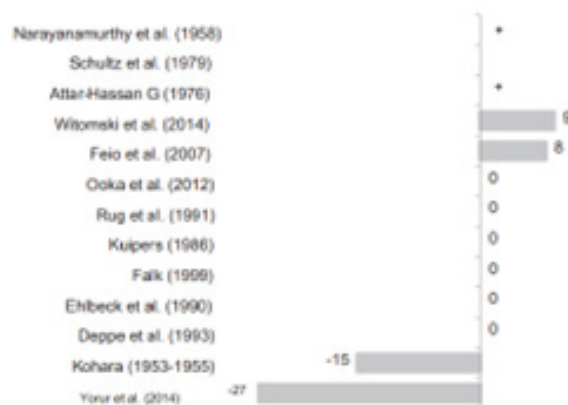
Cavalli et al. (2016) realizó una revisión exhaustiva de la literatura sobre la determinación de las propiedades mecánicas de la madera envejecida y recuperada con el objetivo de evaluar cómo el envejecimiento y otros factores pudieron afectar a estas propiedades. Los autores resaltaron la complejidad de evaluar la madera envejecida debido a la variabilidad natural del material, la disponibilidad limitada de muestras y la historia desconocida de las cargas aplicadas a la madera. La investigación mostró que, en general, el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR) no se vieron significativamente afectados por el envejecimiento. Sin embargo, hubo discrepancias en los resultados debido a diferentes enfoques de investigación y metodologías de prueba.

Los estudios revisados indicaron que las propiedades mecánicas en flexión (MOE y MOR) tendieron a mantenerse estables o disminuir levemente con el tiempo. Las mayores reducciones de MOE y MOR por flexión se reportaron para la madera estructural, que se vio afectada por las condiciones en servicio, como la duración de carga, el estado de conservación y los daños por mantenimiento. En cambio, la resistencia a la compresión permaneció sin cambios, aunque los resultados a menudo se vieron influenciados por una importante diferencia de densidad entre las muestras nuevas y las recuperadas (ver Figura 42).

Por otro lado, los resultados de la resistencia a la tracción fueron completamente diferentes, mientras que, los MOE de tracción y compresión se mantuvieron sin cambios. La falta de trabajos de investigación limita llegar a una conclusión definitiva respecto a la resistencia a cizalle. En resumen, el estudio bibliográfico de Cavalli et al. (2016) subrayó la necesidad de estandarizar los métodos de prueba para permitir comparaciones fiables y un enfoque más integral que considere tanto las propiedades mecánicas como las condiciones ambientales a las que la madera ha sido expuesta.

**Figura 42**

Diferencia porcentual entre la resistencia a la compresión de madera antigua y nueva. Los valores positivos indican una mayor resistencia a la compresión para la madera antigua, y cuando no se indica un valor específico la tendencia se indica como incremento (+) o decremento (-) (Cavalli et al., 2016).



Similarmente, Kranitz et al. (2016) realizaron una revisión de la literatura para estudiar los efectos del envejecimiento de la madera, abarcando aspectos químicos, físicos y mecánicos. Identificaron dos tipos principales de envejecimiento: el natural (aeróbico o anaeróbico) y el envejecimiento acelerado mediante tratamientos térmicos. El envejecimiento natural implicó cambios irreversibles en las propiedades de la madera debido a factores climáticos, ambientales y biológicos. En condiciones aeróbicas, la madera almacenada

en ambientes secos y protegidos mostró mínimos efectos de envejecimiento, mientras que la madera expuesta a la intemperie sufrió degradación química y física. En condiciones anaeróbicas, como cuando la madera estuvo enterrada o sumergida en agua, la degradación ocurrió de manera diferente, afectando principalmente a la celulosa.

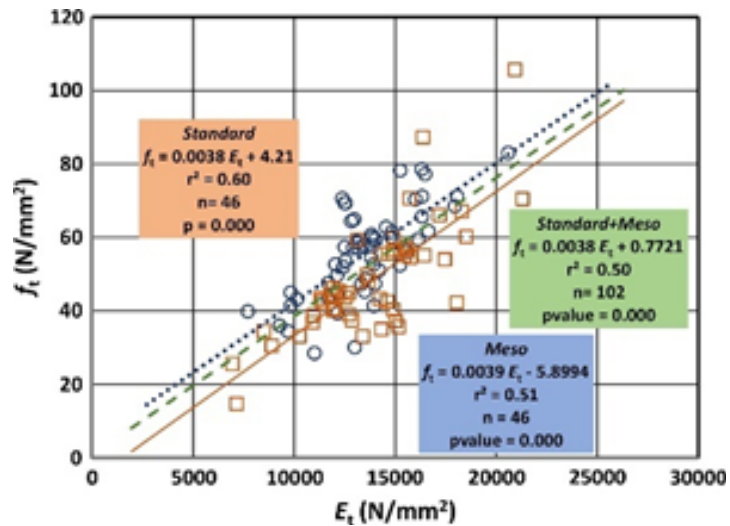
Por otro lado, el envejecimiento acelerado mediante tratamientos térmicos modificó las propiedades químicas y físicas de la madera, mejorando su estabilidad dimensional y resistencia a la degradación biológica. En cuanto a las propiedades mecánicas de la madera, como la resistencia y el módulo de elasticidad, pudieron disminuir con el tiempo. En muchos casos, no se encontraron tendencias para las propiedades mecánicas paralelas a las fibras, lo que indicó una influencia baja del envejecimiento en esas propiedades. La madera envejecida pudo volverse más frágil, lo que indujo una reducción de las propiedades de resistencia perpendicular a la fibra, así como una menor resistencia a la flexión por impacto y una menor deformación, especialmente la deformación plástica. En resumen, la revisión de Kranitz et al. (2016) proporcionó una comprensión detallada de los efectos del envejecimiento de la madera, ofreciendo información para la conservación del patrimonio cultural y la reutilización de la madera en proyectos de construcción.

Machado et al. (2019) evaluaron muestras de madera antigua, destacando la importancia de identificar las especies de madera para comprender sus propiedades mecánicas y su comportamiento a lo largo del tiempo. En su discusión abordaron cómo el envejecimiento mecánico puede afectar la resistencia con el tiempo, manifestándose en cambios microestructurales y pérdida de resistencia. Además, enfatizaron la importancia de realizar ensayos directos semidestructivos para obtener información adicional sobre las propiedades de las muestras de madera in situ. Esto ayuda a determinar la necesidad de aplicar un factor de ajuste de seguridad a los valores de resistencia.

Machado et al. (2019) para llevar a cabo las evaluaciones, utilizaron una metodología que combinó la identificación de la especie de madera y ensayos semidestructivos (de tracción) para evaluar elementos de madera antigua. El estudio se centró en los muros frontales de edificios de la tipología "Pombalino" en Lisboa, construidos después del terremoto de 1755. En estos muros, se identificaron y analizaron la densidad, el contenido de humedad y la resistencia a la tracción de diferentes piezas de madera las especies de *pinus pinaster* aiton y *pinus sylvestris*.

Los resultados del estudio demostraron que la densidad y contenido de humedad variaron entre los elementos analizados, con densidades medias entre 530 y 637 kg/m<sup>3</sup>. Las pruebas de tracción indicaron una alta variabilidad en la resistencia de la madera antigua, sugiriendo la necesidad de aplicar factores de seguridad adicionales debido al envejecimiento. Se observó que la relación de la resistencia a la tracción de la madera antigua con la nueva osciló entre 0.6 a 0.9 para las muestras de *P. sylvestris* y entre 0.4 a 0.6 para las muestras de *P. pinaster* (ver Figura 43). Estos valores son superiores al factor 0.9 sugerido por Suter (1982), indicando que la aplicación de factores de seguridad adicionales puede ser necesaria para compensar la posible disminución de la resistencia debido al envejecimiento, asegurando así la conservación y seguridad de las estructuras históricas.

En conclusión, Machado et al. (2019) destacaron que la evaluación precisa de miembros de madera antigua requiere una combinación de métodos de identificación de especies y pruebas in situ. Esta combinación proporciona una base segura y fiable para la evaluación de la resistencia de los miembros



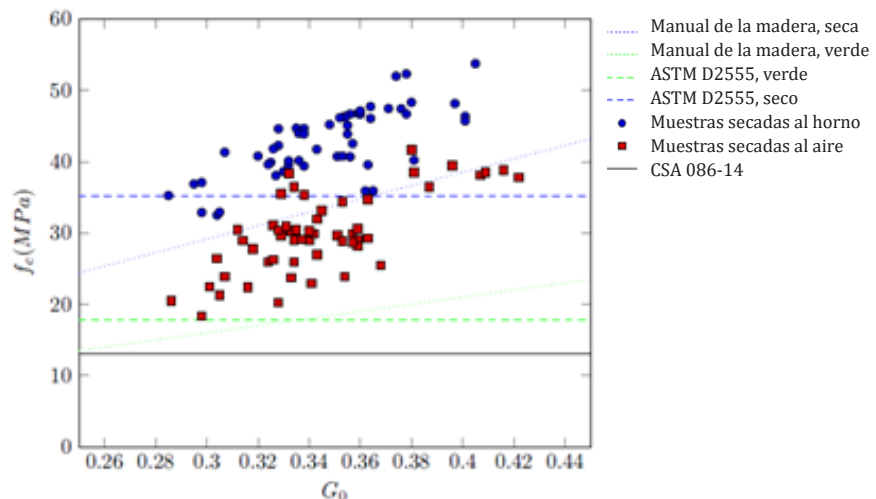
**Figura 43**  
 Curvas de regresión ajustadas a las muestras estándar y meso (Manchado et al., 2019).

de madera en servicio. Los resultados subrayaron la importancia de considerar los efectos del envejecimiento y la variabilidad inherente en las propiedades mecánicas de la madera al evaluar estructuras históricas. Además, señalaron la posible influencia del envejecimiento mecánico debido a la duración de la carga.

Smith (2021) realizó un estudio que buscó caracterizar la madera de pino blanco americano (*pinus strobus*), existente en edificios históricos del valle de Ottawa y el este de Canadá, evaluando sus propiedades mecánicas mediante métodos destructivos y no destructivos. Las muestras se extrajeron desde dos edificios y se prepararon según los estándares ASTM D143 (2000). Las pruebas incluyeron la evaluación de propiedades tales como la gravedad específica, la resistencia a la perforación, densidad de anillos de crecimiento, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, y resistencia a la flexión.

Los resultados de Smith (2021) indicaron que, aunque los métodos destructivos proporcionan propiedades precisas, no reflejan el comportamiento estructural real, y no son prácticos para pruebas in situ. Sin embargo, los métodos no destructivos (NDT) son preferibles para la conservación del patrimonio, ya que no causan daños significativos. Los métodos como la clasificación visual, identificación de especies y pruebas de perforación por resistencia fueron relevantes en este contexto. Smith (2021) concluyó que la madera es variable y no todos los miembros de una especie tendrán la misma resistencia (ver Figura 44). Aunque los métodos destructivos son precisos,

**Compresión paralela al grano frente a la densidad**

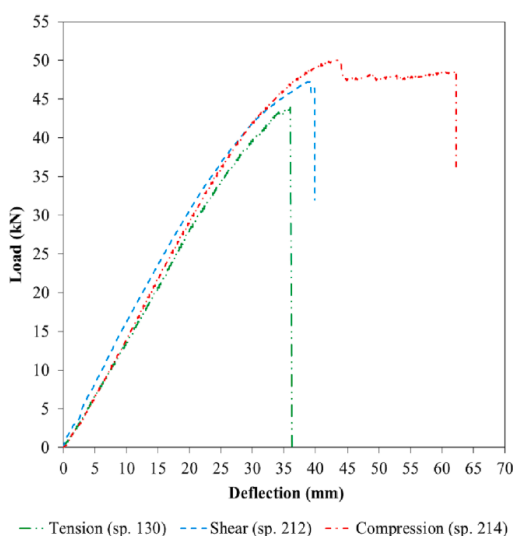


**Figura 44**  
 Comparación de la resistencia a la compresión con las normas de diseño (Smith, 2021).

no son los más adecuados cuando se desea conservar las piezas como parte del patrimonio. Los métodos NDT ofrecen una manera efectiva de evaluar las propiedades de la madera sin causar daños, y son cruciales para preservar estructuras históricas. Smith (2021) recomienda realizar más estudios para correlacionar los resultados de las pruebas NDT con las propiedades estructurales reales y considerar el efecto del contenido de humedad variable en la madera de estructuras históricas.

Por otro lado, Llana et al. (2023) abordó el estudio de la reutilización o el reciclaje de la madera estructural. Para ello, los autores evaluaron la clasificación del material, no obstante, los estándares de clasificación visual (VSG) diseñados para la madera nueva no fueron considerados apropiados para esta tarea, donde son parámetros comunes las grietas y las torsiones. Por ello propusieron un sistema de clasificación que consideró ciertos parámetros aplicables a la madera recuperada. Además, se exploraron técnicas de ensayos no destructivos (NDT) usados en árboles en pie, troncos y madera aserrada, y en la evaluación estructural de madera existente. El objetivo de esta investigación fue evaluar las opciones para estimar las propiedades mecánicas y la densidad de la madera recuperada, con el fin de promover su reutilización en aplicaciones estructurales.

Los resultados obtenidos por Llana et al. (2023) concluyeron que los VSG para la clasificación de la resistencia no son favorables, dado que resultan en el rechazo del 95 % de la madera recuperada (ver Figura 45). Eso demostró que los VSG no son efectivos para estimar las propiedades mecánicas del material, por lo que, y con base en los resultados de las pruebas destructivas realizadas, sugirieron que la madera recuperada puede utilizarse como si fuera como madera nueva. Los investigadores observaron que las pruebas no destructivas (como el ultrasonido, la vibración longitudinal, la extracción de virutas de perforación y la resistencia a la perforación) son aplicables y confiables para la estimación de las propiedades estructurales de la madera recuperada, y destacaron la necesidad de establecer un procedimiento estandarizado para clasificar la madera recuperada y así facilitar su reutilización con propósitos estructurales.



**Figura 45**

Gráfico de carga-deformación en probetas según los tres modos de fallo detectados durante el ensayo: tensión, cizalle y compresión (Llana et al., 2023).

El estudio de Carmona & Durán (2005) abordó la eficacia de diferentes preservantes en la madera de pinus radita frente al ataque de termitas subterráneas (*reticulitermes hesperus*) en Chile. La aparición de estas termitas en Santiago y la V región ha revelado una falta de información sobre el uso adecuado de la madera y la necesidad de medidas preventivas y normativas. El objetivo de ese estudio fue proporcionar información sobre productos al-

ternativos de protección y las dosis recomendadas para la impregnación de la madera de *pinus radiata*. Las probetas fueron expuestas a mini colonias de termitas durante dos meses en condiciones óptimas para observar el actuar de dichos insectos. Carmona & Durán (2005) confeccionaron una novedosa herramienta metodológica para evaluar y cuantificar el grado de daño causado por el ataque de termitas en las piezas de madera, generando una tabla donde caracteriza el nivel de daño observado que experimentaron las probetas en cuatro grados, desde sin ataque 0 hasta ataque fuerte 3. El estudio concluye que la actividad de las mini colonias de termitas disminuye progresivamente con el tiempo, especialmente tras el contacto con la madera preservada. Los investigadores sugieren la implementación de medidas de capacitación y normativas para el uso adecuado de la madera y productos elaborados en base a ella, con el fin de prevenir el ataque de termitas subterráneas.

## 2.5 COMENTARIOS FINALES

A modo de cierre de esta sección de revisión bibliográfica se concluye que la evaluación de las estructuras patrimoniales y la caracterización mecánica de la madera existente son fundamentales para la conservación y la reutilización de los elementos estructurales históricos. Diversos estudios han abordado estos aspectos, proporcionando información valiosa sobre el envejecimiento de la madera y su viabilidad estructural. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes de las investigaciones revisadas, las cuales se han agrupado en ítems por la afinidad en el tema que abordaron:

- Los estudios en torno a evaluación de las propiedades mecánicas de la madera antigua o recuperada han demostrado que esta puede conservar sus propiedades, respecto a la comparación con la madera nueva, incluso después de eliminar defectos como los nudos. En cuanto al tiempo de uso, la especie y la función original de la madera, ninguna de estas propiedades demostró tener una influencia significativa en la resistencia y rigidez del material.
- El envejecimiento natural y acelerado de la madera se ha abordado ampliamente en investigaciones en las que se ha observado que la madera envejecida puede mantener o aumentar ciertas propiedades mecánicas, aunque la resistencia a la tracción puede variar. También se ha identificado en este aspecto que los efectos ambientales y el tipo de madera influyen en los cambios que se han evidenciado, y que las pruebas no destructivas son cruciales para evaluar las propiedades del material sin comprometer la integridad estructural.
- La reutilización de la madera en la construcción presenta oportunidades sostenibles y beneficiosas, al evitar la necesidad de construir nuevas estructuras que pueden generar más gastos y afectar el patrimonio histórico. Es crucial comprender las propiedades mecánicas de la madera en construcciones históricas para su conservación y reutilización estructural. En este contexto, las pruebas no destructivas (NDT) son esenciales para evaluar la integridad de la madera sin comprometer su valor patrimonial.
- La clasificación visual estándar no es adecuada para la madera recuperada, por lo que se debe adoptar o trabajar en un enfoque alternativo. En ese sentido, dado que las pruebas no destructivas son esenciales para evaluar las propiedades y la densidad de la madera, se considera que facilitan la reutilización estructural del material.
- La evaluación estructural de edificaciones históricas de madera requiere el uso de métodos que vayan más allá de las normativas actuales. Los ensayos no destructivos, proporcionan una caracterización precisa.



ARCHIVO PROPIO, 2024

## CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE ENTRAMADO DE MADERA EN LA CIUDAD DE VALPARAÍSO, CHILE

El presente capítulo aborda un estudio descriptivo para la caracterización de los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso, desde una perspectiva histórica y constructiva. La sección 3.1 incluye una contextualización histórica en torno a los fenómenos urbanos, sociales y arquitectónicos que se vinculan a la aparición del sistema constructivo en la ciudad de Valparaíso, y describe la configuración actual de los barrios que los comprenden. Luego, la sección 3.2 describe en detalle el sistema constructivo conocido como tabique-adobillo, incluyendo aspectos técnicos y constructivos, realizando un análisis crítico de su origen y evolución (sección 3.2.1) a lo largo del tiempo, y analizando las diversas tipologías existentes (sección 3.2.2). Por último, la sección 3.2.3 aborda una descripción de las especies madereras más utilizadas en estas construcciones.

### 3.1 CONTEXTO HISTÓRICO Y APARICIÓN DE LA ARQUITECTURA EN MADERA

La población de Valparaíso experimentó un notable aumento entre los años 1810 y 1822, alcanzando los 16.000 habitantes y una población flotante de más de 3.000 marinos nacionales y extranjeros, consolidándose, así como la segunda ciudad más poblada del país (Jorquera & Cisternas, 2016; Urbina, 2011). Este crecimiento se debió en gran parte a su desarrollo como puerto principal, que atrajo a comerciantes y marineros de diversas nacionalidades, impulsando su economía y expansión urbana. Valparaíso se convirtió en un punto estratégico para el comercio marítimo, especialmente durante la independencia de Chile, lo que incentivó su crecimiento demográfico y generó la autoconstrucción de viviendas en las quebradas de los cerros (ver Figura 46), donde la clase obrera y los sectores populares se establecieron en conventillos, mientras que en la parte plana de la ciudad los cités (Urbina, 2011).

La transculturación que comenzó a partir de la segunda mitad del siglo XIX se caracteriza por la aparición de barrios con técnicas constructivas híbridas. Estas técnicas combinaban sistemas constructivos tradicionales de entramados de madera y las técnicas extranjeras, adaptados a la tipología de los cerros porteños como el cerro Alegre y Concepción (Bustos, 2023; Jiménez, 2014). Los entramados de madera se integraron de manera efectiva, proporcionando una solución adecuada para las condiciones geográficas y sísmicas de la zona, y contribuyendo a la identidad arquitectónica única de estos barrios.



**Figura 46**  
Fotografía de Rafael Castro y Ordoñez en 1864, construcciones de viviendas en la quebrada de los cerros en Valparaíso.

A mediados del siglo XIX, la rápida expansión de la ciudad y el incremento de la población extranjera hicieron necesaria la construcción acelerada de viviendas. Estas casas, que “parecían colgar de los cerros” (Jorquera, 2022, p. 43), fueron edificadas utilizando un nuevo sistema constructivo conocido como técnica mixta tabique-adobillo. Con este innovador método, los pobladores comenzaron a construir estructuras residenciales de dos y tres pisos al estilo europeo, caracterizadas por “la verticalidad que ha sido uno de los tantos obstáculos superados casi de manera inconsciente por los porteños” (Urbina, 2011, p. 61). Este tipo de construcciones de madera, casi estandarizadas, permitieron levantar obras más livianas y de bajo costo, facilitando una mayor rapidez en la ejecución de los proyectos de construcción.

La Figura 47 presenta tres planos históricos de Valparaíso, abarcando un periodo significativo desde 1838 hasta 1902, y reflejando el notable crecimiento y desarrollo urbano de la ciudad en términos de infraestructura y organización. El primer plano, de 1838, se centra en la bahía de Valparaíso, destacando su topografía y el crecimiento urbano, especialmente en el sector del Almendral. El segundo mapa, de 1879, ofrece una vista detallada de las calles, edificios y áreas urbanas de Valparaíso. Este mapa pone énfasis en la planificación y desarrollo urbano, subrayando la importancia de la infraestructura y el transporte en la ciudad. El tercer mapa, de 1902, muestra la disposición detallada de las manzanas y calles, con numeración específica para la administración urbana. En este mapa se destacan sectores específicos con letras grandes, indicando distritos o barrios.



(a)



(b)



(c)

**Figura 47**  
Mapas de Valparaíso: (a) se visualiza el desarrollo urbano en el sector del Almendral, la meseta se encuentra natural, 1838; (b) se visualiza una trama urbana bien definida en los cerros de Valparaíso, 1879; (c) se puede ver la trama urbana completamente consolidada, 1902. Fuente: Cartografía histórica de Valparaíso.

Asimismo, la población se vio obligada a construir edificios que fueran sismorresistentes debido a la alta sismicidad del territorio. Tras enfrentar varios eventos de alta intensidad en los años 1730, 1822, 1851, y 1906 (Memoria Chilena, 2021), la cultura constructiva de Valparaíso se adaptó a una arquitectura antisísmica, donde la madera se convirtió en el principal material de construcción, aclamado por su buen comportamiento ante estos eventos. La Figura 48 ilustra como este tipo de construcciones se emplazaron sin problemas en los cerros, demostrando la versatilidad de sus estructuras, que pudieron adaptarse eficazmente a la pendiente y a la compleja topografía.



**Figura 48**  
Fotografía de Félix LeBlanc. Vista de las construcciones en los cerros vislumbrando una urbanización en crecimiento.

En particular, los cerros Alegre, Concepción y la parte baja de Playa Ancha, se caracterizaron por ser barrios con una fuerte influencia extranjera, exhibiendo viviendas con evidentes rasgos de la arquitectura inglesa del siglo XIX, configurando así barrios con aires europeos (Jiménez, 2014). Waisberg (1988) estudió principalmente los inmuebles tipo “casona” ubicados en el cerro Playa Ancha, construcciones, destinadas principalmente a la vivienda configuradas con sistemas constructivos de entramado en madera de pino Oregón y roble y grandes escuadrías (4”x 6”, 4”x 4”, 4”x 12”). A través de sus descripciones y levantamientos técnicos, Waisberg (1988) caracterizó los sistemas constructivos de entramado de madera observando diversas construcciones de finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX. Los muros estaban generalmente rellenos de bloques de adobillo, y en el exterior, algunas viviendas utilizaban revestimiento de hojalata acanalada, al igual que en la cubierta, protegiendo así las áreas expuestas a los fuertes vientos de la ciudad. Las construcciones que no requerían esta protección debido a su ubicación en los cerros eran revestidas con tablas traslapadas y sus terminaciones eran, en muchos casos de madera de pino Oregón, raulí, laurel o álamo (1”x 4”, 1”x 5”, 1”x 6”), elegidas por su durabilidad (Waisberg, 1988).

Jiménez (2014) abordó el estudio de los sistemas estructurales de entramado de madera en las viviendas de los cerros Alegre y Concepción, construidas entre mediados del siglo XIX y principios del XX. Este estudio se basa en sistemas estructurales de entramado de madera (*timber frame*, *balloon frame* y *platform frame*) adaptados a las condiciones locales de Valparaíso. Estos cerros, caracterizados por su complejidad geográfica y sísmica, albergan un valioso patrimonio arquitectónico que necesita ser preservado adecuadamente. Se estudiaron tres inmuebles que revelaron que las estructuras de entramado de madera en estas construcciones eran híbridas, combinado con técnicas tradicionales con soluciones estructurales locales. Los entramados de madera de la ciudad de Valparaíso muestran similitudes con el sistema británico “*stud frame*”.

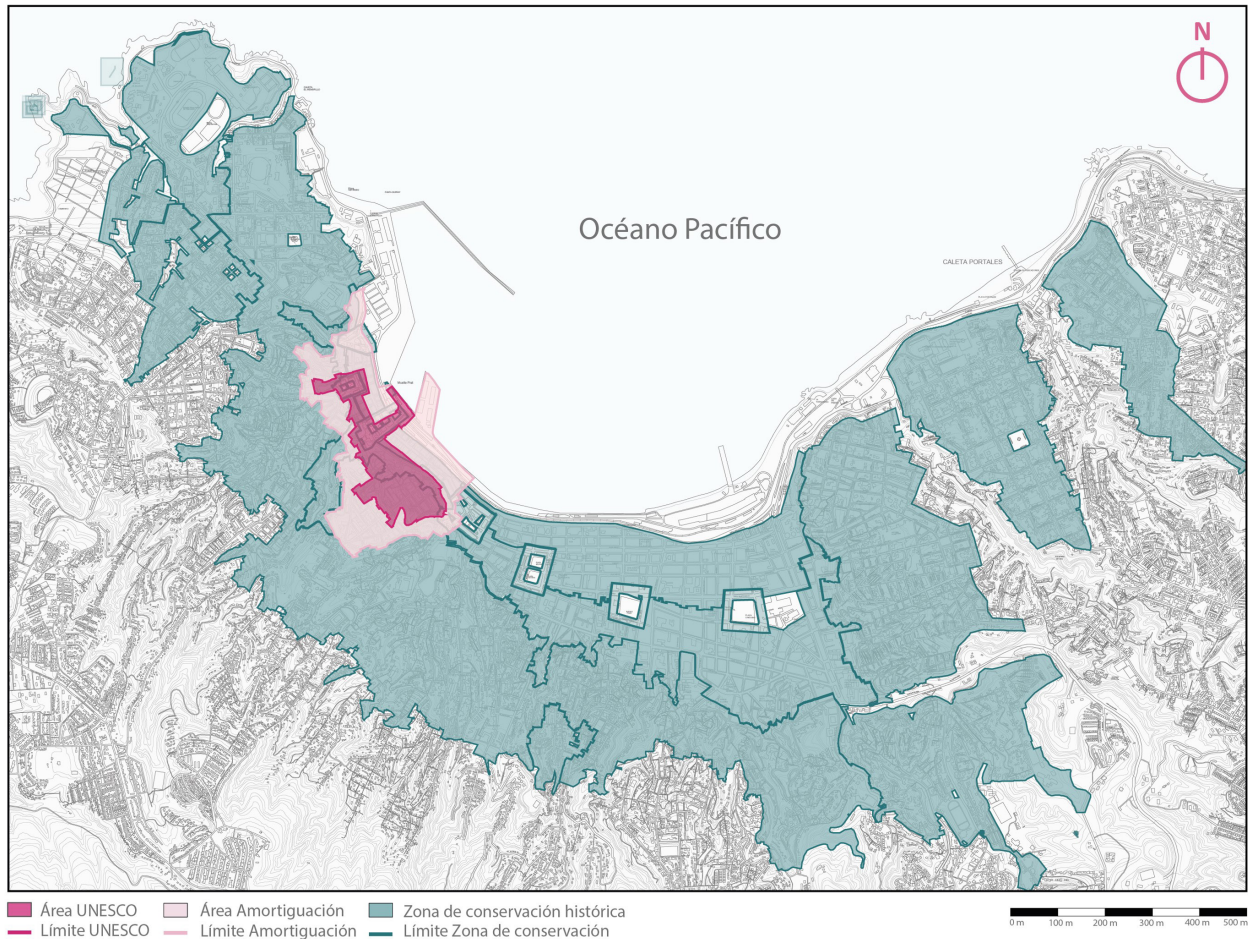
La configuración espacial de estas viviendas se distingue de las del resto de los cerros por su marcada presencia volumétrica. Además, los detalles constructivos revelan influencias de estilos neogótico y neoclásico. Estas características pueden atribuirse a la participación de profesionales de diversas procedencias como arquitectos, constructores e ingenieros, con raíces en países como Inglaterra, Francia, Chile, Italia, entre otros; pues es precisamente esa diversidad de influencias la que contribuye significativamente a la singularidad arquitectónica de los cerros Alegre, Concepción y Playa Ancha, convirtiéndolos en destacados hitos en la arquitectura residencial de Valparaíso (ver Figura 49). Actualmente, los cerros Alegre y Concepción pertenecen al casco histórico de la ciudad, y conservan íntegramente numerosos ejemplares de este tipo de construcciones con entramado en madera y alto valor patrimonial.



**Figura 49**

Fotografías de viviendas de entramado en madera. (a) vivienda en cerro Alegre, (b) vivienda en cerro Concepción y (c) vivienda en Playa Ancha.

El casco histórico de Valparaíso fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en el año 2003, en reconocimiento a su testimonio excepcional de la temprana globalización del siglo XIX (ver Figura 50). Este hecho convirtió al Puerto de Valparaíso en una terminal líder en las rutas navieras de la costa Pacífico de Sudamérica. La arquitectura del área presenta una variedad de tipologías y estilos, aplicados a construcciones que van desde viviendas sencillas hasta edificios monumentales en el centro de la ciudad, pasando por viviendas residenciales y colectivas. Este diverso paisaje arquitectónico también refleja el uso de distintos sistemas constructivos, entre ellos el tabique-adobillo.



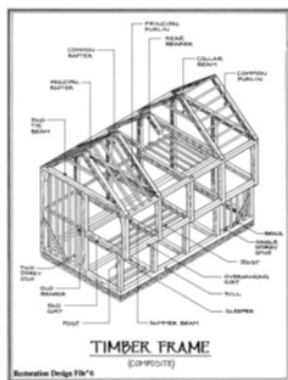
**Figura 50**  
Límites de las zonas de protección patrimonial UNESCO en Valparaíso.

## 3.2 EL SISTEMA CONSTRUCTIVO TABIQUE-ADOBILLO

### 3.2.1 ORÍGENES Y EVOLUCIÓN

El tabique-adobillo es un sistema constructivo que tiene sus bases originales en los sistemas conocidos como *timber frame*, *balloon frame* y *platform frame* (Jiménez, 2014). Según Jiménez (2014), las diferencias entre estas tipologías son sutiles y se relacionan con la configuración de los muros y las dimensiones de las escuadrías madereras. Los sistemas tipo *timber frame* o entramados pesados, fueron pioneros en Inglaterra a partir del siglo XII, y utilizaban elementos de grandes escuadrías. En contraste, los sistemas conocidos como *balloon* y *platform frame*, presentaron una evolución del entramado pesado, reduciendo la sección de sus elementos y simplificando la configuración de los marcos. En Valparaíso, los entramados se reconocen similares al sistema tipo plataforma (*platform frame*). Sin embargo, las escuadrías de sus elementos estructurales son superiores que las asociadas a esta tipología en la actualidad. Esta adaptación refleja tanto la influencia de las técnicas constructivas europeas como las necesidades y condiciones locales, contribuyendo a la singularidad y diversidad del patrimonio arquitectónico de Valparaíso.

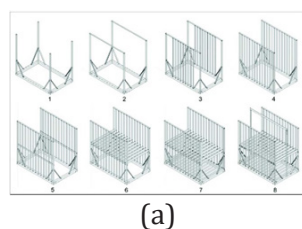
Diversos autores (Barros & Sarabia, 2016; Bustos, 2023; Jiménez, 2014) concuerdan que, con el paso del tiempo, los sistemas de entramado pesado o *timber frame* evolucionaron y aligeraron sus marcos estructurales, convirtiéndose en nuevas tipologías constructivas. Un ejemplo de esta evolución es la aparición y consolidación del sistema *stud frame* (Lewis, 2009), un entramado de madera que deriva del conocido *box frame*, y se compone esencial-



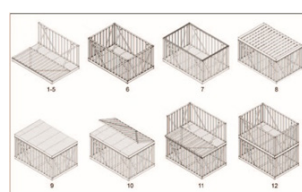
**Figura 51**  
Diagrama que ilustra una composición típica del sistema box frame (Labine et al., 1980).

mente por pies derechos separados de forma equidistante (ver Figura 51). El *box frame* fue un sistema ampliamente utilizado en las construcciones rurales inglesas, configurado por un armazón primario de grandes escuadrías, y armazones secundarios que constituyen los tabiques interiores y los rellenos del marco principal, conocidos como *stud*. Estos elementos alcanzaron autonomía, desligándose del armazón principal primario, al añadirse otros elementos como las soleras, dando lugar al *stud frame* (Lewis, 2009) Esta tipología se difundió en lugares como Australia (Lewis, 2009) y Valparaíso (Jiménez, 2014).

Cabe mencionar que, a diferencia de los entramados pesados, que utilizan piezas labradas a mano conectadas mediante complejas uniones carpinteras, los sistemas de entramado ligero utilizan piezas de madera aserrada de menor escuadría, unidas mediante uniones mecánicas con clavos industrializados. Dentro de esta categoría se encuentran el sistema de globo o *balloon frame* (ver Figura 52a) y el *platform frame* (ver Figura 52b). En el sistema *balloon frame* los muros se configuran principalmente con pies derechos continuos que van desde las fundaciones hasta la techumbre, y las vigas del entrepiso descansan en piezas de 1" x 4" ubicadas entre los pies derechos, dispuestas de manera equidistante en la longitud de los tabiques. Por otro lado, el sistema marco plataforma o *platform frame*, se distingue por una construcción secuencial en la que cada piso actúa como una estructura independiente. En este caso, los tabiques del primer nivel del edificio se construyen a partir de los pies derechos, y las soluciones de entrepiso se apoyan directamente en la solera superior de los tabiques, transmitiendo sus cargas en forma axial. Los tabiques del piso superior aprovechan este entramado horizontal, ya que cuenta con el tableado del piso inferior para su construcción, utilizando pequeñas secciones de madera (2"x4", 4"x4", 4"x6") (Gil, 2017).



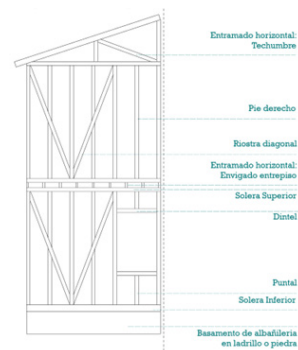
(a)



(b)

**Figura 52**  
Proceso de construcción (a) de un sistema de entramado tipo balloon frame y (b) de un sistema de entramado tipo platform frame (O'Brien, 2010).

Jorquera (2014) argumenta que los sistemas constructivos, que han sido utilizados en las construcciones de Valparaíso a lo largo del tiempo han demostrado una tendencia que sugiere que esta tecnología llegó a la ciudad casi estandarizada. Estos sistemas, basados principalmente en los sistemas *balloon frame* (ver Figura 52a), surgieron durante la revolución industrial norteamericana, lo que llevó la estandarización de los materiales que los conforman (Jorquera, 2014). Según Jiménez (2014), las estructuras predominantes en Valparaíso se asemejan más a los entramados pesados, específicamente al *stud frame* (ver Figura 53) debido a las dimensiones de los elementos estructurales, que generalmente varían entre 4" x 4" y 4" x 6", distanciándose de las medidas típicas de los entramados ligeros, que suelen oscilar entre 2" x 4" y 2" x 8". El sistema constructivo que guarda mayor similitud con el sistema arquetípico de Valparaíso es el *platform frame* (ver Figura 52b), dado que este sistema se caracteriza por la configuración independiente de cada planta (Jiménez, 2014).



**Figura 53**  
Configuración de un entramado de madera tipo stud frame (Jiménez, 2014).

### 3.2.2 CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL Y CONSTRUCTIVA

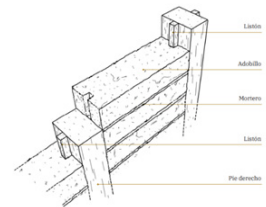
El sistema constructivo denominado tabique-adobillo corresponde a un sistema mixto conformado por elementos de madera donde los muros están rellenos con bloques de tierra (ver Figura 54). Los entramados de madera desempeñan un rol estructural fundamental en este tipo de edificaciones, encargándose de transmitir las cargas a través de sus elementos estructurales (Inat, 2011; Jiménez, 2014). Además, se caracterizan por ser estructuras sismorresistentes gracias a la flexibilidad de la madera y al comportamiento semirrígido de las uniones, que se encargan de disipar la energía sísmica (Inat, 2011).



**Figura 54**  
Fotografías de viviendas de entramado de madera en cerro Concepción.

Por otro lado, la tierra se presenta en formato de bloque, conocido como adobillo, y tiene la función de rellenar los muros de entramado, dispuesto entre los pies derechos, tal como se muestra en la Figura 55. De acuerdo con Dávila y Contreras (2022), el sistema de encastre de los bloques de adobillo responde a la necesidad de crear un sistema antivuelco en caso de sismo. Las medidas del adobillo pueden ser de 45 x 10 x 10 cm, o de 45 x 15 x 10 cm, siendo ambas de menor dimensión al tamaño común de un adobe en Chile, que es aproximadamente de 60 x 30 x 10 cm (Barros & Sarabia, 2016; Jorquera, 2022).

En relación con los muros de carga de los sistemas constructivos de entramado de madera (Jiménez, 2015), estos se configuran mediante pies derechos confinados entre elementos horizontales conocidos como soleras superiores e inferiores. Los pies derechos se conectan con las soleras mediante uniones ensambladas tipo caja y espiga, con intervalos que varían entre las 16" y 18" (40-60 cm) (Jiménez, 2015). Generalmente, los diafragmas verticales se rigidizan con riostras diagonales que dividen el pie derecho intermedio en dos. Estas se disponen de manera aleatoria en los muros de las estructuras. La sección de los elementos madereros puede variar; sin embargo, coinciden en que para los tabiques interiores se utilizan elementos de sección cuadrada de 4" x 4", mientras que para los muros de fachada pueden llegar a 4" x 6". En los edificios de más de dos plantas, las escuadrías pueden alcanzar las 6" x 6" en las plantas inferiores, disminuyendo su sección hacia las superiores (Jiménez, 2015).



**Figura 55**  
Sistema tabique-adobillo (Dávila & Contreras, 2022).

Como se puede observar en la Figura 56, los muros se configuran como sistemas independientes en cada nivel, interrumpidos por la estructura del entrepiso, asemejándose a las tipologías *stud o platform frame*. Las estructuras de entrepiso se configuran como plataformas horizontales independientes de los elementos verticales del muro. Dichos entrepisos se componen de viguetas de sección rectangular, generalmente de 2 x 5" simplemente apoyadas sobre las soleras inferiores de los muros o fundaciones, según corresponda. Por lo general, el revestimiento de los envigados, con los que se configuran los cielos y suelos, se ejecutan con entablados de madera dispuestos en dirección perpendicular al envigado.



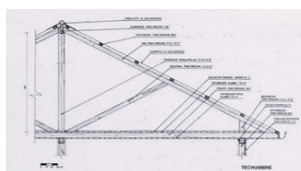
(a)



(b)

**Figura 56**

Entramado de madera tipo plataforma (independiente de cada planta): (a) muro de entramado del tercer piso y (b) entramado ubicado en subterráneo. Vivienda ubicada en el cerro Alegre.



**Figura 57**

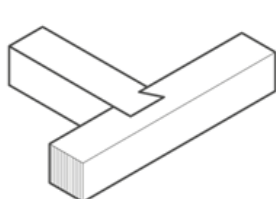
Detalles constructivos. Vivienda Quebrada Verde N° 192 de Playa Ancha, detalle de techumbre. (Waisberg, 1988, p.79).

En cuanto a la estructura de la techumbre (ver Figura 57), esta se construye generalmente con cerchas de madera, tijerales o vigas horizontales, que forman una estructura secundaria destinadas a absorber su propio peso, y transmitirlo a los tabiques soportantes, proporcionando así la solución del cielo. Vale decir que, esta estructura no solo es la encargada de soportar el peso de la techumbre, sino también otras cargas, como las generadas por la lluvia, la nieve y el viento. (Barros & Sarabia, 2016; Jiménez, 2014).

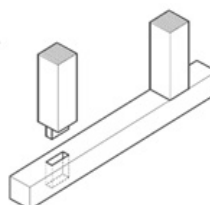
Dávila y Contreras (2022) señalan que las uniones carpinteras más comunes en Valparaíso son el ensamble de caja y espiga, utilizado en la unión de soleras con pies derechos; el ensamble de espera, empleado en diagonales; el ensamble de media madera, usado en las uniones de solares en esquina; el empalme rayo de Júpiter, aplicado en uniones de vigas; y el ensamble cola de milano (ver Figura 58). Tradicionalmente, estas uniones se refuerzan con clavos de hierro forjado hechos a mano, hasta la llegada del clavo industrializado, lo que mejoró la estabilidad y durabilidad de las estructuras.

**Figura 58**

Tipos de uniones carpintera características de los entramados de Valparaíso: (a) unión ensamble tipo cola de milano (González, 2019), (b) unión ensamble tipo caja y espiga y (c) ensamble embarbillado (Jiménez, 2014).



