

EVALUACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA EXISTENTE EN CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS TIPO TABIQUE-ADOBILLO CON DAÑO POR ATAQUE DE TERMITAS EN VALPARAÍSO, CHILE

Viviana González Guastavino¹, Belén Jiménez², Ramiro Bazáez³

Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

¹viviana.gonzalezg@sansano.usm.cl, ²belen.jimenez@usm.cl, ³ramiro.bazaez@usm.cl

Palabras clave: sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera y adobe, caracterización mecánica, patologías de la madera, termitas

Resumen

La presente investigación despliega un estudio experimental para la caracterización mecánica de la madera de roble existente en construcciones históricas que utilizan la técnica del tabique-adobillo en el área histórica de la ciudad de Valparaíso, Chile. El objetivo de este estudio es evaluar cuantitativamente el impacto del daño ocasionado por el ataque de termitas en la resistencia de la madera, considerando que son uno de los principales agentes del deterioro en este tipo de construcciones en la zona central del país. Asimismo, se busca evaluar si el paso del tiempo degrada o no las propiedades de la madera. La campaña experimental propuesta en este trabajo incluye la ejecución de ensayos destructivos convencionales a escala reducida para determinar la resistencia de la madera de roble antiguo, extraído de construcciones históricas, y de roble nuevo (comercial), bajo cargas de compresión paralela y perpendicular a la fibra, tracción perpendicular, cizalle paralelo y flexión estática. Para ello, se propone una herramienta para categorizar visualmente la madera dependiendo del nivel de ataque superficial por termitas en las probetas. La resistencia y el módulo de elasticidad de las probetas ensayadas fueron comparados y analizados en los siguientes grupos: (1) probetas construidas con madera nueva y antigua sin daños, y (2) probetas con daños de termitas clasificadas por nivel de ataque. En términos generales, los resultados demostraron que, en todos los ensayos, excepto en el de compresión paralela, la resistencia de la madera de roble antiguo fue menor que en la madera nueva entre un 11% y un 60%. Además, se pudo comprobar que tanto la resistencia como el módulo de elasticidad de la madera disminuyen en magnitud cuando aumenta el nivel de ataque por termitas en una correlación inversa.

1 – INTRODUCCIÓN

Los sistemas constructivos tradicionales híbridos que utilizan armazones de entramado de madera rellenos con tierra se caracterizan por su reconocido carácter antisísmico en diferentes lugares del mundo (Aktaş, 2017; Jiménez; Pelà, 2023; Jorquera; Cisternas, 2016; Lukic et al., 2018; Poletti et al., 2016; Quinn et al., 2016). Algunos ejemplos de este tipo de técnicas de construcción son la quincha o bahareque y la tierra alivianada presentes principalmente en Sudamérica y Panamá (Acevedo et al., 2022; Gómez-Patrocinio et al., 2021), y la técnica del tabique-adobillo característica de Valparaíso, Chile, entre otros. En estas tipologías el principal sistema portante se constituye con armazones de madera, estructuras altamente sensibles 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 lo tanto, afectan gravemente su capacidad de carga y conservación.

Particularmente, en la ciudad de Valparaíso, 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 están experimentando 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 Valparaíso habían más de 5.000 construcciones dañadas por las termitas, situación que va en aumento. En particular, las termitas de madera seca, húmeda 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 acumulado y originado por otras patologías como la humedad, y la falta de mantenimiento y protección ante dicha amenaza (Figura 1c). Los daños producidos por las termitas son generalizados e incrementan la inestabilidad de los marcos al verse desintegradas las piezas estructurales. Tal como observa en la Figura 1, el daño en el marco también desestabiliza el relleno compuesto de bloques de adobillo al perder la madera la capacidad de confinar las piezas, propiciando la pérdida de la integridad de los muros.

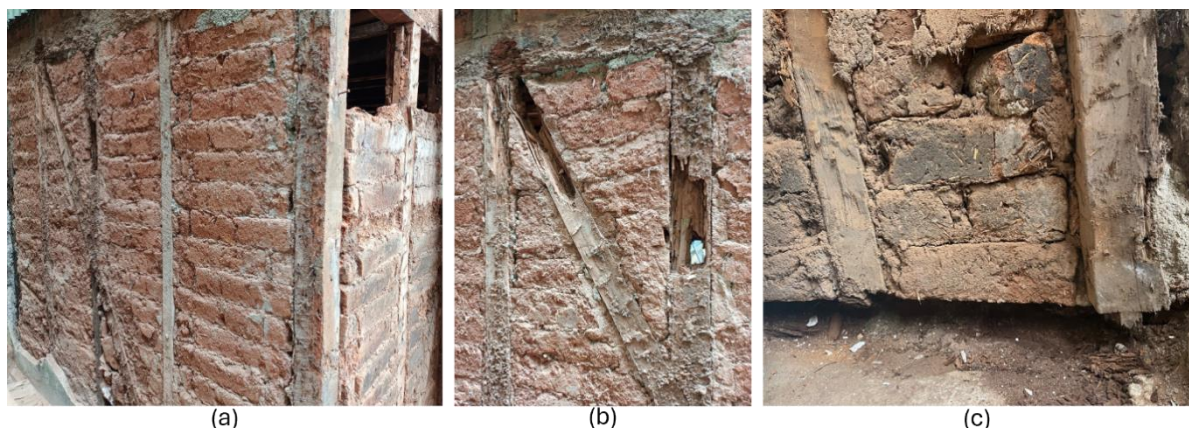


Figura 1. Vivienda afectada por ataque de termitas en el cerro Alegre de Valparaíso: (a) desprendimiento parcial del adobe y desintegración parcial y total de (b) diagonales y (c) soleras

Las propiedades mecánicas de la madera son altamente variables y dependen de diferentes factores tales como la especie maderera, la localización de los inmuebles, y el estado de uso y conservación de las estructuras, entre otros. En este sentido, la caracterización mecánica de las maderas nuevas (y sin patologías) no suelen otorgar valores representativos ni comparables con las maderas antiguas, existentes en edificios históricos (Cisterna; Jorquera, 2016; Ferrada; Berg, 2016; Jiménez, 2015). Es por esta razón que se vuelve imprescindible realizar estudios para comprender 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, que permitan formar sistemas de indicadores para la evaluación y monitoreo de las estructuras en servicio (Hernández; Venegas, 2015).

La presente investigación aborda la caracterización mecánica de la madera de roble existente en las construcciones tipo tabique-adobillo de Valparaíso. El objetivo es determinar el impacto del daño producido por las termitas en las propiedades de la madera, y la injerencia el paso del tiempo. El estudio se realizó mediante 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 (NCh 973, 2018), la compresión perpendicular (NCh 974, 2018), la tracción perpendicular (NCh 975, 2018), el cizalle paralelo (NCh 976, 2018), y la flexión estática (NCh 987, 2018). Las probetas de roble antiguo fueron construidas a partir de piezas estructurales de descarte, y clasificadas de acuerdo con una escala de grado de daño que cuantifica de forma cualitativa el nivel ataque superficial por termitas en la zona de fallo esperada de las probetas por ensayo. A continuación, se describen los aspectos principales de la campaña experimental y los resultados de los ensayos.

2 METODOLOGÍA

La metodología propuesta en esta investigación es del tipo experimental y cuantitativa. La campaña considera la evaluación de la resistencia de las probetas ante esfuerzos de

compresión, tracción, cizalle y flexión en probetas a escala reducida a través de la aplicación de los métodos y procedimientos descritos en la normativa chilena.

Una etapa preliminar a la ejecución de los ensayos experimentales consideró la búsqueda y selección de casos de estudio desde los que se extrajeron piezas de madera estructural de roble de descarte. Los edificios estudiados se localizan en el cerro Alegre de Valparaíso (área inscrita en la zona de protección UNESCO), y al momento de la inspección se encontraban en procesos de rehabilitación. Las piezas recuperadas fueron utilizadas para construir las probetas para los ensayos, considerando el tipo de ensayo y el número de probetas requerido en cada uno. Las probetas fueron clasificadas de acuerdo con el grado de daño superficial por ataque de termitas de acuerdo con la tabla 1. En la tabla el nivel de ataque 0 corresponde a probetas sin ataque de termitas ni lesiones aparentes, y el nivel 3 a probetas con ataque alto. Para elaborar esta herramienta se consideró la metodología de Carmona y Durán (2005).

Tabla 1 Herramienta de clasificación visual de la madera existente 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 ¹ 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 ² 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 ³ de 1 a 3mm de profundidad en una extensión no mayor a 1/4 de la superficie lateral de la probeta. - Perforaciones 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. - Erosión ³ sobre una extensión superior a 1/4 de la superficie lateral de la probeta. - Ataque penetrante ² 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

Nota: 1) ataque superficial corresponde a aquel compuesto por agujeros pequeños que se concentran en un área, o desprendimientos pequeños causados por termitas;

2) perforación o ataque penetrante corresponde a agujeros puntuales, profundos y más grandes en comparación a los provocados por el ataque superficial.

3) erosión considera surcos y cavernas ocasionadas por la termita subterránea sobre la madera, lo cual puede (o no) generar grietas longitudinales.

La aplicabilidad de la herramienta descrita en la tabla 1 se restringe a la evaluación del daño en las cercanías del plano de fallo, donde se espera se produzca el daño en las probetas; es decir, si el ataque se concentra en lugares alejados del plano o de la zona de fallo, entonces no son tomados en cuenta para la clasificar. Además, no se consideran en esta evaluación la presencia de grietas en las cercanías al plano de fallo que no se hayan producido por el ataque de las termitas.

Finalmente, la metodología considera la ejecución de todos los ensayos con probetas de madera nueva y antigua, y, el cálculo de la resistencia y rigidez inicial de cada probeta, y del módulo de elasticidad desde los resultados de los ensayos de flexión. Por último, se considera el procesamiento de los resultados obtenidos a través de análisis estadísticos que permitan capturar tendencias, valores medios y dispersiones en las muestras de la investigación.