(a)



(b)



(c)

En la actualidad, existen diversos antecedentes y estudios publicados por autores como Jiménez (2014), Gil (2017) y González (2019) que caracterizan y describen de manera gráfica, técnica y estructural las uniones carpinteras más utilizadas en las edificaciones de entramados de madera en Valparaíso. Una de las uniones más utilizadas es la de ensamble de caja y espiga, que conecta dos piezas desde sus extremos. En este tipo de ensambles, la parte de la pieza adelgazada (espiga) se inserta en el tallado de la otra pieza, identificada como caja, la cual tiene forma de rectángulo (ver Figura 59).



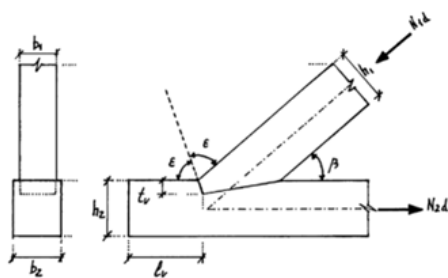
(a)



(b)

**Figura 59**  
Unión de caja y espiga, en una construcción en el cerro Alegre de Valparaíso (Jiménez, 2014).

La técnica de la unión de empalme, también conocida como embarbillado (ver Figura 60), se caracteriza por encajar una pieza comprimida en otra mediante un entallado. Este tipo de unión se utiliza para resolver encuentros en armaduras de techumbres (Arriaga et al., 2011). En Valparaíso, además, un tipo de unión en las construcciones conocido como embarbillado frontal o unión espera, que consiste en la unión de un pilar con diagonales o la unión de la cuerda superior con el tirante, conformando así la cercha (ver Figura 60a) o costaneras (ver Figura 60b).



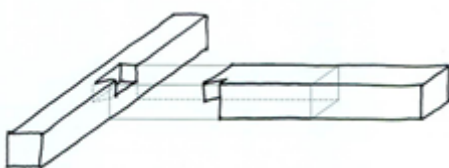
(a)



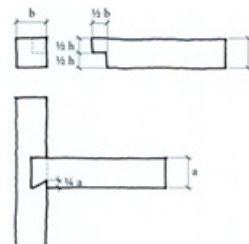
(b)

**Figura 60**  
Tipos de ensamble embarbillado frontal simple: (a) diagrama de unión de techumbre (Arriaga et al., 2011, p. 33) y (b) unión embarbillada ubicada en vivienda en cerro Alegre.

Otro tipo de unión es el ensamble de cola de milano, que se caracteriza por tener una configuración tipo caja y espiga con forma de trapecio isósceles. Este ensamble recibe su nombre porque, cuando se visualiza en planta, se asemeja a la cola de muchas aves rapaces y golondrinas. Se utilizaba preferentemente para transmitir esfuerzos de tracción y, en los edificios de entramado de madera, es comúnmente empleado en el encuentro intermedio entre las soleras inferiores (González, 2019, p. 124), tal como se observa en la Figura 61.



(a)



(b)

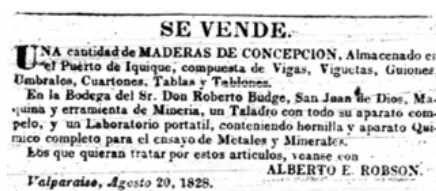
**Figura 61**  
Unión cola de Milano: (a) esquema de la unión y (b) detalle de las medidas y como se acopla la unión (González, 2019, p. 127).

### 3.2.3 ESPECIES MADERERAS EXISTENTES EN LOS ENTRAMADOS DE MADERA TRADICIONALES DE VALPARAÍSO

De acuerdo con Jiménez (2014), la industria mecánica de la madera en Chile comienza a desarrollarse a mediados del siglo XVIII en el sur del país, donde hasta hoy se encuentra la mayor cantidad de bosques de los que se extrae la materia prima. Entre finales del siglo XIX y comienzos del XX, la madera se convirtió en material de construcción predominante en las edificaciones en Chile. En particular, en la ciudad de Valparaíso, el uso de este mate-

rial en la construcción se asociaba a la importancia del puerto y su impacto en el desarrollo urbano de la ciudad (Estrada, 1987; Jiménez, 2014; Salazar, 2014). Los barcos que llegaban desde Norteamérica o Europa a Valparaíso traían madera ya elaborada en los formatos de construcción. La llegada de estos recursos significó la apertura de nuevas posibilidades arquitectónicas y convirtió a Valparaíso en el centro del desarrollo industrial y de nuevas técnicas constructivas.

De esta manera, especies como el roble, el abeto Douglas (conocido como pino Oregón), el raulí y el álamo, entre otros, fueron comunes en los edificios de la época. Algunas de estas maderas se extraían y aserraban en el país, mientras que otras, como el pino Oregón y la caoba, se importaban en formato comercial. Estos productos se comercializaban en bruto y se dimensionaban en los aserraderos del puerto. El traslado de estas maderas se realizaba a través del puerto o por ferrocarril (Salazar, 2014). En la Figura 62 se muestran algunos anuncios que reflejan la actividad comercial de la madera, con detalles sobre la disponibilidad y tipo de madera que se comercializaba a comienzos del siglo XIX en Valparaíso.

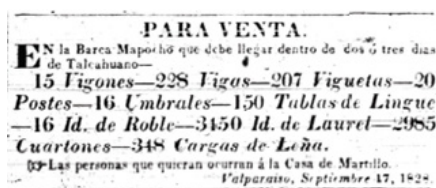


(a)

(a) Se vende

“Una cantidad de Maderas de Concepción. Almacenado en el Puerto de Iquique, compuesta de Vigas, Viguetas, Guiones, Umbrales, Cuartones, Tablas y Tablones.(...)” Valparaíso, agosto 20, 1828.

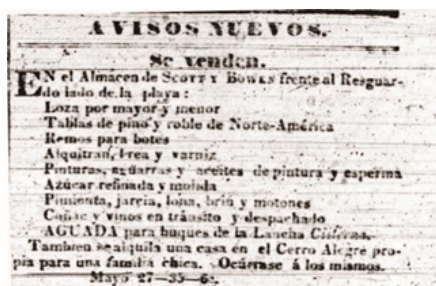
Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 20 de agosto de 1828. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso.



(b)

(b) “En la barca Mapocho que debe llegar dentro de dos o tres días de Talcahuano- 15 Vigones - 228 Figas - 207 Viguetas - 20 Postes - 16 Umbrales- 150 Tablas de Lingue - 16 Id. De Roble - 3450 Id. de Laurel - 2985 Cuartones - 348 Cargas de Leña.(...)” Valparaíso, septiembre 17, 1828.

Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 17 de septiembre de 1828. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso.



(c)

(c) Se venden

En el almacén de Scott y Bowes,“(...) Tablas de pino y roble de Norte-América. (...)”.

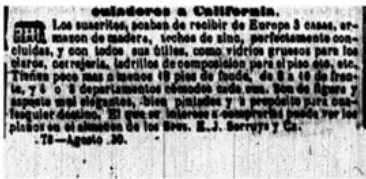
Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 21 de mayo de 1840. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso

Figura 62

Anuncios de venta de productos de construcción por comerciantes (Jiménez, 2014, p. 116).

El puerto no solo fue la entrada y salida de población del país, sino también el principal canal de intercambio comercial. Jiménez (2014) muestra un registro de los anuncios publicitarios de la época, que atestiguan la diversidad de productos para la construcción que eran importados y comercializados en Valparaíso, incluyendo maderas, planchas de zinc e incluso casas prefabricadas (ver Figura 63). Las especies madereras más comunes en estas publicaciones eran el roble y el pino Oregón, que se extraían del territorio nacional, pero también importaban. Asimismo, se comercializaban otras especies que se utilizaban para revestir interiormente las construcciones, tales como elementos de maderas de raulí, álamo o laurel, para los entablados de

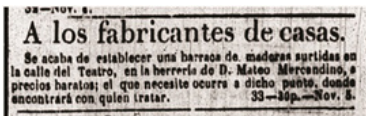
piso y cielo. Estos productos tenían escuadrías que variaban entre 1"x 4", 1"x 5", 1"x 6" (Waisberg, 1988).



(a) "los suscritos acaban de recibir de Europa 8 casas, armazón de madera, techo de zinc, perfectamente concluidas, y con todos sus útiles, como vidrios gruesos para los claros, cerrajería, ladrillo de composición para el piso etc. Etc.

Tienen poco más o menos 10 pies de fondo, de 8 a 10 de frente, y 4 o 5 departamentos cómodos cada uno. Son de ligera y aspecto muy elegante, bien pitadas y a propósito para cualquier destino. El que se interese a comprarlas puede ver los planos en el almacén de los Sres. E. J. Serruys y Ca." Valparaíso, agosto 20, 1850

Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 4 de septiembre de 1850. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso.



(b) "A los fabricantes de casas. Se acaba de establecer una barraza de maderas surtidas en la calle del Teatro, en la herrería de D. Mateo Mercandino, a precios baratos; el que necesite ocurra a dicho punto, donde encontrará con quien tratar."

Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 11 de noviembre de 1850. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso.



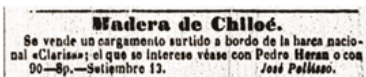
(c) "Una partida de 13000 tablas de alerce a precios cómodos." D. Ignacio Vicuña.

Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 12 de julio de 1828. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso.



(d) "Hay de Venta, en el almacén de D. Jorge Young, cantidad de tablas de pino de noruega."

Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 3 de septiembre de 1828. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso.



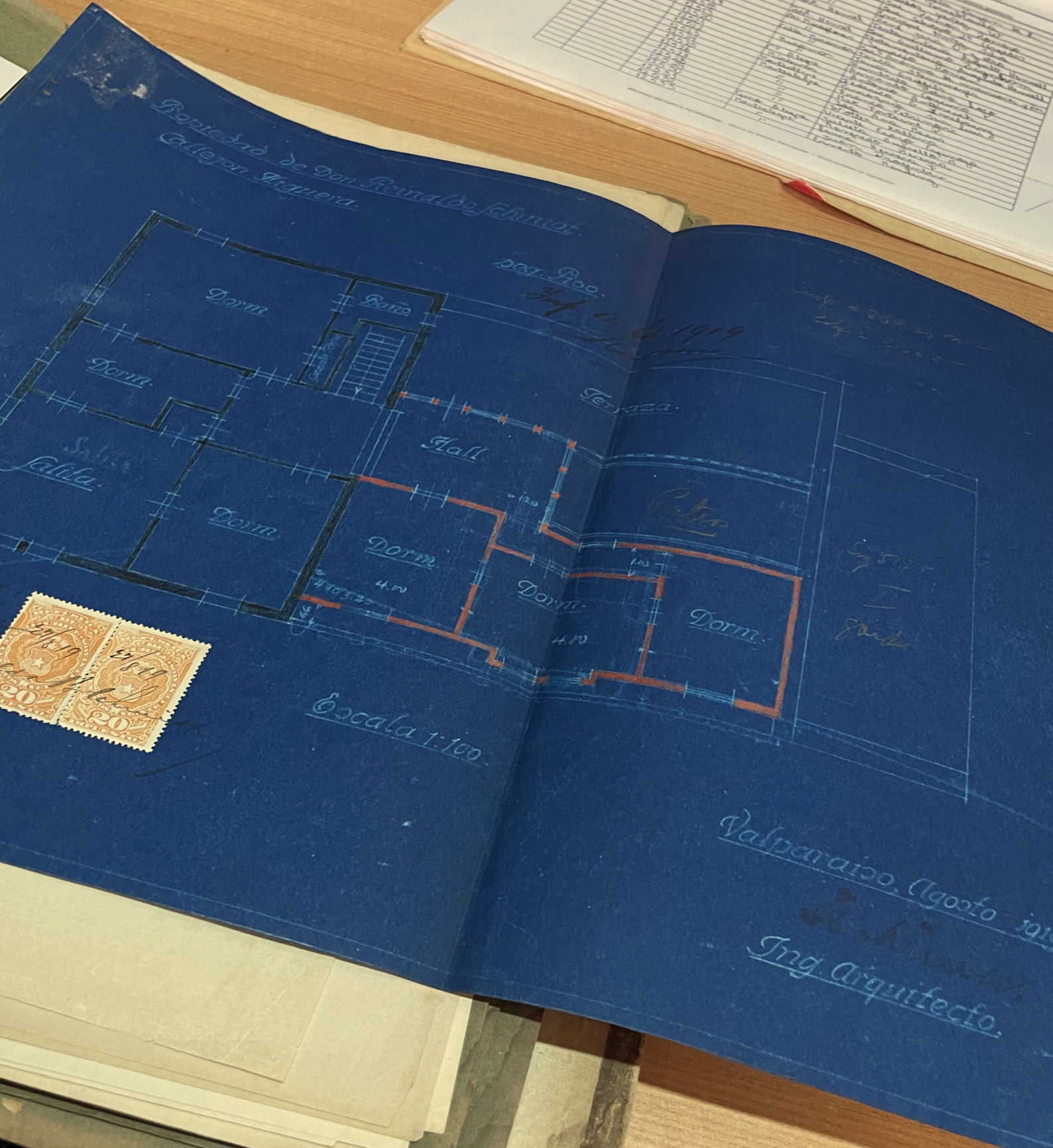
(e) "Maderas de Chiloé. Se vende un cargamento surtido a bordo de la barca nacional "Clarissa"; el que se interese véase con Pedro Hernan o con José Pellisso."

Fuente: El Mercurio de Valparaíso, 13 de septiembre de 1851. Microformatos. Hemeroteca Biblioteca Santiago Severin, Valparaíso.

Figura 63 Anuncios de la venta de madera y para la construcción de casa de madera en Valparaíso (Jiménez, 2014, p. 147).



INDICE GENERAL		CARPETAS DE EXPEDIENTES	
1	...	1	...
2	...	2	...
3	...	3	...
4	...	4	...
5	...	5	...
6	...	6	...
7	...	7	...
8	...	8	...
9	...	9	...
10	...	10	...
11	...	11	...
12	...	12	...
13	...	13	...
14	...	14	...
15	...	15	...
16	...	16	...
17	...	17	...
18	...	18	...
19	...	19	...
20	...	20	...
21	...	21	...
22	...	22	...
23	...	23	...
24	...	24	...
25	...	25	...
26	...	26	...
27	...	27	...
28	...	28	...
29	...	29	...
30	...	30	...
31	...	31	...
32	...	32	...
33	...	33	...
34	...	34	...
35	...	35	...
36	...	36	...
37	...	37	...
38	...	38	...
39	...	39	...
40	...	40	...
41	...	41	...
42	...	42	...
43	...	43	...
44	...	44	...
45	...	45	...
46	...	46	...
47	...	47	...
48	...	48	...
49	...	49	...
50	...	50	...



## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA EL LEVANTAMIENTO DE DATOS Y CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA EXISTENTE EN EDIFICIOS HISTÓRICOS

El capítulo 4 presenta la metodología de trabajo para llevar a cabo la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera estructural existente en edificios con sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera con valor patrimonial a través de ensayos experimentales. Se describen las tareas que permitieron optimizar y sistematizar las etapas de trabajo, actividades y herramientas para seleccionar casos, levantar información y conseguir muestras de piezas estructurales para su posterior caracterización y análisis mediante ensayos destructivos en el laboratorio.

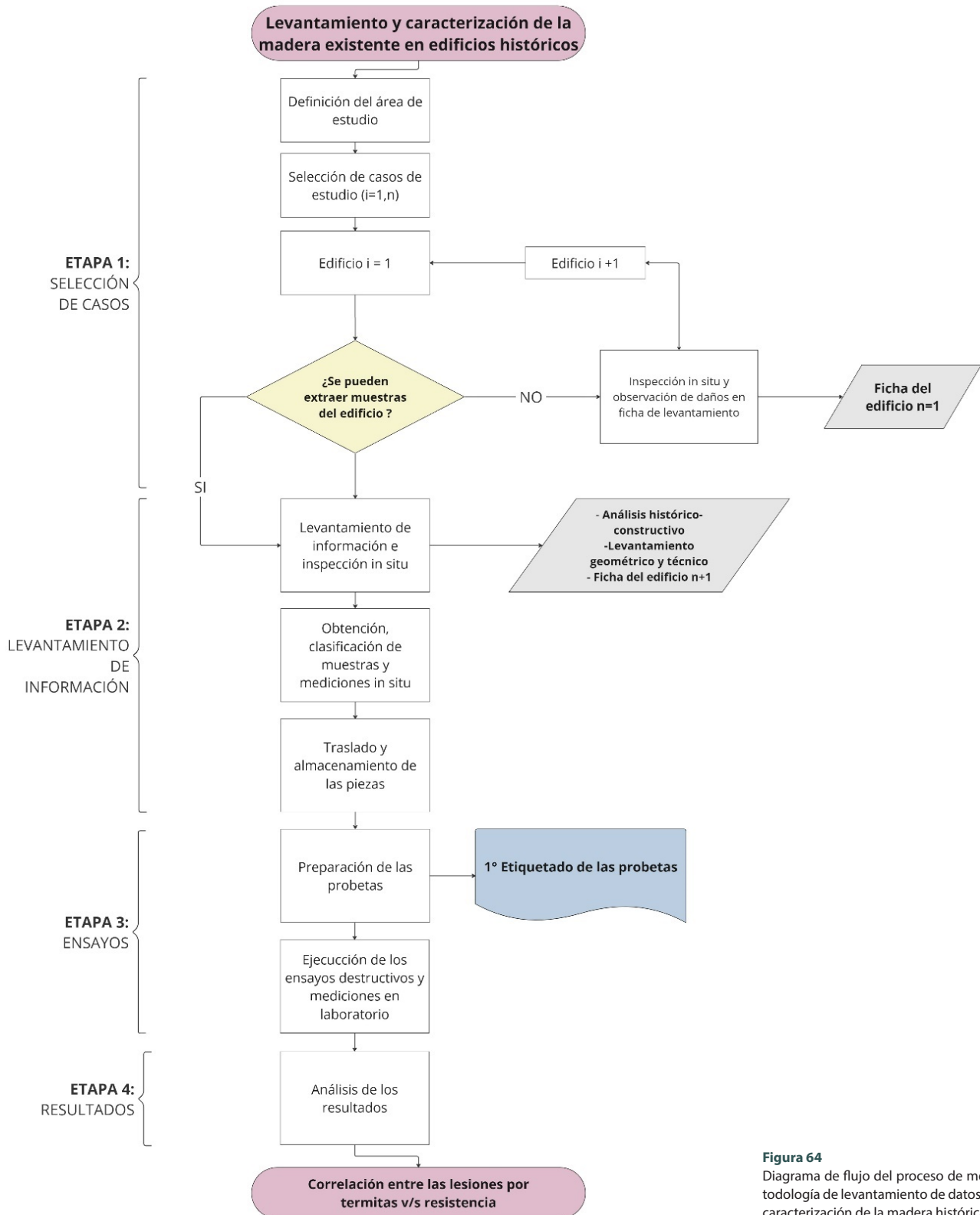
El esquema de este capítulo se divide en cinco partes. El apartado 4.1 describe la metodología propuesta mediante un diagrama de flujo detallando las etapas y actividades. El siguiente apartado 4.2 aborda las actividades de la Etapa 1, que considera la determinación del área de estudio. Posteriormente, en el apartado 4.3 se describen las actividades de la Etapa 2 “levantamiento de información”. Dentro de esta sección, se detalla el levantamiento de datos desde la inspección in situ (apartado 4.3.1), que incluye una ficha para el relevamiento de datos (apartado 4.3.2), la obtención, clasificación de muestras y mediciones in situ (apartado 4.3.3), las actividades de traslado y almacenamiento de las piezas (apartado 4.3.4). Para continuar con el apartado 4.4 que presenta la Etapa 3 de la metodología “ejecución de los ensayos”, que detalla la preparación de las probetas (apartado 4.4.1), clasificación de las probetas (apartado 4.4.2) y la ejecución de los ensayos (apartado 4.4.2). El apartado 4.5 “análisis de los resultados” describe los procedimientos contemplados en la Etapa 4 donde se implementaron marcos teóricos y procedimientos para analizar los resultados y alcanzar los objetivos propuestos.

### 4.1 DIAGRAMA DE FLUJO, ETAPAS Y ACTIVIDADES PROPUESTAS

La Figura 64 presenta un diagrama de flujo que detalla las etapas y actividades propuestas para la metodología de levantamiento y caracterización de la madera existentes en edificios históricos. Este diagrama guiará los procesos para seleccionar los casos de estudio y las muestras de madera para construir las probetas y ejecutar los ensayos destructivos hacia la determinación de las propiedades mecánicas de la madera antigua de diferentes edificios de entramado de madera.

En primer lugar, la Etapa 1 “Selección de casos” se enfoca en la definición del área de estudio desde donde se seleccionarán los casos de estudio y se extraerán las muestras que serán evaluadas en las etapas posteriores. Luego la Etapa 2, “Levantamiento de información” se enfoca en las actividades que

tienen que ver con la obtención y clasificación de las muestras de madera, así como en el traslado y preparación de las probetas para la ejecución de los ensayos. Posteriormente la Etapa 3 “Ensayos” involucra las actividades que tienen que ver con la ejecución de los ensayos destructivos y mediciones de laboratorio, permitiendo determinar las propiedades mecánicas y físicas del material. Finalmente, la Etapa 4 “Resultados” integra las actividades que tienen que ver con el análisis de los datos obtenidos en las etapas previas. A continuación, se describirán en extenso cada una de estas etapas en conjunto con los resultados obtenidos desde cada una de ellas.

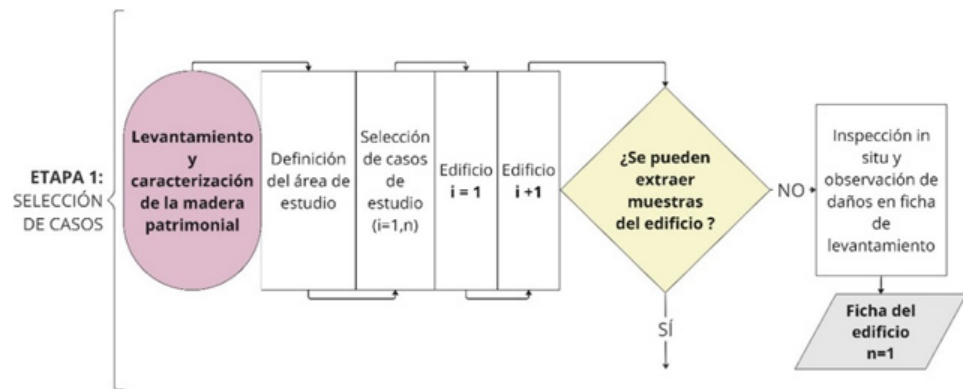


**Figura 64**  
Diagrama de flujo del proceso de metodología de levantamiento de datos y caracterización de la madera histórica.

## 4.2 ETAPA 1: SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

La Etapa 1 (ver Figura 65) considera la selección de los casos de estudio. La primera actividad de esta etapa es la “Definición del área de estudio” o las zonas territoriales de interés según de las ubicaciones de las tipologías constructivas a analizar. En este sentido se consideran los barrios históricos donde se encuentren los casos más representativos de la tipología constructiva, utilizando como referencia cualquier guía o documentación previa que clasifique las edificaciones por su valor patrimonial, como son las definiciones y declaratorias otorgadas por la UNESCO.

Una vez delimitada el área urbana de estudio se procede a realizar la “Selección de casos”. Esto implica determinar un número de edificios que cumplan con los requisitos deseados tales como la tipología estructural y material, la factibilidad de acceso e inspección al interior de la obra, y la posibilidad de obtener piezas de descarte de madera estructural. Para facilitar la identificación de casos que cumplan con estos criterios, se prefieren aquellos edificios que se encuentren en procesos de rehabilitación o intervención estructural durante la inspección. Esto permitirá observar el entramado desnudo y obtener piezas estructurales en desuso y/o dañadas debido al reemplazo de las maderas en el proceso de reforma del edificio.



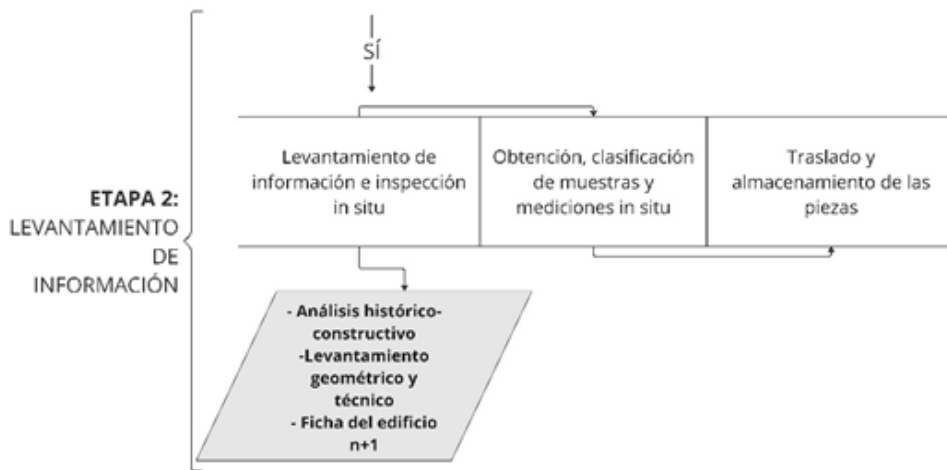
**Figura 65**  
Etapa 1: Selección de casos, de la metodología propuesta.

## 4.3 ETAPA 2: LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

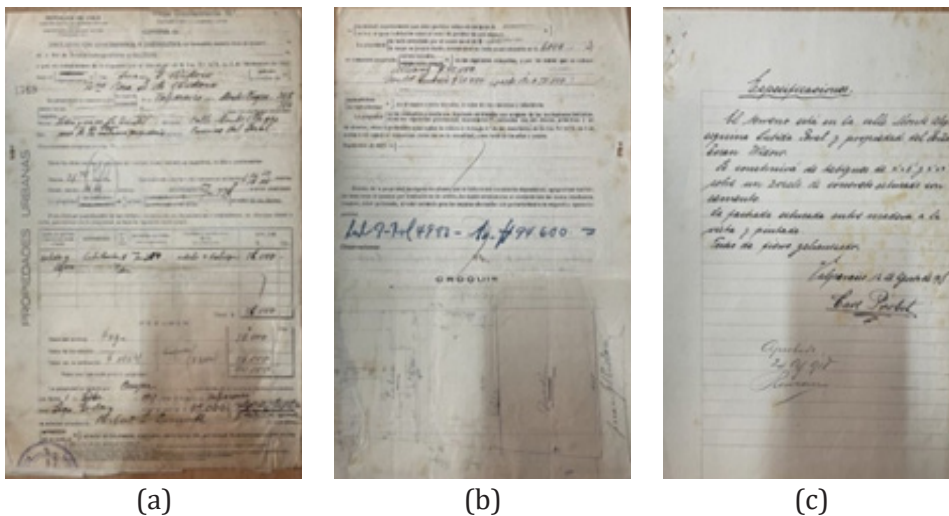
### 4.3.1 LEVANTAMIENTO DE DATOS DESDE INSPECCIONES IN SITU

Una vez definidos los casos de estudio, se procede con la etapa denominada “Levantamiento de información e inspección” (ver Figura 66) cuyo objetivo es caracterizar cualitativamente las obras, considerando aspectos relacionados con la morfología estructural, arquitectónica e histórica del edificio.

En primer lugar, esta etapa incluye la búsqueda y recopilación de información existente del inmueble a partir de archivos locales y bibliografía publicada, con el objetivo de delinear un análisis histórico-constructivo de la obra. Esto implica una revisión archivística exhaustiva desde registros municipales, bibliografía publicada, diarios, archivos locales, y cualquier otro recurso que contribuya con el reconocimiento estructural, arquitectónico y material del edificio. Esta información puede incluir croquis, planos, fotografías, especificaciones técnicas y otros documentos relevantes (ver Figura 67).



**Figura 66**  
Etapa 2: “Levantamiento de información” de la metodología propuesta.



**Figura 67**  
Ejemplo de levantamiento de información. Casa en Montea Alegre 386, cerro Alegre, Valparaíso, Chile. Archivos rescatados desde el Archivo Histórico Patrimonial – oficina de Gestión patrimonial de la Dirección de Obra Municipales de Valparaíso, DOM.: (a) declaración descriptiva y estimativa del inmueble, (b) croquis ilustrativo del emplazamiento del inmueble y (c) especificaciones técnicas.

### 4.3.2 LEVANTAMIENTO DE DATOS DESDE INSPECCIONES IN SITU

Para optimizar las actividades del levantamiento de información, en este trabajo se elaboró una ficha técnica para la recopilación de datos de diversa naturaleza de manera homogénea y sistemática. La ficha se divide en las siguientes partes: (1) Información general; (2) tipologías constructivas; (3) Revestimientos; (4) Patologías del edificio; y (5) Observaciones.

La Sección 1, “Información general”, proporciona los antecedentes generales del inmueble, tales como dirección, año de construcción, número de plantas y uso original y actual. Además, permite informar la categorización patrimonial del inmueble. La ficha también permite clasificar los casos de estudio con un número identificador (ID) para la posterior creación de bases de datos. En esta parte de la ficha, el usuario puede incluir observaciones, notas, croquis o fotos, según sea necesario (ver Figura 68).

La Sección 2, “Tipologías constructivas” considera la documentación de las técnicas constructivas o tipologías que configuran el sistema portante de la obra arquitectónica. Esta sección está dividida en dos subcategorías principales: naturaleza del sistema constructivo y materialidad de los componentes estructurales. La primera subcategoría considera si la estructura es homogénea o híbrida y permite su libre descripción, mientras que la segunda subcategoría incluye la determinación de los materiales de cada uno de los componentes estructurales del edificio mediante selección múltiple. La ficha también permite registrar las modificaciones o alteraciones que se han ejecutado en la estructura y sus componentes (ver Figura 69).

La Sección 3, “Revestimientos” contempla el registro de los materiales utilizados para revestir la estructura de la obra, abarcando las secciones: revestimiento exterior, interior y de entrepiso (ver Figura 70).

La Sección 4, “Patologías del edificio” busca relevar y caracterizar las patologías existentes en los elementos estructurales y no estructurales de los inmuebles, localizados en los revestimientos y estructuras, y, especialmente, en la madera. En la ficha se considera algunas de las patologías más comunes, tales como ataques de xilófagos (termitas), hongos, humedad y fallas mecánicas. Esta información permite al usuario clasificar de manera más exhaustiva y precisa las piezas que se rescatan para su posterior análisis (ver Figura 71).

Finalmente, la Sección 5, “Observaciones”, proporciona un espacio donde el usuario puede registrar cualquier comentario o particularidad del edificio. En el Anexo 1 se muestra la ficha completa y su aplicación a los casos de estudio seleccionados para esta investigación (ver Figura 72). El levantamiento de información y recopilación de datos a través de la ficha debe complementarse con registros geométricos, fotográficos y audiovisuales, para la posterior elaboración de planimetrías e informes técnicos. Además, se recomienda utilizar la información recabada para crear una base de datos digital que resguarde la información de manera más segura y accesible.

Ficha técnica		ID: XX	
<b>Sección 1: Información General</b>			
Nombre del Inmueble:	Foto		
Calle:			
Número:			
Cerro:			
Rol:			
Uso:			
Año de construcción:			
N° de plantas:			
Estilo arquitectónico:			
Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	Zona de Conservación Histórica
Protección Patrimonial	Sí No	Tipo:	

**Figura 68**  
Ficha técnica de recopilación de datos,  
Sección 1: Información General.

<b>Sección 2: Tipologías constructivas</b>		<b>ID: XX</b>			
<b>2.1. Sistema Estructural</b>	Único				
	Híbrido				
<b>2.2. Material Estructural</b>	Fachada principal	Mampostería en piedra	Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo		No	
		Entramado de madera relleno con adobillo			
		Madera			
		Acero/Hierro			
		Adobe			
	Muros laterales	Mampostería en piedra	Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo		No	
		Entramado de madera relleno con adobillo			
		Madera			
		Acero/Hierro			
		Adobe			
	Muros interiores	Mampostería en piedra	Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo		No	
		Entramado de madera relleno con adobillo			
		Madera			
		Acero/Hierro			
		Adobe			
	Entrepisos	Mampostería en piedra	Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo		No	
		Entramado de madera relleno con adobillo			
		Madera			
		Acero/Hierro			
		Adobe			
Techumbre	Mampostería en piedra	Adaptado o alterado	Sí		
	Mampostería de ladrillo		No		
	Entramado de madera relleno con adobillo				
	Madera				
	Acero/Hierro				
	Adobe				

**Figura 69**  
 Ficha técnica de recopilación de datos,  
 Sección 2: Tipologías constructivas.

Sección 3: Revestimientos		ID:XX
Revestimiento exterior	Zinc	
	Yeso + pintura	
	Bahareque (listones de madera con tierra)	
	Madera	
	Otro	
Revestimiento interior	Zinc	
	Yeso + pintura	
	Bahareque (listones de madera con tierra)	
	Madera	
	Baldosas	
	Otro	
Revestimiento de entrepiso	Entablado de Madera	
	Baldosas	
	Plancha de madera (OSB)	
	Otro:	

**Figura 70**  
 Ficha técnica de recopilación de datos,  
 Sección 3: Revestimientos.

Sección 4: Patologías del edificio		ID:XX			
4.1. Patologías presentes en la estructura	Tipología de la lesión	Sintomatología	Agente patológico	Lesión Si/No	
	Biológicas	A) Pudrición parda	2) Presencia de xilófagos (termitas)	1) Presencia de hongos	
		B) Pudrición blanca			
		C) Degradación			
	Mecánicas	D) Agrietamientos	3) Cargas, sobrecargas y aplastamiento	4) Incremento esbeltez	
		E) Deformaciones	5) Aplastamiento	6) Asentamiento	
			7) Colapso		
			F) Fisuraciones	8) Dilataciones	9) Retracciones
		G) Nudos	10) Nudos vivos	11) Nudos muertos	
			I) Erosión	12) Presencia de agua	13) Acción del viento
		Físico - químicos	J) Meteorización	14) Condiciones atmosférica	
	K) Suciedad		15) Deposito	16) Excremento animales	
			L) Humedad	17) Capilar	18) Filtración
	19) Condensación				
	20) Obra				
	21) Accidental				

**Figura 71**  
 Ficha técnica de recopilación de datos,  
 Sección 4: Patologías en el edificio.

**Sección 5: Observaciones****ID:XX****4.3.3 OBTENCIÓN, CLASIFICACIÓN DE MUESTRAS Y MEDICIONES**

Luego de completar el levantamiento de información, se procede a la etapa de “Obtención de muestras y mediciones in situ”. Esta fase incluye, en primer lugar, la selección de piezas estructurales, tanto dañadas como intactas, que serán utilizadas para la ejecución de los ensayos destructivos. Para la extracción de las muestras estructurales, es necesario considerar diversos escenarios posibles. Por ello, es fundamental contar con un protocolo de extracción seguro que utilice alzaprimas y garantice la seguridad de la estructura, en caso de ser necesario. Se recomienda realizar este trabajo con el apoyo de especialistas en construcción que puedan asegurar la seguridad en la obra en todo momento.

**4.3.4 TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO**

Una vez obtenidas las piezas, es necesario gestionar las actividades de “Transporte y almacenamiento”. En esta fase, es crucial manipular adecuadamente las muestras para evitar cambios substanciales en su condición original hasta que se realicen las probetas. El transporte de las piezas debe llevarse a cabo utilizando vehículos específicos, dependiendo de la longitud de las piezas, que pueden llegar a medir más de 3 metros de largo en el caso de vigas o pilares.

Para el almacenaje de las piezas, se deben seguir los estándares que rigen las condiciones ambientales. En Chile, la norma NCh968 (Instituto Nacional de Normalización, 1986b) establece que las muestras destinadas a ser probetas deben mantenerse en un ambiente con temperatura controlada ( $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) y una humedad relativa ( $65 \pm 2\%$ ), para alcanzar gradualmente un contenido de humedad aproximado al 12%. Estos cuidados son necesarios para minimizar la frecuencia e intensidad de grietas y rajaduras causadas por el proceso de secado.

Una vez que las piezas estén correctamente almacenadas, se debe medir nuevamente el contenido de humedad y registrar estos valores diariamente hasta el día de la ejecución de los ensayos. Este seguimiento minucioso garantiza que las condiciones de las piezas se mantengan estables, permitiendo obtener resultados precisos y fiables en los ensayos experimentales.

**4.4 ETAPA 3: EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS****4.4.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS**

En la Etapa 3 (ver Figura 73) de la metodología, la actividad inicial es la “Preparación de las probetas” a partir de las piezas recuperadas de los casos de estudio. Esta fase incluye la construcción de las probetas y la elaboración de la matriz de ensayo, considerando aspectos como los tipos de ensayos que se efectuarán y el número de probetas por ensayo. Esta tarea puede ser com-

**Figura 72**

Ficha técnica de recopilación de datos, Sección 5: Observaciones.

pleja cuando se trata de analizar maderas antiguas o existentes en edificios históricos, especialmente si no se dispone de material suficiente para obtener un número adecuado y homogéneo de probetas para todos los ensayos planificados.

La construcción de las probetas y su distribución implica llevar a cabo una clasificación preliminar de las piezas estructurales recuperadas de edificios históricos. Este proceso tiene como objetivo cubicar el material y distribuirlo de manera más homogénea para la posible para la fabricación de las probetas necesarias de cada ensayo. Las piezas rescatadas se reclasifican, agrupándolas en categorías generales y describiendo sus principales atributos. Además, se definen de manera preliminar las probetas que se construirán a partir de cada pieza.

La matriz experimental para ensayos destructivos de madera se diseña para evaluar y comparar las propiedades mecánicas de muestras de madera nueva y antigua, abarcando diferentes especies y condiciones de deterioro. Este estudio se enfoca en realizar ensayos mecánicos, como compresión paralela y perpendicular a la fibra, tracción perpendicular, cizalle paralelo y flexión estática, siguiendo las normas estandarizadas. Previo a los ensayos, se registran parámetros físicos como humedad, volumen y masa de las probetas, utilizando equipos especializados. Los ensayos se deben realizar con equipos de precisión que permiten la recolección y visualización de datos a tiempo real. Los resultados obtenidos se analizan estadísticamente, comparando las propiedades mecánicas según su tipo y nivel de daño. Este enfoque integral permite entender mejor el impacto del envejecimiento y deterioro de la resistencia de la madera, proporcionando una base para la conservación y rehabilitación de estructuras históricas de madera.

Una vez construidas las probetas, con madera nueva y existente, se procede a su clasificación de acuerdo con el grado de daño ocasionado por termitas en la siguiente etapa.



**Figura 73**  
Etapa 3: Ensayos, de la metodología propuesta.

#### 4.4.2 CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS

El objetivo de esta tesis de investigación es determinar cuantitativamente el impacto del paso del tiempo y del daño ocasionado por termitas en la madera antigua extraída de los casos de estudio a través de un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de la madera antigua y nueva de la misma especie. Para alcanzar este objetivo, una etapa fundamental y previa a la ejecución de los ensayos experimentales consiste en clasificar las probetas disponibles por ensayo según el grado de daño que presenten.

La Tabla 4 describe la escala de clasificación de las probetas según el nivel de ataque ocasionado por termitas. La elaboración de la herramienta se basó en la metodología de Carmona & Durán (2005), que incorpora una evaluación visual y cualitativa para clasificar la madera respecto a la gravedad del ataque

por termitas. La Tabla 4 muestra las definiciones de los niveles asignados, que van desde el nivel de ataque 0 (o sin ataque) hasta el nivel 3 (con ataque alto).

En la evaluación de las muestras, solo se consideran aquellas fallas que se encuentran cerca del plano de falla esperado en el ensayo respectivo. Si el ataque se concentra en áreas alejadas del plano de falla, estas no son tomadas en cuenta. Asimismo, no se consideran las grietas cercanas al plano de falla que no haya sido causadas por el ataque de termitas.

Se emplean las siguientes definiciones para clasificar el daño:

**i) Ataque Superficial:** se refiere a pequeños agujeros concentrados en un área específica o desprendimientos menores causados por termitas.

**ii) Perforación o Ataque Penetrante:** consiste en agujeros puntuales, profundos y de mayor tamaño en comparación con los provocados por el ataque superficial.

**iii) Erosión:** incluye surcos y cavernas ocasionadas por las termitas en la madera, que pueden o no generar grietas longitudinales.

Cabe destacar que se incorpora el tema de las grietas en el nivel de daño por termitas. Además, es importante señalar la complejidad de medir las grietas en el plano de falla una vez que las probetas han sido ensayadas.

**Tabla 4** Herramienta de clasificación visual de la madera antigua en edificios históricos de acuerdo con la gravedad del daño por ataque de termitas.

Gravedad del Ataque de Termitas	Nivel Asignado	Definición
Sin ataque	0	La probeta no presenta ningún tipo de lesión o ataque superficial <sup>i</sup> debido a termitas.
Ataque Bajo	1	Se debe cumplir alguna de las siguientes condiciones: Ataque superficial menor a 1mm de profundidad y limitado a una extensión máxima de 1/4 de la superficie lateral de la probeta. Perforaciones <sup>ii</sup> puntuales de hasta 5mm de profundidad.
Ataque Medio	2	Se debe cumplir alguna de las siguientes condiciones: 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 cubrir toda la superficie. Erosión <sup>iii</sup> de 1 a 3mm de profundidad en una extensión no mayor a 1/4 de la superficie lateral de la probeta. Perforaciones <sup>ii</sup> puntuales de profundidad mayor a 5mm que no se extiendan en cavernas.
Ataque Alto	3	Se debe cumplir alguna de las siguientes condiciones: Ataque superficial mayor a 1mm de profundidad que se extiende sobre la totalidad de la superficie lateral de la probeta. Ataque penetrante <sup>ii</sup> superior a 5mm de profundidad extendiéndose en cavernas dentro de la masa de la probeta y pudiendo llegar a un estado de destrucción muy avanzado. Erosión <sup>iii</sup> sobre una extensión superior a 1/4 de la superficie lateral de la probeta.