3 PROBETAS Y MATRIZ DE ENSAYOS

En la tabla 2 se despliega la matriz ensayo del programa, considerando probetas a escala reducida, donde se describen las medidas y la cantidad de probetas disponibles para cada tipo de ensayo. Por otro lado, la tabla 3 muestra la distribución de la muestra respecto al tipo de ensayo y a la clasificación por nivel de ataque por termitas. Lamentablemente, la muestra no es homogénea en cuanto al número de probetas para cada nivel de ataque, debido a que estas fueron elaboradas y luego clasificadas, existiendo disparidad en el tipo de lesiones que se observaron. La figura 2 presenta a modo de ejemplo las probetas de cizalle paralelo clasificadas por nivel de ataque.

Tabla 2. Matriz de ensayo con probetas a escala reducida

Tipo de ensayo	Medidas de la probeta (mm)	N° de probetas		Total
		Roble antiguo (edificaciones históricas)	Roble nuevo (madera comercial)	
Compresión paralela	200 x 50 x 50	21	6	27
Compresión perpendicular	150 x 50 x 50	17	6	23
Tracción perpendicular	63 x 50 x 50	22	6	28
Cizalle paralelo	65 x 50 x 50	24	8	32
Flexión	760 x 50 x 50	16	8	24
Total		100	34	134

Tabla 3. Distribución de la muestra 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	1	4	4	7	16
Total	35	10	16	39	100

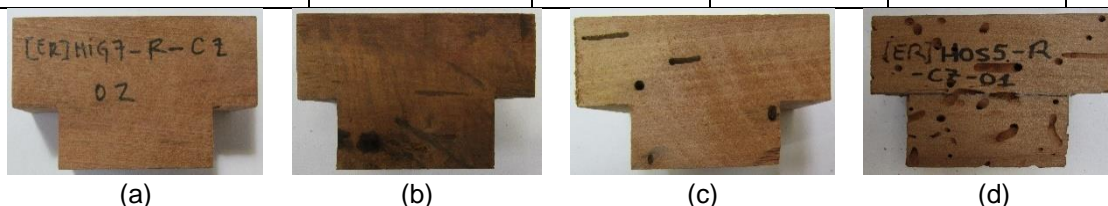


Figura 2. Probetas de cizalle paralelo clasificadas según nivel de ataque: (a) sin ataque 0; (b) ataque bajo 1; (c) ataque medio 2 y (d) ataque alto 3

a. Características físicas de la madera de roble

La determinación de las características físicas de la madera, tales como la densidad aparente y el contenido de humedad es una actividad preliminar a la ejecución de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas del material. La densidad fue estimada para todas las probetas de acuerdo con la NCh176/2 (1986) que establece la densidad nominal, la densidad básica (relación de masa anhidra y volumen verde) y la densidad de referencia. Por otro lado, para determinar el contenido de humedad se adoptaron las recomendaciones de la NCh3028/2 (2017) con el propósito normalizar los valores a un nivel de contenido de humedad igual al 12%, y así homogeneizar los resultados. Para realizar las mediciones de humedad se consideró el protocolo de uso de equipos higrómetro descritos en la NCh2827 (2020).

b. Características mecánicas de la madera

Para determinar las propiedades mecánicas de la madera existente en construcciones históricas se llevaron a cabo ensayos experimentales convencionales de acuerdo con los métodos descritos en la normativa chilena. En particular, se llevaron a cabo ensayos en probeta pequeña (figura 3) para determinar la resistencia ante esfuerzos de compresión paralela (NCh 973, 2018b), compresión perpendicular (NCh 974, 2018c), tracción perpendicular (NCh 975, 2018e), cizalle paralelo (NCh 976, 2018a) y flexión estática (NCh 987, 2018d). A continuación, se exponen los resultados y conclusiones obtenidas para cada uno de los ensayos mencionados.

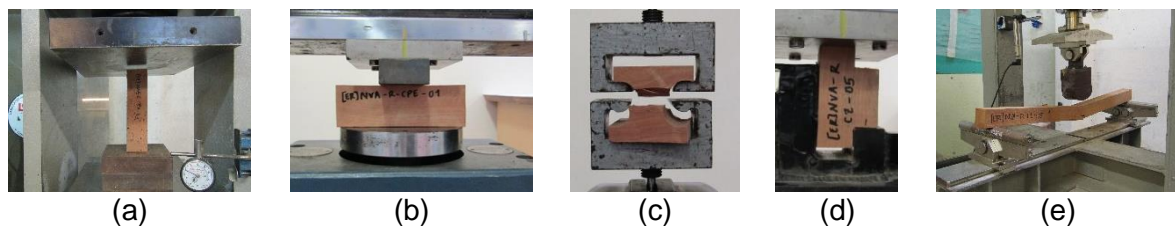


Figura 3. Configuración de los ensayos con probeta a escala pequeña para determinar las propiedades mecánicas de la madera ante cargas de: (a) compresión paralela; (b) compresión perpendicular; (c) tracción perpendicular; (d) cizalle paralelo; y (e) flexión estática.

a) Resistencia a la compresión paralela

Los ensayos de resistencia a la compresión paralela se realizaron de acuerdo con la NCh973 (2018b). En los ensayos la velocidad de carga fue controlada por desplazamiento, con una velocidad constante de 0.5 MPa/s, aplicada mediante un cabezal rotulado que permitió su distribución sobre las probetas, como se muestra en la Figura 3a. La figura 4 muestra los resultados de los ensayos con probetas sin daño de roble nuevo y roble antiguo proveniente de construcciones históricas, donde $R_{c,12}$ es la resistencia a la compresión paralela normalizada al 12% de humedad. El valor de la mediana de resistencia de las probetas de roble nuevo alcanzó un valor de 41.36 MPa, mientras que el roble antiguo 43.40 MPa, demostrando que el roble antiguo fue un 4.8% más resistentes respecto a las de roble nuevo.

En relación con las probetas con daño por termitas, los resultados revelaron una tendencia clara a disminuir su resistencia a la compresión paralela a medida que aumentaba el grado de daño, desde la clasificación 0 (sin ataque) a la 3 (ataque alto). La Figura 4b permite observar el valor de la mediana que disminuyó desde 57.89 MPa (nivel de ataque 0) hasta 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 con nivel de ataque 0 (sin daño), mientras que el nivel de ataque 1 (35.23 MPa) fue un 11% menos resistente que el nivel de ataque 0.

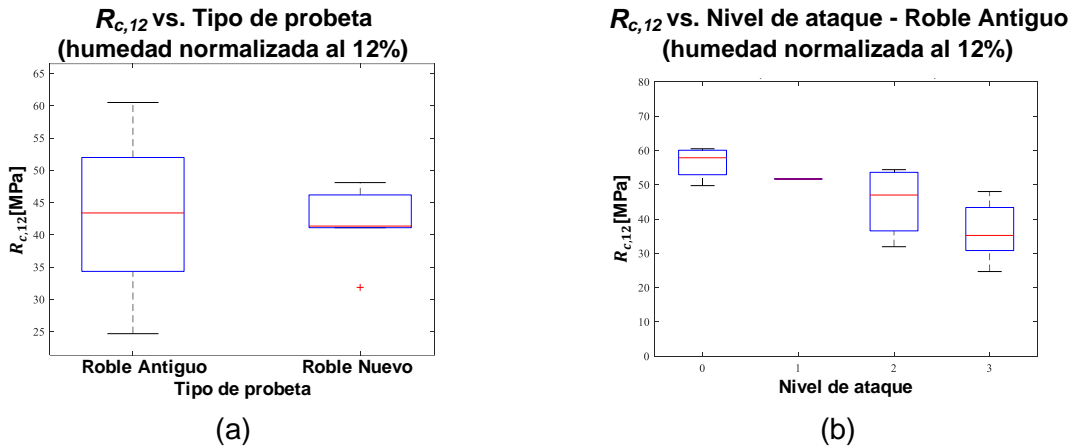


Figura 4. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión paralela según: (a) tipo de probeta y (b) nivel de ataque por termitas

b) Resistencia a la compresión perpendicular

Para determinar de la resistencia de la madera de roble ante esfuerzos de compresión perpendicular se siguieron los métodos y procedimientos descritos en la norma NCh974 (2018). La carga, controlada por desplazamiento, fue aplicada con una velocidad constante de 0.5 mm/min mediante un cabezal rotulado que permitió su distribución sobre cada espécimen, como se en la Figura 3b. La figura 5, muestra los resultados del ensayo donde R_{cn} , es la resistencia a la compresión perpendicular normalizada al 12% de humedad. El valor de la mediana de la resistencia en las probetas nuevas fue de 11.87 MPa, mientras que en el grupo de probetas de madera de roble antiguo fue de 8.40 MPa, demostrando que la resistencia de la madera existente en edificios históricos disminuyó casi un 34% respecto a las probetas de roble nuevo. No obstante, existe una alta dispersión en los resultados debido a la variabilidad de la muestra de roble antiguo (Figura 5a), por lo que los resultados deben ser analizados con discreción.