#### 4.4.3 EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

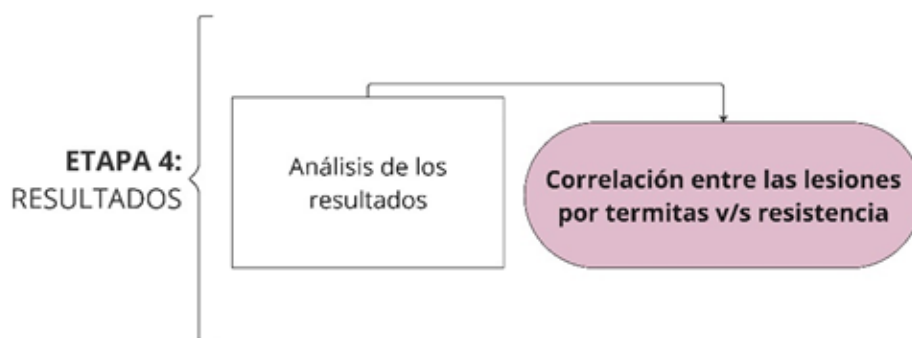
Los ensayos experimentales se ejecutarán siguiendo los lineamientos establecidos en las normativas y estándares nacionales para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera utilizando probetas a escala pequeña (compresión paralela NCh973 (Instituto Nacional de Normalización,

2018c), la norma de compresión perpendicular NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), la norma de tracción perpendicular NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), la norma de cizalle paralelo NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b) y la norma de flexión estática NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e). Previo a la ejecución de los ensayos en el laboratorio, se deberán determinar las condiciones generales de cada ensayo, así como las condiciones de carga y contorno de estos. Para llevar a cabo la campaña experimental, será necesario disponer de infraestructura y equipamiento apropiado, conforme a los requisitos de un laboratorio de ensayo de materiales.

Para cada ensayo, se realizará un registro inicial de las probetas, documentando detalles de su geometría, masa, contenido de humedad y cualquier observación específica. Durante la ejecución de los ensayos, se registrarán pares de puntos de carga y desplazamiento en la probeta, además de identificar los puntos de falla de esta. Esto implica aplicar cargas controladas a la muestra y medir el desplazamiento resultante. En todos los ensayos, es crucial determinar el límite de proporcionalidad, que representa el punto en el que la relación entre carga aplicada y el desplazamiento (o deformación) de la probeta sigue siendo lineal hasta que se experimentan deformaciones permanentes o se observa un comportamiento no lineal, es decir, su punto de falla.

#### 4.5 ETAPA 4: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La última etapa de la metodología corresponde al “Análisis de los resultados” obtenidos en la fase experimental. Esta fase incluye el cálculo de la resistencia y rigidez inicial para cada probeta y por nivel de ataque, únicamente para las probetas de roble antiguo (ver Figura 74). Una vez obtenidos los resultados de los ensayos con maderas nuevas y antiguas, se deben calcular los valores característicos de resistencia y rigidez para cada probeta, siguiendo los lineamientos de los estándares aplicables de las normativas. Estos valores se procesarán para generar gráficos de análisis estadístico que capturen tendencias, valores medios y dispersiones en las muestras de la investigación. Posteriormente, se compararán estos resultados entre sí y con aquellos disponibles en otros estudios que hayan realizado ensayos similares.



**Figura 74**  
Etapa 4: Análisis de los resultados, de la metodología propuesta.



## CAPÍTULO 5. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA EXTRAÍDA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS EXISTENTES

El presente capítulo expone procesos y resultados de los programas experimentales ejecutados para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera antigua existente en edificaciones históricas de la ciudad de Valparaíso. El apartado 5.1 presenta el programa experimental. El apartado 5.2 se describen los casos de estudios y obtención de las muestras. El siguiente apartado 5.3 se realiza las probetas y la matriz de ensayos. El apartado 5.4 se describen los tipos de ensayos a ejecutar. El siguiente apartado (sección 5.4.1) se describen los equipos e instrumentalización con la determinación de las propiedades físicas de las probetas. El siguiente apartado 5.5 expone la ejecución de los ensayos y los resultados los cuales son: compresión paralela (sección 5.5.1) y perpendicular (sección 5.5.2), tracción perpendicular (sección 5.5.3), cizalle paralelo (sección 5.5.4), flexión estática (sección 5.5.5) y densidad (sección 5.5.6). Finalmente, el apartado 5.6 se realiza las conclusiones y el análisis comparativo de los resultados de los ensayos debidamente ejecutados, en donde se comparará la resistencia y rigidez de las muestras ensayadas.

### 5.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta sección expone las metodologías aplicadas y los resultados en torno a la determinación de las propiedades mecánicas de la madera estructural antigua, existente en construcciones históricas de entramado de madera en los barrios patrimoniales de Valparaíso. El objetivo de este estudio es evaluar la resistencia de la madera mediante ensayos experimentales convencionales a escala reducida, de acuerdo con la normativa chilena que describe los métodos para su ejecución:

- Compresión perpendicular a la fibra. NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c)
- Compresión paralela a la fibra. NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d)
- Tracción perpendicular a la fibra. NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f)
- Cizalle paralelo a la fibra. NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b)
- Flexión estática. NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e)

La metodología de estudio involucra la caracterización mecánica de la madera de roble en probetas construidas con piezas antiguas, extraídas de edificios históricos y con madera comercial nueva de la misma especie. Además, se considera la construcción de probetas de Pino Oregón comercial (Jiménez, 2014; Salazar, 2014), al ser una de las especies más utilizadas en la rehabilitación de estas construcciones tradicionales, al ser más económica y accesible que el roble. La madera antigua se extrajo desde diferentes casos de estudio en procesos de rehabilitación donde existía material de descarte. A través de un análisis comparativo de los resultados de los ensayos en la madera nueva y antigua, se espera poder evaluar el impacto del paso del tiempo en las propiedades mecánicas de la madera. Por otro lado, este estudio busca analizar el impacto del deterioro de la madera por el ataque de termitas. Para ello, se utilizaron técnicas de inspección visual para identificar y cuantificar el daño causado por las termitas. Luego, se seleccionaron muestras representativas para los ensayos destructivos, asegurando una comparación adecuada entre la madera con y sin daño. También se busca comparar las propiedades de la madera de roble antiguo sin daños y nuevo con la madera de Pino Oregón, para cuantificar la diferencia entre sus capacidades.

Los resultados obtenidos fueron analizados a través aproximaciones estadísticas y comparativas, realizando una primera clasificación a partir de las especies madereras encontradas en los casos de estudio y los existentes en el mercado: probetas de madera roble antiguo de edificios patrimoniales, probetas de roble y de pino Oregón comerciales. El objetivo de este análisis es comprender las diferencias entre la madera existente en los edificios tradicionales de entramado de madera de Valparaíso, con y sin daños, y comparar la madera nueva sin daños, con la finalidad de cuantificar las variaciones en términos de resistencia y rigidez.

A continuación, se muestran los casos de estudio y se describen las muestras recuperadas en cada caso para la posterior elaboración de las probetas y ejecución de los ensayos.

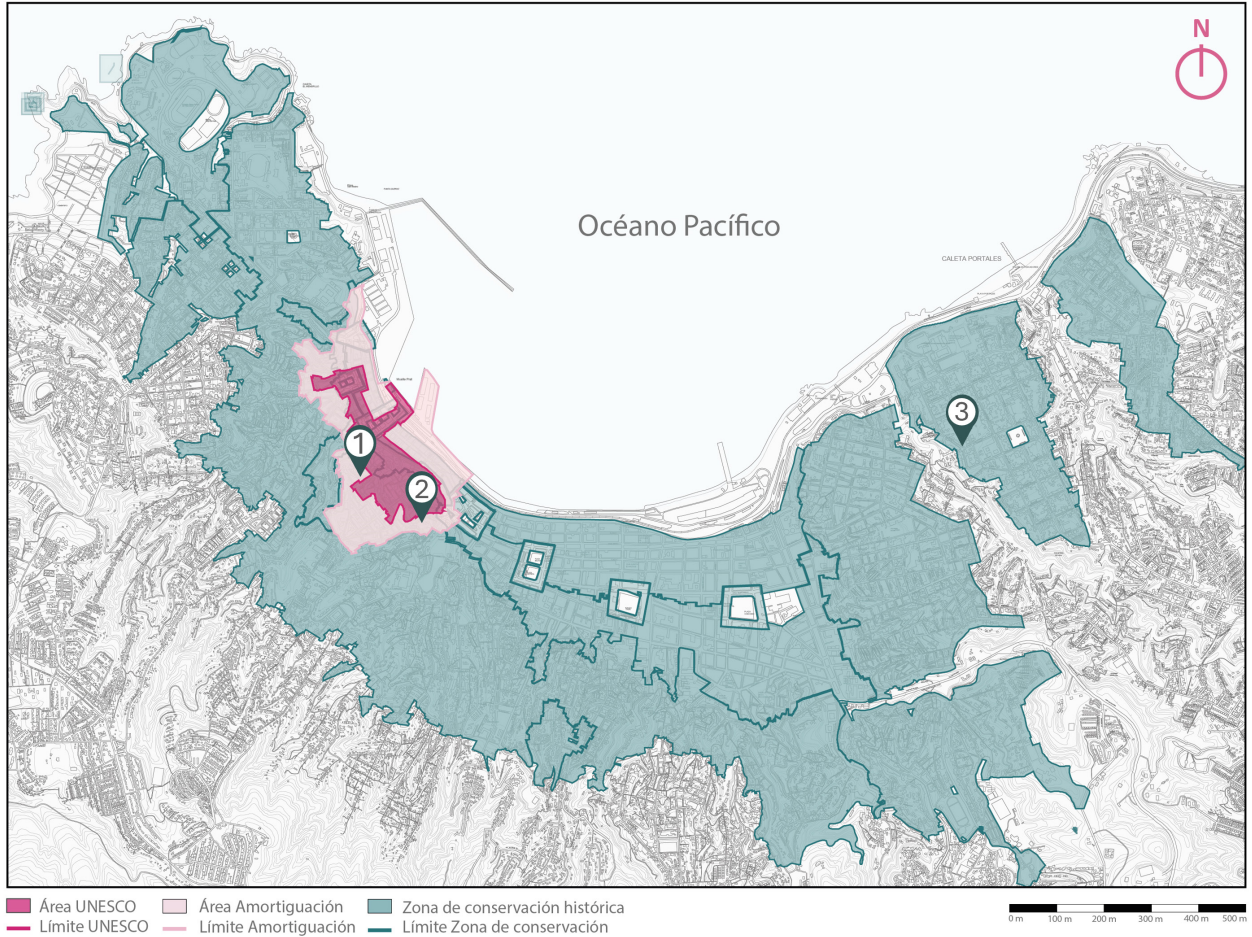
## 5.2 CASOS DE ESTUDIO Y OBTENCIÓN DE MUESTRAS

La metodología propuesta en el capítulo 4 se implementó para llevar a cabo el levantamiento de dos edificios emplazados en la zona de amortiguación de Valparaíso, Chile, así como en un edificio coetáneo en un barrio histórico del cerro Placeres, dentro de la zona de conservación histórica (Figura 75). La información general de los edificios se recopiló mediante fichas de relevamiento de datos, propuesta como parte de la metodología de esta investigación (ver Anexo 1).

La Figura 75 muestra la localización de los tres casos de estudio seleccionados para esta investigación. Las zonas demarcadas incluyen la Zona de Sitio de Patrimonio Mundial, la Zona de Amortiguación y la Zona de Conservación Histórica. Los puntos marcados en el mapa localizan los casos de estudio. Los casos 1 y 2 están ubicados en la Zona de Amortiguación, mientras que el caso de estudio 3 se encuentra en la Zona de Conservación Histórica.

De los edificios estudiados se recuperaron diversas piezas de descarte para construir las probetas utilizadas en los ensayos. Al momento de la inspección, todos los edificios se encontraban en procesos de rehabilitación, y estas piezas fueron reemplazadas debido a su deterioro parcial por diversos factores. A continuación, se describirá más en detalle cada uno de los casos de estudio.

El Caso de estudio 1, ubicado en el pasaje Higuera N° 179, cerro Alegre ( Figura 76a) estaba siendo intervenido por el arquitecto local Carlos Urquiza Vega, quien estaba realizando un proyecto para convertir la vivienda en departamentos habitacionales. El proyecto incluía una intervención estructural y formal en el interior del inmueble, que originalmente fue construido con el sistema tradicional de entramado de madera relleno con adobillo, o “tabique-adobillo. Además, se consideró la integración de una estructura auxiliar de acero que busca incrementar la altura de la construcción.



**Figura 75**  
Plano de emplazamiento los casos de estudio 1 y 2, en la Zona de Amortiguación y caso de estudio 3, en la Zona de Conservación Histórica.



(a)



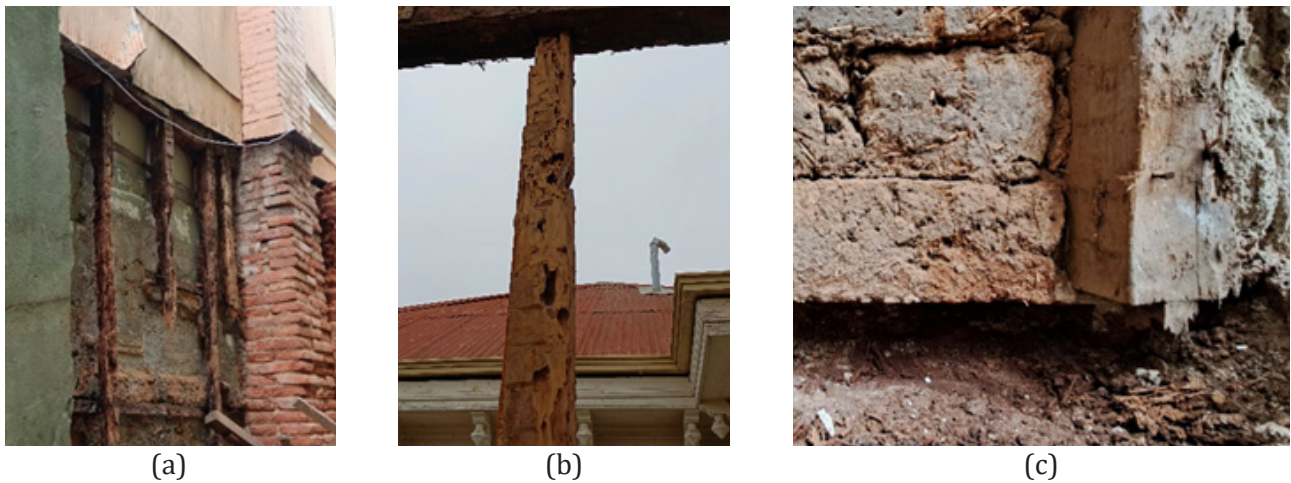
(b)



(c)

**Figura 76**  
Casos de estudio en Valparaíso: (a) vivienda en pasaje Higuera, N° 179, cerro Alegre; (b) Hostal La Casa del Puerto calle Almirante Montt N° 97-107-109, cerro Alegre; (c) vivienda en calle Malfatti N° 585, cerro Placeres.

Las piezas de descarte obtenidas en esta obra fueron reemplazadas debido al alto grado de daño, que presentaba un riesgo para la estabilidad de la estructura. Las muestras obtenidas, son en su mayoría pies derechos de 4x4" provenientes de los marcos. Estas piezas estaban seriamente dañadas, en su mayoría parcialmente desintegradas por presencia humedad y, sobre todo, por el ataque de las termitas, como se puede observar en la Figura 77.



**Figura 77**

Caso de estudio calle Higuera N° 179, cerro Alegre: con presencia extrema de ataque de xilófagos (termitas): (a) degradación casi completa de muro de entramado; (b) pie derecho atacado por las termitas; (c) solera superior inexistente ante el daño avanzado por termitas.

El Caso de estudio 2, Hostal La Casa del Puerto, ubicado en la calle Almirante Montt N° 97-107-109, cerro Alegre ( Figura 76b), es una edificación histórica con una estructura mixta de tabique-adobillo. Al momento de la inspección, se encontraba en buen estado de conservación (ver Figura 78). Desde este caso también se recuperaron piezas de descarte las cuales presentaban daños parcialmente causados por insectos xilófagos (termitas). Las piezas donadas corresponden a pies derechos de roble de 4x4", provenientes de los marcos del entramado.



**Figura 78**

Caso de estudio calle Almirante Montt N° 97-107-109, cerro Alegre: (a) vista de pies derechos sin su relleno; (b) identificación de unión caja y espiga, sección maderera de 4 x 4".

El Caso de Estudio 3, ubicado en la calle Malfatti N° 585, cerro Placeres ( Figura 76c), se encontraba en proceso de demolición durante la inspección. Esto se debió a que la estructura estaba seriamente deteriorada por los ataques de termitas, así como por la humedad y la falta de mantenimiento (ver Figura 79). El propietario decidió reconstruir utilizando hormigón, conservando solo la fachada exterior original de la vivienda.

Debido al avance de la demolición, no se pudo realizar un levantamiento estructural completo y no se encontraron registros gráficos de la propiedad en la Dirección de Obras Municipales (DOM). Sin embargo, se pudieron medir

y recuperar piezas de roble de descarte para su posterior análisis. Las piezas obtenidas corresponden a pies derechos de 4x4" provenientes del marco estructural.

El registro formal de todos los casos de estudio se encuentra en las fichas de levantamiento de información en el Anexo 1. Además, el anexo incluye registros de otros casos de estudio donde se realizaron inspecciones visuales de los entramados.



**Figura 79**  
Caso de estudio calle Malfatti N°585, cerro Placeres con daños por (a) y (b) desprendimiento total de abobe; (c) pies derechos atacados por termitas.

### 5.3 PROBETAS Y MATRIZ DE ENSAYOS

Para ejecutar la campaña experimental se consideraron tres grupos de probetas: (1) madera de roble nueva, (2) madera de pino Oregón nuevo y (3) madera antigua de roble. La selección de estos grupos responde a la necesidad de evaluar y comparar las propiedades mecánicas de la madera de diferentes edades y tipos, así como la influencia de defectos presentes en las maderas antiguas.

Para la construcción de las probetas, se siguieron las especificaciones detalladas en las normativas chilenas para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera en probetas a escala reducida. Se consideraron los documentos que guían los ensayos de compresión paralela (NCh973, Instituto Nacional de Normalización, 2018c), compresión perpendicular (NCh974, Instituto Nacional de Normalización, 2018d), tracción perpendicular (NCh975, Instituto Nacional de Normalización, 2018f), cizalle paralelo (NCh976, Instituto Nacional de Normalización, 2018b) y flexión estática (NCh987, Instituto Nacional de Normalización, 2018e). En general, estos documentos establecen que todas las muestras deben estar libres de nudos y otras condiciones (ver Tabla 5).

Tabla 5 Descripción de los ensayos a escala reducida.

Ensayo	Dimensiones de la probeta (mm)	Dirección de carga y la fibra	Norma de referencia	Velocidad de ensayo	Propiedad mecánica de interés
Compresión paralela			NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b)	0.5 Mpa/s	Resistencia a la compresión paralela ( $R_c$ )
Compresión perpendicular			NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c)	0.5 mm/min	Resistencia a la compresión perpendicular ( $R_{cn}$ )
Tracción perpendicular			NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e)	2.0 mm/min	Resistencia a la tracción perpendicular ( $R_{tn}$ )
Cizalle paralelo			NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018a)	0.5 mm/min	Resistencia al cizalle paralelo ( $R_v$ )
Flexión estática			NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d)	2.5 mm/min	Resistencia en flexión ( $R_f$ ) y módulo de elasticidad en flexión ( $E_f$ )

La Figura 80 muestra las probetas de roble comercial (Figura 80a) y pino Oregón comercial (Figura 80b) sin defectos. No obstante, para la construcción de las probetas con madera de roble antiguo si se consideró la existencia de defectos, tales como las termitas, hongos y grietas, como se ilustra en la Figura 80c.

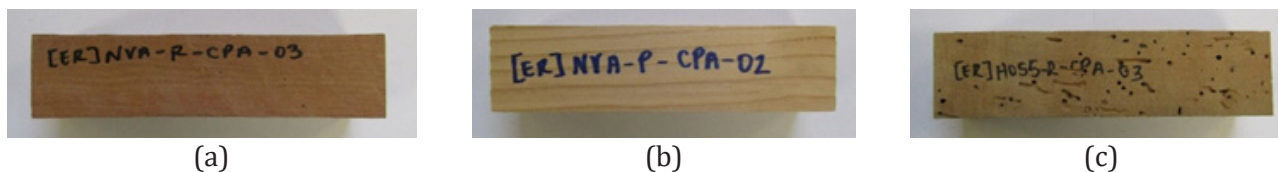


Figura 80  
 Probetas (a y b) libres de nudos y defectos: (a) probeta de roble nuevo; (b) probeta de pino Oregón; y (c) probetas de los edificios históricos con defectos de termitas.

La Tabla 6 presenta la matriz experimental de ensayo a escala reducida mostrando de manera estructurada las condiciones de los ensayos, incluyendo el tipo de ensayo, así como la geometría y el número de probetas disponibles para cada ensayo. En total, se consideraron 189 probetas para los ensayos en el laboratorio, distribuidas entre probetas nuevas y antiguas en los distintos ensayos. Por otro lado, la Tabla 7 muestra la distribución de la muestra en relación con el tipo de ensayo y la clasificación según nivel de ataque por termitas. Se puede observar que la muestra no es homogénea en cuanto al número de probetas para cada nivel de ataque. Esto se debe a que el material rescatado desde los casos de estudio era limitado, y, por lo tanto, las probetas fueron construidas y posteriormente clasificadas de acuerdo con la Tabla 7, existiendo disparidad en el tipo de lesiones y grado de daño observado.

Una vez fueron construidas las probetas, estas se clasificaron y rotularon de acuerdo con el origen o procedencia, su locación (calle, pasaje), el tipo de especie y el ensayo asociado con su respectiva abreviación donde CPA co-

Tabla 6 Matriz experimental de ensayos a escala reducida.

Tipo de ensayo	(ID)	Medidas de la probeta en mm	Tipo de probeta			Total
			Roble antiguo (edificaciones históricas)	Roble nuevo (madera comercial)	Pino Oregón (madera comercial)	
Compresión paralela	CPA	200 x 50 x 50	21	6	12	39
Compresión perpendicular	CPE	150 x 50 x 50	17	6	12	35
Tracción perpendicular	TPE	63 x 50 x 50	22	6	12	40
Cizalle paralelo	CZ	65 x 50 x 50	24	8	12	44
Flexión estática	FL	760 x 50 x 50	16	8	6	30
<b>Total</b>			<b>100</b>	<b>34</b>	<b>54</b>	<b>189</b>

Tabla 7 Distribución de las muestras de acuerdo con el tipo de ensayo y el grado de ataque por termitas.

Tipo de ensayo	N° de probetas clasificadas por nivel de ataque de termitas (Roble antiguo)				Total
	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	
Compresión paralela	4	2	4	11	21
Compresión perpendicular	7	-	3	7	17
Tracción perpendicular	7	2	4	9	22
Cizalle paralelo	16	2	1	5	24
Flexión estática	1	4	4	7	16
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>39</b>	<b>100</b>

responde al ensayo de compresión paralela, CPE que corresponde al ensayo de compresión perpendicular, TPE que se identifica como ensayo de tracción perpendicular, CZ que se identifica como ensayo de cizalle paralelo y FL que corresponde al ensayo de flexión estática, tal como se muestra en la Tabla 6. La Figura 81 considera, en primer lugar, el etiquetado de los testigos que considera el tipo de ensayo, especie, origen y número de la probeta. Esta clasificación permite asegurar la correcta manipulación y seguimiento del proceso de ensayo y análisis de los resultados y la Figura 82 muestra a modo de ejemplo las probetas construidas para ejecutar de los ensayos de compresión paralela, donde se puede observar el formato del rotulado.

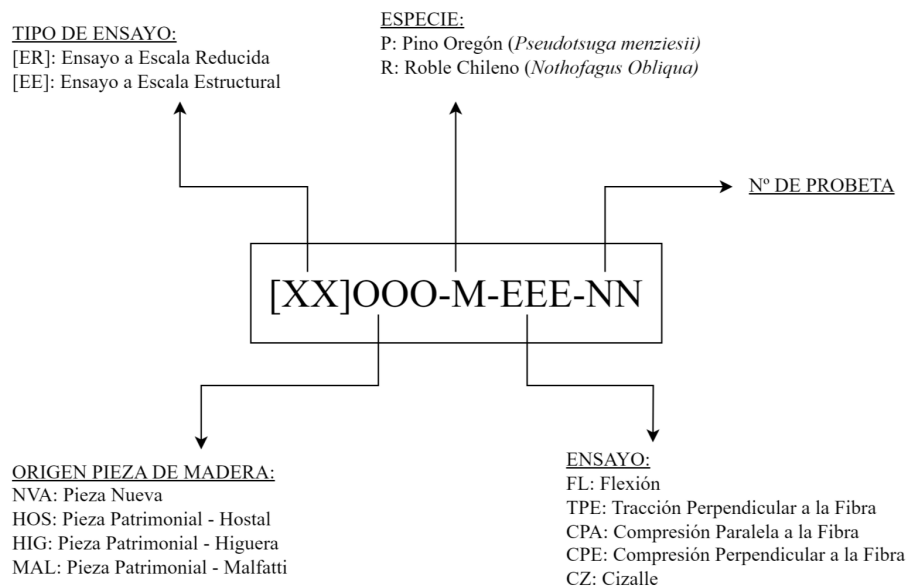
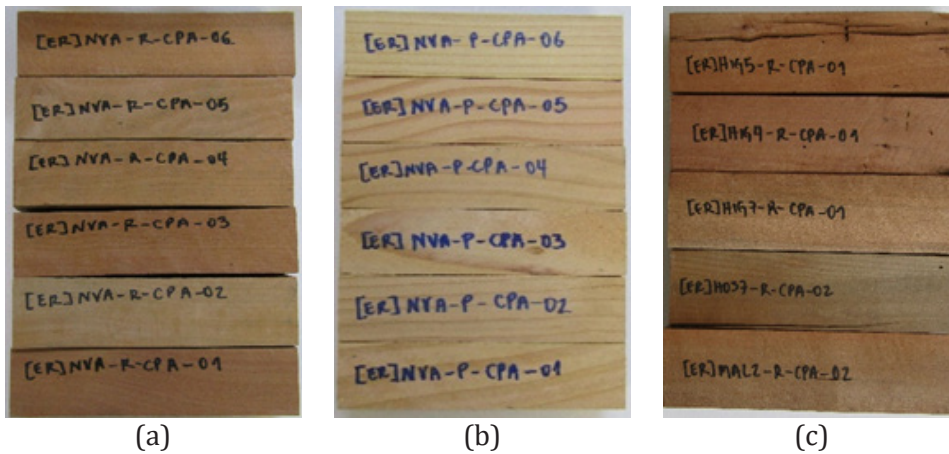


Figura 81 Definición de códigos únicos para el rotulado de las probetas para los ensayos.



**Figura 82**  
Rotulado de las probetas para ensayos de compresión paralela de las especies de (a) roble nuevo; (b) pino Oregón nuevo, y (c) madera antigua de roble.

## 5.4 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

La ejecución de los ensayos se realizó conforma a los parámetros de descritos en la Sección 4.4 de este documento. Los ensayos fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) y en el Laboratorio de Tecnología Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM).

### 5.4.1 EQUIPOS E INSTRUMENTALIZACIÓN

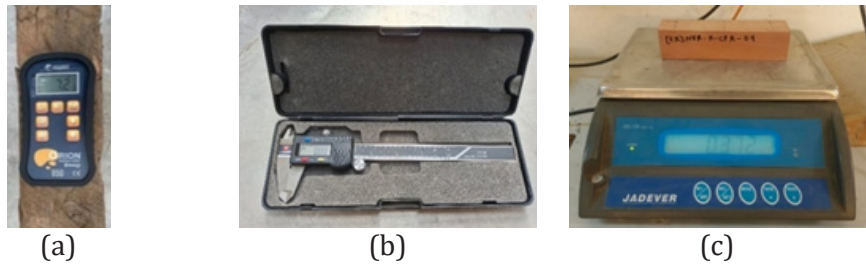
Previo a la ejecución de los ensayos se registraron diferentes parámetros respecto a las propiedades físicas de las probetas, tales como la humedad, volumen y masa de estas.

El contenido de humedad se registró utilizando un xilohigrómetro portátil de marca Wagner Meters®, modelo Orion 950. Este dispositivo es capaz de medir con una precisión de 0.1% al entrar en contacto con la madera. La calibración del instrumento se ajusta según la especie maderera, ingresando el valor de la densidad. Para llevar a cabo la medición, fue necesario colocar el instrumento en la cara superior de la probeta, dejando un espacio vacío de al menos 25 mm debajo de ella. El xilohigrómetro tiene la capacidad de medir hasta una profundidad de 3/4", por lo que, para obtener lecturas más precisas, se realizaban mediciones tanto en la cara superior como en la inferior de cada probeta, promediando luego los datos. En esta investigación los valores de calibración para el roble eran de 0.67 y 0.48 para el pino Oregón. El protocolo para el uso del higrómetro fue el detallado en la norma chilena NCh2827 (Instituto Nacional de Normalización, 2020) (ver Figura 83a).

La geometría de las probetas, requerida para estimar el volumen de las probetas y las áreas de los planos de falla, se midió utilizando un pie de metro digital de marca Ubermann®, con una precisión de 0.05 mm (ver Figura 83b). Con el fin de cuantificar la masa de las probetas, se empleó una balanza con una precisión de 1 g (ver Figura 83c). el Anexo 2 despliega en detalle los registros del contenido de humedad y geometría de las probetas.

**Figura 83**

Equipos utilizados para la medición de las probetas: (a) xilohigrómetro dieléctrico; (b) pie de metro digital; (c) balanza



La Tabla 8 proporciona una descripción de los ensayos y los equipos utilizados para ejecutarlos. En particular, se empleó el equipo de carga CONTROLS 50-C1200/8B, conformando un marco de ensayo a flexión universal con control de desplazamiento y transductor de presión, para los ensayos de compresión paralela a la fibra y flexión estática. Este equipo permite registrar los resultados tabulados y visualizar la curva de carga- deformación. Para los ensayos de compresión paralela el equipo alcanza una carga máxima de 3000 kN, mientras que para los de flexión estática 150 kN. Por otro lado, los ensayos de compresión paralela a la fibra, tracción perpendicular y cizalle, fueron ejecutados específicamente con el equipo INSTRON TTCM - 10, una máquina universal de ensayos con una capacidad de carga de 100 kN, y control de desplazamiento. Su sistema de recolección de datos permite visualizar la curva de carga-desplazamiento en tiempo real.

**Tabla 8** Descripción de los ensayos y equipamiento de los ensayos a escala reducida.

Ensayo	Norma de Referencia	Equipo	Capacidad de carga máxima	Configuración del ensayo
Compresión paralela	NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c)	CONTROLS 50-C35Z00	3000 kN	
Compresión perpendicular	NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d)	INSTRON TTCM-10	100 kN	
Tracción perpendicular	NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f)	INSTRON TTCM-10	100 kN	
Cizalle paralelo	NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b)	INSTRON TTCM-10	100 kN	
Flexión estática	NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e)	CONSTROLS 50-C1200/8B	150 kN	

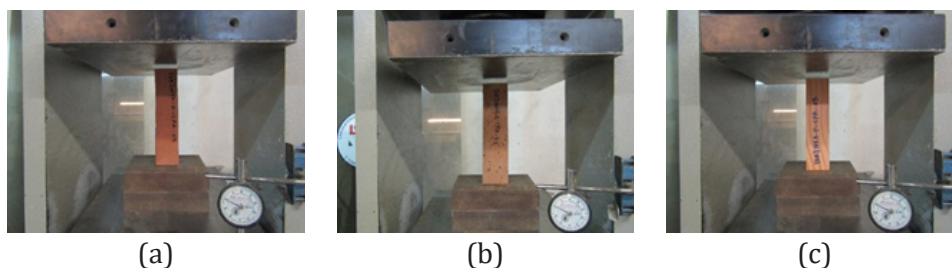
## 5.5 EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS: RESULTADOS

En los siguientes apartados se incluyen los resultados obtenidos a partir de los ensayos ejecutados en el programa experimental, junto con los métodos y relaciones utilizadas para obtener los valores de resistencia y rigidez de las probetas. Estos resultados se exponen a través de gráficos de dispersión de las propiedades mecánicas, agrupados según el tipo de probeta y el nivel de daño por termitas. Además, se presenta la relación utilizada para normalizar los valores a un nivel de contenido de humedad igual al 12%, con el fin de homogeneizar los resultados, en los ensayos que fue necesario. Para este propósito, se aplican las ecuaciones calibradas de la norma NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017a). Por último, se incluye el análisis de los resultados, identificando correlaciones y tendencias, y discutiendo los resultados con otros existentes en la literatura. Los resultados de los cálculos de densidad y rigidez de las probetas se encuentran desplegadas en las tablas del Anexo 2. Por otro lado, los resultados en formato de tabla, acompañados de estadísticas descriptivas, se encuentran en el Anexo 3. Además, en cada sección se propusieron modelos funcionales que relacionan el daño causado por las termitas con la mediana de resistencia en cada ensayo. Esto tiene como objetivo contribuir de forma preliminar a la predicción del efecto de este tipo de daño en las propiedades mecánicas esperadas en la madera antigua existente en los edificios tradicionales de entramado de madera del casco patrimonial de Valparaíso.

A continuación, se describen cada uno de los ensayos y sus resultados de acuerdo con los tres grupos de probetas: (1) de madera de roble nueva, (2) de madera de pino Oregón nuevo, y (3) de madera antigua de roble.

### 5.5.1 ENSAYOS DE COMPRESIÓN PARALELA (CPA)

El ensayo de compresión paralela se realizó siguiendo los criterios de la norma NCh973 (Instituto Nacional de Normalización, 2018c). La velocidad de carga fue controlada por desplazamiento, con una velocidad constante de 0.5 MPa/s aplicado mediante un cabezal rotulado que permitía la distribución de la carga sobre cada espécimen. La Figura 84 muestra la configuración del ensayo de compresión paralela, considerando las diferentes probetas de la matriz experimental.



**Figura 84**  
Ensayos de compresión paralela con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.

En los ensayos de compresión paralela cada probeta fue cargada hasta que la presión ejercida sobre ella dejaba de aumentar y comenzaba a disminuir. El equipo registró directamente la carga máxima  $Q$ . Para calcular la resistencia a la compresión paralela a las fibras se utilizó la expresión Ecuación (12):

$$R_c = \frac{Q}{\bar{a} * \bar{e}} \quad (12)$$

donde  $Q$  es la carga máxima expresada en Newtons, N;  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos en milímetros de la probeta, mm;  $\bar{e}$  es el promedio de los espesores medidos en mm de la probeta; y es  $R_c$  la resistencia a la compresión paralela expresada en MPa.

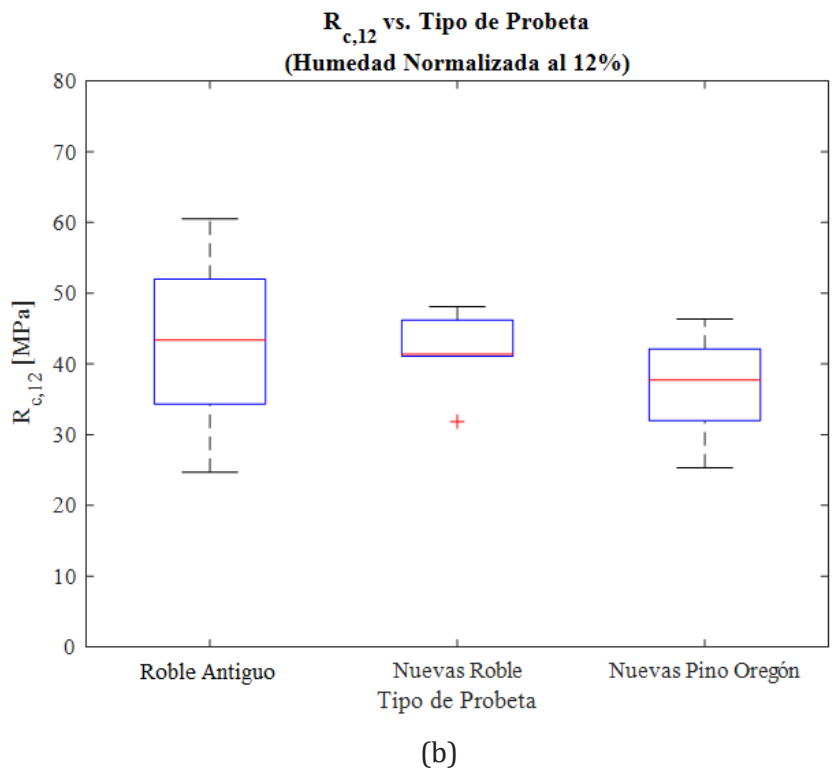
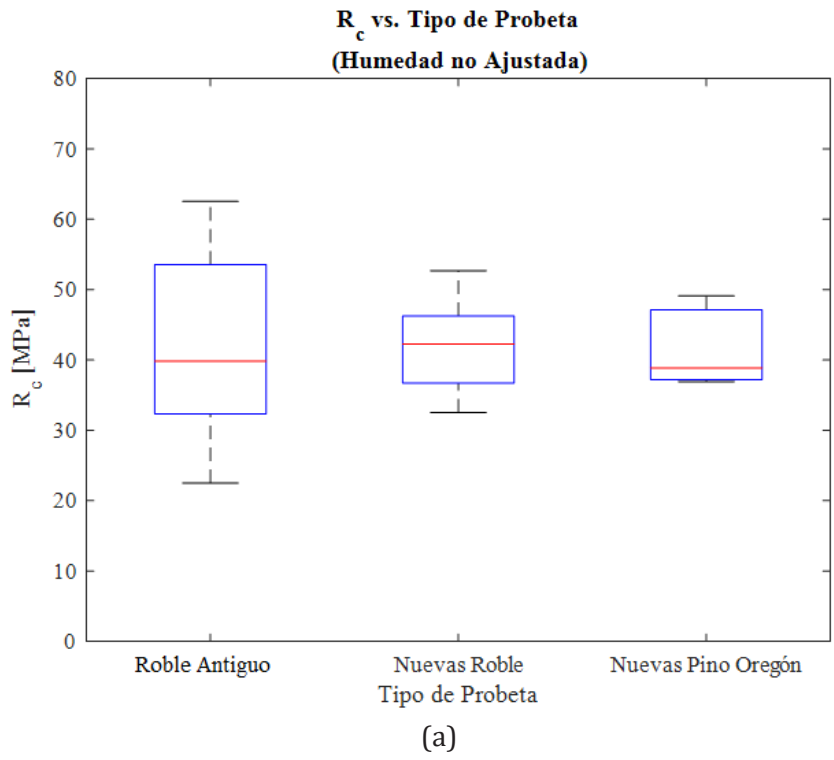
Para poder comparar los resultados se ajustó el contenido de humedad a un valor único e igual al 12%, utilizando los coeficientes de calibración expresados de la norma chilena NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017a), tal como se expresa en la Ecuación (13):

$$R_{c,12} = \begin{cases} R_c & , \text{si } R_c \leq 9.65 \text{ MPa} \\ R_c * \left( \frac{9.65 - (34 * 12)}{9.65 - (34 * H)} \right) & , \text{si } R_c > 9.65 \text{ MPa} \end{cases} \quad (13)$$

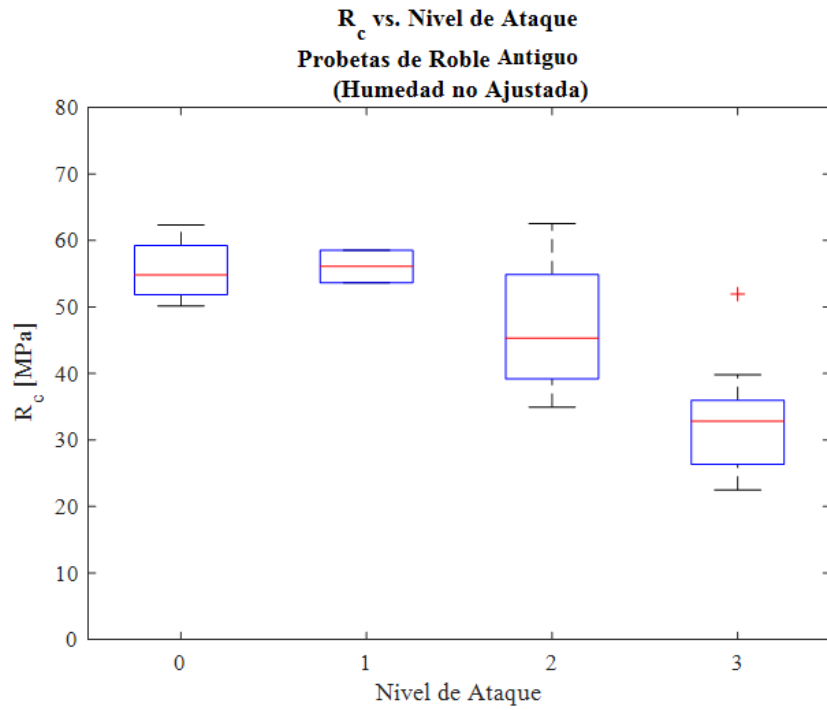
donde  $R_{c,12}$  es la resistencia a la compresión paralela normalizada al 12% del contenido de humedad en MPa, donde  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en %, el cual no puede ser menor a 10% ni mayor a 23%.

La Figura 85 muestra los resultados de los ensayos de las probetas de roble antiguo proveniente de construcciones históricas, roble nuevo y pino Oregón en formato boxplot. En estos gráficos se consideran las probetas con la humedad registrada al momento del ensayo (ver Figura 85a), y también con el ajuste de humedad para normalizar el valor al 12% (ver Figura 85b). En términos generales, se puede observar que las probetas de roble antiguo alcanzan resultados de resistencia similares al roble nuevo. No obstante, se observa una disminución de la dispersión en el grupo del roble nuevo respecto al antiguo. En específico, la mediana de la resistencia a la compresión paralela de las probetas de roble nuevo alcanzó 41.36 MPa, mientras que el roble antiguo 43.40 MPa, siendo las probetas de roble antiguo un 4.8% más resistentes respecto a las de roble nuevo. Por otro lado, las probetas de pino Oregón presentaron una mediana de 37.73 MPa, demostrando ser menos resistentes que el roble antiguo como el roble nuevo en un 14% y 9%, respectivamente (ver Figura 85b). Los resultados normalizados del grupo de probetas antiguas están en un rango de 24.70 MPa a 60.50 MPa, mientras que las de roble nuevo se localizaron entre los 31.86 MPa y 48.10 MPa. Las probetas de pino Oregón por su parte se encontraron en un rango 25.35 MPa a 46.35 MPa.