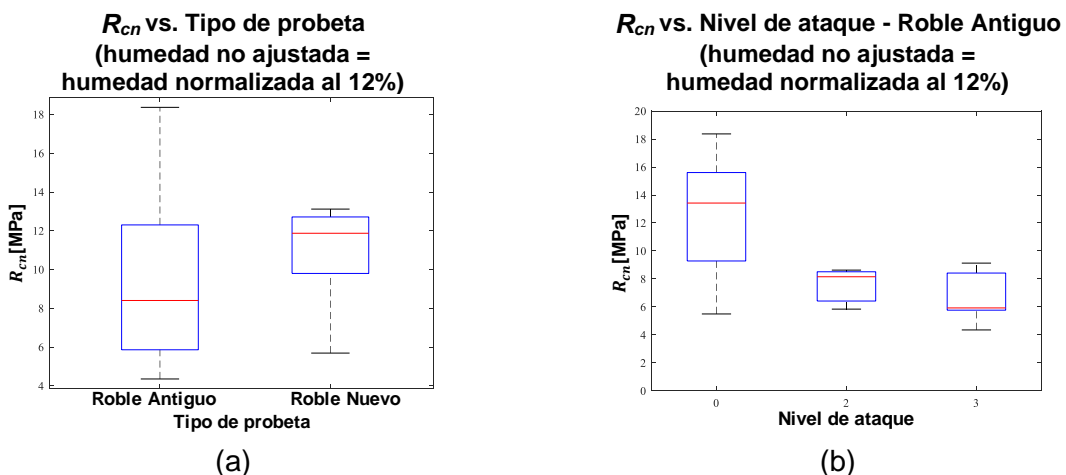


Figura 5. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión perpendicular según: (a) tipo de probeta y (b) nivel de ataque por las termitas.

Por otro lado, los resultados de las probetas con daños por ataque de termitas (fFigura 5b), mostraron una dispersión mayor que las otras categorías. Los valores de la mediana indicaron una resistencia de 13.42 MPa para el nivel de ataque 0, 8.16 MPa para el nivel de ataque 2, y 5.93 MPa para el nivel de ataque 3, demostrando 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. Por otro lado, 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). En esta muestra no

se catalogaron probetas con nivel 1, ya que ninguna de las disponibles en este estudio se clasificó de acuerdo con ese nivel de daño superficial. En este sentido, se vuelve necesario obtener más datos para poder validar estos resultados con un mayor grado de confiabilidad.

c) Resistencia a la tracción perpendicular

Los ensayos de tracción perpendicular se ejecutaron de acuerdo con la de la NCh975 (2018e). La carga, controlada por desplazamiento, tuvo una velocidad constante de 2.0 mm/min, y fue aplicada mediante un cabezal rotulado que permitió su distribución sobre cada espécimen, como se observa en la Figura 3c. La Figura 6 muestra los resultados del ensayo donde R_{tn} es la resistencia a la tracción perpendicular normalizada al 12% de humedad. En este caso, los resultados de las probetas de roble antiguo sin daños también presentaron una dispersión alta debido a la variabilidad de la muestra, como se puede apreciar en la figura 6a. El valor de la mediana de la resistencia de las probetas de madera de roble nuevo fue de 3.66 MPa, mientras que la de la madera antigua fue de 2.82 MPa, disminuyendo en un 22% en respecto a las probetas de roble nuevo.

Por otro lado, la mediana de la resistencia en probetas con daño por ataque de termitas, fueron de 6.18 MPa para aquellas clasificadas en nivel 0 (sin ataque), 5.60 MPa para en nivel 1, 3.40 MPa para el nivel 2, y 1.91 MPa para el nivel 3. Las probetas del nivel 1, 2 y 3 fueron un 10%, 58% y 135% menos resistentes que las del nivel 0. Asimismo, las probetas de nivel 2 fueron un 96% más resistente que las de nivel 3 (Figura 6b).

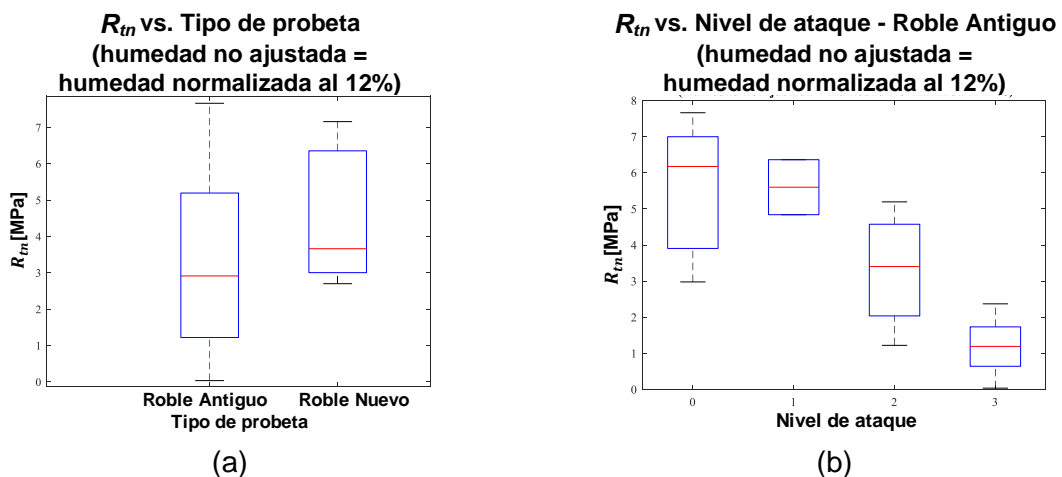


Figura 6. Resultado de los ensayos de resistencia a la tracción perpendicular según: (a) el tipo de probeta y (b) nivel de ataque por las termitas