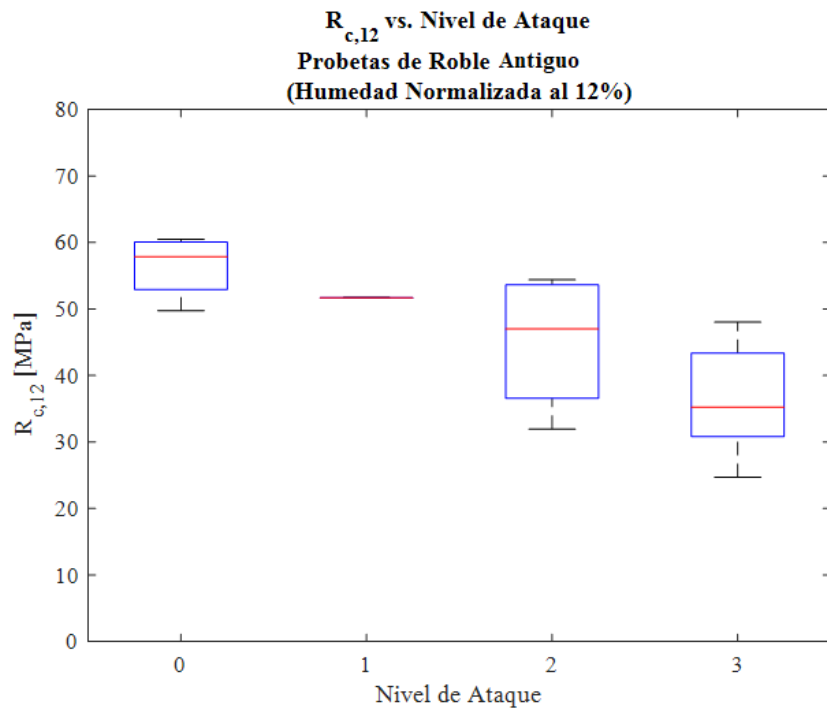
En las Figura 86a y Figura 86b se muestran los resultados de la resistencia a la compresión paralela,  $R_c$  y  $R_{c,12}$  sin y con ajuste de humedad al 12% de las probetas agrupadas por grado de daño ocasionado por termitas, clasificadas según la herramienta descrita en la Sección 4.4.2 y Tabla 4. Desde los gráficos se puede observar que, tras realizar los ajustes de humedad, la resistencia a la compresión paralela tiende a disminuir su magnitud a medida que aumenta el nivel de daño. Al revisar los valores de las medianas en la Figura 86b se puede apreciar que esta disminuyó de 57.88 MPa (nivel de ataque 0) a 35.23 MPa (nivel de ataque 3), lo que representa una reducción del 49%. Las probetas con nivel de ataque 2 (47.01 MPa) demostraron ser un 21% menos resistentes que las probetas sin daño (con nivel de ataque 0), mientras que las probetas con nivel de ataque 1 (35.23 MPa) fueron un 11% menos resistente que las sin daño.



**Figura 85**  
Resistencia a la compresión paralela según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.



(a)



(b)

**Figura 86**  
 Resistencia a la compresión paralela según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.

Con el objetivo de interpretar y correlacionar los resultados obtenidos en los ensayos, y cuantificar la tendencia experimentada, se presenta el gráfico de la Figura 87. Este gráfico muestra una recta de regresión de las medianas de  $R_{c,12}$ , junto con los intervalos de predicción y confianza. Los intervalos de predicción y confianza son conceptos que permiten estimar entender la incertidumbre asociada a los datos y las estimaciones. Un intervalo de confianza es una estimación de un parámetro de interés basado en la muestra de datos ensayados. Por otro lado, los intervalos de predicción permiten predecir el valor futuro de una variable dependiente para una nueva

observación. En otras palabras, y aplicando los conceptos a este estudio, los intervalos representan un modelo o herramienta que permite estimar el valor de la resistencia a la compresión paralela en muestras o piezas dañadas que sean clasificadas de acuerdo con la escala de daño de forma visual (no ensayadas).

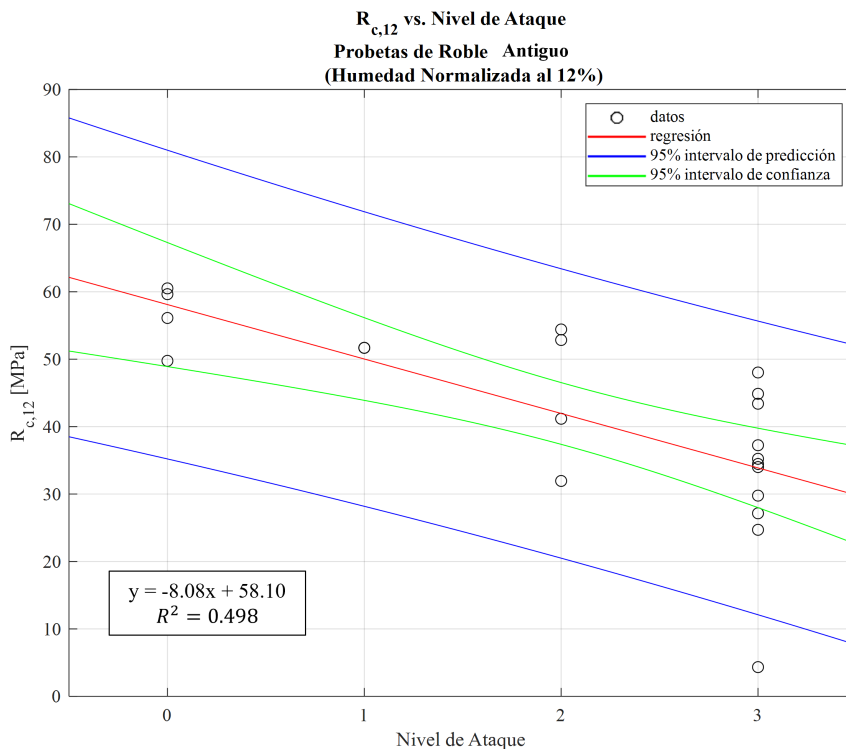
Los gráficos se construyen de acuerdo con la expresión de la Ecuación (14), la que permite ajustar la resistencia a la compresión paralela respecto al nivel de ataque observado, proporcionando un rango de valores posibles para los diferentes niveles:

$$R_{c,e} = f_{NA, CPA} * R_{c0} \tag{14}$$

$$R_{c0} = 58.10 \text{ MPa}$$

$$f_{NA, CPA} = \begin{cases} 1.00, & \text{si } NA = 0 \\ 0.86, & \text{si } NA = 1 \\ 0.72, & \text{si } NA = 2 \\ 0.58, & \text{si } NA = 3 \end{cases} \begin{matrix} [0.61; 1.39] \\ [0.49; 1.24] \\ [0.35; 1.09] \\ [0.21; 0.96] \end{matrix}$$

donde,  $R_{c,e}$  es la resistencia a la compresión paralela esperada en MPa;  $f_{NA, CPA}$  representa un factor adimensional de reducción de resistencia a la compresión paralela según nivel de ataque;  $R_{c0}$  es la resistencia a la compresión paralela sin daño aparente por termitas en MPa; y  $NA$  es el nivel de ataque. Esta ecuación es válida exclusivamente para las probetas construidas con madera antigua de roble extraídas de los edificios históricos de Valparaíso (casos de estudio).



**Figura 87**  
Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados a compresión paralela según el nivel de ataque por termitas.

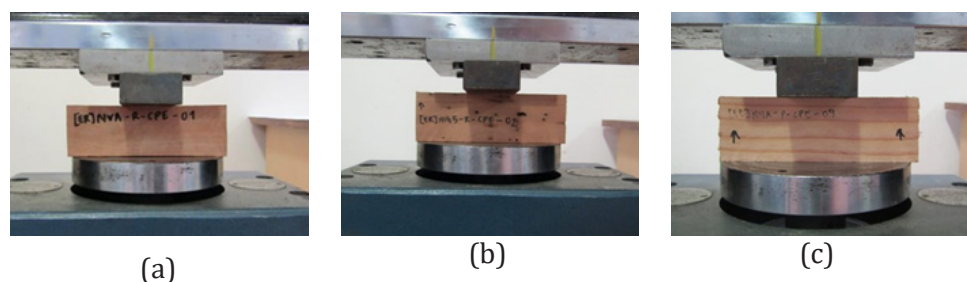
Para cuantificar la tendencia, se ajusta una recta de regresión a los valores de  $R_{c,12}$ . Los resultados indican que el ajuste del modelo es relativamente aceptable, con un valor de  $R^2$  de 0.498. Esto sugiere que aproximadamente el 49.8% de la variación de la variable dependiente puede ser explicada por el modelo, teniendo una buena correlación lineal con los datos (línea roja en la Figura 87).

Los ensayos de compresión paralela revelaron que las muestras de roble antiguo alcanzaron una resistencia promedio de 43.4 MPa en este estudio. Esta resistencia promedio mostró similitud con la reportada por el Instituto Forestal de Chile (INFOR) (Catalán et al., 2020) para el grado estructural G2 (40.3 MPa) en estado seco (12%). En el Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas de Hernández & Pinilla (2010), se reporta una resistencia ligeramente mayor de 46.7 MPa. En comparación el roble antiguo de este estudio fue un 7.4% más resistente que el valor del INFOR y un 7.3% menos resistente a los informes mencionados respectivamente. Esta diferencia podría atribuirse al sesgo en el número de muestras, ya que en este estudio se utilizaron menos muestras en comparación con los informes revisados. Por otro lado, los ensayos de roble nuevo mostraron una resistencia de 41.7 MPa, siendo solo un 3.4% más resistentes que los valores del INFOR, pero un 11.3% menos resistentes que los resultados del Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas (Hernández & Pinilla, 2010). En general, los resultados de este estudio se encuentran dentro de los rangos previstos.

Para los ensayos de pino Oregón los ensayos de compresión paralela exhibieron una resistencia promedio de 37.2 MPa, superior a la reportada por el INFOR (Catalán et al., 2019) para el grado estructural GS, que es de 29.6 MPa en estado seco (12%). Además, los resultados del Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas (Hernández & Pinilla, 2010) mostraron una resistencia similar a la de este estudio con un valor de 37.24 MPa. En contraste, otro informe del Instituto Forestal de Chile (Vásquez et al., 2013) reportó una resistencia menor (33.4 MPa), asignándole también el grado estructural GS. En resumen, los valores de este estudio para el pino Oregón se encuentran dentro de los rangos esperados. Además, se demuestra que las probetas de pino Oregón fueron un 15% y un 11% menos resistentes que las probetas de roble antiguo y roble nuevo respectivamente.

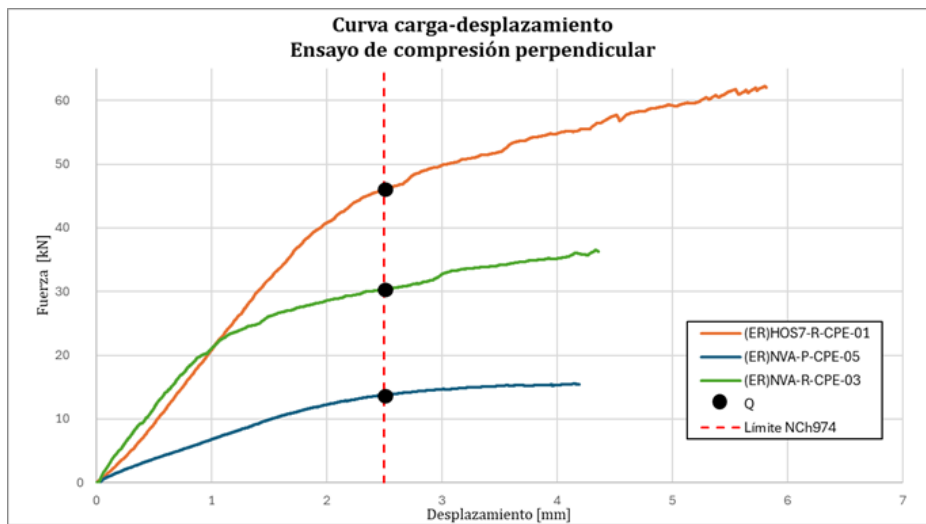
### 5.5.2 ENSAYOS DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA (CPE)

Los ensayos de compresión perpendicular a la fibra se realizaron conforme a la norma NCh974 (Instituto Nacional de Normalización, 2018d) para la determinación de la resistencia a la compresión perpendicular en probetas a escala reducida. La carga fue controlada por desplazamiento, aplicándose a una velocidad constante de 0.5 mm/min mediante un cabezal rotulado que permitió la distribución uniforme de la carga sobre cada espécimen. La Figura 88 muestra las probetas construidas con los diferentes grupos de madera dispuestas en el equipo para la aplicación de la carga. El equipo registra curvas de carga-deformación, como las que se observan en la Figura 89 donde se aprecia un comportamiento dúctil y no lineal de las probetas. De cada registro se extrae el valor de carga máxima  $Q$ .



**Figura 88**

Ensayos de compresión perpendicular con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.



**Figura 89**  
Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de compresión perpendicular.

La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra  $R_{cn}$  de cada probeta se determina mediante la Ecuación (15):

$$R_{cn} = \frac{Q}{z * \bar{a}} \quad (15)$$

donde  $Q$  representa la carga máxima registrada en Newtons, N, que produce la falla de la probeta o una deformación de 2.5 mm;  $z$  es el ancho de la placa metálica rígida, igual a 50 mm y,  $\bar{a}$  es el promedio de los anchos medidos de la probeta en milímetros, mm.

Para realizar la comparación de los datos, los resultados se ajustaron a un contenido de humedad único e igual al 12%, utilizando los coeficientes de calibración de la normativa chilena NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017a). Este ajuste se expresa en la Ecuación (16):

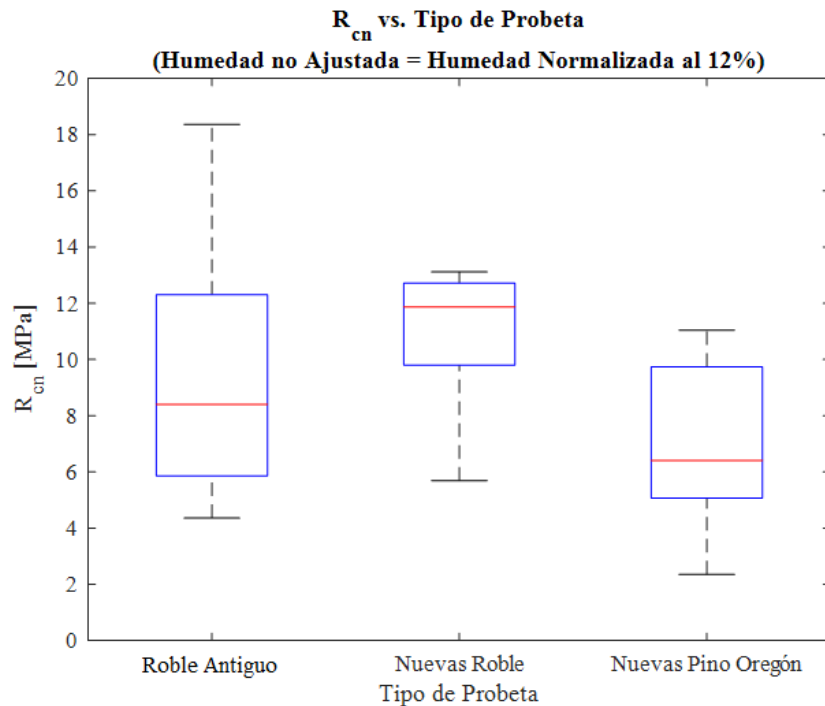
$$R_{cn,12} = R_{cn} * \left( \frac{1.00 - (0.12)}{1.00 - (0 * H)} \right) = R_{cn} \quad (16)$$

donde  $R_{cn,12}$ , es la resistencia a la compresión perpendicular normalizada al 12% del contenido de humedad, medida en MPa.

El contenido de humedad registrado al momento de ensayo,  $H$ , se expresa en porcentaje (%) y debe estar comprendido entre el 10% y 23%. No obstante, y como se puede observar en la Ecuación (16), la resistencia normalizada es idéntica a la original, por lo que los resultados no experimentaron ningún cambio en su resistencia.

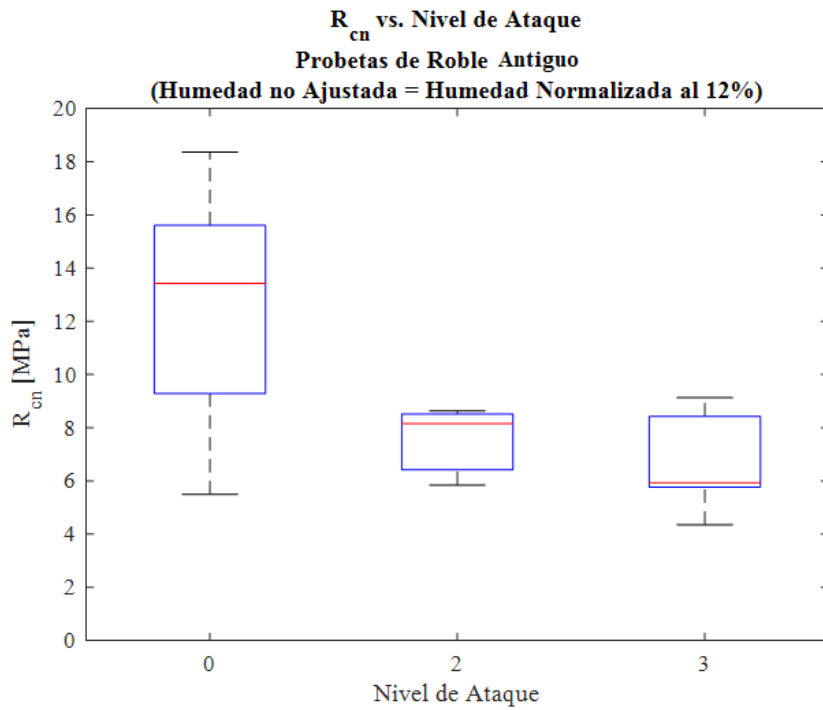
La Figura 90 ilustra los gráficos de dispersión correspondiente a los distintos grupos de probetas. En estos gráficos se observa una alta variabilidad en los resultados para el roble antiguo, reflejando la alta variabilidad dentro de este grupo, con resultados normalizados que oscilan entre los 4.36 MPa hasta los 18.37 MPa. En contraste la mediana de resistencia de las probetas nuevas de roble es de 11.87 MPa, mientras que en el grupo de probetas de madera de roble antiguo es de 8.40 MPa, lo que indica que la resistencia de la madera existente en edificios históricos disminuyó casi un 34% en comparación con las probetas de roble nuevo. Por otro lado, las probetas de pino Oregon presentaron una mediana de 6.41 MPa, demostrando ser menos resistentes que las de roble antiguo y el roble nuevo en un 27% y 60% respectivamente (ver Figura 90).

Los resultados también revelan una notable reducción en la dispersión del grupo de probetas nuevas de roble cuyos valores oscilan entre 5.69 MPa y 13.12 MPa. Por otro lado, las probetas de pino Oregón muestran una dispersión media, con valores que fluctúan entre 2.35 MPa y 11.04 MPa, situándose así entre la variabilidad observada en el roble nuevo y el roble antiguo.



**Figura 90**  
Resistencia a la compresión perpendicular según tipo de probeta.

Por otro lado, los resultados del grupo de probetas clasificadas según el daño causado por el ataque de termitas (ver Figura 91) mostraron una dispersión más amplia en comparación con las otras categorías. Los valores de la mediana muestran una resistencia de 13.42 MPa para nivel de ataque 0, 8.16 MPa para el nivel de ataque 2, y 5.93 MPa para el nivel de ataque 3. Estos datos demostraron que las probetas de nivel 0 (sin daño) fueron un 49% más resistentes que las de nivel 2, y un 77% más resistentes que las del nivel de ataque 3. Además, las probetas categorizadas en el nivel de ataque 2 (8.16 MPa) fueron un 32% más resistente que las del nivel de ataque 3 (5.93 MPa). No se catalogaron probetas con nivel de ataque 1 en este estudio, ya que ninguna de las muestras disponibles se clasificó con dicho nivel. Por lo tanto, es necesario recopilar más datos para confirmar estos resultados con un mayor grado de confiabilidad.



**Figura 91**  
Resistencia a la compresión perpendicular según nivel de ataque por termitas.

A partir del gráfico desplegado en la Figura 92 se desprende la Ecuación (17), la que proporciona una forma de ajustar la resistencia a la compresión perpendicular en función de su composición específica, facilitando un rango de valores posibles para diferentes niveles:

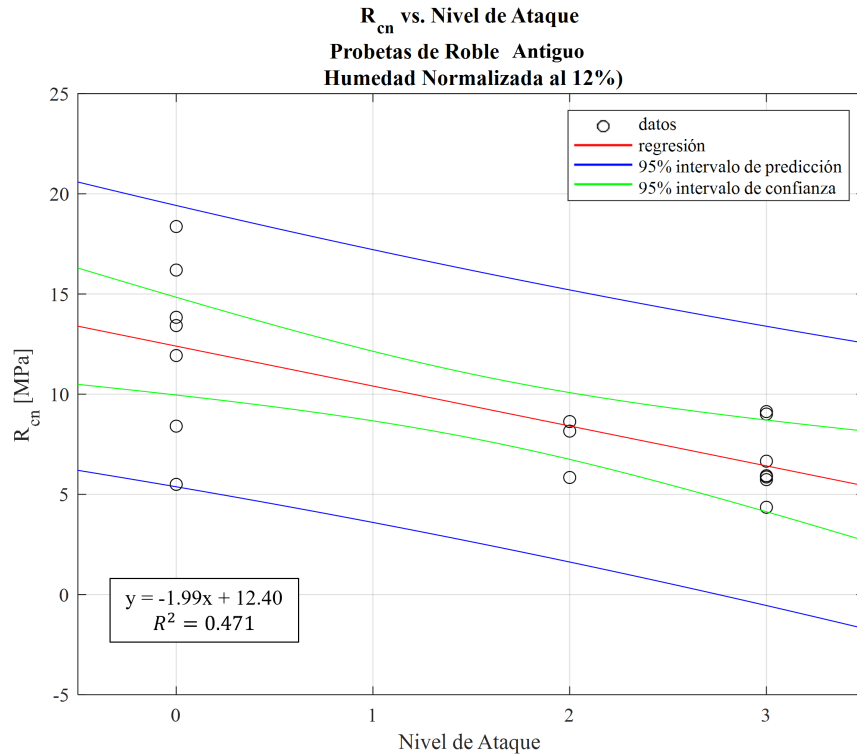
$$R_{cn,e} = f_{NA,CPE} * R_{cn0} \tag{17}$$

$$R_{cn0} = 12.40 \text{ MPa}$$

$$f_{NA,CPE} = \begin{cases} 1.00, & \text{si } NA = 0 \\ 0.84, & \text{si } NA = 1 \\ 0.68, & \text{si } NA = 2 \\ 0.52, & \text{si } NA = 3 \end{cases} \begin{matrix} [0.43; 1.56] \\ [0.29; 1.39] \\ [0.13; 1.23] \\ [0.00; 1.08] \end{matrix}$$

donde,  $R_{cn,e}$  es la resistencia a la compresión perpendicular esperada en MPa;  $f_{NA,CPE}$  representa al factor adimensional de reducción de resistencia a compresión paralela por nivel de ataque;  $R_{cn0}$  es la resistencia a la compresión perpendicular sin daño aparente por las termitas en MPa; y  $NA$  es el nivel de ataque.

Esta ecuación es válida exclusivamente para la madera antigua de roble extraída de edificios históricos en Valparaíso y correlaciona la resistencia a la compresión paralela esperada con el nivel de deterioro observado, basándose en la curva de ajuste obtenida.



**Figura 92**  
 Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados a compresión perpendicular según el nivel de ataque por termitas.

Para predecir la resistencia a la compresión paralela  $R_{cn,12}$  a partir del nivel de ataque se ajustó una recta de regresión a los valores observados. Los resultados indican que el ajuste del modelo es relativamente aceptable, con un coeficiente de correlación  $R^2$  es 0.471, lo que sugiere que aproximadamente el 47.1% de la variación en la variable dependiente puede ser explicada por el modelo (ver Figura 92). Sin embargo, dado que no se disponía de probetas en el grupo de nivel de ataque 1, se debe utilizar la recta de regresión con cautela y considerar su mejora en el futuro.

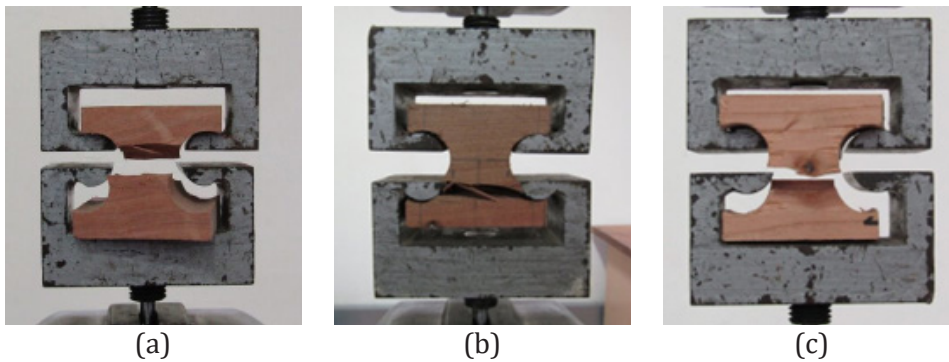
Además, los ensayos de compresión perpendicular realizados en la madera de roble antiguo mostraron valores significativamente inferiores a los reportados en estudios anteriores. En este estudio, la resistencia a la compresión perpendicular fue de 9.23 MPa, un 57% menor que el promedio de 16.5 MPa reportado en el Informe Forestal de Chile (Catalán et al., 2020). Esta diferencia sugiere que las probetas de roble antiguo, afectadas por la acción de las termitas, han experimentado una notable reducción en su resistencia. Este hallazgo subraya la importancia de abordar y mitigar los efectos del deterioro causado por las termitas en la madera de roble antiguo, especialmente en el contexto de la conservación y restauración de edificios patrimoniales.

La resistencia a la compresión perpendicular de los ensayos de pino Oregón en este estudio fue de 7.00 MPa, lo que representa una disminución significativa del 32% en comparación con el promedio reportado en el Informe Forestal de Chile (Catalán et al., 2019), que fue de 9.7 MPa. Además, el Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas (Hernández & Pinilla, 2010), reporta una resistencia de 11.27 MPa, el cual es un valor superior al observado en este estudio. Esta discrepancia sugiere que las probetas utilizadas en nuestra investigación podrían haber sido de tamaño menor en comparación con las descritas en los estudios mencionados. Los ensayos de pino Oregón mostraron una resistencia inferior en un 27% en comparación con las de roble antiguo y en un 43% en comparación con las de roble nuevo. La variación en los resultados podría deberse a varios factores, como el tamaño limitado de la muestra en este estudio en comparación con

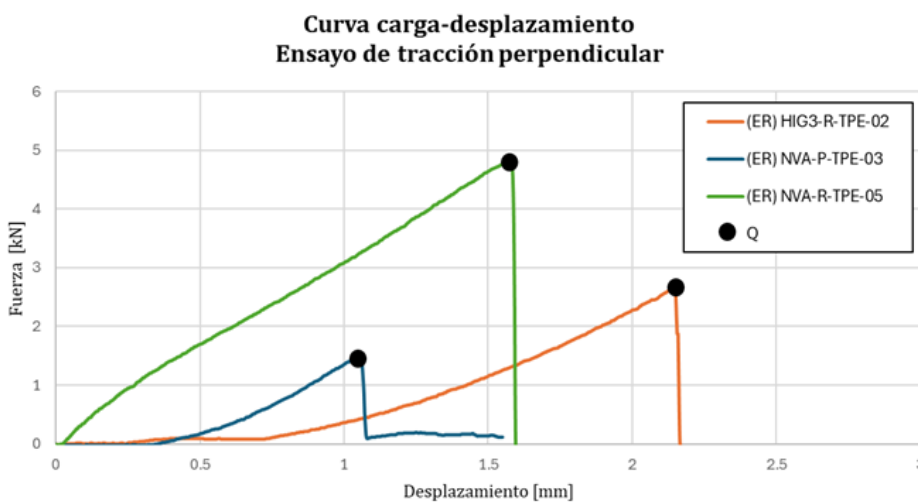
los estudios previos, diferencias en las condiciones locales de crecimiento de los árboles, o procesos de secado menos sofisticados que los empleados en la industria maderera. No obstante, la confirmación de estas hipótesis queda fuera del alcance de este trabajo.

### 5.5.3 ENSAYOS DE TRACCIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA (TPE)

El ensayo de tracción perpendicular se realizó de acuerdo con los criterios establecidos en la norma NCh975 (Instituto Nacional de Normalización, 2018f). La carga se controló mediante desplazamiento, aplicando una velocidad constante de 2.0 mm/min, a través de un cabezal rotulado que asegura una distribución uniforme de la carga sobre cada espécimen. En la Figura 93 se muestran los grupos de madera colocados en las mordazas del equipo de ensayo. Este equipo registra la curva carga-desplazamiento, que revela un comportamiento frágil de las probetas. En cada curva, se identifica el valor máximo de carga  $Q$ , el cual se utiliza para calcular la tensión de rotura (ver Figura 94).



**Figura 93**  
Ensayos a tracción perpendicular con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregon nuevo.



**Figura 94**  
Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de tracción perpendicular.

Para determinar la tensión máxima de tracción perpendicular  $R_{tn}$  de cada probeta se utiliza la Ecuación (18):

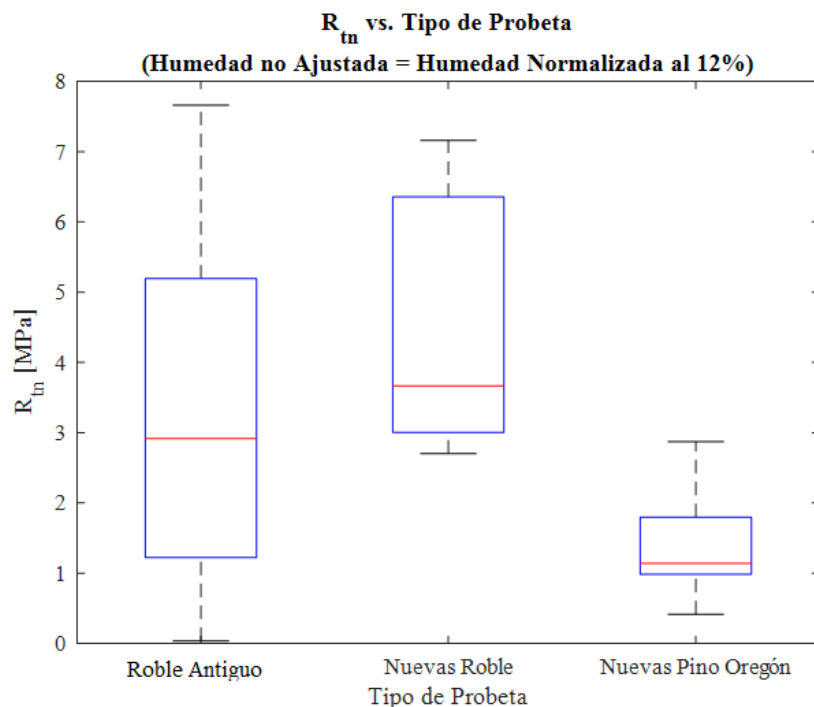
$$R_{tn} = \frac{Q}{\bar{l} * \bar{a}} \quad (18)$$

donde  $Q$  es la carga máxima registrada que se obtiene de la falla de la probeta en Newtons, N;  $\bar{l}$  es el promedio de las medidas de altura del plano de falla de la probeta en milímetros, mm y  $\bar{a}$  es el promedio de las medidas del ancho del plano de falla de la probeta en mm.  $R_{tn}$  corresponde a la tensión máxima de la probeta en tracción y se expresa en MPa.

La norma utilizada para guiar este ensayo no exige ajustes de humedad, por lo que, al igual que en el ensayo de compresión perpendicular, se asume que la humedad no afecta significativamente la respuesta de las probetas. Por lo tanto, los resultados se consideran equivalentes a los que se obtendrían si las probetas tuvieran un contenido de humedad del 12%.

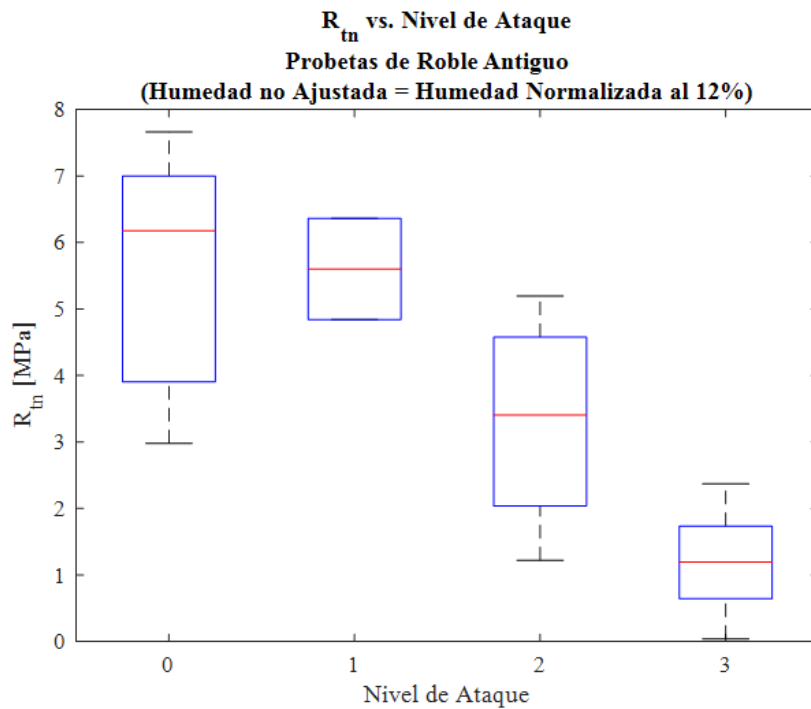
El gráfico de la Figura 95 ilustra la dispersión de los resultados para la resistencia de las probetas de roble antiguo sin daños, roble nuevo y pino Oregón. En este caso, se observa una alta dispersión en los grupos de roble antiguo y roble nuevo, lo cual se atribuye a la variabilidad y al tamaño de la muestra. Específicamente, la mediana de la resistencia de las probetas de roble nuevo fue de 3.66 MPa, mientras que la de roble antiguo fue de 2.92 MPa, representando una disminución del 22% en comparación con las probetas de roble nuevo. Por otro lado, la mediana de la resistencia para las probetas de pino Oregón fue de 1.14 MPa, demostrando ser un 88% y un 105% menos resistentes que las de roble antiguo y roble nuevo, respectivamente.

En este grupo de ensayos, se observa una clara disminución en la dispersión de los resultados en las probetas nuevas de roble en comparación con las de roble antiguo. Los resultados normalizados para el grupo de roble antiguo varían entre 0.04 MPa y 7.66 MPa, mientras que para el roble nuevo se encuentran en el rango de 2.70 MPa a 7.16 MPa. Por su parte, las probetas de pino Oregón tienen una dispersión más reducida, con valores entre 0.42 MPa y 2.87 MPa, mostrando la menor dispersión entre los grupos evaluados

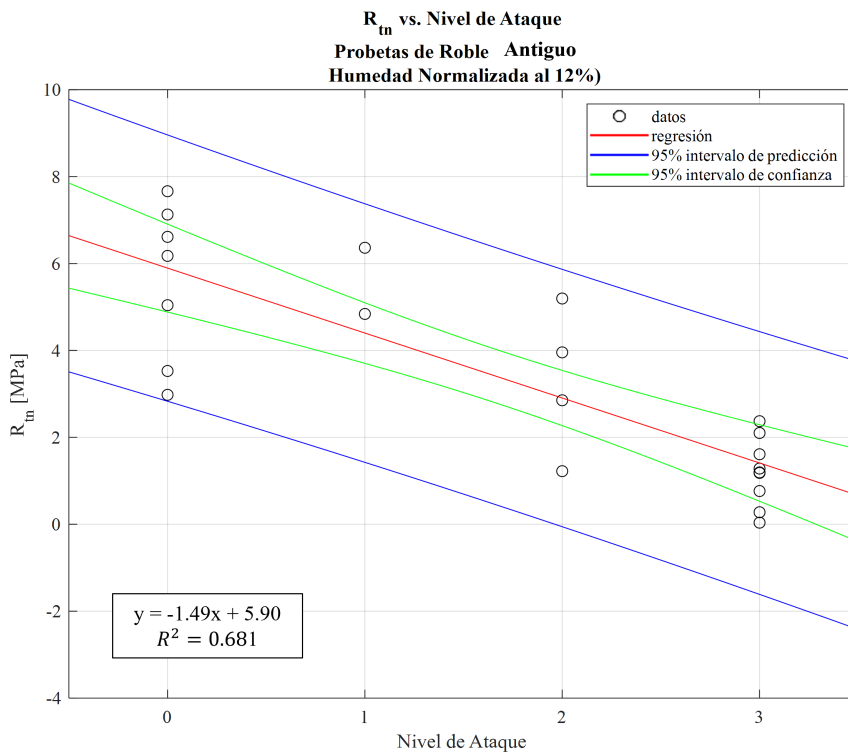


**Figura 95**  
Resistencia a la tracción perpendicular según tipo de probeta.

En relación con los resultados del grupo de probetas de roble antiguo, clasificadas según el nivel de ataque por termitas, se observa que las probetas clasificadas en el nivel 0 (sin daño) presentan una mayor dispersión en comparación con las de las categorías de roble nuevo y pino Oregón nuevo. La mediana de la resistencia en las probetas con daño por termitas fue de 6.18 MPa para las del nivel 0 (sin ataque), 5.60 MPa para el nivel 1, 3.40 MPa para el nivel 2 y 1.19 MPa para el nivel 3. En comparación con las del nivel 0, las probetas del nivel 1, 2 y 3 fueron un 10%, 58% y 135% menos resistentes, respectivamente. Además, las probetas del nivel 2 mostraron una resistencia un 96% mayor que las del nivel 3 (ver Figura 96).



**Figura 96**  
 Resistencia a la tracción perpendicular según nivel de ataque por termitas.



**Figura 97**  
 Regresión lineal e intervalos de predicción y media de confianza para los resultados de resistencia a la tracción perpendicular según el nivel de ataque por termitas.

A partir del gráfico desplegado en la Figura 97, se sintetiza la Ecuación (19), de forma empírica, desde las regresiones, intervalos y observaciones de los resultados experimentales. Esta ecuación relaciona la resistencia a la tracción perpendicular con el nivel de ataque observado, basado en la curva de ajuste resultante.

$$R_{tn,e} = f_{NA,TPE} * R_{tn0} \quad (19)$$

$$R_{tn0} = 5.90 \text{ MPa}$$

$$f_{NA,TPE} = \begin{cases} 1.00, & \text{si } NA = 0 \\ 0.75, & \text{si } NA = 1 \\ 0.49, & \text{si } NA = 2 \\ 0.24, & \text{si } NA = 3 \end{cases} \begin{matrix} [0.48; 1.52] \\ [0.24; 1.25] \\ [0.00; 1.00] \\ [0.00; 0.75] \end{matrix}$$

donde,  $R_{tn,e}$  es la resistencia a la compresión perpendicular esperada en MPa;  $f_{NA,TPE}$  representa al factor adimensional de reducción de resistencia a compresión paralela por nivel de ataque;  $R_{tn0}$  es la resistencia a la tracción perpendicular sin daño aparente por las termitas en MPa, y  $NA$  es el nivel de ataque.

La Ecuación (19) es aplicable exclusivamente a las maderas antiguas de roble extraídas de los edificios históricos de Valparaíso, como las analizadas en esta investigación.

En la Figura 97 se presenta una recta de regresión ajustada a los valores observados  $R_{tn,12}$  con el fin de evaluar el impacto del daño por termitas sobre la resistencia. Los resultados muestran que el ajuste del modelo es relativamente aceptable, con una correlación  $R^2$  de 0.681, lo que indica aproximadamente el 68.1% de la variación de la variable dependiente que puede ser explicada por el modelo.

Los ensayos de tracción perpendicular de roble antiguo (3.38 MPa) y nuevo (4.42 MPa) revelaron una resistencia promedio fue significativamente menor en un 57% y 32% respetivamente en comparación con las muestras del Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas (6.08 MPa) (Hernández & Pinilla, 2010). Esta discrepancia podría atribuirse al número limitado de muestras ensayadas en este estudio, lo que restringió la capacidad de realizar un análisis más exhaustivo de los datos.

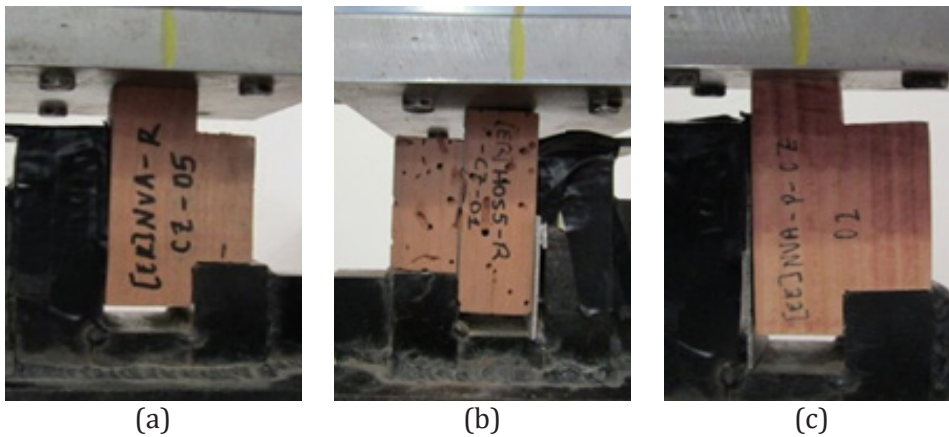
Por otro lado, los ensayos de tracción perpendicular en pino Oregón mostraron una resistencia promedio de 1.37 MPa, mientras que el Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas reportó una resistencia de 1.18 MPa (Hernández & Pinilla, 2010). Aunque la resistencia promedio en este estudio es ligeramente mayor, la variación podría deberse al tamaño limitado de la muestra en comparación con el documento mencionado. No obstante, la confirmación de estas hipótesis queda fuera del alcance de este trabajo. Las probetas de pino Oregón demostraron ser menos resistentes que las de roble antiguo y nuevo en un 85% y 105%, respectivamente.

#### 5.5.4 ENSAYO DE CIZALLE PARALELO A LA FIBRA (CZ)

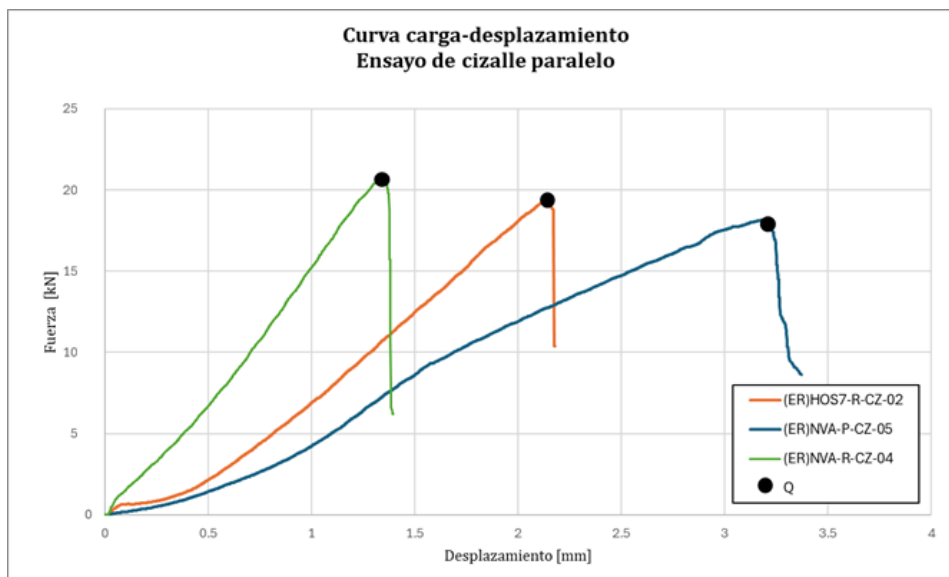
El ensayo de cizalle paralelo se llevó a cabo siguiendo los criterios de la norma NCh976 (Instituto Nacional de Normalización, 2018b). En este procedimiento, la carga se controló mediante desplazamiento a una velocidad constante de 0.5 mm/min, utilizando un cabezal rotulado que asegura una distribución uniforme de la carga sobre cada espécimen. Las probetas fueron diseñadas en forma de "T" en lugar de la forma de "L" especificada en la norma, para facilitar la aplicación de la carga y la inducción del fallo. Se añadió un volumen de 50 x 50 mm en uno de los extremos de las probetas.

La Figura 98 muestra las probetas de los diferentes grupos de madera

preparadas y colocadas en el equipo de ensayo. Durante la prueba, la carga se aplicó hasta inducir el fallo en dirección perpendicular a las fibras. El equipo registró la curva carga-desplazamiento para cada probeta, como se ilustra en la Figura 99. A partir de cada registro, se extrajo la carga máxima  $Q$  y se calculó la resistencia mecánica.



**Figura 98**  
Ensayos a cizalle paralelo con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.



**Figura 99**  
Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de cizalle paralelo.

Para determinar la tensión máxima de cizalle paralelo de cada probeta  $R_v$  se utilizó la Ecuación (20)

$$R_v = \frac{Q}{\bar{h} * \bar{e}} \quad (20)$$

donde,  $Q$  representa la carga máxima registrada obtenida de la falla de la probeta en Newtons, N;  $\bar{h}$  es el promedio de las medidas de la altura del plano de falla de la probeta en milímetros, mm y  $\bar{e}$  es el promedio de las medidas del ancho del plano de falla de la probeta en mm.

Los resultados de resistencia fueron normalizados a un contenido de humedad del 12% utilizando los coeficientes de ajuste de la norma chilena NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017a), a través de la Ecuación (21).

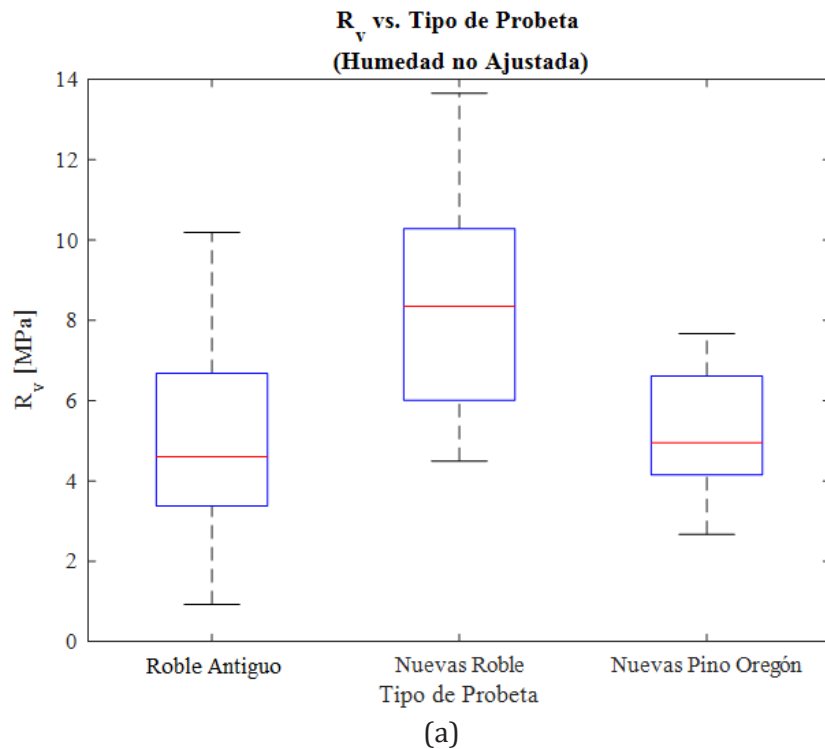
$$R_{v,12} = R_v * \left( \frac{1.33 - (0.0167 * 12)}{1.33 - (0.0167 * H)} \right) \tag{21}$$

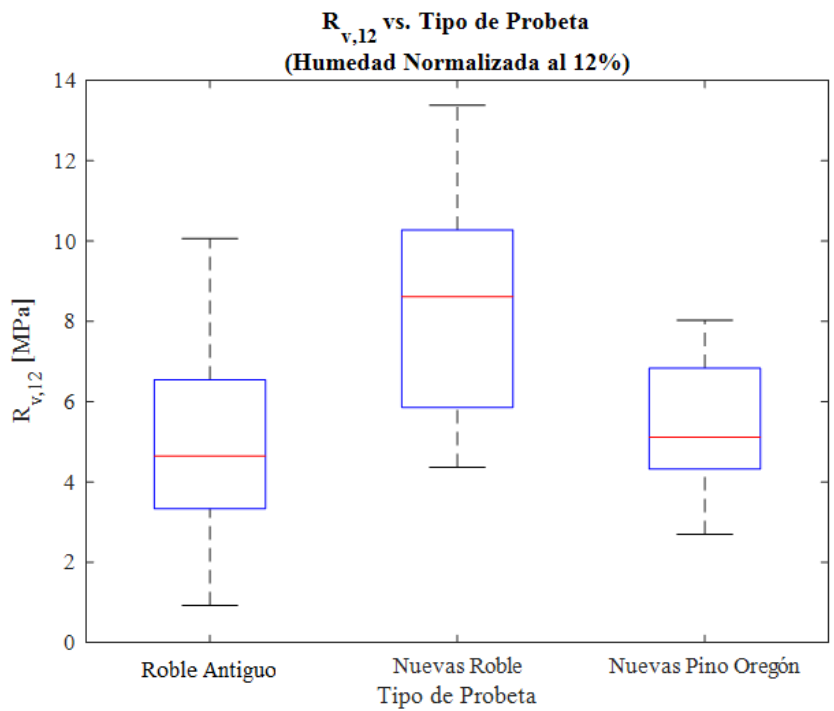
donde  $R_{v,12}$  es la resistencia al cizalle paralelo normalizada al 12% del contenido de humedad en MPa; y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en %, el cual no puede ser menor a 10% ni mayor a 23%.

Las Figura 100a y Figura 100b presentan los resultados de los ensayos realizados con las probetas de roble antiguo, roble nuevo y pino Oregón, con sus respectivos valores calculados y sus dispersiones. La figura 100<sup>a</sup> los datos considerando la humedad registrada al momento del ensayo, mientras que la figura 100b presenta los resultados ajustados de humedad normalizado al 12%.

Des la figura 100b se puede observar que la resistencia al cizalle paralelo disminuye notablemente en las probetas de roble antiguo en comparación con las de roble nuevo. En concreto, los valores de la mediana de la resistencia en las probetas de roble nuevo fueron de 8.62 MPa, mientras que para los grupos de probetas de roble antiguo fue de 4.65 MPa, experimentando una reducción del 60%. Las probetas de pino Oregón, con una mediana 5.12 MPa, demostraron ser un 51% menos resistentes que las de roble nuevo, pero un 9,6% más resistentes que las de roble antiguo.

Además, los gráficos revelan una disminución en la dispersión del grupo de probetas nuevas de pino Oregón. Los resultados normalizados muestran que las probetas de roble antiguo tienen una resistencia que varía entre 0.92 MPa y 10.06 MPa, mientras que las de roble nuevo se sitúan entre 4.37 MPa y 13.38 MPa. Las probetas de pino Oregón, por su parte, presentan un rango de resistencia de 2.69 MPa a 8.03 MPa (ver Figura 100b).



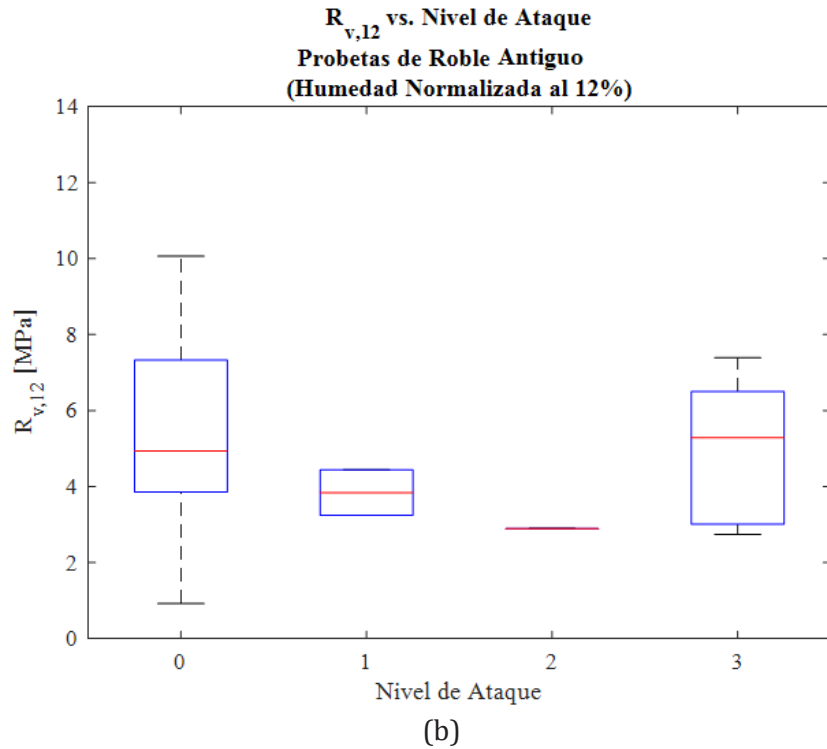
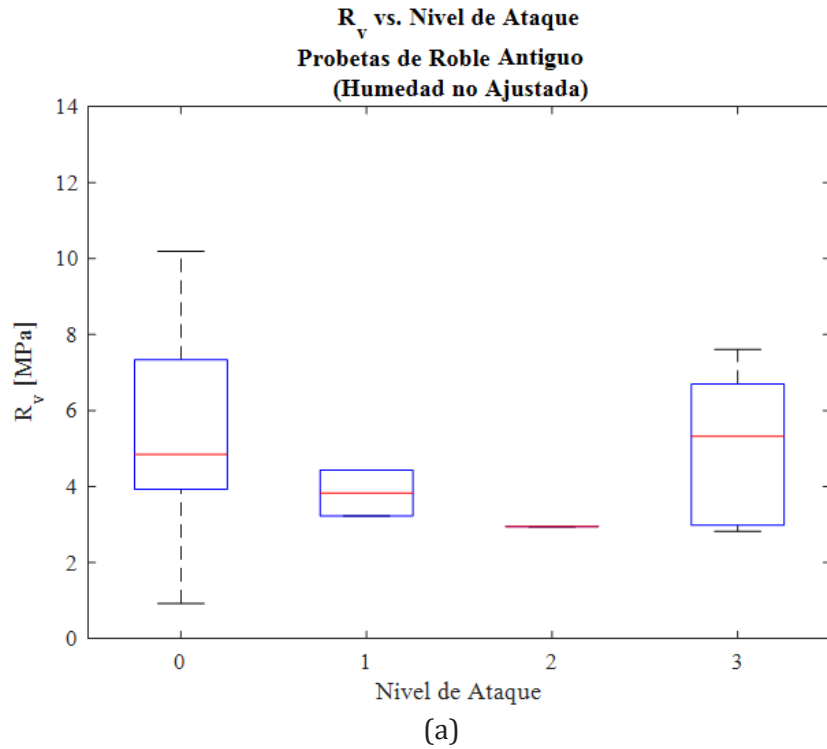


**Figura 100**  
Resistencia a la cizalle paralelo según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.

(b)

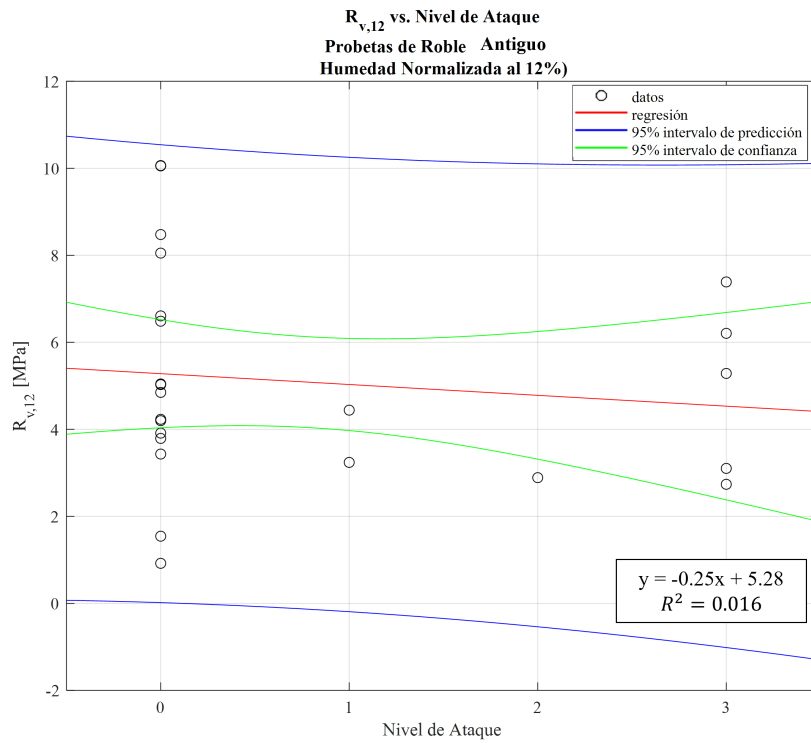
En el grupo de probetas clasificadas por el nivel de ataque superficial las medianas de la resistencia fueron las siguientes: 4.94 MPa para nivel de ataque 0, 3.84 MPa para el nivel ataque 1, 2.89 MPa para el ataque 2, y 5.29 MPa para el nivel 3. Estos datos indican que las probetas con nivel de ataque nivel 1 y 2 presentaron una resistencia un 25% y 52% menor, respectivamente, en comparación con las del nivel 0. Sin embargo, la mediana de las probetas del nivel 3 fue un 6.8% superior a la de las del nivel 0, lo que contrasta con la tendencia esperada de una reducción progresiva de la resistencia con el aumento del nivel de daño.

Este resultado atípico podría deberse a varios factores, como errores en la clasificación de las probetas, que podrían no haber presentado daño significativo en el plano de falla, o a que el mecanismo de fallo no se activó en la dirección de la fibra del ensayo. Por lo tanto, se recomienda incrementar el tamaño de la muestra para mejorar la fiabilidad de los resultados, especialmente para los niveles de ataque 1 y 2.



**Figura 101**  
 Resistencia a la cizalle paralelo según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.

Para cuantificar la tendencia de los resultados obtenidos, se ajustó una recta de regresión a los promedios  $R_{(v,12)}$ , como se muestra en la Figura 102. Los resultados indican una baja correlación entre el nivel de ataque y la resistencia del cizalle paralelo, con un valor del  $R^2$  es 0.016, lo que sugiere una correlación lineal casi nula. La línea de regresión tiende a ser horizontal (ver Figura 102). Debido a esta baja correlación obtenida en este grupo de ensayos, no fue posible plantear una ecuación empírica que relacione el nivel de daño observado con la resistencia al cizalle paralelo basándose en los resultados de este estudio.



**Figura 102**  
 Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados a cizalle paralelo según el nivel de ataque por termitas.

Los resultados de los ensayos de cizalle paralelo revelaron diferencias significativas entre el roble antiguo y roble nuevo. Los resultados de roble antiguo mostraron una resistencia promedio de 5.08 MPa, que es menor en comparación con los valores reportados por el INFOR (Catalán et al., 2020), que indicaron 6.9 MPa, demostrando una menor resistencia en un 30% los resultados de roble antiguo, y el Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas (Hernández & Pinilla, 2010), que registró 11.76 MPa, siendo este mayor en resistencia en un 79% que los resultados de roble antiguo. En contraste, las probetas de roble nuevo exhibieron una resistencia más cercana a los resultados mencionados en estos informes, con un valor de 8.40 MPa. Este contraste sugiere las probetas de roble antiguo, afectadas por termitas, experimentaron una reducción en su resistencia.

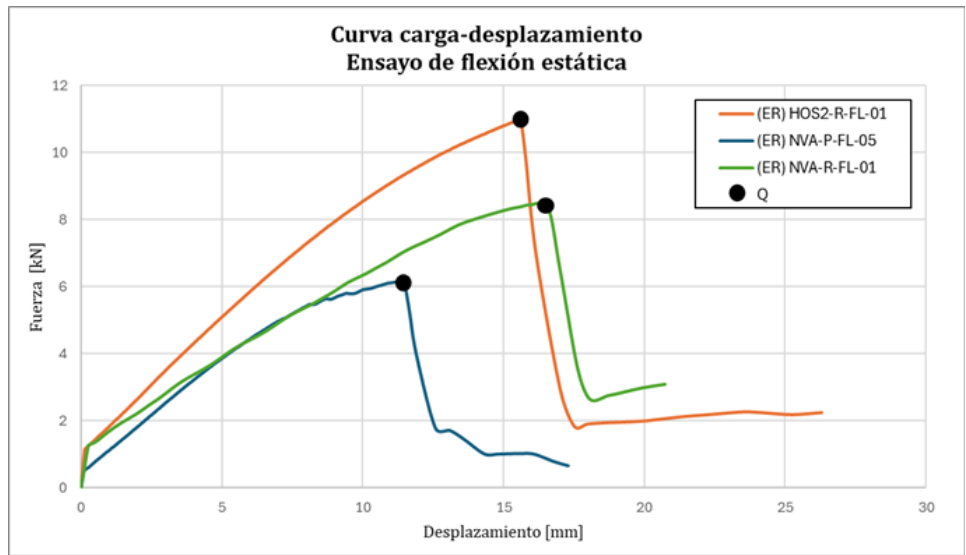
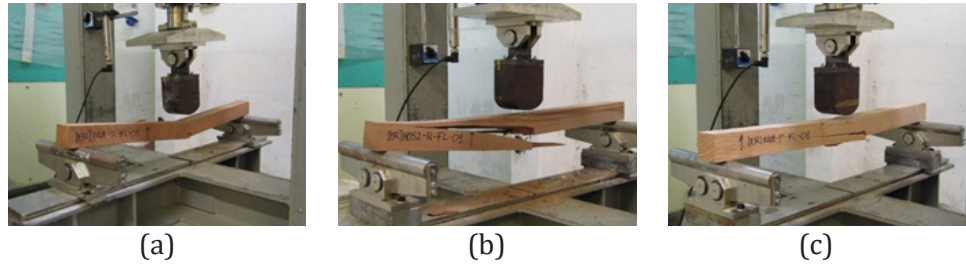
En cuanto a los resultados de pino Oregón, los ensayos de cizalle paralelo revelaron una resistencia media de 5.4 MPa. De acuerdo con la literatura revisada, el informe del Instituto Forestal de Chile (Catalán et al., 2019) reportó un promedio de 5.9 MPa para el grado estructural GS y 5.1 MPa para el grado estructural G1. Esto sitúa a las probetas de pino Oregón entre los grupos estructurales GS y G1 mencionados en el informe. Basado en estos valores, se observó que los resultados de pino Oregón fueron aproximadamente un 43% menos resistentes que las de roble nuevo, pero un 6% más resistentes que las de roble antiguo.

### 5.5.5 ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA (FL)

Los ensayos de flexión estática se realizaron conforme a los criterios establecidos en la norma NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e). La carga se controló por desplazamiento aplicándose a una velocidad constante de 2.5 mm/min mediante un cabezal rotulado que permite la distribución uniforme de la carga sobre cada espécimen. La Figura 103 muestra los especímenes de los diferentes grupos de maderas y la configuración de los ensayos en el equipo de carga. Durante el ensayo, las probetas se cargaron a tres puntos, concentrando la fuerza en el centro, y se registraron tanto la magnitud de la fuerza como la deflexión producida en el

medio del vano durante el transcurso del ensayo. La Figura 104 presenta, a modo de ejemplo, las curvas de carga-desplazamiento obtenidas para cada probeta al finalizar el ensayo, donde se observa un comportamiento no lineal, y una falla frágil una vez que las probetas alcanzan su carga máxima  $Q$ .

**Figura 103**  
Ensayos a flexión estática con diferentes tipos de probetas: (a) roble nuevo; (b) roble antiguo y (c) pino Oregón nuevo.



**Figura 104**  
Ejemplos de mediciones carga-desplazamiento para el ensayo de flexión estática.

A partir de los ensayos de flexión se deben calcular dos propiedades mecánicas: el módulo de rotura  $R_f$  y el módulo de elasticidad en flexión  $E_f$ . El módulo de rotura en flexión  $R_f$  se calcula mediante la expresión indicada en la Ecuación (22):

$$R_f = \frac{3Q * L}{2b * h^2} \quad (22)$$

donde  $R_f$  es el módulo de rotura en MPa,  $Q$  es la carga máxima obtenida en Newtons (N),  $L$  es la luz del ensayo, igual a 700 mm,  $b$  es el ancho de la probeta medido a la mitad de la luz en milímetros (mm) y  $h$  es la altura de la probeta medida a la mitad de la luz en milímetros (mm).

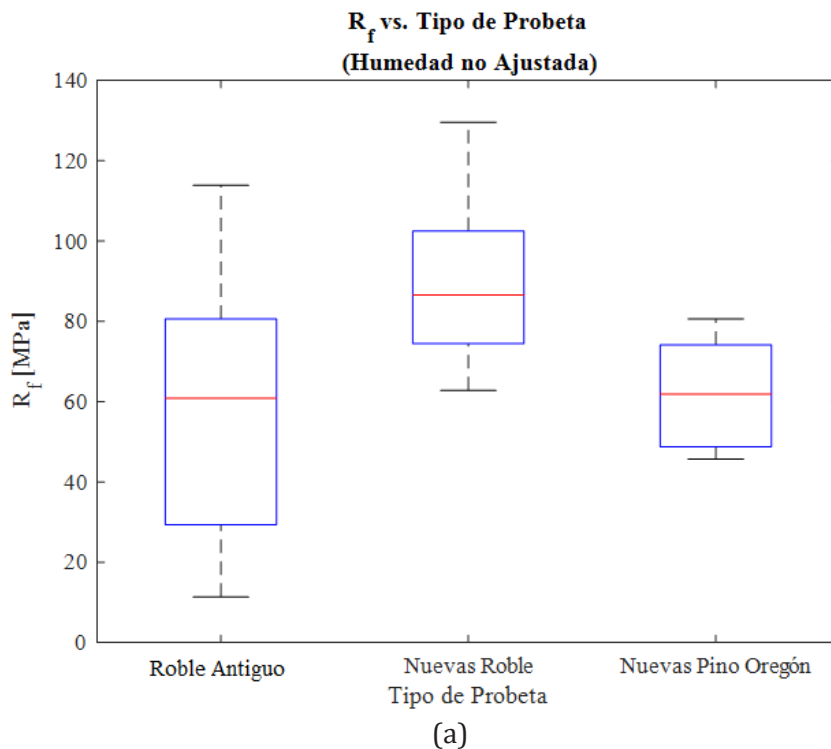
Los resultados de resistencia son ajustados a un contenido de humedad del 12% para evitar sesgos y permitir comparaciones precisas, utilizando los factores de ajuste sugeridos en norma chilena NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017a), como se muestra en la Ecuación (23).

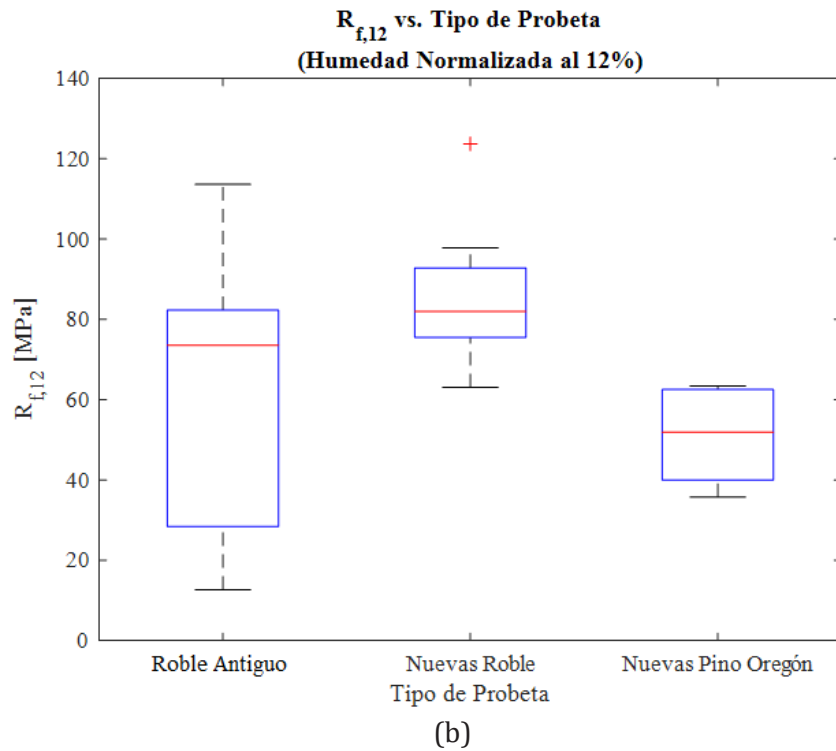
$$R_{f,12} = \begin{cases} R_f & , \text{si } R_f \leq 16.6 \text{ MPa} \\ R_f * \left( \frac{16.65 - (40 * 12)}{16.65 - (40 * H)} \right) & , \text{si } R_f > 16.6 \text{ MPa} \end{cases} \quad (23)$$

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

La Figura 105a y Figura 105b muestran los resultados del módulo de rotura  $R_f$  y del módulo de rotura normalizado  $R_{f,12}$  para los grupos de probetas de roble antiguo, roble nuevo y pino Oregón, considerando tanto la humedad registrada durante el ensayo como el ajuste de humedad normalizado al 12%, respectivamente.

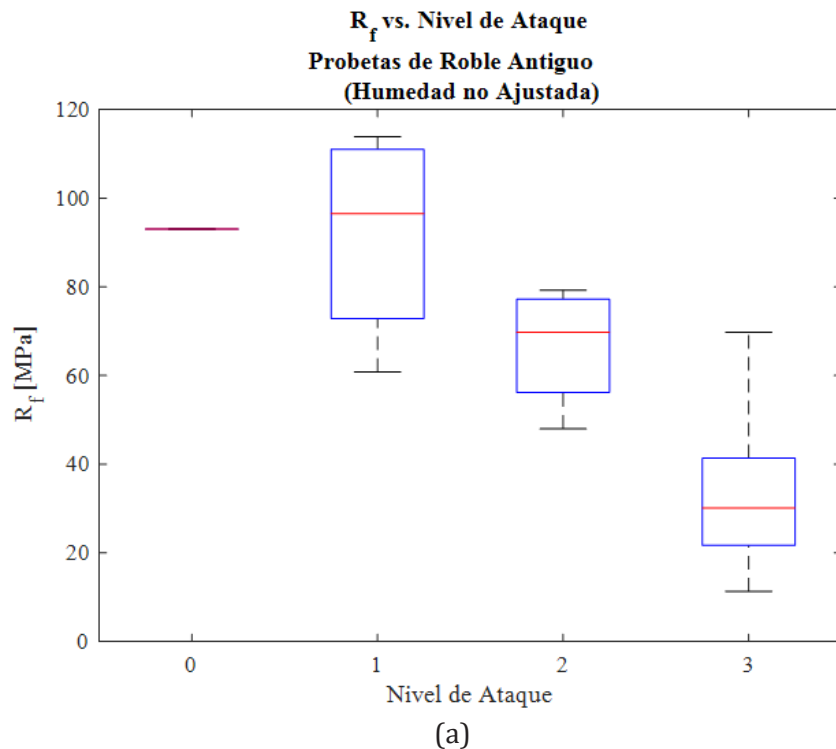
En la Figura 105b se observa que la mediana del módulo de rotura para las probetas de roble antiguo es de 73.55 MPa, mientras que para las probetas de roble nuevo es de 81.97 MPa. Esto indica que la madera antigua presenta una reducción del 11% en su resistencia a la flexión estática en comparación con la madera nueva. Por otro lado, la mediana del módulo de rotura para las probetas de pino Oregón es de 51.88 MPa, lo que muestra que es un 35% y un 45% menos resistente que las probetas de roble antiguo y roble nuevo, respectivamente.

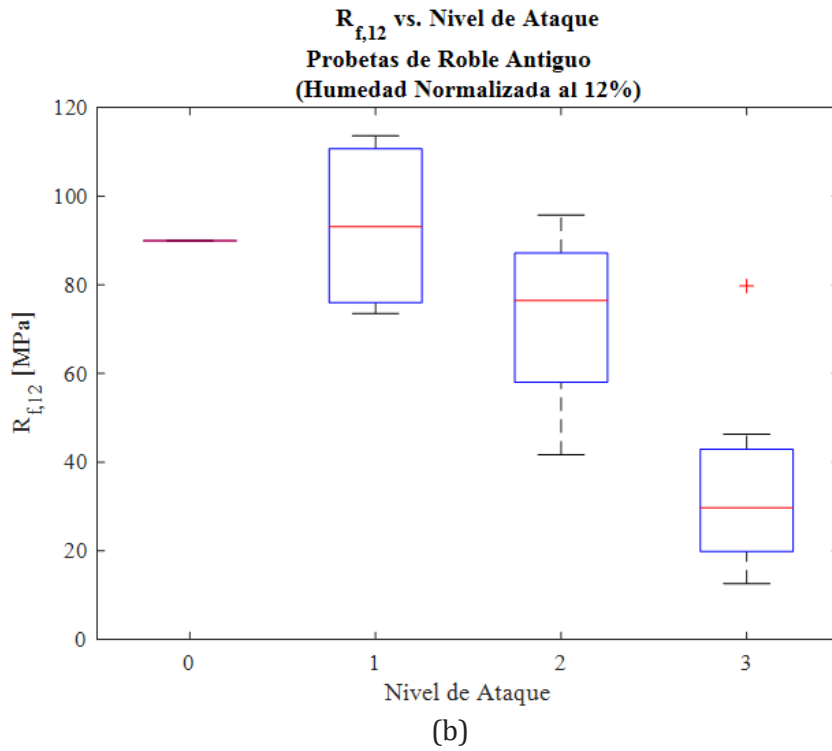




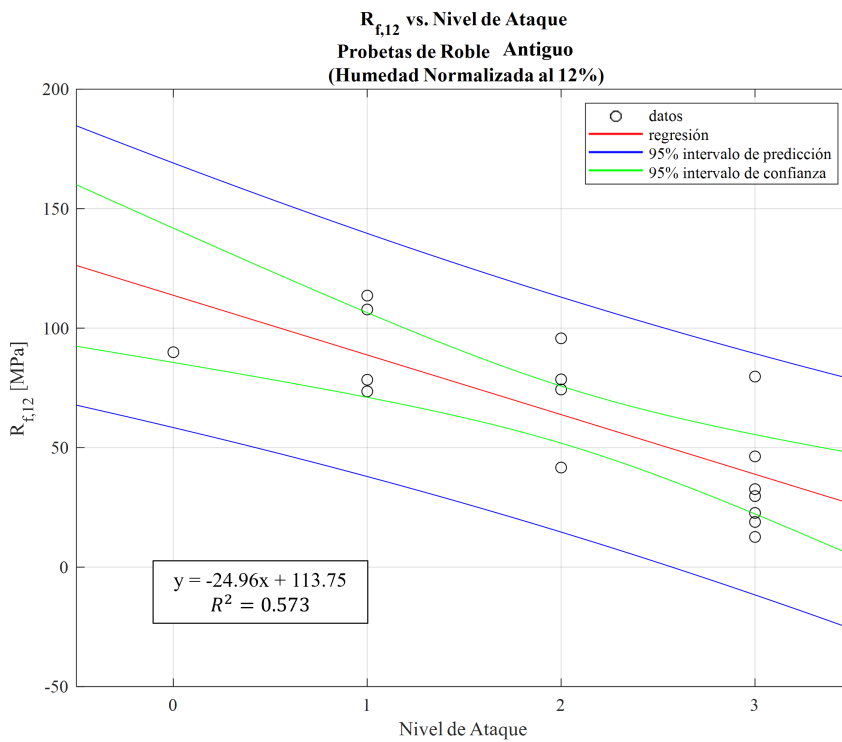
**Figura 105**  
Módulo de rotura en flexión estática según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.

La Figura 106b presenta los resultados de los ensayos en probetas clasificadas según su nivel de daño por ataque de termitas, mostrando una clara tendencia a la disminución de la resistencia a medida que aumenta el nivel de ataque o daño. Los valores de las medianas del módulo de rotura revelan que la resistencia disminuye de 89.93 MPa en el nivel de ataque 0 a 29.73 MPa en el nivel de ataque 3, lo que representa una reducción del 101%. Además, para los niveles 1 y 2, las medianas de la resistencia son 93.11 MPa y 76.46 MPa, respectivamente, lo que representa una reducción del 3.5% y del 16% en comparación con el nivel 0. Estos resultados deben interpretarse con cautela, dado que solo se pudo clasificar una probeta en el nivel 0 y se identificó un valor anómalo en las probetas del nivel 3.





**Figura 106**  
 Módulo de rotura en flexión estática según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.



**Figura 107**  
 Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados del módulo de rotura en flexión según el nivel de ataque por termitas.

A partir del gráfico desplegado en la Figura 107, se sintetiza la Ecuación (24) de forma empírica, desde las regresiones, intervalos y observaciones de los resultados experimentales. Esta ecuación relaciona la resistencia a la flexión estática con el nivel de ataque observado, basado en la curva de ajuste resultante:

$$R_{f,e} = f_{NA,FL} * R_{f0} \quad (24)$$

$$R_{f0} = 113.75 \text{ MPa}$$

$$f_{NA,FL} = \begin{cases} (1.00, \text{ si } NA = 0) & [0.51; 1.49] \\ (0.78, \text{ si } NA = 1) & [0.33; 1.23] \\ (0.56, \text{ si } NA = 2) & [0.13; 0.99] \\ (0.34, \text{ si } NA = 3) & [0.00; 0.79] \end{cases}$$

donde,  $R_{f,e}$  es la resistencia a la compresión perpendicular esperada en MPa;  $f_{NA,FL}$  representa al factor adimensional de reducción de resistencia a compresión paralela por nivel de ataque;  $R_{f0}$  es la resistencia a la flexión estática sin daño aparente por las termitas en MPa; y  $NA$  es el nivel de ataque. La Ecuación (24) solo es válida para las maderas antiguas de roble extraídas de los edificios históricos de Valparaíso.

Para determinar la tendencia de los ensayos se ajusta una recta de regresión a los promedios  $R_{f,12}$ . En vista de los resultados se puede deducir que el ajuste del modelo es aceptable, ya que su valor del  $R^2$  es 0.573, lo que indica aproximadamente el 49.8% de la variación de la variable dependiente puede ser explicada por el modelo, mostrando una buena correlación lineal con los datos (ver Figura 107). No obstante, se debe considerar que para el nivel de ataque 0 solo se registró una probeta, lo que podría sesgar la interpretación de los datos.

En cuanto a los resultados de los ensayos de flexión estática que determinan el módulo de rotura, agrupados por tipo de probeta, se observan las siguientes conclusiones. Los ensayos de roble antiguo, con un módulo de rotura de 60.03 MPa, mostraron resultados similares a los reportados por el INFOR (Catalán et al., 2020) para el grado estructural G2, que es de 64.4 MPa. En contraste, los ensayos de roble nuevo, con un módulo de rotura de 85.91 MPa, presentaron valores superiores a los informes del Instituto Forestal de Chile (78.2 MPa para el grado N°1) y al compendio de Hernández y Pinilla (2010), que reportó 82.03 MPa.

El módulo de rotura en flexión los resultados del pino Oregón fue de 50.88 MPa. La literatura muestra que el Informe Forestal de Chile (Vásquez et al., 2013) reportó un promedio de 52.8 MPa para el grado estructural GS, y otro estudio del INFOR (Catalán et al., 2019) indicó un promedio de 60.4 MPa para el mismo grado. Ambos informes utilizaron un tamaño de muestra mayor al disponible en esta investigación. Los ensayos de pino Oregón resultaron ser un 17% más resistentes que las de roble antiguo, pero un 51% menos resistentes que las de roble nuevo.

A partir de los resultados experimentales de la resistencia en flexión estática, también se puede calcular la rigidez, conocida como módulo Young o de elasticidad  $E_f$ . Este cálculo se basa en las curvas de carga-deflexión obtenidas de los ensayos (ver Figura 104). Para determinar  $E_f$ , se traza una línea recta desde el origen hasta la intercepción donde la curva deja de ser lineal, conocido como el punto de límite de proporcionalidad. Este punto marca el comienzo del rango no-lineal. Una explicación detallada del método utilizado, junto con un ejemplo, se encuentra en el Anexo 4.

De acuerdo con la norma NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e), el módulo de elasticidad se puede determinar a través de la siguiente Ecuación (25)

$$E_f = \frac{(P_{lp} - P_0) * L^3}{4 * (\delta_{lp} - \delta_0) * bh^3} \quad (25)$$

donde  $E_f$  es el módulo de elasticidad en flexión en MPa;  $P_{lp}$  es la carga registrada límite de proporcionalidad en Newtons, N;  $P_0$  es la carga de asentamiento del equipo en N;  $\delta_{lp}$  es la deflexión registrada en el límite de proporcionalidad en milímetros, mm;  $\delta_0$  es la deflexión de asentamiento 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 manera similar al cálculo del módulo de rotura, los resultados de cada probeta de madera deben ser normalizados en función de su contenido de humedad registrado. Esto se realiza conforme a lo establecido en la norma NCh987 (Instituto Nacional de Normalización, 2018e), utilizando la Ecuación (26):

$$E_{f,12} = E_f * \left( \frac{1.857 - (0.0237 * 12)}{1.857 - (0.0237 * H)} \right) \quad (26)$$

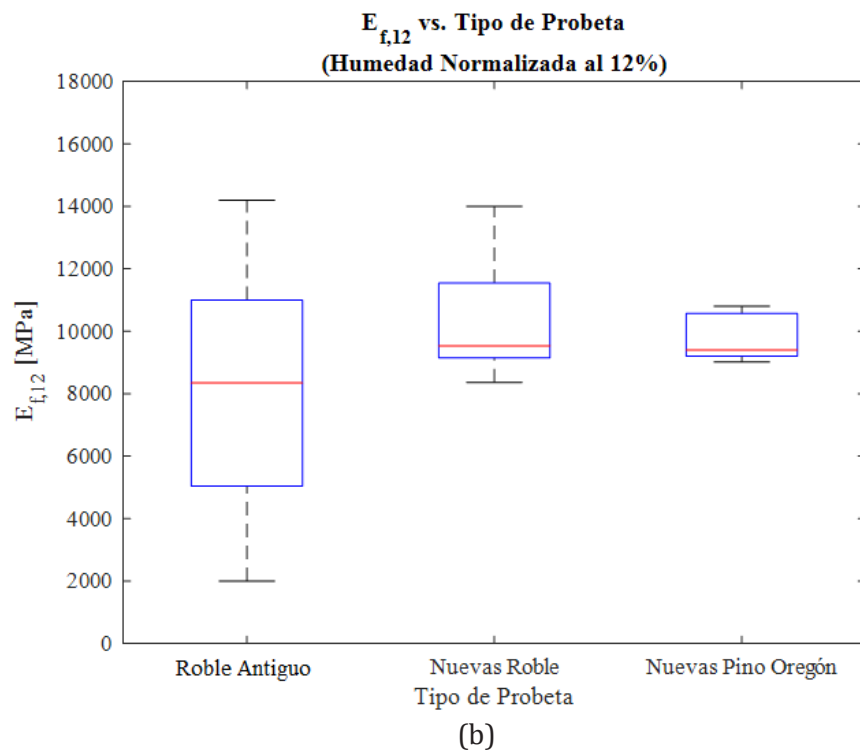
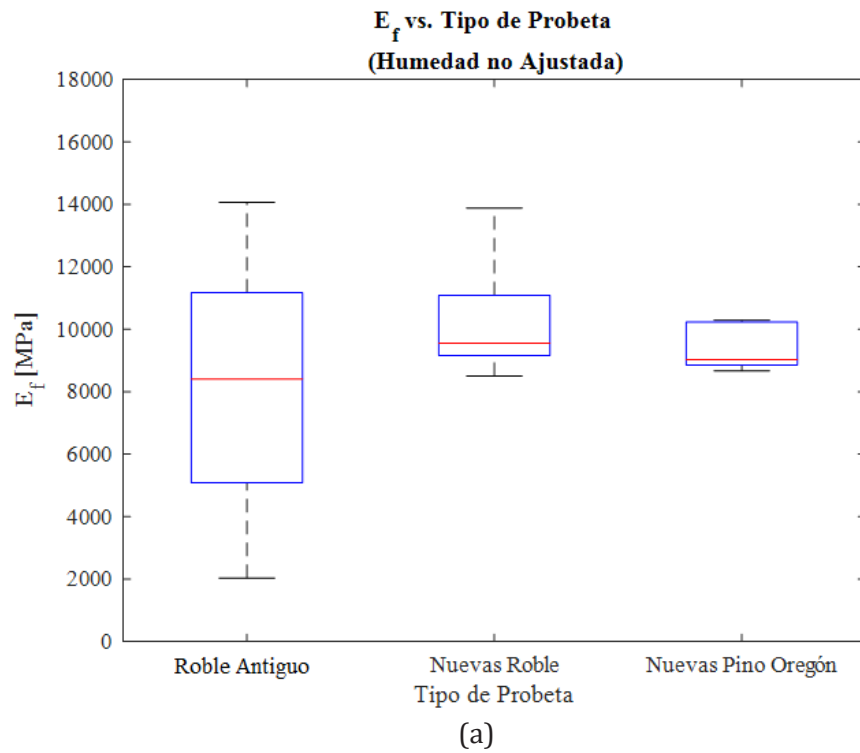
donde  $E_{f,12}$  es el módulo de elasticidad en flexión normalizado al 12% del contenido de humedad en MPa;  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayo en %, el cual no puede ser menor a 10% ni mayor a 23%.