La figura 7 muestra los resultados de los ensayos de cizalle donde $R_{v,12}$ es la resistencia al cizalle paralelo normalizado al 12% de humedad. El valor de la mediana de la resistencia en el grupo de probetas de roble nuevo fue de 8.62 MPa, mientras que la del grupo de probetas de roble antiguo fue de 4.65 MPa, experimentando una reducción del 60% (Figura 7a). Por otro lado, las medianas de los resultados de resistencia para el grupo de probetas clasificadas por el nivel de ataque superficial por termitas fueron de 4.94 MPa para el 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, demostrando que las probetas del nivel 1 y 2 fueron un 25% y 52% menos resistentes que las del nivel 0, respectivamente (Figura 7b). No obstante, la mediana de las probetas clasificadas en nivel de ataque 3 fue un 6.8% mayor a las del nivel 0, saliéndose de la tendencia esperada hacia la reducción de la resistencia a medida que aumenta el nivel daño. Este resultado se puede asociar a diversos factores que tienen que ver con un error de clasificación de las probetas, que no presentaron daño substancial en el plano de fallo, y a que el mecanismo de fallo no se activó en la dirección de la fibra del ensayo.

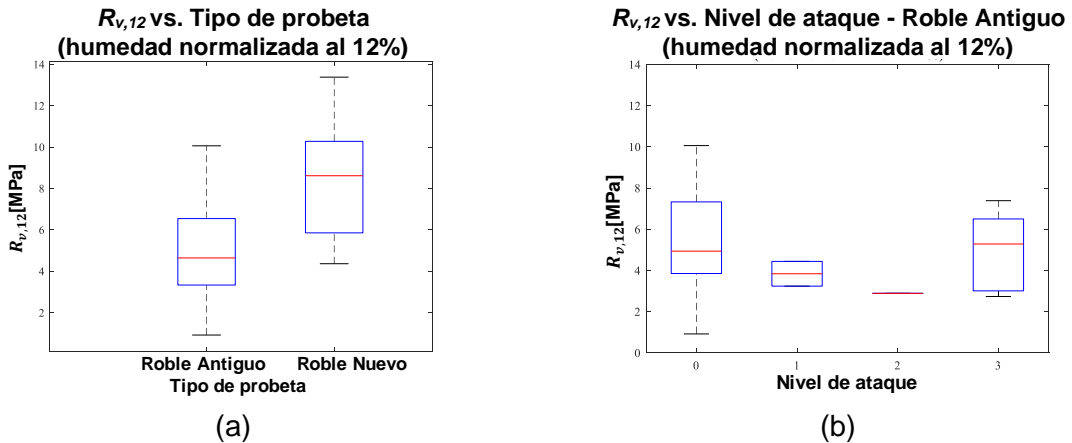


Figura 7. Resultados de los ensayos de resistencia al cizalle paralelo según: (a) tipo de probeta y (b) nivel de ataque por las termitas.

e) Resistencia a la flexión estática

Los ensayos de flexión estática se realizaron de acuerdo con los métodos descritos en la NCh987 (2018d). La carga, controlada por desplazamiento, fue aplicada con una velocidad constante de 2.5 mm/min mediante un cabezal rotulado que permitió su distribución sobre los especímenes (Figura 3e). La figura 8 muestra los resultados de los ensayos donde $R_{f,12}$ corresponde al módulo de rotura que representa la resistencia a la flexión normalizada al 12% de humedad. El valor de la mediana del módulo de rotura para las probetas de roble antiguo fue de 73.55 MPa, mientras que en el grupo de roble nuevo fue de 81.97 MPa, lo que demuestra que la madera antigua experimentó una reducción del 11% en su resistencia respecto a la madera nueva.

Los resultados de los ensayos en probetas clasificadas según su nivel de daño por ataque de termitas (Figura 8b) mostraron una tendencia clara a la disminución de la resistencia con el incremento del daño. Los valores de las medianas del módulo de rotura mostraron que la resistencia bajo de 89.93 MPa (nivel de ataque 0) a 29.73 MPa (nivel de ataque 3), lo que representa un 100% menos. Asimismo, para el grupo de probetas del nivel 1 y 2 la mediana de la resistencia fue estimada en 93.11 MPa y 76.46 MPa, respectivamente, representando una reducción del 3,5% y 16% respecto a las del nivel 0. No obstante lo anterior, estos resultados deben ser analizados con discreción, ya que solo fue posible clasificar una probeta en el nivel 0, y se identificó un valor anómalo en las probetas de nivel 3.

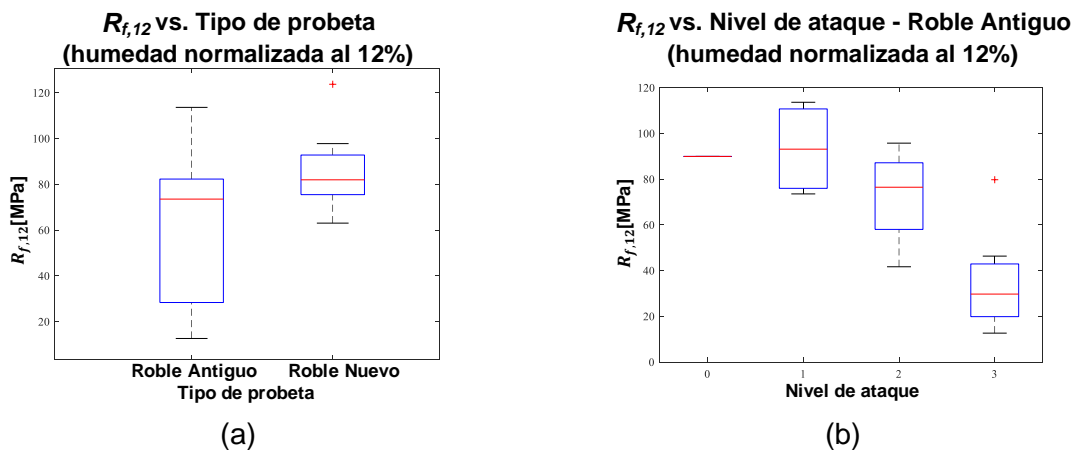


Figura 8. Resultados de los ensayos de resistencia a la flexión estática según: (a) tipo de probeta y (b) nivel de ataque por las termitas.

La Figura 9 muestra los valores del módulo de elasticidad $E_{f,12}$ calculadas desde las probetas ensayadas a flexión. En particular, desde la Figura 9a se puede apreciar que la mediana de las probetas hechas con madera de roble antiguo fue de 8344 MPa, mientras que aquellas hechas de roble nuevo de 9535 MPa, demostrando que la madera antigua disminuyó su rigidez en un 13%. Por otro lado, la determinación del módulo de elasticidad en las probetas agrupadas según el nivel de daño por termitas (Figura 9b) también mostró una tendencia a disminuir a medida que la porosidad por daño de termitas en los especímenes aumenta. Los valores de las medianas mostraron que la resistencia bajo de 11261 MPa (nivel de ataque 0) a 5061 MPa (nivel de ataque 3), lo que representa una reducción del 76%. Asimismo, el módulo de elasticidad del nivel 1 y 2 fue estimado en 12326 MPa y 9569 MPa, representando un aumento del 9% y reducción de un 16% respecto a las del nivel 0.

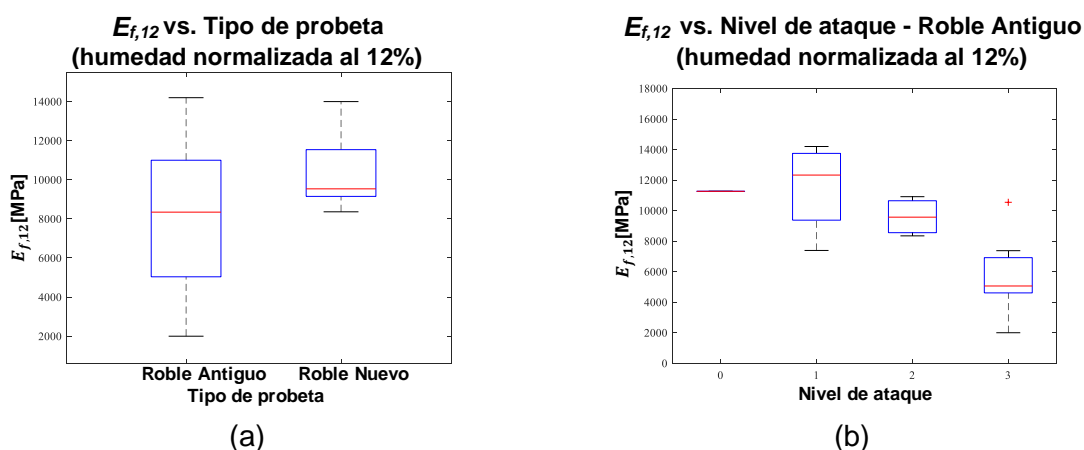


Figura 9. Resultados de los ensayos de resistencia a la flexión estática. Valores del módulo de elasticidad según: (a) tipo de probeta y (b) nivel de ataque por termitas.

4 COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

El presente artículo aborda un estudio para la caracterización mecánica de madera de roble antiguo existente en las construcciones históricas de Valparaíso, específicamente de la tipología tabique-adobillo, con el objetivo de analizar el impacto del daño ocasionado por las termitas en la resistencia del material. Para ello, se llevó a cabo una campaña experimental para determinar la resistencia de la madera desde el ensayo de probetas nuevas (comerciales) y antiguas, con y sin daños por termitas, ante esfuerzos de compresión paralela, compresión perpendicular, tracción perpendicular, cizalle paralelo y flexión estática, de acuerdo con los métodos establecidos en la normativa chilena vigente para ensayos en probeta a escala pequeña.