Las Figura 108a y Figura 108b muestran los resultados del cálculo del módulo de elasticidad en flexión para los grupos de probetas de roble antiguo, roble nuevo y pino Oregón, considerando tanto la humedad sin ajustar como contenido de humedad ajustado al 12% respectivamente.

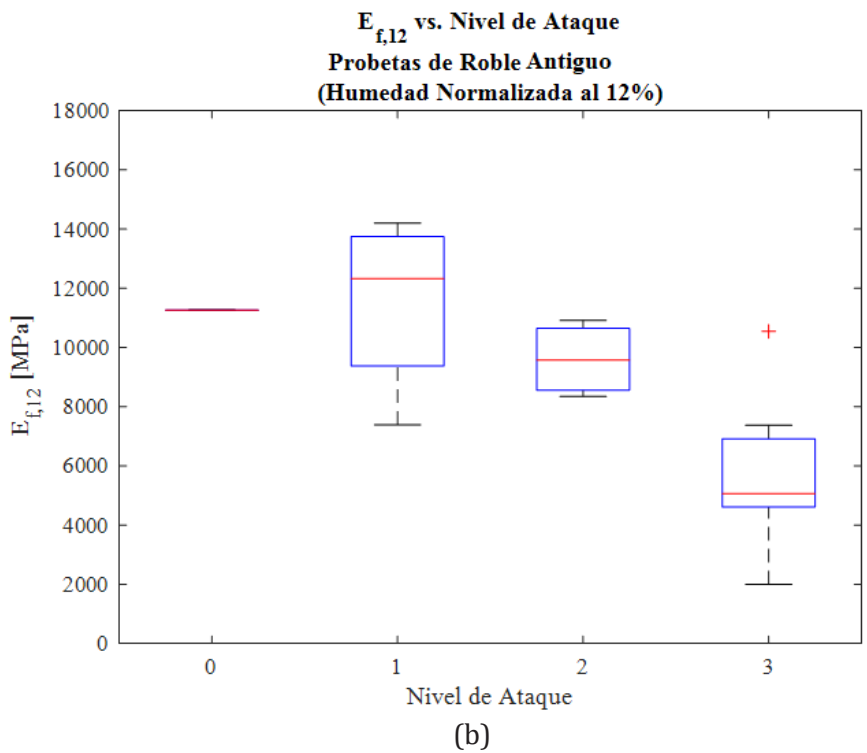
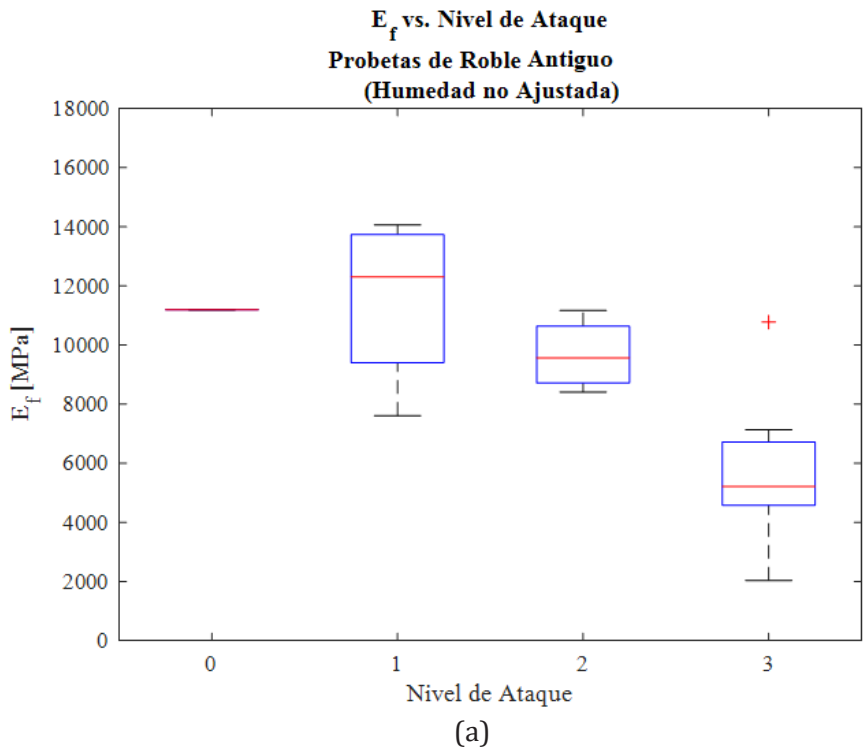
La mediana del módulo de elasticidad para las probetas de roble antiguo fue de 8344 MPa, mientras que para las de roble nuevo fue 9535 MPa. Esto indica que la madera antigua presenta una reducción del 13% en su resistencia en comparación al roble nuevo. Por otro lado, la mediana de elasticidad para las probetas de pino Oregón fue de 9400 MPa, lo que muestra que estas probetas son un 12%, más resistentes que las de roble antiguo, pero un 1.4% menos resistentes que las de roble nuevo.

Las Figuras 109a y 109b presentan los resultados y las variaciones del cálculo de la rigidez para las probetas de roble antiguo, agrupadas según el nivel de ataque y daño por termitas. El módulo de elasticidad muestra una clara tendencia a disminuir a medida que aumenta la porosidad causada por el daño de las termitas, es decir, con el incremento en el nivel de ataque o daño (ver Figura 109b).

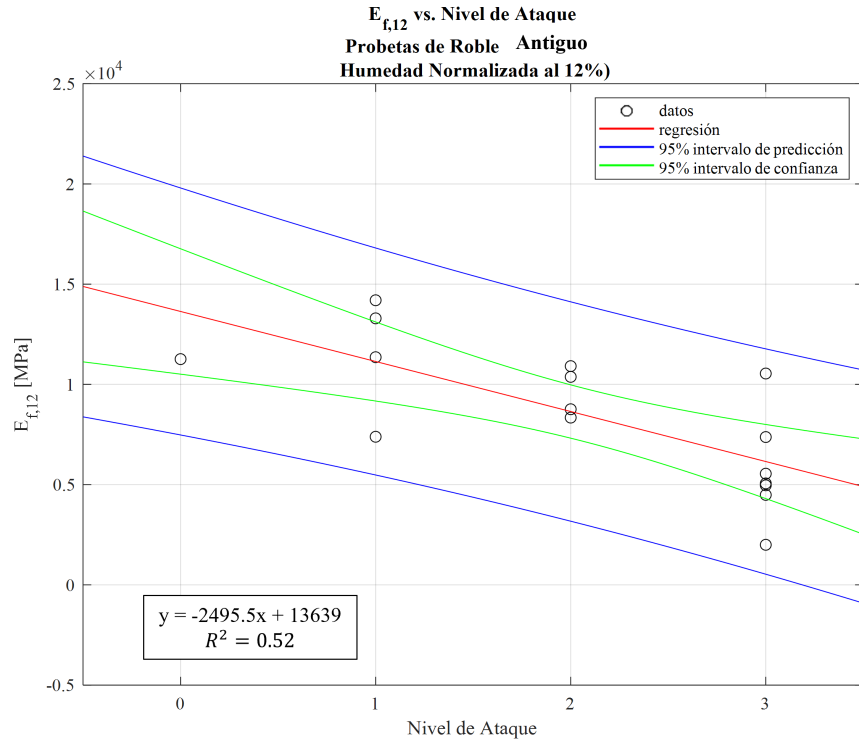
Los valores medianos indican que la resistencia disminuye de 11261 MPa en el nivel de ataque 0 a 5061 MPa en el nivel de ataque 3, lo que representa una reducción del 76%. Además, el módulo de elasticidad para los niveles 1 y 2 se estimó en 12326 MPa y 9569 MPa, respectivamente. Estos valores reflejan un aumento del 9% y una reducción del 16% en comparación con el nivel 0.



**Figura 108**  
Módulo de elasticidad en flexión estática según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.



**Figura 109**  
 Módulo de elasticidad en flexión estática según nivel de ataque por termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad



**Figura 110**  
 Regresión lineal e intervalo de predicción y media de confianza para los resultados del módulo de elasticidad en flexión según el nivel de ataque por termitas.

A partir del gráfico desplegado en la Figura 110, se sintetiza la Ecuación (27), de forma empírica, desde las regresiones, intervalos y observaciones de los resultados experimentales. Esta ecuación relaciona el módulo de elasticidad en flexión estática con el nivel de ataque observado, basado en la curva de ajuste resultante:

$$E_{f,e} = g_{NA, FL} * E_{f0} \tag{27}$$

$$E_{f0} = 13639.1 \text{ MPa}$$

$$g_{NA, FL} = \begin{cases} 1.00, \text{ si } NA = 0 & [0.55; 1.45] \\ 0.82, \text{ si } NA = 1 & [0.40; 1.23] \\ 0.63, \text{ si } NA = 2 & [0.23; 1.04] \\ 0.45, \text{ si } NA = 3 & [0.04; 0.86] \end{cases}$$

donde,  $E_{f,e}$  es el módulo de elasticidad en flexión en MPa;  $g_{NA, FL}$  representa al factor adimensional de reducción de resistencia a la flexión estática por nivel de ataque;  $E_{f0}$  es el módulo de elasticidad de las probetas sin daño (nivel 0) en MPa; y  $NA$  es el nivel de ataque. Esta ecuación es solo válida para las maderas antiguas de roble extraídas de los edificios históricos de Valparaíso.

De manera similar al cálculo del módulo de rotura, se realizó una regresión lineal con los promedios del módulo de elasticidad. La Figura 110 muestra el ajuste de las curvas, indicando una correlación relativamente buena entre  $E_{f,12}$  y el nivel de ataque, con un valor de  $R^2$  de 0.52. Esto sugiere una buena correlación lineal con los datos. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, este modelo debe interpretarse con precaución debido a la falta de datos en la clasificación del nivel de ataque 0, lo que podría sesgar los resultados del ajuste.

En cuanto a los resultados del módulo de elasticidad derivados de los ensayos de flexión estática y agrupados por tipo de probeta, se observa lo siguiente: las muestras de roble antiguo, con un valor de 8124.4 MPa, mostraron valores inferiores a los reportados por el Instituto Forestal de

Chile (Catalán et al., 2020), que fueron de 12435 MPa para el grado N°1, así como a los del compendio de Hernández y Pinilla (2010), que registró 12112.08 MPa. Por otro lado, las muestras de roble nuevo, con un valor de 10351 MPa, presentaron resultados más alineados con los valores revisados en la literatura.

Para el módulo de elasticidad en las muestras de pino Oregón, el estudio registró una magnitud de 9731.8 MPa. En comparación, el informe del INFOR (Catalán et al., 2019) reportó un valor para el grado G1 que era un 5% mayor que el obtenido en esta investigación. A pesar de la variabilidad del material y el tamaño limitado de la muestra, los resultados se encuentran dentro del rango esperado.

### 5.5.6 DENSIDAD

De acuerdo con lo establecido en las normas chilenas, la densidad de las probetas de madera se calcula de la misma manera que para todos los ensayos realizados en esta investigación utilizando la Ecuación (28):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (28)$$

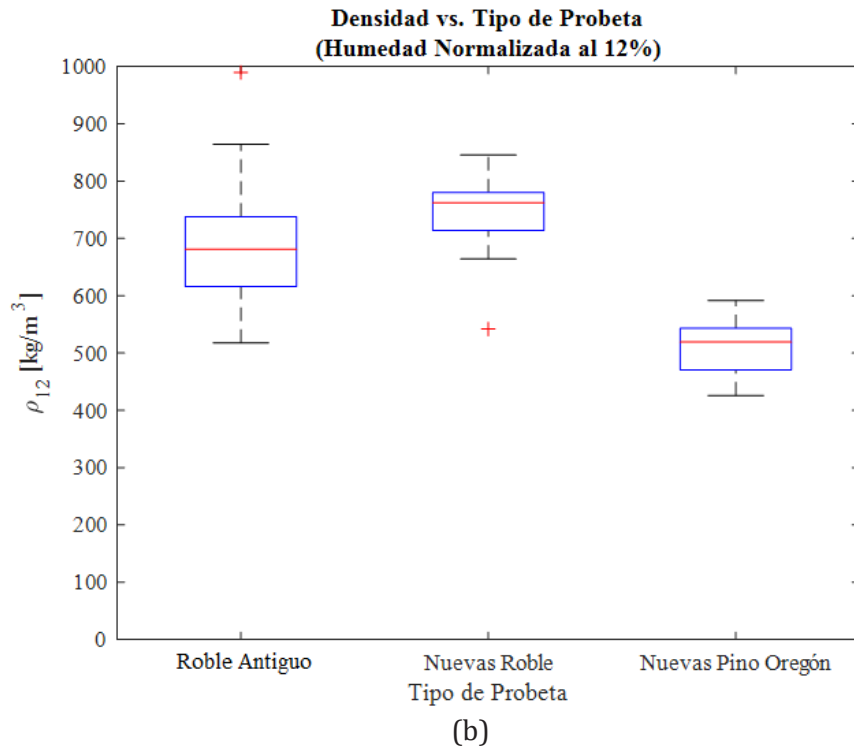
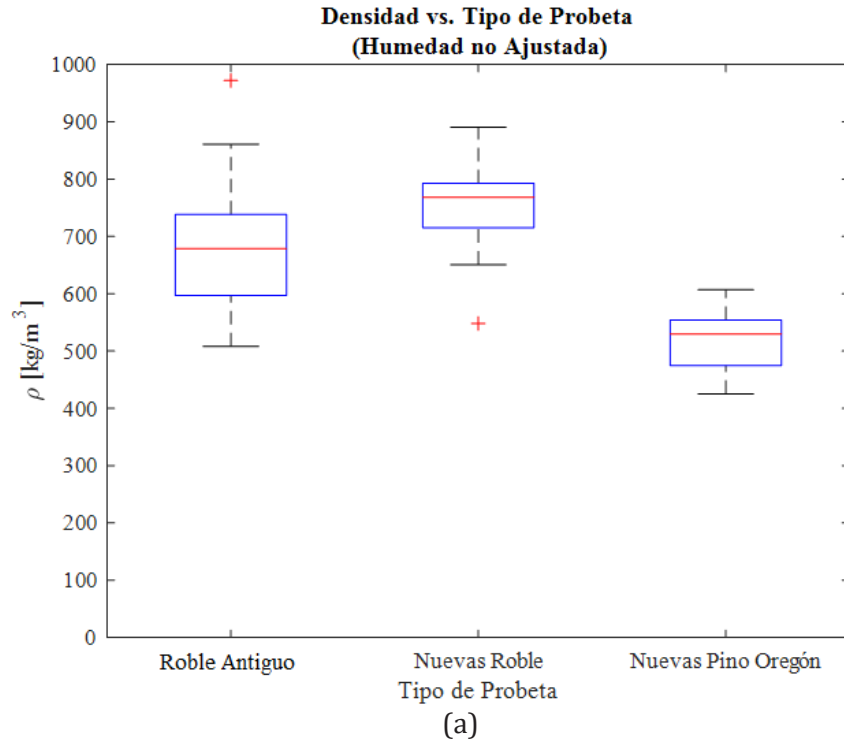
donde  $\rho$  es la densidad de la probeta al momento del ensayo en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; la masa registrada en  $\text{kg}$  expresada en  $m$ ; y  $V$  es el volumen calculado con la geometría medida en cada probeta en  $\text{m}^3$ .

En todos los casos, los resultados son ajustados al contenido de humedad al 12% para evitar sesgos y poder compararlos de forma homogénea. Para realizar el ajuste, se utilizan los factores propuestos en la norma chilena NCh3028/2 (Instituto Nacional de Normalización, 2017a), que se describe en la Ecuación (14):

$$\rho_{12} = \rho * \left( \frac{1.12}{1 + \frac{H}{100}} \right) \quad (29)$$

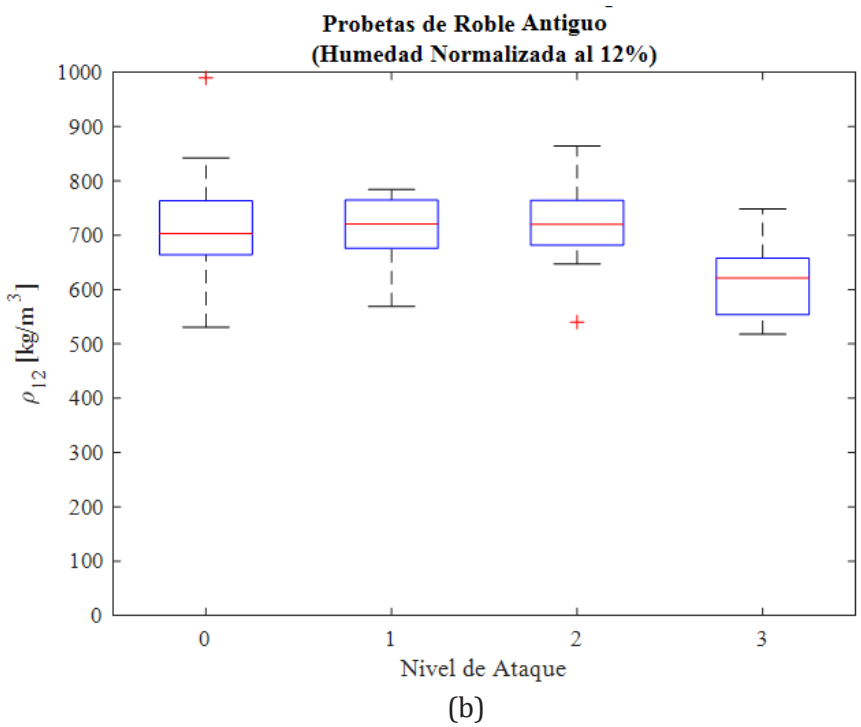
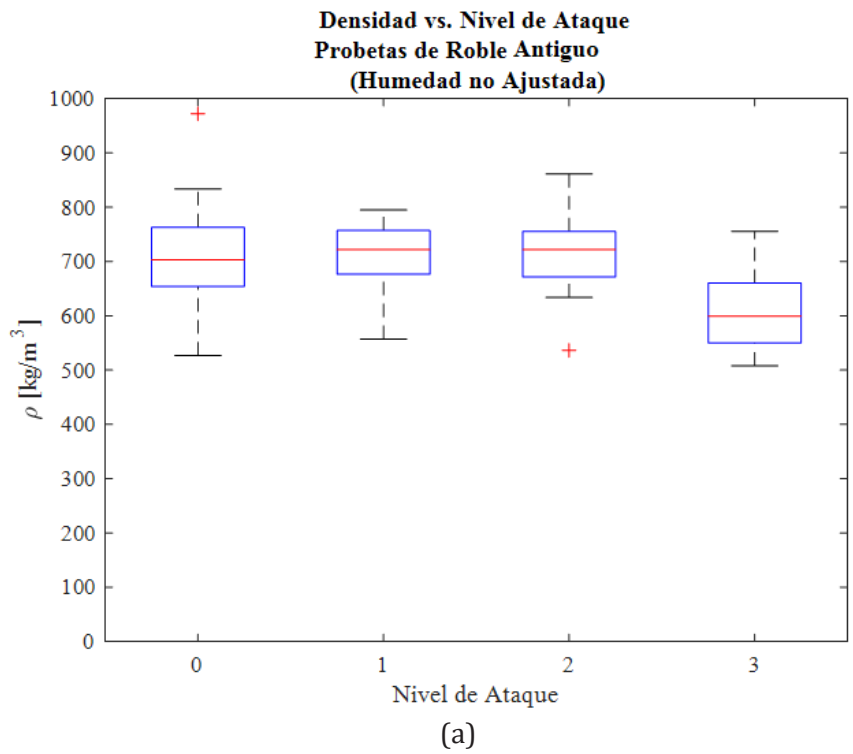
donde  $\rho_{12}$  es la densidad normalizada al 12% de contenido de humedad en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; y  $H$  es el contenido de humedad registrado al momento del ensayos en %.

La Figura 111a y Figura 111b muestran los valores de densidad obtenidos para cada grupo de probetas. Los resultados indican que la mediana de la densidad en las probetas de roble antiguo (con humedad normalizada) fue de  $681 \text{ kg}/\text{m}^3$ , mientras que para las de roble nuevo fue de  $762 \text{ kg}/\text{m}^3$ , demostrando que las probetas de roble antiguo disminuyeron su densidad en un 11% respecto al roble nuevo. En contraste, la mediana de la densidad en las probetas de pino Oregón fue de  $519 \text{ kg}/\text{m}^3$ , lo que muestra que estas son menos resistentes que las probetas de roble antiguo y roble nuevo en un 27% y 38%, respectivamente. La diferencia observada entre el roble antiguo y el nuevo sugiere que, con el tiempo, el roble puede experimentar una ligera reducción en su densidad. Este efecto podría atribuirse a procesos como la degradación celular, la pérdida de componentes volátiles, o la formación de microfisuras internas a lo largo de los años.



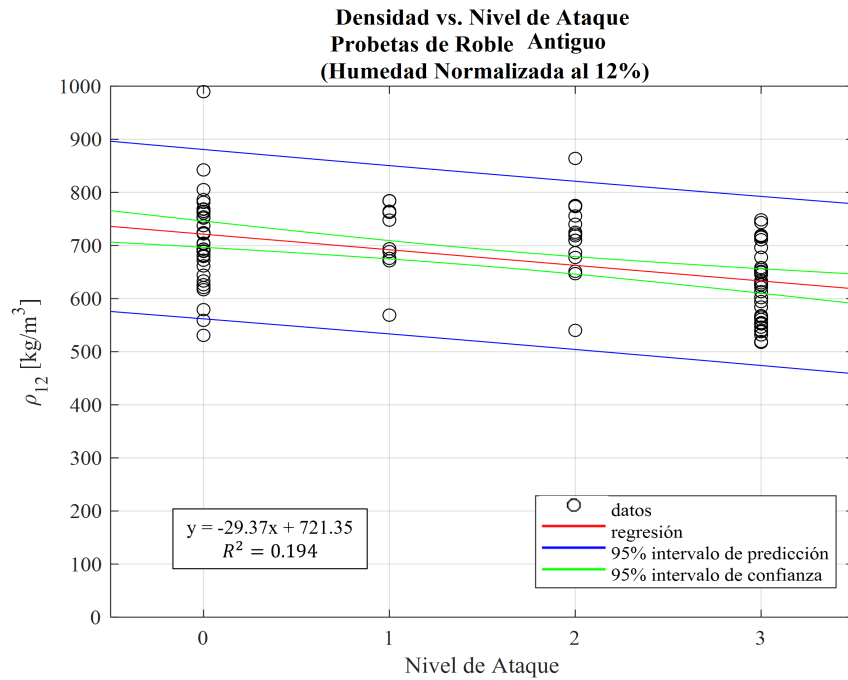
**Figura 111**  
Densidad según tipo de probeta: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.

La Figura 112a y Figura 112b presentan todos los resultados del cálculo de la densidad en las probetas de roble antiguo agrupadas en función del nivel de ataque de daño por termitas. A partir de estos resultados se puede apreciar que no existe una tendencia o correlación clara que indique que la densidad de las muestras se ve afectada por los diferentes niveles de daño observado. Los valores de las medianas para los niveles de ataque 0,1, 2 y 3 fueron muy similares, con valores de 703 kg/ m<sup>3</sup>, 721 kg/ m<sup>3</sup>, 720 kg/ m<sup>3</sup> y 621 kg/ m<sup>3</sup>, respectivamente. Como se esperaba, las probetas clasificadas con el nivel de daño 3 presentaron la densidad más baja, pero no se observa una variación significativa en la densidad en función del nivel de ataque.



**Figura 112**  
Densidad según nivel de ataque de termitas: (a) resultados sin ajuste de humedad; y (b) con ajuste de humedad al 12%.

La Figura 113 muestra el ajuste de una regresión lineal aplicado a los promedios de todos los ensayos realizados, revelando un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.194. Este valor indica que no hay una correlación significativa entre el grado de daño y la densidad de las probetas. Por lo tanto, no se justifica el desarrollo de una ecuación predictiva para esta variable.



**Figura 113**  
Regresión lineal e intervalos de predicción y media de confianza para los resultados de densidad según el nivel de ataque por termitas.

La comparación de los valores de densidad entre los ensayos de roble antiguo y nuevo, y con los datos reportados en la literatura, revela lo siguiente: aunque la densidad promedio de los ensayos de roble antiguo fue de 673 kg/m<sup>3</sup>, ligeramente superior a la de las muestras de los informes revisados (625 kg/m<sup>3</sup> según el INFOR (Catalán et al., 2020) y 624 kg/m<sup>3</sup> según el Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas (Hernández & Pinilla, 2010)), el valor de densidad para los ensayos de roble nuevo fue de 747 kg/m<sup>3</sup>, un 18% mayor que el de las muestras de roble antiguo. Este hallazgo sugiere que, a pesar del deterioro causado por las termitas, las probetas de roble antiguo han mantenido una mayor densidad en comparación con las muestras típicas reportadas en los estudios mencionados. Por otro lado, los resultados de los ensayos de roble nuevo, al no presentar defectos, exhiben una densidad y resistencia significativamente mayores. Esta comparación subraya la importancia de considerar no solo la densidad, sino también factores como la integridad estructural y la presencia de defectos al evaluar la resistencia de la madera en diferentes contextos. Los resultados de los ensayos de roble antiguo demostraron una resistencia un 7.4% superior a la reportada por el INFOR y el Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas, mientras que las probetas de roble nuevo fueron un 18% más resistentes que los valores reportados en dichos informes.

En cuanto a la densidad del pino Oregon, los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con los de la literatura. El valor promedio registrado fue de 509 kg/m<sup>3</sup>, superior a los valores reportados en otros estudios. Por ejemplo, el INFOR (Catalán et al., 2019) informó una densidad promedio de 464 kg/m<sup>3</sup>, y el Compendio de Propiedades de la Madera de Especies Forestales Nativas (Hernández & Pinilla, 2010) reportó una densidad de 408 kg/m<sup>3</sup>. Esto indica que la densidad del pino Oregon en este estudio fue un 9.3% y un 22% superior a la reportada en esos informes, respectivamente.

## 5.6 CONCLUSIONES Y ANÁLISIS COMPARATIVO

Luego de realizar los ensayos experimentales para determinar las propiedades mecánicas de la madera de roble antigua y nueva, así como del pino Oregón nuevo, y analizar los datos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- **Intervalo de Predicción del 95%:** Los gráficos que presentan el intervalo de predicción del 95% (línea azul) muestran el rango en el que se espera que se encuentren nuevas observaciones individuales con un 95% de probabilidad. En particular, los gráficos de cizalle paralelo y densidad no permiten establecer una correlación clara entre el nivel de ataque por termitas y la resistencia en el ensayo de cizalle, debido a la falta de consistencia en los datos. La Figura 113 indica que existe poca correlación entre la densidad y el grado de daño por termitas. Esto puede deberse a la escasa variabilidad observada durante los ensayos de cizalle, lo cual se refleja en el gráfico.

- **Intervalo de Confianza del 95%:** Los gráficos de confianza media del 95% (líneas verdes) para la regresión muestran el rango en el que se espera que se encuentre la verdadera línea de regresión para el 95% de las muestras en todos los ensayos ejecutados. Aunque estos resultados son preliminares y podrían estar sesgados debido a la heterogeneidad del tamaño de la muestra, representan un primer acercamiento valioso para conocer la caracterización mecánica de la madera de roble antigua extraída de edificios históricos en Valparaíso. Además, demuestran una correlación entre el grado de daño por termitas y la pérdida de resistencia.

- **Comparación con Estudios Previos:** En comparación con la tesis de Klenner (2024), que utiliza una regresión lineal basada en medianas, este estudio propone una regresión basada en todos los datos de la muestra. Ambos enfoques muestran una tendencia hacia la disminución de la resistencia a medida que aumenta el nivel de ataque para todos los ensayos: resistencia a la compresión paralela, compresión perpendicular, tracción perpendicular y flexión. Sin embargo, en el caso del cizalle paralelo, la correlación entre el nivel de ataque y la resistencia es casi nula, resultando en una línea de regresión horizontal (Figura 102). De manera similar, la densidad normalizada no muestra una correlación suficiente con el daño por termitas (Figura 113).

- **Ecuaciones Empíricas:** Este trabajo propone un conjunto de ecuaciones empíricas funcionales, válidas únicamente para las maderas de roble antiguo evaluadas en edificios patrimoniales de Valparaíso y con un contenido de humedad del 12%. Estas ecuaciones permiten predecir la propiedad mecánica esperada (promedio) a partir de una evaluación del nivel de ataque por termitas. Las ecuaciones propuestas en este estudio para la resistencia a compresión paralela (Ecuación (14)), resistencia a compresión perpendicular (Ecuación (17)), resistencia a tracción perpendicular (Ecuación (19)), módulo de rotura en flexión (Ecuación (24)) y módulo de elasticidad en flexión (Ecuación (27)) son comparables con las ecuaciones empíricas de Klenner (2024). La principal diferencia radica en los valores de los intervalos, ya que este estudio utiliza promedios, mientras que el estudio de Klenner se basa en las medianas.

- **Importancia de la Integridad Estructural:** Los resultados subrayan la importancia de considerar no solo la densidad, sino también otros factores como la integridad estructural y la presencia de defectos al evaluar la resistencia de la madera. Las diferencias encontradas entre las probetas de roble antiguo y nuevo indican que el deterioro y los daños a lo largo del tiempo pueden afectar significativamente la resistencia, incluso si la densidad parece ser relativamente constante.





## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

### 6.1 RESUMEN

En la ciudad de Valparaíso (Chile) las construcciones que utilizan la técnica conocida como tabique-adobillo representan una parte importante del patrimonio construido en madera en el país. No obstante, en la actualidad estas construcciones centenarias experimentan alarmantes procesos de deterioro, fenómenos que se asocian a diferentes factores entre los que destacan el ataque por insectos xilófagos como las termitas y carcomas. De acuerdo con MINVU (2018), ya en 2004 en la región de Valparaíso habían más de 5.000 construcciones dañadas por las termitas, situación que aumenta de forma progresiva. En particular, las termitas del tipo voladoras y subterráneas se han expandido peligrosamente por la región de Valparaíso (MINVU, 2017), siendo las construcciones históricas las más propensas a sufrir daños, debido al daño acumulativo por otras patologías como la humedad, la falta de mantenimiento y protección ante dicha amenaza.

El objetivo de esta investigación es determinar el impacto del paso del tiempo y del daño producido por las termitas en las piezas estructurales ante diferentes solicitaciones estructurales. El estudio se llevó a cabo mediante la ejecución de ensayos experimentales destructivos con probetas a escala reducida, conforme a las normativas vigentes en Chile. En este marco, se ejecutaron ensayos para determinar la resistencia a la compresión paralela (Instituto Nacional de Normalización, 2018c), la compresión perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018d), la tracción perpendicular (Instituto Nacional de Normalización, 2018f), el cizalle paralelo (Instituto Nacional de Normalización, 2018b), y la flexión estática (Instituto Nacional de Normalización, 2018e).

Los resultados de esta investigación permitieron demostrar que las propiedades mecánicas de la madera existente en edificios históricos presentan variaciones significativas en sus propiedades mecánicas respecto a la madera nueva de la misma especie, viendo disminuida su resistencia y rigidez. En particular, la resistencia a la compresión perpendicular de la madera de roble antigua (8.40 MPa) disminuyó un 34% en comparación con la nueva (11.87MPa). En los ensayos de tracción perpendicular la madera antigua (2.92 MPa) disminuyó su resistencia en un 41% respecto a la madera nueva (4.43 MPa), y en los ensayos de cizalle paralelo la resistencia también disminuyó para las probetas de madera antigua (4.65 MPa) en un 60% (maderas nuevas 8.62 MPa). Por último, la resistencia a la flexión estática también se redujo en las probetas de roble antiguo (73.55 MPa), con una disminución del 11% respecto a la madera nueva (81.97 MPa). Asimismo, el módulo de elasticidad en flexión del roble antiguo (8344.33 MPa) se redujo en un 13% en comparación

con la madera nueva (9535.84 MPa). La única excepción fue para la resistencia de compresión paralela de la madera de roble antiguo (43.40 MPa) la cual aumento un 4.8% en comparación con la madera nueva de roble (41.36 MPa).

En cuanto a los resultados de las muestras de pino Oregón comparadas con las especies de roble antiguo y las muestras de roble nuevo, estas tendieron a la disminución de su resistencia y rigidez. Respecto a la resistencia a la compresión paralela de la madera de pino Oregón (37.73 MPa) disminuyó un 9.2% respecto a la madera de roble nuevo (41.36 MPa) y un 14% en comparación con la madera de roble antigua (43.40 MPa). En los ensayos de compresión perpendicular la madera de pino Oregón (6.41 MPa) disminuyó su resistencia en un 60% en relación con la madera nueva de roble (11.87 MPa) y un 27% respecto a la madera antigua (8.40 MPa). Para los resultados de tracción perpendicular las muestras de pino Oregón (1.14 MPa) mostraron ser menos resistentes en un 105% en comparación con las muestras de roble nuevo (3.66 MPa) y un 88% en relación con las muestras de roble antiguo (2.92 MPa); en los ensayos de cizalle paralelo la resistencia disminuyó en las muestras de pino Oregón (5.12 MPa) en un 51% respecto a las de madera de roble nuevo (8.62 MPa) y un 10% en las maderas de roble antiguo (4.65 MPa). Por último, la resistencia a la flexión estática también se redujo en los resultados de pino Oregón (51.88 MPa), con una disminución del 45% en cuanto a la madera de roble nuevo (81.97 MPa) y un 35% respecto a la madera de roble antiguo (73.55 MPa). Del mismo modo, el módulo de elasticidad en flexión del pino Oregón (9400 MPa) disminuyó en un 1.4% en comparación con la madera nueva (9535.94 MPa) y un 12% en relación con la madera roble antiguo (8344.33 MPa).

Por otro lado, la madera afectada por ataques de insectos xilófago demostró que el daño superficial generado por el ataque de termitas tiene un impacto directo en la pérdida de la capacidad y rigidez de la madera ante diferentes tipos de cargas. La escala de clasificación visual permitió establecer una correlación cuantitativa que es inversamente proporcional entre el nivel de ataque y la pérdida de resistencia en las probetas, corroborando la hipótesis de esta investigación: a mayor nivel de ataque menor resistencia de las piezas. Esto puede indicar que el daño por termitas y el uso prolongado de una pieza estructural puede afectar negativamente a la integridad de una estructura de madera, viendo reducida su capacidad de carga y siendo más vulnerable a deformaciones y daños.

Los resultados obtenidos de estos ensayos deben ser usados con discreción debido a que aún es necesario aumentar el tamaño de la muestra para reducir la dispersión de los datos y consolidar la tendencia observada sobre la correlación entre el grado de daño y la resistencia.

Por último, la comparación entre los resultados de las probetas de Pino Oregón con la madera de roble nueva y existente sin daños demostró que existen importantes diferencias respecto a la resistencia y rigidez de ambas especies. Esta situación es relevante a la hora de reemplazar parcialmente las estructuras que se encuentren siendo afectadas por el ataque de los insectos xilófagos.

## 6.2 PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DE ESTA INVESTIGACIÓN

A continuación, se mencionan algunas de las principales contribuciones de este trabajo:

- Se realiza una caracterización inédita de las propiedades mecánicas de la madera de roble antiguo presente en las construcciones históricas de Valparaíso, específicamente de la tipología tabique-adobillo, y, aunque el tamaño de la muestra puede ser mejorado para consolidar los resultados, se observa que la madera envejecida y el daño del material ocasionado por insectos xilófagos afecta en la resistencia del material ante diferentes condiciones de carga.
- Se ha generado una primera base de datos empírica de las propiedades mecánicas para la madera patrimonial de Valparaíso, lo que permite dar un primer paso hacia una evaluación estructural más precisa y menos incierta de las estructuras históricas. Esta base de datos no solo incluye resultados estadísticos para madera de roble sin daño, sino también para material en condiciones deterioradas por el ataque de xilófagos. Estos datos permiten comparar las propiedades mecánicas de la madera en diferentes estados de conservación y cuantificar el impacto del deterioro por ataque bióticos.
- Este trabajo propuso una herramienta de evaluación cualitativa que incorpora una escala de grado de daño por ataque de termitas (Tabla 4) que permitió catalogar las probetas de madera antigua de acuerdo con la gravedad de sus lesiones a través de la observación. Esta herramienta permitió establecer una correlación entre el grado de daño y la variación de las propiedades mecánicas de la madera, identificando que existe una relación indirecta entre el aumento del grado de daño y la reducción de la resistencia y rigidez de las probetas en la mayoría de los ensayos.
- La principal contribución de este trabajo corresponde a las ecuaciones empíricas de predicción para los ensayos de compresión paralela (Ecuación (14)), compresión perpendicular (Ecuación (17)), tracción perpendicular (Ecuación (19)), módulo de rotura en flexión (Ecuación (24)) y módulo de elasticidad en flexión (Ecuación (27)) que correlacionan el grado de daño y la resistencia esperada del material por ensayo, y se constituyen como una herramienta de predicción de las propiedades mecánicas a partir de una evaluación visual del nivel de ataque por xilófagos. Esta herramienta podría incluso utilizarse para realizar inspecciones in situ en estructuras con que posean daño por xilófagos. Dichas expresiones ofrecen una herramienta práctica para la evaluación y conservación de estructuras de madera antiguas, además corresponden a un primer paso hacia la predicción basada en el nivel de daño por xilófagos de las propiedades mecánicas en la madera patrimonial de Valparaíso. No obstante, en su estado actual deben ser aplicadas con discreción, considerando que son una primera versión y que el tamaño de la muestra de los ensayos aún debe ser mejorado para validar estas tendencias.

### 6.3 COMENTARIOS GENERALES Y CONCLUSIONES

- A partir de los resultados obtenidos para el grupo que considera la madera nueva vs madera antigua sin daños, se puede concluir que el roble antiguo experimenta un deterioro significativo en todas sus propiedades mecánicas en comparación con la madera nueva, especialmente ante esfuerzos de tracción perpendicular y cizalle paralelo. Esto indica que el paso del tiempo y la historia de carga por el uso prolongado de una pieza estructural puede afectar negativamente la integridad de una estructura de madera, reduciendo su capacidad de carga y haciéndola más vulnerable a deformaciones y daños.
- La tendencia general observada es que la magnitud de las propiedades mecánicas disminuye a medida que aumenta el nivel de daño por xilófagos identificado. Específicamente, se observó una reducción más significativa

en las resistencias a compresión paralela, compresión y tracción perpendiculares, así como el módulo de rotura y el módulo elástico en flexión. Sin embargo, esta correlación no se observó en la resistencia al cizalle paralelo ya que no se logró captar una relación clara entre ambas variables. De manera similar, la densidad normalizada tampoco mostró una correlación suficiente para indicar con certeza una relación con el daño por termitas.

- Estos hallazgos indican que la degradación por termitas es un factor crítico que debe ser considerado en la evaluación de la durabilidad de estructuras de madera antiguas. La reducción en las propiedades mecánicas críticas, como la resistencia a compresión y tracción, así como los módulos de rotura y elásticos, subraya la importancia de detectar y cuantificar el daño por termitas para evaluar adecuadamente la capacidad estructural residual de las construcciones de madera. Además, la falta de correlación clara en la resistencia al cizalle paralelo y la densidad normalizada sugiere que se requieren métodos de evaluación más precisos o complementarios para entender completamente el impacto del daño por xilófagos en todas las propiedades mecánicas de la madera.

- Se reconoce que el número de probetas ensayadas en este estudio fue considerablemente limitado en comparación con otros programas experimentales publicados en la literatura. Esta limitación resultó en situaciones donde los grupos de análisis incluyeron solo 1 o 2 resultados, complicando así el estudio preciso del comportamiento del material y su variabilidad. Para evitar sesgos en los resultados de esta investigación, se sugiere homogeneizar la cantidad de muestras por ensayo, lo que contribuirá a mejorar la consistencia de los resultados. Es fundamental incluir tanto especímenes nuevos como dañados, garantizando así una representación equilibrada y más fiable del comportamiento mecánico de la madera antigua de edificios patrimoniales en diferentes condiciones.

## 6.4 CONSIDERACIONES Y TRABAJO FUTURO

A continuación, se presentan algunas consideraciones que se desprenden de los aprendizajes obtenidos de este trabajo para ejecutar trabajos futuros en esta línea de investigación:

- Dada la variabilidad intrínseca de la madera, se recomienda el tamaño de la muestra y ejecutar más ensayos de compresión paralela, compresión perpendicular, tracción perpendicular, cizalle paralelo y flexión estática con probetas con y sin daño por ataque de termitas.

- Otro aspecto que mejorar una vez se agrande la muestra tiene que ver con la incorporación de la incertidumbre a las ecuaciones predictivas. Esto se podría lograr utilizando métodos estadísticos avanzados que tengan en cuenta la dispersión de los datos, permitiendo así una estimación más precisa de las propiedades mecánicas esperadas. Incluir la incertidumbre en las ecuaciones predictivas aumentaría la fiabilidad y aplicabilidad de los modelos, ofreciendo un margen de seguridad adicional y permitiendo a los investigadores y profesionales de la conservación tomar decisiones más informadas y seguras.

- Por otro lado, se sugiere mejorar la escala para la evaluación del daño causada por ataques de xilófagos presentada en la Tabla 4, incorporando

otros factores que puedan afectar la resistencia y rigidez mecánica de la madera, como por ejemplo nudos, hongos o grietas. Asimismo, se recomienda seguir ajustando las descripciones por niveles a través de la validación en su aplicación, y complementando las observaciones con mediciones no destructivas in situ.

- Aunque se reconocen ciertas dificultades asociadas a la disponibilidad y recolección de piezas de edificios patrimoniales, se recomienda, llevar a cabo un estudio y análisis estadístico similar por nivel de daño en muestras de pino Oregón antiguo, considerando que también es una madera ampliamente utilizada en los sistemas constructivos de entramado de madera. Esta sugerencia también se puede extrapolar para la investigación de otras especies que pudieran existir en los edificios históricos de Valparaíso. Realizar este tipo de estudios en distintas especies de madera permitirá una comprensión más completa y detallada del efecto del daño por termitas en diversas maderas de edificaciones patrimoniales, pudiendo impactar positivamente en el mejoramiento las estrategias de conservación y restauración para una mayor variedad de estructuras históricas.

- Mejorar los resultados obtenidos en este trabajo permitirá crear herramientas precisas que permitan evaluar el impacto del daño en la vulnerabilidad estructural y sísmica de los edificios de entramado de madera. Por ejemplo, los datos obtenidos en este trabajo permitirán trabajar hacia la calibración de herramientas cualitativas o semi-cualitativa de predicción de las condiciones mecánicas de la madera mucho más precisas, e incluso aplicar de herramientas de evaluación más avanzadas, como los modelos de simulación numérica para evaluar estructuras más complejas.

- Se recomienda llevar a cabo evaluaciones in situ a través de métodos no destructivos que permitan determinar las propiedades de la madera y así complementar, comparar y validar los resultados obtenidos en esta investigación. Implementar esta tecnología no solo permitiría validar los resultados, si no considerar lineamientos más precisos en las evaluaciones rutinarias de los inmuebles, ofreciendo una forma menos invasiva y más sostenible de monitorear y conservar las estructuras de madera de edificios patrimoniales. Herramientas como el ultrasonido, el resistógrafo, el penetrómetro, y la termografía infrarroja, podrían ser utilizados para proporcionar un diagnóstico más completo y preciso del estado de conservación de la madera.

- Finalmente, futuras investigaciones podrían explorar el impacto de otros agentes del deterioro, como la presencia de hongos, grietas, fuego, humedad daño mecánico, etc., en la resistencia de la madera.



## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, R., Carrillo, O., & Broughton, J. (2022). Construcción en quincha liviana. Sistemas constructivos sustentables de reinterpretación patrimonial.
- Aktaş, Y. D. (2017). Seismic resistance of traditional timber-frame *hıms* structures in Turkey: a brief overview. In *International Wood Products Journal* (Vol. 8, pp. 21–28). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1273683>
- Argüelles, R., & Arriaga, F. (2003). Estructuras de madera. diseño y cálculo. AITIM.
- Arriaga, F., Íñiguez, G., Herrero, M. E., Argüelles, R., & Fernández, J. L. (2011). Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera. *Maderia. Construcción*. [www.maderia.es](http://www.maderia.es)
- Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., & García, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, y Corcho.
- Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forests*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/f14061202>
- ASTM D143. (2000). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. (ASTM D143:2000).
- ASTM International. (2015). Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. (ASTM D198:2015). <https://doi.org/10.1520/D0198-15>
- Barros, L., & Sarabia, G. (2016). *Sistemas Constructivos Básicos: Vol. Segunda edición*.
- Broto, C. (2005). *Enciclopedia broto de patologías de la Construcción [Book]*. Links International.
- Bustos, P. (2023). Propuesta de metodología para la identificación, caracterización y registro de los procesos patológicos en las tipologías constructivas históricas del puerto de Valparaíso.
- Carmona, R., & Durán, A. (2005). Eficacia de preservantes en madera *pinus radiata* D. Don, frente al ataque de termitas subterráneas (*reticulitermes esperus*). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7(1), 27–36. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48570104>
- Catalán, J., Vásquez, L., Hernández, G., Fernández, M., Troncoso, L., Elgueta, P., Campos, R., Mardones, P., Reyes, C., & Padilla, J. (2019). Tensiones admisibles de la madera aserrada estructural de Pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) clasificada visualmente. In *Tensiones admisibles de la madera aserrada estructural de Pino oregón (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) clasificada visualmente*. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/29196>
- Catalán, J., Vásquez, L., Hernández, G., Reyes, C., Padilla, J., Elgueta, P., Troncoso, L., Campos, R., & Mardones, P. (2020). Tensiones admisibles de la made-

ra aserrada estructural de roble (*Nothofagus oblicua* (Mirb.) Oerst.). <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/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001>

Chan, M., Araujo, O., & Azueta, M. (2002). Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería*, 6(1), 29–38.

Cisterna, R., & Jorquera, N. (2016). El tabique-adobillo de Valparaíso. Una técnica poco conocida en un Sitio del Patrimonio Mundial UNESCO.

Dávila, V., & Contreras, J. (2022). El adobillo cultura constructiva de Valparaíso: Vol. Segunda Edición.

Duarte, P., & Zúñiga, I. (2007). Valparaíso cosmopolita: los efectos de la disposición hacia la técnica como parte de un espíritu progresista del siglo XIX. *Revista de Urbanismo*, 17. <https://doi.org/10.5354/RU.V0117.279>

EN. (1997). EUROCÓDIGO 5: Proyecto de estructuras de madera PARTE 1 - 1: reglas generales y reglas para edificación.

Estándar Australiano. (2010a). Characterization of structural timber - Test methods. (AS/NZS 4063-1:2010).

Estándar Australiano. (2010b). Characterization of structural timber Determination of characteristic values. (AS/NZS 4063-2:2010).

Estándar Australiano. (2010c). Characterization of structural timber, Part 1: Test methods (AS/NZS 4063-1:2010).

Estrada, B. (1987). Valparaíso 1536-1986 : Primera Jornada de Historia Urbana: Valparaíso y el proceso de industrialización en Chile a fines del siglo XIX. (Valparaíso, Ed.). Ediciones Altazor.

Eujenio, N. (2015). Sistema constructivo de madera en armaduras de techumbre. Construcciones de Valparaíso de fines del siglo XIX y principios del XX.

Facultad de ingeniería UNAM. (2018). Consideraciones técnicas de la madera. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/512/7/A7.pdf>

Ferrada, M., & Berg, L. (2016, June 28). Importancia de los indicadores en la conservación de los valores universales y excepcionales del patrimonio arquitectónico en los Sitios de Valparaíso y Chiloé. Territorio FAU N°2. <https://postgradofau.uchilefau.cl/importancia-de-los-indicadores-en-la-conservacion-de-los-valores-universales-y-excepcionales-del-patrimonio-arquitectonico-en-los-sitios-de-valparaiso-y-chiloe/>

Foschi, R., & Barrett, J. D. (1982). Load-Duration Effects in Western Hemlock Lumber. *Journal of the Structural Division*, 108(7), 1494–1510. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005984>

Gil, D. P. (2017). Sistemas constructivos de madera en viviendas de Playa Ancha de principios de siglo XX (UTFSM., Ed.).

Gómez-Patrocínio, F. J., García-Soriano, L., Vegas, F., & Mileto, C. (2021). Técnicas y características de los muros mixtos de tierra y madera. El caso de España. *Informes de La Construcción*, 73(561), e372. <https://doi.org/10.3989/ic.73876>

González, L. F. (2019). Uniones carpinteras de Valparaíso. Ril editores.

Gordon, J. E., & Ball, P. (2006). *The new science of strong materials or what you don't fall through the floor*. Princeton Science Library.

Guindos, P. (2019). *Fundamentos del diseño y la construcción con madera*. Imprenta Salesianos.

Hernández, G., & Pinilla, J. C. (2010). Propiedades de la madera de especies forestales nativas y exóticas en Chile. In *Propiedades de la madera de especies forestales nativas y exóticas en Chile*. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/18505>

Hernández, S. (2019). Degradación y durabilidad de materiales y componentes constructivos. Editorial Cigome S.A. de C.V. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/100158>

Hernández, W., & Venegas, D. (2015). Indicadores de conservación del patrimonio arquitectónico aproximación metodológica- conceptual al monitoreo de Sitios Patrimonio Mundial en Chile [Seminario (arquitecto), Universidad de Chile]. [https://www.bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?context=L&vid=56UDC\\_INST:56UDC\\_INST&search\\_scope=MyInst\\_and\\_CI&tab=Everything&docid=alma991002295239703936](https://www.bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?context=L&vid=56UDC_INST:56UDC_INST&search_scope=MyInst_and_CI&tab=Everything&docid=alma991002295239703936)

Horie, H. (2002). Strength deterioration of recycled lumber collected from demolished wooden buildings in Hokkaido. *Mokuzai Gakkaishi*, 48, 280–287.

ICOMOS. (1999). Principles for the Preservation of Historic Timber Structures (1999). ICOMOS, October, 2–4.

Inat, S. (2011). Sistema de plataforma con entramado ligero de madera [Tesis de magíster]. Universidad Politécnica de Cataluña.

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (1972). Maderas - Acondicionamiento de las maderas destinadas a los ensayos físicos y mecánicos (Correspondiente a la norma COPANT 459:1972).

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2007a). Maderas - Método de determinación de la compresión axial o paralela al grano (Correspondiente a la norma COPANT 464:1972) (NB/COPANT 464:2007).

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2007b). Maderas - Método de determinación de la compresión perpendicular al grano (Correspondiente a la norma COPANT 466:1972) (NB/COPANT 466:2007).

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2007c). Maderas - Método de determinación del cizallamiento paralelo al grano (Correspondiente a la norma COPANT 463:1972) (NB/COPANT 463:2007).

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2007d). Maderas - Método de ensayo de flexión estática (Correspondiente a la norma COPANT 555:1975) (NB/COPANT 555:2007).

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2007e). Maderas - Método de ensayo de tracción perpendicular al grano (Correspondiente a la norma COPANT 743:1975)(NB/COPANT 743:2007).

Instituto Nacional de Normalización. (1986a). Madera - Parte 2: Determinación de la densidad (NCh176/2.Of86).

Instituto Nacional de Normalización. (1986b). Madera - Selección, obtención y acondicionamiento de muestras y probetas para la determinación de propiedades físicas y mecánicas (NCh968.Of86).

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 2: Muestreo y evaluación de los valores característicos de pieza en tamaño estructural (NCh3028/2.Of2017).

Instituto Nacional de Normalización. (2017b). Maderas - Agrupamiento de especies madereras según su resistencia - Procedimiento estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh1989.Of2017).

Instituto Nacional de Normalización. (2017c). Maderas - Parte 1: Especies latifoliadas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh1970/1.Of2017).

Instituto Nacional de Normalización. (2017d). Maderas - Parte 1: Especies latifoliadas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh1970/1.Of2017).

Instituto Nacional de Normalización. (2017e). Maderas - Parte 2: Especies coníferas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad.

Instituto Nacional de Normalización. (2017f). Maderas - Parte 2: Especies coníferas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh1970/2.Of2017).

Instituto Nacional de Normalización. (2018a). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Condiciones generales para los ensayos (NCh969.Of2018).

Instituto Nacional de Normalización. (2018b). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de cizalle paralelo a las fibras (NCh976.Of2018).

Instituto Nacional de Normalización. (2018c). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión paralela (NCh973.Of2018).

Instituto Nacional de Normalización. (2018d). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión perpendicular a las fibras (NCh974.Of2018).

Instituto Nacional de Normalización. (2018e). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de flexión estática (NCh987.Of2018).

Instituto Nacional de Normalización. (2018f). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de tracción perpendicular a las fibras (NCh975.Of2018).

Instituto Nacional de Normalización. (2019). Madera - Parte 1: Determinación del contenido de humedad (NCh176/1.Of2019). <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch176>

Instituto Nacional de Normalización. (2020). Calibración y uso de xilohigrómetros portátiles (NCh2827.Of2020).

International Organization for Standardization. (2011). Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework. (ISO 15686-1:2011).

International Organization for Standardization. (2014). Timber structures - Strength graded timber - The methods for structural properties. (ISO 13910:2014).

International Organization for Standardization. (2017). Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. (ISO 13061-1:2017).

Jiménez, B. (2014). Los Entramados Tradicionales de Madera en los Cerros Alegre y Concepción en Valparaíso, Chile. Caracterización histórica y técnica de las viviendas de finales del siglo XIX y comienzos del XX.

Jiménez, B., & Pelà, L. (2023). Numerical Modelling of Traditional Buildings Composed of Timber Frames and Masonry Walls under Seismic Loading. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(8), 1256–1289. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2033885>

Jiménez, B., Pelà, L., & Hurtado, M. (2018). Building survey forms for heterogeneous urban areas in seismically hazardous zones. Application to the historical center of Valparaíso, Chile. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(7–8), 1076–1111. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1503370>

Jiménez, 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.jobbe.2021.103185>

Johns, K., & Madsen, B. (1982). Duration of load effects in lumber. Part I: A fracture mechanics approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 9(3), 502–514. <https://doi.org/10.1139/l82-060>

Jorquera, N. (2014). Culturas constructivas que conforman el patrimonio chileno construido en tierra. *AUS*, 16, 30–35. <https://doi.org/10.4206/aus.2014.n16-06>

- Jorquera, N. (2022). Patrimonio chileno construido en tierra. Ediciones ARQ.
- Jorquera, N., & Cisternas, R. (2016). El tabique-adobillo, una técnica sis-morresistente de Valparaíso. Terra Lyon.
- Kasal, B. (2004). WOOD FORMATION AND PROPERTIES | Mechanical Properties of Wood. In J. Burley (Ed.), *Encyclopedia of Forest Sciences* (pp. 1815–1828). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00041-7>
- Koca, G. (2019). Evaluation of Wooden Structures. In F. Bianconi & M. Filippucci (Eds.), *Digital Wood Design: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design* (pp. 761–781). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_30)
- Kohara, J. (1955). On permanence of wood II, differences between the ageing processes of cypress wood and zelkova wood. *Wood Industry*, 10, 395–399.
- Kranitz, K., Sonderegger, W., Bues, C.-T., & Niemz, P. (2016). Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology*, 50(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>
- Lasheras, F. (1998). Patología de la madera. In *Tratado de Rehabilitación. Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales: Vol. Tomo 3* (pp. 255–276). Munilla-Lería.
- Lasheras, F. (2009). Patología de la construcción madera. In *Patología de la construcción madera | En: Tratado Técnico Jurídico de la Edificación y el Urbanismo. Tomo I. Patología de la Construcción y Técnicas de Intervención | pág. 801-862 | Thomson Reuters, Aranzadi, S.A | 2009* (pp. 789–850). E.T.S. Aquatinter (UPM). <http://oa.upm.es/53437/1/L032009TCXIMadera.pdf>
- Lewis, M. (2009). Stud and balloon frames. *Proceedings of The Pacific Connection–Trade, Travel & Technology Transfer*, 48–73.
- Llana, D. F., Íñiguez-González, G., Plos, M., & Turk, G. (2023). Grading of recovered Norway spruce (*Picea abies*) timber for structural purposes. *Construction and Building Materials*, 398, 132440. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132440>
- López, F., Ventura, R., Rodríguez, R., Santa, J., Astorqui, C., Torreño, I., Pascual, G., & De Mingo, U. (2004a). Manual de patología de la edificación tomo II Patología de las estructuras: hormigón y madera.
- López, F., Ventura, R., Rodríguez, R., Santa, J., Astorqui, C., Torreño, I., Pascual, G., & De Mingo, U. (2004b). Manual de patología de la edificación Tomo III Lesiones debidas a las humedades. Patología de cubiertas y fachadas.
- Lourenço, P. B. (2005). Selected case studies for ancient Portuguese timber structures.
- Lukic, R., Poletti, E., Rodrigues, H., & Vasconcelos, G. (2018). Numerical modelling of the cyclic behavior of timber-framed structures. *Engineering Structures*, 165, 210–221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.039>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.168>
- Martín, M. H. C., Molina, O. A., & García, M. A. (2002). Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería*, 6(1), 29–38.
- Martínez, A. (2023). Evaluación de la Resistencia al Ataque de Termitas Subterráneas Reticulitermes Flavipes (Collar) de Doce Maderas Comerciales Chilenas. Universidad de Chile.
- Memoria Chilena, B. N. de C. (2021). Los terremotos en Chile (1570-2010). <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-3576.html#ui-id-10>.
- MINVU. (2017). Cómo prevenir y enfrentar daños provocados por termitas en edificaciones.

- MINVU. (2018). Recomendaciones para la prevención y control de ataques de termitas en edificaciones.
- Monjó, J., & Maldonado, L. (2001). Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas. Munilla-Lería.
- Montero García-Andrade, M. J. (2013). Clasificación de madera estructural de gran escuadría de *Pinus sylvestris* l. mediante métodos no destructivos [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.THE-SIS.15201>
- Normalización Española. (2013). Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. (UNE-EN 1912:2012/AC:2013).
- Normalización Española. (2016a). Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Ensayos y clasificación de la resistencia a los agentes biológicos de la madera y de los productos derivados de la madera. (UNE-EN 350:2016).
- Normalización Española. (2016b). Madera estructural. Clases resistentes. (UNE-EN 338:2016).
- Poletti, E. (2013). Characterization of the seismic behaviour of traditional timber frame walls [Tesis de doctorado]. Universidade do Minho.
- Quinn, N., D'Ayala, D., & Descamps, T. (2016). Structural Characterization and Numerical Modeling of Historic Quincha Walls. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(2-3), 300-331. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1113337>
- Record, S. (2018). The Mechanical Properties of Wood: Including a Discussion of the Factors Affecting the Mechanical Properties, and Methods of Timber Testing. *Forgotten Books*.
- 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.composit.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. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA La Cruz. <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/libros/NR32333.pdf>
- Salazar, M. (2014). El carácter técnico/constructivo en la obra de E.O.F. Harrington.
- Salmerón, P. (2017). Guía de la Catedral de Granada. <http://pedrosalmeron.com/protocolos/identificacion-de-patologias-en-madera-estructural/>
- Smith, N. J. (2021). Material Characterization of Wood in Historic Structures [Tesis de magíster].
- Sotomayor, J. (2015). Comportamiento elástico de la madera.
- Suter, G. T. (1982). Evaluation of in situ strength of aged timber beams.
- Urbina, M. X. (2011). Los conventillos de Valparaíso, 1880-1920. Fisonomía y percepción de una vivienda popular urbana.
- Vásquez, L., Campos, R., Elgueta, P., González, M., & Hernández, G. (2013). Informe técnico 196. Grados estructurales de la madera aserrada de Pino oregón clasificada visualmente. INFOR. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/20480>
- Vásquez, L., Elgueta, P., Hernández, G., Campos, R., Catalán, J., Reyes, C., & Guzmán, S. (2019). Alternativas para la Clasificación Mecánica de Madera Aserrada Estructural. Instituto Forestal. [www.infor.cl](http://www.infor.cl)
- Vignote, S., & Martínez, I. (2006). Tecnología de la Madera (Vol. 3). Ediciones Mundi-Prensa.
- Waisberg, M. (1988). La vivienda de fines del siglo XIX en Valparaíso: casas de Playa Ancha. Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico. <https://libros.uchile.cl/1141>

Weaver, M. E. (2003). Successes and Failures in the Conservation of Wooden Structures. *Journal of Architectural Conservation*, 9(3), 36–50. <https://doi.org/10.1080/13556207.2003.10785350>



## ANEXOS

### ANEXO 1

Se presentan las fichas de todos los casos de estudio, de los que se pudieron recopilar información para esta investigación.

#### Caso 1: Pasaje Higuera #179

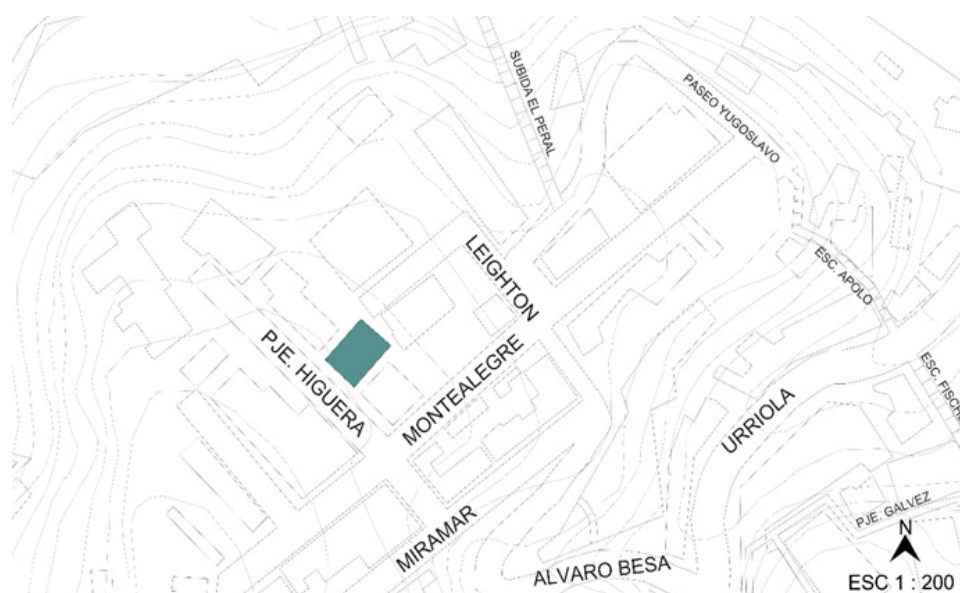



Figura 114  
Emplazamiento general.

<b>Ficha Técnica</b>		<b>ID: 01</b>	
<b>Sección 1: Información General</b>			
Nombre del Inmueble: HIGUERA			
Calle: PASAJE HIGUERA			
Número: #179			
Cerro: ALEGRE			
Rol: 3001-39			
Uso: VIVIENDA			
Año de construcción: Siglo XIX (1902)			
Nº de Pisos: 3			
Estilo Arquitectónico: VICTORIANO			
Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	x
		Zona de Conservación Histórica	x
Protección Patrimonial	Sí	x	Tipo: Zona típica declarada por el Plan Regulador Comunal.
	No		Declarado Inmueble de Conservación Histórica y Zona de Conservación Histórica por el Art. 60 de la L.G.U.C.

<b>Sección 2: Tipologías constructivas</b>		<b>ID: 01</b>						
2.1. Sistema Estructural	Único							
	Híbrido	Se compone de un sistema de entramado de madera relleno con adobillo en el primer nivel y un segundo solo de entramado de madera un subterráneo de piedra con mampostería en ladrillo.						
2.2. Material Estructural	Fachada principal	Mampostería en piedra		Sí	x			
		Mampostería de ladrillo	x	No				
		Mixto (Madera/Tierra)	x	Debido a una filtración, en la esquina por la baja del agua del baño				
		Madera						
		Acero/Hierro						
		Adobe						
	Muros laterales	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí			
		Mampostería de ladrillo		Adaptado o alterado	No	x		
		Mixto (Madera/Tierra)	x					
		Madera						
		Acero/Hierro						
		Adobe						
	Muros interiores	Mampostería en piedra				Adaptado o alterado	Sí	x
		Mampostería de ladrillo				Adaptado o alterado	No	
		Mixto (Madera/Tierra)		Por patologías de agentes biológicos (termitas)				
		Madera	x					
		Acero/Hierro						
		Adobe						

	Muros interiores	Adobe		Adaptado o alterado	Sí	x
		Mampostería en piedra			No	
		Mampostería de ladrillo			Por patologías de agentes biológicos (termitas)	
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
	Entrepisos	Adobe		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería en piedra			No	x
		Mampostería de ladrillo				
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
	Techumbre	Adobe		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería en piedra			No	x
		Mampostería de ladrillo				
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				

**Sección 3: Revestimientos****ID: 01**

3.1. Elementos Secundarios	Revestimiento exterior	Zinc		x
		Yeso + pintura		
		Bahareque (listones de madera con tierra)		
		Madera		
		Otro:		
	Revestimiento interior	Zinc		x
		Yeso + pintura		
		Bahareque (listones de madera con tierra)		
		Madera		
		Baldosas		
		Otro		
	Revestimiento de entrepiso	Entablado de Madera		x
		Baldosas		
		Plancha de madera (OSB)		
Otro:				

**Sección 4: Patologías del edificio****ID: 01**

Tipología de la lesión	Sintomatología	Agente patológico	Lesión Si/No
ológicas	A) Pudrición parda	1) Presencia de hongos	x
	B) Pudrición blanca		

4.1. Patologías presente en la estructura	Biológico	B) Pudrición blanca	2) Presencia de xilófagos (termitas)	x
		C) Degradación		
	Mecánicas	D) Agrietamientos	3) Cargas, sobrecargas y aplastamiento	x
			4) Incremento esbeltez	
		E) Deformaciones	5) Aplastamiento	x
			6) Asentamiento	
			7) Colapso	
		F) Fisuraciones	8) Dilataciones	
			9) Retracciones	
		G) Nudos	10) Nudos vivos	
			11) Nudos muertos	
		Físico - químicos	I) Erosión	12) Presencia de agua
	13) Acción del viento			x
	J) Meteorización		14) Condiciones atmosférica	x
	K) Suciedad		15) Deposito	x
			16) Excremento animales	
	L) Humedad		17) Capilar	x
			18) Filtración	x
			19) Condensación	
			20) Obra	
			21) Accidental	

**Sección 5: Observaciones**

**ID: 01**

Estado de rehabilitación y restauración de la vivienda, con donación y extracción de piezas, pudiendo acceder a todo el inmueble y realizar una inspección visual. Además, se agregan las imágenes y otros antecedentes que se pudieron recopilar del inmueble estudiado.

**PLANIMETRÍA GENERAL**



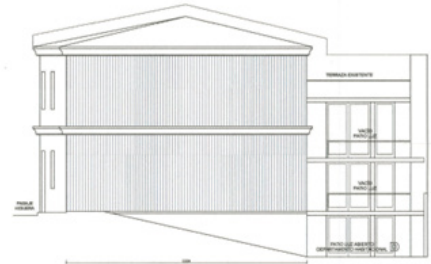
**Figura 115**

Planimetría general. Plantas de los diversos niveles, se presenta la nueva propuesta, además de la distribución original de la vivienda. Fuente: U6 arquitectos, 2023.

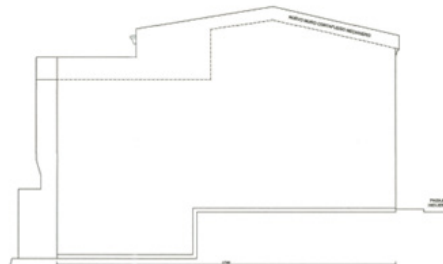
**ELEVACIONES GENERALES**



ELEVACIÓN SUR-PONIENTE  
PROYECTO VIVIENDAS 2023  
ESCALA 1:100



ELEVACIÓN SUR-ORIENTE  
PROYECTO VIVIENDAS 2023  
ESCALA 1:100



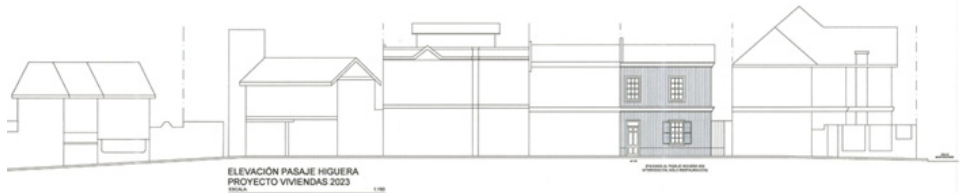
ELEVACIÓN NOR-PONIENTE  
PROYECTO VIVIENDAS 2023  
ESCALA 1:100



ELEVACIÓN NOR-ORIENTE  
PROYECTO VIVIENDAS 2023  
ESCALA 1:100

**Figura 116**  
Elevaciones de todas las fachadas del inmueble actuales. Fuente: U6 arquitectos, 2023.

**ELEVACIÓN**



ELEVACIÓN PASAJE HIGUERA  
PROYECTO VIVIENDAS 2023  
ESCALA 1:100

**Figura 117**  
Elevación pasaje Higuera. Fuente: U6 arquitectos, 2023.

**FOTOGRAFÍAS DEL INMUEBLE**



**Figura 118**  
Secciones del sistema constructivo entramado de madera, con daño por terminas.



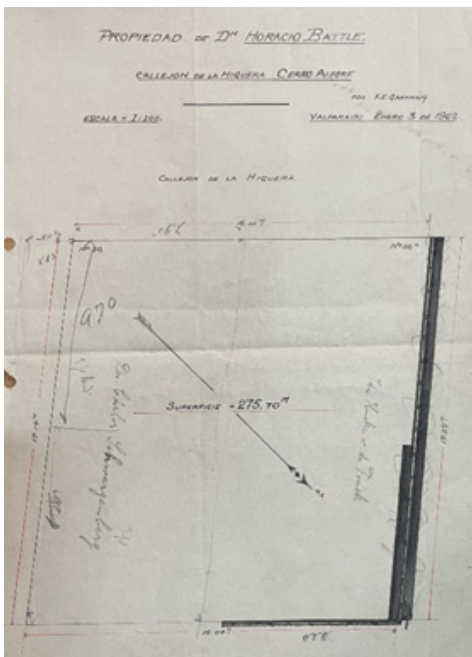
**Figura 119**  
Tipo de fundación de albañilería en ladrillo con piedra.



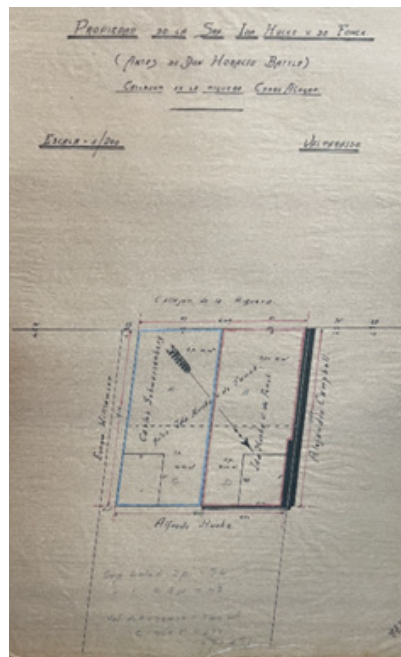
**Figura 120**  
Entramado de muro en madera, relleno de adobillos. Piezas madereras de 4x4".



**Figura 121**  
Envigado de piso del primer piso, amarrada entre ladrillos de albañilería.



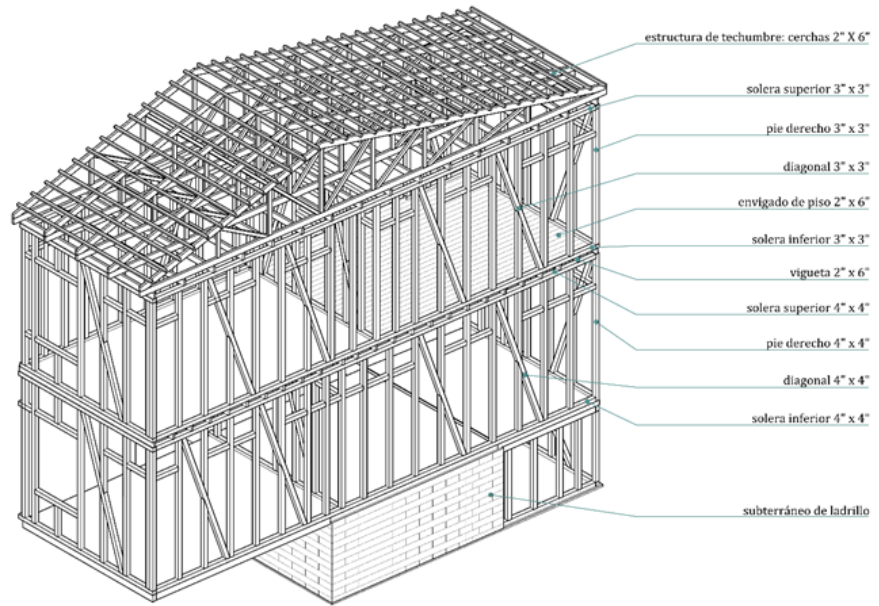
(a)



(b)

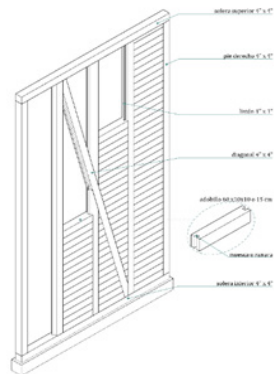
**Figura 122**  
Planos del predio: (a) plano simple del predio, propietario Horacio Battle y (b) plano subdivisión del predio en dos

### ESCANTILLÓN

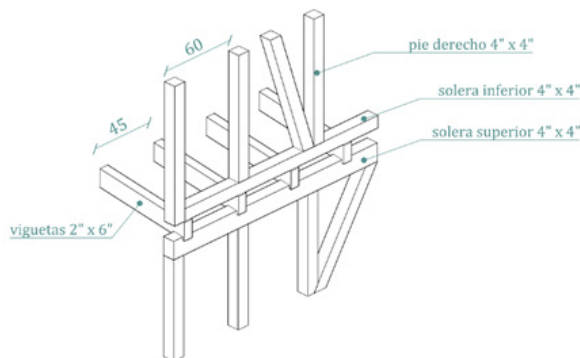


**Figura 123**  
 Escantillón isométrico fachada principal.

### DIAGRAMAS



**Figura 124**  
 Sistema de montaje de los adobillos. Diagrama isométrico.




**Figura 125**  
 Entramado horizontal del piso. Diagrama isométrico.

**Caso 2: Almirante Montt #97-107-109**



**Figura 126**  
Emplazamiento general.

<b>Ficha Técnica</b>		<b>ID: 02</b>		
<b>Sección 1: Información General</b>				
Nombre del Inmueble: HOSTAL				
Calle: ALMIRANTE MONTT				
Número: #107 - #109				
Cerro: CONCEPCIÓN				
Rol: 3020-43 / 3020-44				
Uso: HOSTAL				
Año de construcción: Siglo XIX (1920)				
Nº de Pisos: 3				
Estilo Arquitectónico: ECLÉCTICO CON RASGOS NEOGÓTICOS				
Zona Sitio Patrimonio Mundial	Zona de Amortiguación	X	Zona de Conservación Histórica	X
Protección Patrimonial	Sí	x	Tipo: Zona típica declarada por el Plan Regulador Comunal	
	No		Declarado Inmueble de Conservación Histórica y Zona Conservación Histórica por el Art. 60 de la L.G.U.C.	

<b>Sección 2: Tipologías constructivas</b>		<b>ID: 02</b>	
<b>2.1. Sistema Estructural</b>	Único		
	Híbrido	Se compone de un sistema de entramado de madera relleno con adobillo en el primer nivel y un segundo solo de entramado de madera y un subterráneo de piedra con mampostería en ladrillo.	
principal	Mampostería en piedra		Sí
	Mampostería de ladrillo		No
	Mixto (Madera/Tierra)	x	
		o alterado	x

2.2. Material Estructural	Fachada	Madera		Adaptado		
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Muros laterales	Mampostería en piedra	x	Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo	x		No	x
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera				
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Muros interiores	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	x
		Mampostería de ladrillo			No	
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x		Por patologías de agentes biológicos (termitas)	
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Entrepisos	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
Mampostería de ladrillo			No		x	
Mixto (Madera/Tierra)						
Madera		x				
Techumbre	Acero/Hierro		Adaptado o alterado			
	Adobe					
	Mampostería en piedra			Sí		
	Mampostería de ladrillo			No	x	
	Mixto (Madera/Tierra)					
	Madera	x				
	Acero/Hierro					
Adobe						
<b>Sección 3: Revestimiento</b>					<b>ID: 02</b>	
3.1. Elementos Secundarios	Revestimiento exterior	Zinc			x	
		Yeso + pintura				
		Bahareque (listones de madera con tierra)				
		Madera				
		Otro:				
	Revestimiento interior	Zinc				
		Yeso + pintura				x
		Bahareque (listones de madera con tierra)				
		Madera				x
		Baldosas				x

3	Revestimiento de entrepiso	Otro	
		Entablado de Madera	x
		Baldosas	x
		Plancha de madera (OSB)	x
		Otro:	

**Sección 4: Patologías del edificio** **ID: 02**

4.1. Patologías presente en la estructura	Tipología de la lesión	Sintomatología	Agente patológico	Lesión Si/No
	Biológicas	A) Pudrición parda	1) Presencia de hongos	
		B) Pudrición blanca	2) Presencia de xilófagos (termitas)	x
		C) Degradación		
	Mecánicas	D) Agrietamientos	3) Cargas, sobrecargas y aplastamiento	
			4) Incremento esbeltez	
		E) Deformaciones	5) Aplastamiento	
			6) Asentamiento	
			7) Colapso	
		F) Fisuraciones	8) Dilataciones	
			9) Retracciones	
		G) Nudos	10) Nudos vivos	
			11) Nudos muertos	
		Físico - químicos	I) Erosión	12) Presencia de agua
	13) Acción del viento			
	J) Meteorización		14) Condiciones atmosférica	
	K) Suciedad		15) Deposito	
			16) Excremento animales	
	L) Humedad		17) Capilar	
			18) Filtración	
			19) Condensación	
			20) Obra	
21) Accidental				

**Sección 5: Observaciones** **ID: 02**

Buen estado de conservación de la hostel, teniendo algunas rehabilitaciones, pero sin cambiar su estado original, con donación de piezas, pudiendo acceder a todo el inmueble y realizar una inspección visual. Se agrega información adicional como la planimetría, elevaciones y fotografías entre otros del inmueble.

PLANIMETRÍA GENERAL

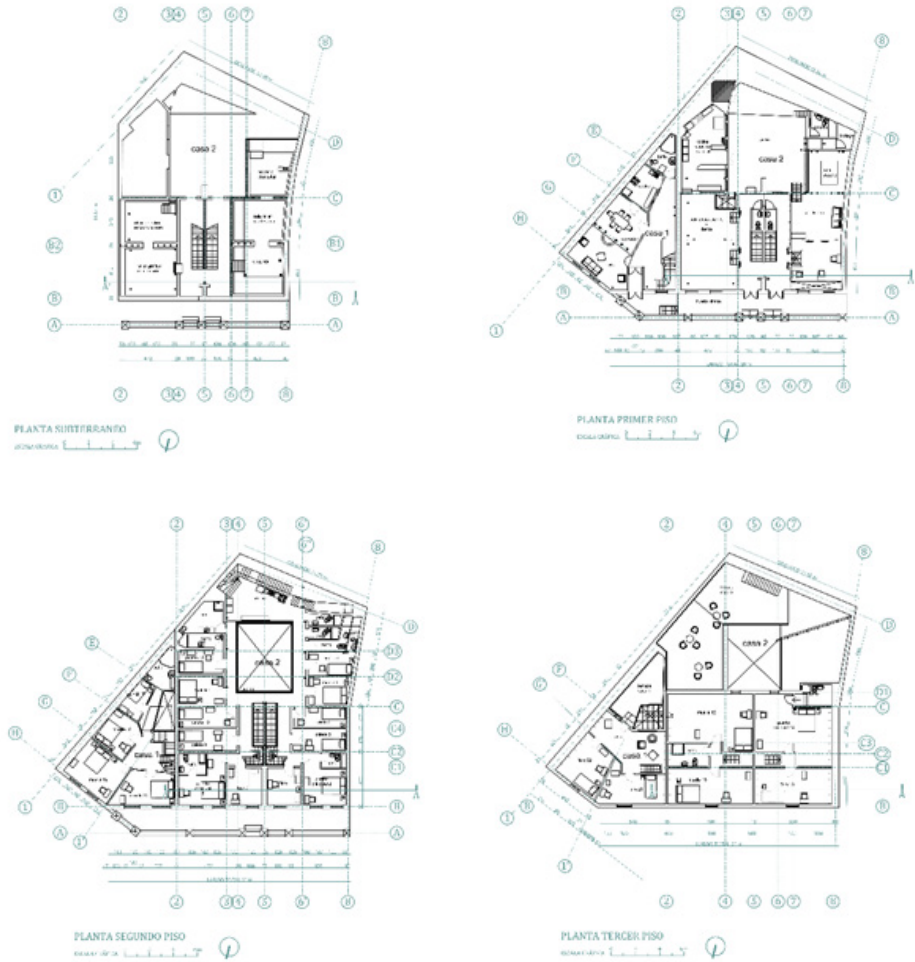


Figura 127  
Planimetría de los diversos niveles del caso de estudio Hostal.

CORTE

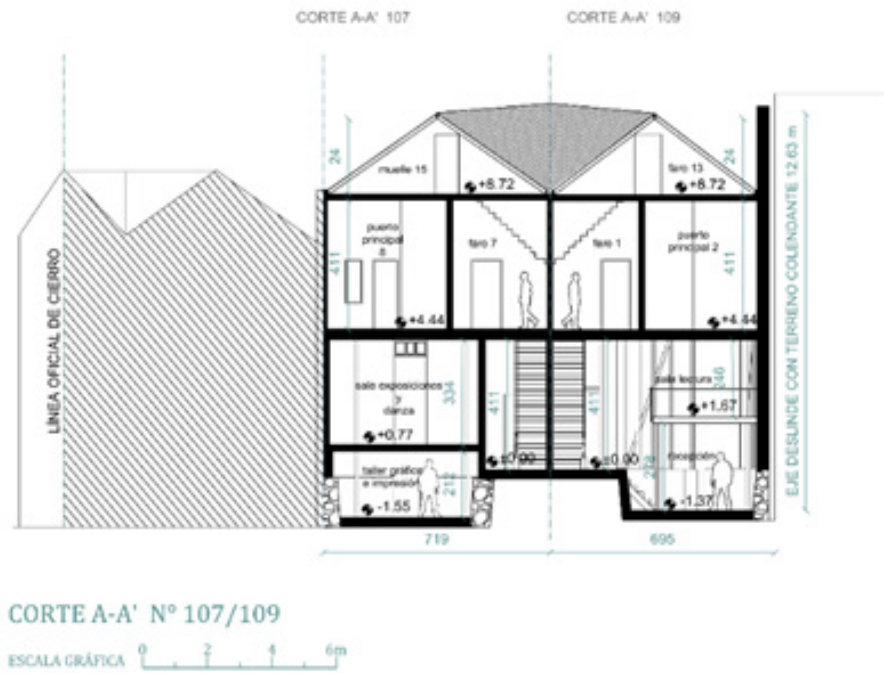


Figura 128  
Corte A-A', transversal.

**FOTOGRAFÍAS DEL INMUEBLE**



(a)



(b)

**Figura 129**  
(a) Patio interior del inmueble y (b) Terraza tercer piso.

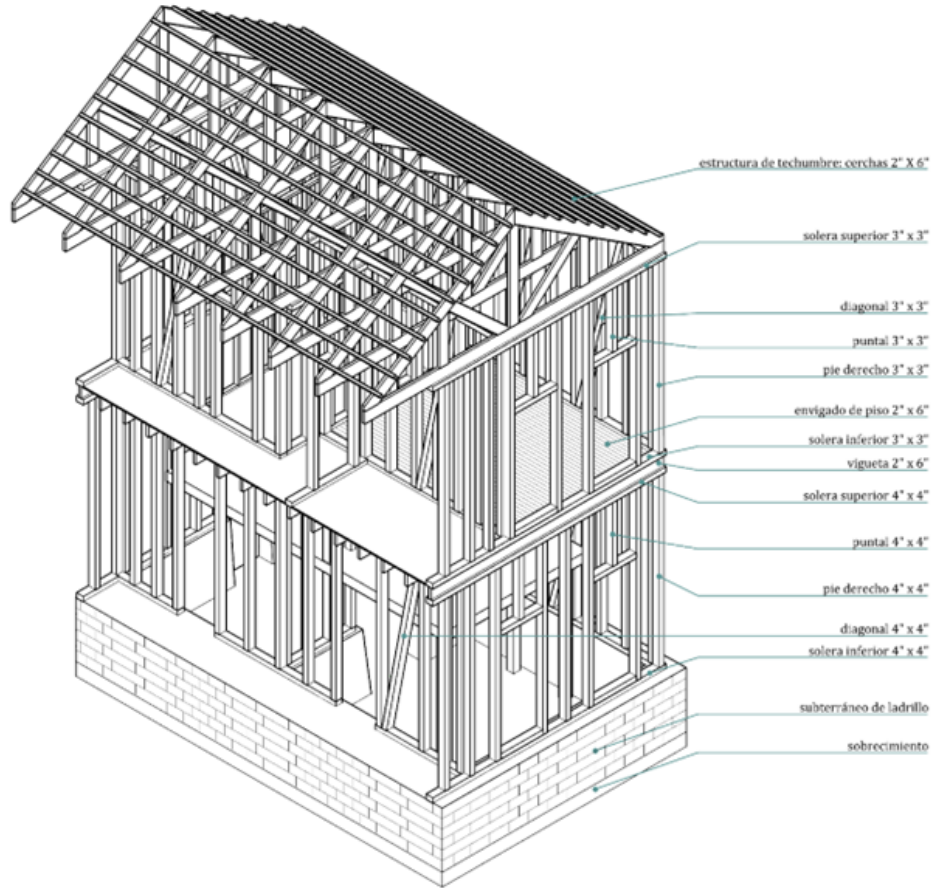


**Figura 130**  
Sección maderera de 4" x 4".



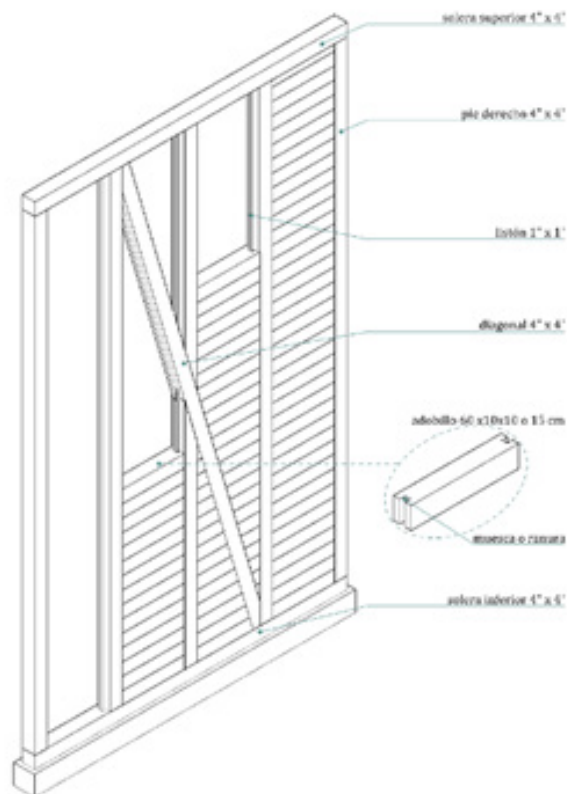
**Figura 131**  
Fundaciones de piedra y ladrillo, subterráneo del inmueble.

**ESCANTILLÓN**



**Figura 132**  
Escantillón isométrico fachada principal.

**DIAGRAMAS**



**Figura 133**  
Sistema de montaje de los adobillos.  
Diagrama isométrico.

**Caso 3: Malfatti #585**

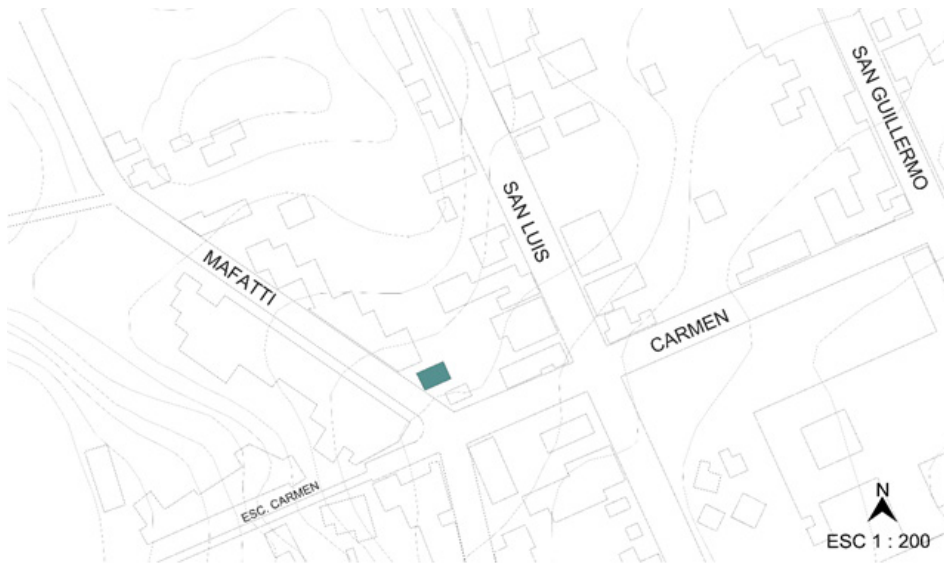


Figura 134  
Emplazamiento general.

Ficha Técnica		ID: 03	
<b>Sección 1: Información General</b>			
Nombre del Inmueble: MALFATTI			
Calle: MALFATTI			
Número: #585			
Cerro: PLACERES			
Rol: 8049-43			
Uso: VIVIENDA			
Año de construcción: DESCONOCIDO			
Nº de Pisos: 1			
Estilo Arquitectónico: DESCONOCIDO			
Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	Zona de Conservación Histórica
			x
Protección Patrimonial	Sí	Tipo: Declarado Zona Conservación Histórica por el Art. 60 de la L.G.U.C.	
	No		
<b>Sección 2: Tipologías constructivas</b>			
		ID: 03	
2.1.Sistema Estructural	Único		
	Híbrido	La vivienda se compone de un piso de entramado de madera con adobillo, pero fue demolida, pasada a hormigón	
Fachada principal	Mampostería en piedra		Sí
	Mampostería de ladrillo		No
	Mixto (Madera/Tierra)	x	x
	Madera		
	Acero/Hierro		
		Adaptado o alterado	

<b>2.2. Material Estructural</b>	Muros laterales	Adobe		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería en piedra			No	x
		Mampostería de ladrillo				
		Mixto (Madera/Tierra)	x			
		Madera				
		Acero/Hierro				
	Muros interiores	Adobe		Adaptado o alterado	Sí	x
		Mampostería en piedra			No	
		Mampostería de ladrillo			Se quitaron los pies derechos por patologías de agentes biológicos (termitas)	
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
	Adobe					
	Entrepisos	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
Adobe						
Techumbre	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí		
	Mampostería de ladrillo			No	x	
	Mixto (Madera/Tierra)					
	Madera	x				
	Acero/Hierro					
	Adobe					
<b>Sección 3: Revestimiento</b>					<b>ID: 03</b>	
<b>3.1. Elementos Secundarios</b>	Revestimiento exterior	Zinc				
		Yeso + pintura				
		Bahareque (listones de madera con tierra)				
		Madera				
		Otro: HORMIGÓN				
	Revestimiento interior	Zinc				
		Yeso + pintura			x	
		Bahareque (listones de madera con tierra)				
		Madera				
		Baldosas				

Revestimiento de entrepiso	Otro	
	Enablado de Madera	x
	Baldosas	
	Plancha de madera (OSB)	
	Otro:	

**Sección 4: Patologías del edificio ID: 03**

4.1. Patologías presente en la estructura	Tipología de la lesión	Sintomatología	Agente patológico	Lesión Si/No
Biológicas	A) Pudrición parda		1) Presencia de hongos	
	B) Pudrición blanca		2) Presencia de xilófagos (termitas)	x
	C) Degradación			
Mecánicas	D) Agrietamientos		3) Cargas, sobrecargas y aplastamiento	x
			4) Incremento esbeltez	
	E) Deformaciones		5) Aplastamiento	
			6) Asentamiento	
			7) Colapso	
	F) Fisuraciones		8) Dilataciones	
			9) Retracciones	
	G) Nudos		10) Nudos vivos	
			11) Nudos muertos	
	Físico - químicos	I) Erosión		12) Presencia de agua
			13) Acción del viento	
J) Meteorización			14) Condiciones atmosférica	
K) Suciedad			15) Deposito	
			16) Excremento animales	
L) Humedad			17) Capilar	x
			18) Filtración	
			19) Condensación	
			20) Obra	
		21) Accidental		

**Sección 5: Observaciones ID: 03**

Estado de demolición de la vivienda, donación y extracción de las piezas, si bien se sabe que el inmueble no pertenece a los limites propuestos, se acepta por las características que cumplen las piezas donadas.

## Caso 4: Ossandón #275

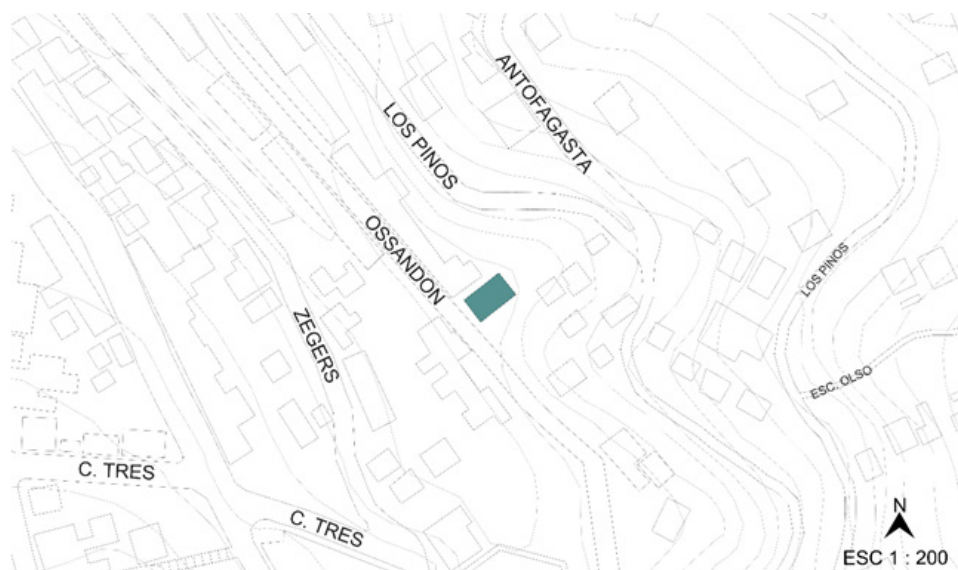


Figura 135  
Emplazamiento general.

## Ficha Técnica

**ID: 04**

### Sección 1: Información General

Nombre del Inmueble: OSSANDÓN

Calle: OSSANDÓN

Número: #275

Cerro: DELICIAS

Rol: 6082-24

Uso: VIVIENDA

Año de construcción: DESCONOCIDO

N° de Pisos: 2

Estilo Arquitectónico: DESCONOCIDO



Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación		Zona de Conservación Histórica	X
Protección Patrimonial	Sí		Tipo: Declarado Inmueble de Conservación Histórica y Zona Conservación Histórica por el Art. 60 de la L.G.U.C.		
	No	x			

### Sección 2: Tipologías constructivas

**ID: 04**

2.1. Sistema Estructural	Único				
	Híbrido	Se compone de un sistema de entramado de madera relleno con adobillo en el primer nivel y un segundo nivel solo de entramado de madera			
Fachada principal	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
	Mampostería de ladrillo			No	
	Entramado de madera relleno con adobillo				
	Madera				
	Acero/Hierro				
	Adobe				

<b>2.2. Material Estructural</b>	Muros laterales	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Entramado de madera relleno con adobillo	x			
		Madera				
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Muros interiores	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Entramado de madera relleno con adobillo	x			
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Entrepisos	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Entramado de madera relleno con adobillo				
		Madera	x			
Acero/Hierro						
Adobe						
Techumbre	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí		
	Mampostería de ladrillo			No	x	
	Entramado de madera relleno con adobillo					

**Sección 3:Revestimiento**

**ID: 04**

<b>3.1. Elementos Secundarios</b>	Revestimiento exterior	Zinc	
		Yeso + pintura	
		Bahareque (listones de madera con tierra)	
		Madera	
		Otro: Hormigón	
	Revestimiento interior	Zinc	
		Yeso + pintura	x
		Bahareque (listones de madera con tierra)	
		Madera	
		Baldosas	
		Otro:	
	Revestimiento de entrepiso	Entablado de Madera	x
		Baldosas	
		Plancha de madera (OSB)	
		Otro:	

<b>Sección 4: Patologías del edificio</b>				<b>ID: 04</b>
<b>4.1. Patologías presente en la estructura</b>	Tipología de la lesión	Sintomatología	Agente patológico	Lesión Si/No
	Biológicas	A) Pudrición parda	1) Presencia de hongos	x
		B) Pudrición blanca	2) Presencia de xilófagos (termitas)	x
		C) Degradación		
	Mecánicas	D) Agrietamientos	3) Cargas, sobrecargas y aplastamiento	x
			4) Incremento esbeltez	
		E) Deformaciones	5) Aplastamiento	
	Físico - químicos	F) Fisuraciones	6) Asentamiento	x
			7) Colapso	
			8) Dilataciones	
9) Retracciones				
G) Nudos		10) Nudos vivos		
		11) Nudos muertos		
I) Erosión		12) Presencia de agua		
		13) Acción del viento		
J) Meteorización		14) Condiciones atmosférica		
K) Suciedad		15) Deposito		
		16) Excremento animales		
L) Humedad	17) Capilar	x		
	18) Filtración	x		
	19) Condensación			
	20) Obra			
	21) Accidental			
<b>Sección 5: Observaciones</b>				<b>ID: 04</b>
Estado de rehabilitación, sin extracción de piezas, se pudo acceder, se deja como caso de estudio.				

**Caso 5: Montealegre #386**

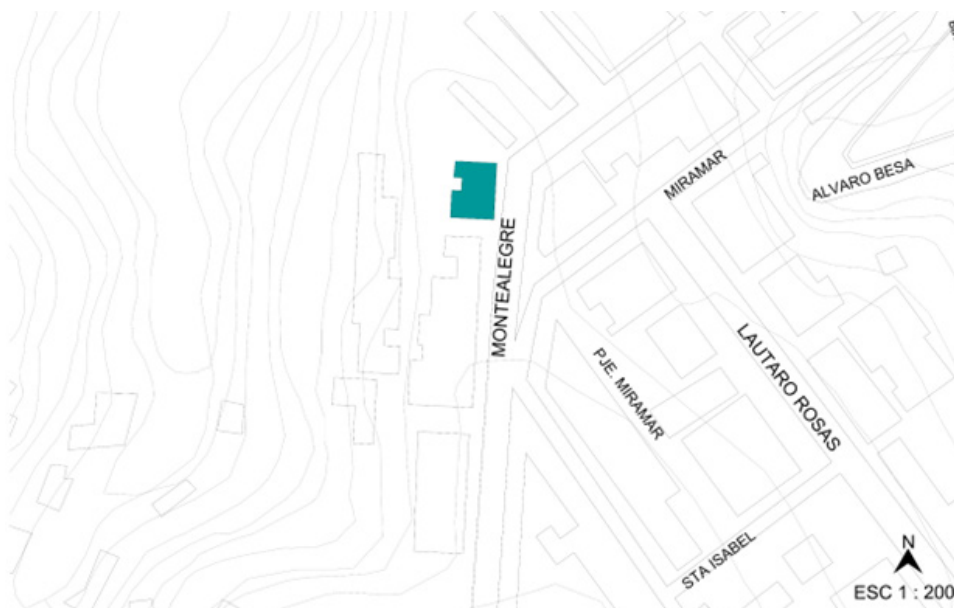


Figura 136 Emplazamiento general.

Ficha Técnica		ID: 05	
<b>Sección 1: Información General</b>			
Nombre del Inmueble:	MONTEALEGRE		
Calle:	MONTEALEGRE		
Número:	#386		
Cerro:	ALEGRE		
Rol:	3023-21		
Uso:	VIVIENDA		
Año de construcción:	Siglo XIX (1918)		
Nº de Pisos:	2		
Estilo Arquitectónico:	DESCONOCIDO		
Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	X
		Zona de Conservación Histórica	X
Protección Patrimonial	Sí	X Tipo: Zona típica declarada por el Plan Regulador Comunal	
	No	Declarado Inmueble de Conservación Histórica y Zona Conservación Histórica por el Art. 60 de la L.G.U.C.	
<b>Sección 2: Tipologías constructivas</b>		ID: 05	
2.1. Sistema Estructural	Único		
	Híbrido	Se compone de un sistema de entramado de madera relleno con adobillo en el primer nivel y un segundo nivel solo de entramado de madera	
Principal	Mampostería en piedra		
	Mampostería de ladrillo		
	Iterado	Sí	
		No	x

2.2. Material Estructural						
2.2. Material Estructural	Fachada princ	Entramado de madera relleno con adobillo	x	Adaptado o alter		
		Madera				
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Muros laterales	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Entramado de madera relleno con adobillo	x			
		Madera				
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Muros interiores	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Entramado de madera relleno con adobillo				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Entrepisos	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Entramado de madera relleno con adobillo				
		Madera	x			
Acero/Hierro						
Adobe						
Techumbre	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí		
	Mampostería de ladrillo			No	x	
	Entramado de madera relleno con adobillo					
	Madera	x				
	Acero/Hierro					
	Adobe					

## Sección 3: Revestimiento

ID:05

3.1. Elementos Secundarios			
3.1. Elementos Secundarios	Revestimiento exterior	Zinc	x
		Yeso + pintura	
		Bahareque (listones de madera con tierra)	
		Madera	
		Otro:	
	Revestimiento interior	Zinc	
		Yeso + pintura	x
		Bahareque (listones de madera con tierra)	
		Madera	
		Baldosas	
		Otro:	
	Revestimiento de entrepiso	Entablado de Madera	x
		Baldosas	
		Plancha de madera (OSB)	
		Otro:	

<b>Sección 4: Patologías del edificio</b>			<b>ID: 05</b>			
4.1. Patologías presente en la estructura	Tipología de la lesión	Sintomatología	Agente patológico	Lesión Si/No		
	Biológicas	A) Pudrición parda		1) Presencia de hongos		
		B) Pudrición blanca		2) Presencia de xilófagos (termitas)	x	
		C) Degradación				
	Mecánicas	D) Agrietamientos		3) Cargas, sobrecargas y aplastamiento	x	
				4) Incremento esbeltez		
		E) Deformaciones		5) Aplastamiento		
				6) Asentamiento		
				7) Colapso		
		F) Fisuraciones		8) Dilataciones		
				9) Retracciones		
		G) Nudos		10) Nudos vivos		
				11) Nudos muertos		
		Físico - químicos	I) Erosión		12) Presencia de agua	
					13) Acción del viento	
	J) Meteorización			14) Condiciones atmosférica		
	K) Suciedad			15) Deposito		
				16) Excremento animales		
	L) Humedad			17) Capilar		
				18) Filtración		
				19) Condensación		
			20) Obra			
			21) Accidental			

**Sección 5: Observaciones**

**ID: 05**

Estado de rehabilitación, sin extracción de piezas, se pudo acceder, se deja como caso de estudio.

## Caso 6: El Litre

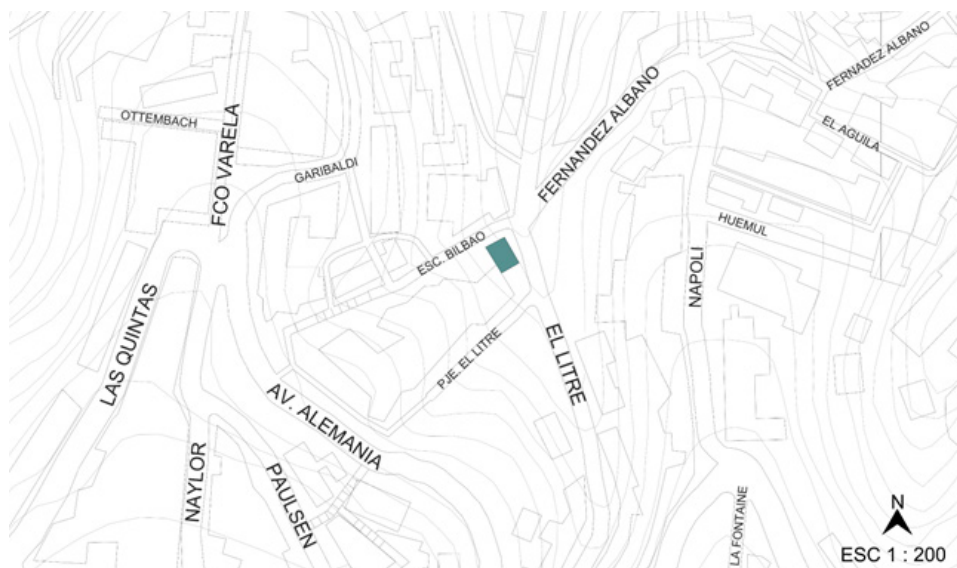


Figura 137  
Emplazamiento general.

Ficha Técnica				ID: 06	
<b>Sección 1: Información General</b>					
Nombre del Inmueble: El Litre					
Calle: El Litre					
Número: #1220					
Cerro: El Litre					
Rol: 5052-7					
Uso: VIVIENDA					
Año de construcción: DESCONOCIDO					
Nº de Pisos: 2					
Estilo Arquitectónico: DESCONOCIDO					
Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación		Zona de Conservación Histórica	
Protección Patrimonial		Sí		X	
		No		X	
Tipo: Declarado Inmueble de Conservación Histórica y Zona Conservación Histórica por el Art. 60 de la L.G.U.C.					
<b>Sección 2: Tipologías constructivas</b>				ID: 06	
2.1. Sistema Estructural	Único				
	Híbrido	El primer nivel es de ladrillo confinado y el segundo nivel la estructura es de entramado de madera.			
Fachada principal	Mampostería en piedra			Sí	x
	Mampostería de ladrillo	x		No	
	Mixto (Madera/Tierra)	x			
	Madera				
	Acero/Hierro				
	Adobe				
			Adaptado o alterado		

<b>2.2. Material Estructural</b>	Muros laterales	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	x
		Mampostería de ladrillo	x		No	
		Mixto (Madera/Tierra)	x			
		Madera				
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Muros interiores	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	x
		Mampostería de ladrillo			No	
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Entrepisos	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	x
		Mampostería de ladrillo			No	
		Mixto (Madera/Tierra)			Se cambio a losa de hormigón en ambos niveles	
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
		Adobe				
	Techumbre	Mampostería en piedra		Adaptado o alterado	Sí	
		Mampostería de ladrillo			No	x
		Mixto (Madera/Tierra)				
		Madera	x			
		Acero/Hierro				
		Adobe				

**Sección 3: Revestimiento** **ID: 06**

<b>3.1. Elementos Secundarios</b>	Revestimiento exterior	Zinc		x
		Yeso + pintura		
		Bahareque (listones de madera con tierra)		
		Madera		
		Otro:		
	Revestimiento interior	Zinc		
		Yeso + pintura		x
		Bahareque (listones de madera con tierra)		x
		Madera		
		Baldosas		
		Otro:		
	Revestimiento de entrepiso	Entablado de Madera		x
		Baldosas		
		Plancha de madera (OSB)		
		Otro: Hormigón		

<b>Sección 4: Patologías del edificio</b>				<b>ID:06</b>	
<b>4.1. Patologías presente en la estructura</b>	Tipología de la lesión	Sintomatología	Agente patológico	Lesión Si/No	
	Biológicas	A) Pudrición parda	1) Presencia de hongos		
		B) Pudrición blanca	2) Presencia de xilófagos (termitas)	x	
		C) Degradación			
	Mecánicas	D) Agrietamientos	3) Cargas, sobrecargas y aplastamiento	x	
			4) Incremento esbeltez		
		E) Deformaciones	5) Aplastamiento		
			6) Asentamiento		
			7) Colapso		
		F) Fisuraciones	8) Dilataciones		
			9) Retracciones		
		G) Nudos	10) Nudos vivos		
			11) Nudos muertos		
		Físico - químicos	I) Erosión	12) Presencia de agua	
				13) Acción del viento	
	J) Meteorización		14) Condiciones atmosférica		
	K) Suciedad		15) Deposito		
			16) Excremento animales		
	L) Humedad		17) Capilar		
			18) Filtración		
			19) Condensación		
20) Obra					
21) Accidental					
<b>Sección 5: Observaciones</b>				<b>ID: 06</b>	
Estado de demolición, sin extracción de piezas, se pudo acceder, se deja como caso de estudio.					

**ANEXO 2**

Se presentan los registros de las mediciones realizadas a las probetas, las siguientes tablas muestran la clasificación por el nivel de daño asignado a cada una de las probetas.

**Tabla 9** Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo de Compresión Paralela.

ID [-]	Humedad [%]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	a [mm]	e [mm]	Nivel Ataque [-]
(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 10 Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Cizalle Paralelo.

ID [-]	Humedad [%]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[-]
(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
(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

**Tabla 11** Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Tracción Perpendicular.

ID [-]	Humedad [%]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	l [mm]	a [mm]	Nivel Ataque [-]
(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
(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

Tabla 12 Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Tracción Perpendicular.

ID [-]	Humedad [%]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	h [mm]	e [mm]	Nivel Ataque [-]
(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
(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

**Tabla 13** Registro de datos y clasificación de probetas para el Ensayo a Flexión Estática.

ID [-]	Humedad [%]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	b[mm]	h[mm]	Nivel Ataque [-]	Ef [MPa]
(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
(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

## ANEXO 3

Las siguientes tablas visualizan los resultados de las propiedades mecánicas mostradas como los gráficos mostrados en la sección 5. Se muestra: el número de probetas en cada grupo, los valores máximos y mínimos, la mediana, el cuartil 1 (Q1) y cuartil 3 (Q3), el rango entre valores extremos y el rango intercuartil (RIC), asimismo se incluye el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV).

Tabla 14 Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales roble	Nuevas roble	Pino Oregón
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	21	6	7
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	62.54	52.69	49.11
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	53.57	46.25	47.12
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	39.83	42.26	38.87
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	32.34	36.73	37.22
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	22.51	32.54	36.92
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	40.03	20.15	12.19
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	21.23	9.52	9.9
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	42.08	42.12	41.59
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	12.98	7.41	5.36
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	30.9	17.6	12.9

Tabla 15 Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales roble	Nuevas roble	Pino Oregón
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	21	6	7
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	60.5	48.1	46.35
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	51.98	46.19	42.13
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	43.4	41.36	37.73
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	34.35	41.11	32
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	24.7	31.86	25.35
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	35.8	16.24	21
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	17.63	5.08	10.13
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	43.42	41.67	37.22
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	10.81	5.63	7.26
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	24.9	13.5	19.5

**Tabla 16** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	4	2	4	11
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	62.34	58.53	62.54	51.95
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	59.23	58.53	54.87	35.97
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	54.83	56.1	45.33	32.82
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	51.86	53.66	39.2	26.33
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	50.18	53.66	34.94	22.51
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	12.16	4.87	27.6	29.44
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	7.37	4.87	15.67	9.64
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	55.54	56.1	47.04	32.83
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	5.14	3.44	11.54	8.5
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	9.3	6.1	24.5	25.9

**Tabla 17** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Paralela según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	4	2	4	11
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	60.5	51.69	54.41	48.03
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	60.07	51.69	53.63	43.37
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	57.88	51.69	47.01	35.23
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	52.94	51.68	36.56	30.83
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	49.76	51.68	31.94	24.7
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	10.74	0.01	22.47	23.33
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	7.13	0.01	17.07	12.54
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	56.5	51.69	45.09	36.56
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	4.88	0.01	10.57	7.63
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	8.6	0	23.44	20.9

**Tabla 18** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Perpendicular según Tipo de Probeta (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales roble	Nuevas roble	Pino Oregón
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	17	6	12
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	18.37	13.12	11.04
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	12.3	12.71	9.74
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	8.4	11.87	6.41
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	5.86	9.8	5.07
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	4.36	5.69	2.35
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	14.01	7.43	8.69
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	6.44	2.91	4.67
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	9.23	10.84	7.01
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	4.11	2.78	2.84
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	44.5	25.7	40.6

**Tabla 19** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Compresión Perpendicular según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	7	0	3	7
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	18.37	-	8.63	9.13
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	15.61	-	8.51	8.42
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	13.42	-	8.16	5.93
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	9.29	-	6.42	5.77
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	5.5	-	5.84	4.36
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	12.87	-	2.79	4.77
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	6.32	-	2.09	2.65
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	12.52	-	7.54	6.67
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	4.41	-	1.49	1.78
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	35.2	-	19.8	26.6

**Tabla 20** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Tracción Perpendicular según Tipo de Probeta (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales roble	Nuevas roble	Pino Oregón
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	22	6	12
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	7.66	7.16	2.87
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	5.2	6.36	1.8
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	2.92	3.66	1.14
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	1.22	3.01	0.99
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	0.038	2.7	0.42
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	7.62	4.46	2.45
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	3.98	3.35	0.81
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	3.38	4.43	1.38
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	2.4	1.87	0.71
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	70.9	42.2	51.8

**Tabla 21** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Tracción Perpendicular según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no ajusta = Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	7	2	4	9
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	7.66	6.36	5.2	2.37
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	7	6.36	4.58	1.73
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	6.18	5.6	3.4	1.19
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	3.91	4.84	2.04	0.64
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	2.98	4.84	1.22	0.038
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	4.68	1.52	3.98	2.33
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	3.09	1.52	2.54	1.09
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	5.59	5.6	3.31	1.2
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	1.8	1.08	1.69	0.77
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	32.2	19.2	51	64.1

**Tabla 22** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales roble	Nuevas roble	Pino Oregón
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	24	8	12
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	10.19	13.66	7.67
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	6.68	10.28	6.61
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	4.61	8.35	4.95
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	3.38	6.01	4.15
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	0.92	4.5	2.67
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	9.27	9.16	5
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	3.3	4.27	2.46
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	5.1	8.43	5.23
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	2.41	3.05	1.57
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	47.2	36.1	30

**Tabla 23** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).

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

**Tabla 24** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	16	2	1	5
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	10.19	4.43	-	7.61
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	7.34	4.43	-	6.69
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	4.84	3.83	2.94	5.32
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	3.93	3.23	-	2.99
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	0.92	3.23	-	2.82
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	9.27	1.2	-	4.79
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	3.41	1.2	-	3.7
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	5.42	3.83	2.94	5.04
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	2.65	0.85	-	2.09
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	49	22.3	-	41.4

**Tabla 25** Estadística Descriptiva – Resistencia a la Cizalle Paralelo según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	16	2	1	5
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	10.06	4.44	-	7.39
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	7.33	4.44	-	6.5
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	4.94	3.84	2.89	5.29
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	3.85	3.24	-	3.01
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	0.92	3.24	-	2.74
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	9.14	1.2	-	4.65
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	3.48	1.2	-	3.49
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	5.42	3.84	2.89	4.94
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	2.7	0.85	-	2
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	49.9	22.1	-	40.4

**Tabla 26** Estadística Descriptiva – Módulo de Rotura en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

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

**Tabla 27** Estadística Descriptiva – Módulos de Rotura en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales roble	Nuevas roble	Pino Oregón
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	17	8	6
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	113.62	123.72	63.39
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	82.3	92.8	62.52
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	73.55	81.97	51.88
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	28.36	75.49	39.96
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	12.65	63.05	35.69
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	100.97	60.67	27.7
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	53.94	17.31	22.56
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	60.04	85.91	50.89
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	33.15	18.36	12.76

**Tabla 28** Estadística Descriptiva – Módulos de Rotura en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).

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

**Tabla 29** Estadística Descriptiva – Módulos de Rotura en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	1*	4	4	7
<b>Máximo</b>	<b>[MPa]</b>	-	113.62	95.75	79.75
<b>Q3</b>	<b>[MPa]</b>	-	110.71	87.16	42.91
<b>Mediana</b>	<b>[MPa]</b>	89.93	93.11	76.46	29.73
<b>Q1</b>	<b>[MPa]</b>	-	75.98	58.02	19.86
<b>Mínimo</b>	<b>[MPa]</b>	-	73.55	41.68	12.65
<b>Rango</b>	<b>[MPa]</b>	-	40.07	54.07	67.1
<b>RIC</b>	<b>[MPa]</b>	-	34.73	29.14	23.05
<b>Promedio</b>	<b>[MPa]</b>	89.93	93.35	72.59	34.67
<b>Desv. Est.</b>	<b>[MPa]</b>	-	20.29	22.59	22.63
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	-	21.7	31.1	65.3
*Se excluye una probeta del análisis debido a que, no presentaba daño por termitas, su modo de falla se vio influenciado por una grieta central					

**Tabla 30** Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

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

**Tabla 31** Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).

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

**Tabla 32** Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).

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

**Tabla 33** Estadística Descriptiva – Módulo de Elasticidad en Flexión Estática según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).

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

**Tabla 34** Estadística Descriptiva – Densidad según Tipo de Probeta (Humedad no Ajustada).

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

**Tabla 35** Estadística Descriptiva – Densidad según Tipo de Probeta (Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Grupo		
		Patrimoniales roble	Nuevas roble	Pino Oregón
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	101	34	49
<b>Máximo</b>	<b>[kg/m3]</b>	990	846	592
<b>Q3</b>	<b>[kg/m3]</b>	738	780	543
<b>Mediana</b>	<b>[kg/m3]</b>	681	762	519
<b>Q1</b>	<b>[kg/m3]</b>	616	714	471
<b>Mínimo</b>	<b>[kg/m3]</b>	518	542	426
<b>Rango</b>	<b>[kg/m3]</b>	472	304	166
<b>RIC</b>	<b>[kg/m3]</b>	122	66	72
<b>Promedio</b>	<b>[kg/m3]</b>	673	747	509
<b>Desv. Est.</b>	<b>[kg/m3]</b>	88	60	42
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	13.1	8	8.3

**Tabla 36** Estadística Descriptiva – Densidad según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad no Ajustada).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	35	10	16	39
<b>Máximo</b>	<b>[kg/m3]</b>	972	795	861	755
<b>Q3</b>	<b>[kg/m3]</b>	763	757	755	661
<b>Mediana</b>	<b>[kg/m3]</b>	703	722	722	599
<b>Q1</b>	<b>[kg/m3]</b>	654	676	671	550
<b>Mínimo</b>	<b>[kg/m3]</b>	527	557	536	508
<b>Rango</b>	<b>[kg/m3]</b>	445	238	325	247
<b>RIC</b>	<b>[kg/m3]</b>	109	81	84	111
<b>Promedio</b>	<b>[kg/m3]</b>	707	714	714	610
<b>Desv. Est.</b>	<b>[kg/m3]</b>	88	71	75	74
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	12.4	9.9	10.5	12.2

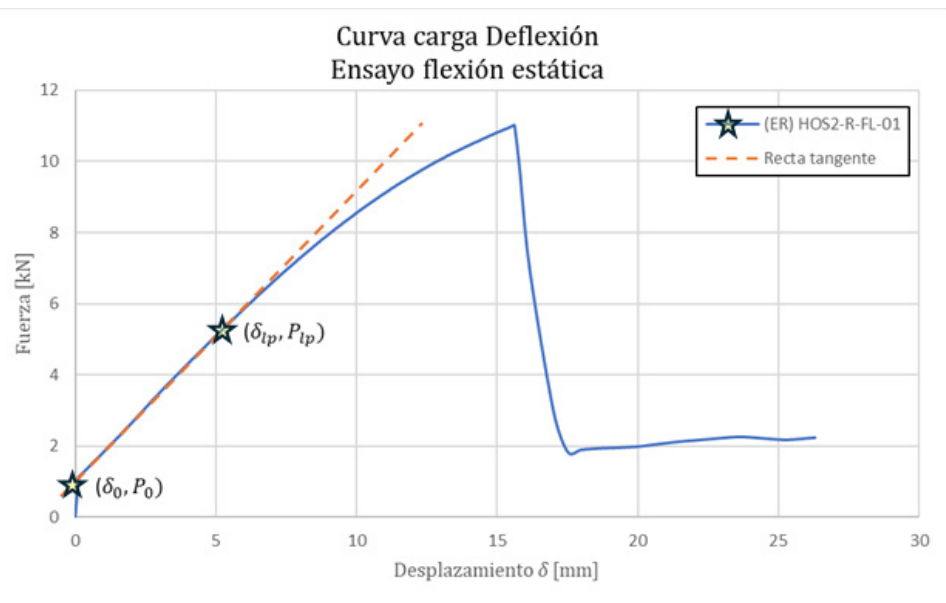
**Tabla 37** Estadística Descriptiva – Densidad según Nivel de Ataque por Termitas (Humedad Ajustada al 12%).

Variable	Unidad	Nivel de Ataque			
		0	1	2	3
<b>N Probetas</b>	<b>[-]</b>	35	10	16	39
<b>Máximo</b>	<b>[kg/m3]</b>	990	784	864	748
<b>Q3</b>	<b>[kg/m3]</b>	763	765	764	658
<b>Mediana</b>	<b>[kg/m3]</b>	703	721	720	621
<b>Q1</b>	<b>[kg/m3]</b>	664	676	682	554
<b>Mínimo</b>	<b>[kg/m3]</b>	531	569	540	518
<b>Rango</b>	<b>[kg/m3]</b>	459	215	324	230
<b>RIC</b>	<b>[kg/m3]</b>	99	89	82	104
<b>Promedio</b>	<b>[kg/m3]</b>	709	714	717	617
<b>Desv. Est.</b>	<b>[kg/m3]</b>	86	68	72	69
<b>CV</b>	<b>[%]</b>	12.1	9.5	10	11.2

## ANEXO 4

El siguiente anexo se presentan los criterios utilizados a la hora de calcular la rigidez elástica de las probetas. El procedimiento consiste en trazar una línea tangente en el gráfico de carga-deflexión obtenido del ensayo correspondiente. Una vez hecho esto, se identifican los puntos del límite de proporcionalidad,  $\delta_{lp}$  y  $P_{lp}$ , que se encuentran donde la curva deja de ser lineal. Además, se localizan los puntos de asentamiento del equipo,  $\delta_0$  y  $P_0$ , que corresponden al desplazamiento inicial que ocurre cuando el equipo hace contacto con la probeta.

Con estos puntos, junto con las propiedades geométricas del ensayo, se procede a calcular el módulo de elasticidad utilizando la ecuación adecuada. Como ejemplo, en la Figura 138 se pueden visualizar los puntos característicos de la curva para el ensayo de flexión estática realizado en la probeta (ER) HOS2-R-FL-01.



**Figura 138**  
Ejemplo de cálculo del módulo de elasticidad en flexión Ef. Caso probeta (ER) HOS2-R-FL-01.