Para alcanzar los resultados propuestos, se elaboró una herramienta cualitativa que incorpora una escala de grado de daño por ataque de termitas, con el objetivo de catalogar a través de la observación las probetas hechas con madera antigua de acuerdo con la gravedad de sus lesiones (tabla 1). Las probetas de cada ensayo fueron catalogadas desde el nivel 0 (sin ataque) al nivel 3 (ataque alto), y los ensayos fueron clasificados en dos grupos: (1) por tipo de probeta, donde se buscó comparar las probetas nuevas con las antiguas sin daños, y estudiar el impacto del envejecimiento de la madera en su resistencia; y (2) por nivel de gravedad del ataque por termitas para cada ensayo.

Los resultados del grupo (1) demostraron que la resistencia de la madera de la madera antigua extraída desde edificios históricos versus la madera nueva de la misma especie se vio reducida en la mayoría de los ensayos, en porcentajes que varían entre el 11% y el 60%. En particular, la resistencia a la compresión perpendicular de la madera de roble antiguo (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 el envejecimiento 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 para 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 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. Considerando lo anterior se puede concluir que:

Para mejorar los resultados obtenidos en esta investigación y continuar con el análisis de la tipología constructiva tabique-adobillo se proponen las siguientes actividades:

- Aumentar el tamaño de la muestra para cada tipo de ensayo con el objetivo de reducir los errores y sesgos en los resultados asociados a la alta dispersión observada.
- Mejorar las descripciones y procedimientos para la clasificación visual de la madera dañada con el objetivo de realizar una categorización más precisa de las probetas, integrando variables como la masa de las probetas, otros tipos de lesiones.
- Incluir ensayos en otras direcciones de la fibra de la madera y ensayos no destructivos para contrastar los resultados obtenidos.
- Incluir otros materiales del sistema constructivo, como es el caso del adobillo, incluyendo ensayos para la caracterización del material y de los marcos elementales.

Los comentarios finales y recomendaciones que se desprenden de este trabajo son las siguientes:

- La reducción de la resistencia y del módulo de elasticidad de la madera debido al daño ocasionado por las termitas implica que esta sea más susceptible a deformaciones y daños bajo cargas de trabajo normales, lo que podría afectar su desempeño a largo plazo. Se remarca la importancia de realizar inspecciones y mantenimiento regular de las estructuras históricas, especialmente cuando están expuestas a plagas como las termitas garantizar su seguridad y durabilidad, y se recomienda aplicar estrategias de conservación preventiva y curativa en caso de ser necesario (como el reemplazo parcial o total de las piezas cuando el daño en los elementos estructurales sea medio o alto, respectivamente).
- El daño superficial y visible de la madera muchas veces no es representativo de lo que ocurre en las zonas críticas o interiores de los elementos estructurales, por lo que puede ser necesario realizar mediciones no destructivas para evaluar el grado de daño que

presentan los elementos en servicio antes de tomar una decisión de intervención en piezas con algún nivel de daño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, p. 21–28). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1273683>
- Broto, C. (2005). Enciclopedia Broto de patologías de la Construcción. Links International.
- 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>
- Cisterna, R.; Jorquera, N. (2016). El tabique-adobillo de Valparaíso. Una técnica poco conocida en un Sitio del Patrimonio Mundial UNESCO.
- Ferrada, M.; Berg, L. (2016). 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*.
- 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>
- 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].
- Jiménez, B. (2015). 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. Tesis de grado. Departamento de Arquitectura, Valparaíso: UTFSM.
- 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>
- Jorquera, N.; Cisternas, R. (2016). El tabique-adobillo, una técnica sismorresistente de Valparaíso. Terra Lyon.
- 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.
- 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>
- MINVU (2017). Cómo prevenir y enfrentar daños provocados por termitas en edificaciones. Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo
- MINVU (2018). Recomendaciones para la prevención y control de ataques de termitas en edificaciones. Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo
- NCh 176/2 (1986). Madera - Parte 2: Determinación de la densidad. Chile: Instituto Nacional de Normalización
- NCh 2827 (2020). Calibración y uso de xilohigrómetros portátiles Chile: Instituto Nacional de Normalización
- NCh 3028/2 (2017). 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. Chile: Instituto Nacional de Normalización

NCh 973 (2018b). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión paralela. Chile: Instituto Nacional de Normalización

NCh 974 (2018c). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión perpendicular a las fibras. Chile: Instituto Nacional de Normalización

NCh 975 (2018e). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de tracción perpendicular a las fibras. Chile: Instituto Nacional de Normalización

NCh 976 (2018a). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de cizalle paralelo a las fibras/ Chile: Instituto Nacional de Normalización

NCh 987 (2018d). Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de flexión estática. Chile: Instituto Nacional de Normalización

Poletti, E.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P. B.; Ciocci, M. P. (2016). Numerical approaches for the analysis of timber frame walls. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 1, pp. 183–192). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39492-3_15

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>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación, Innovación y Emprendimiento de la Universidad Técnica Federico Santa María por financiar el proyecto de investigación 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_3) en el cual se enmarca la presente investigación.

AUTORES

Viviana González Guastavino, estudiante de magister en Rehabilitación Arquitectónica Sostenible, egresada de arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Belén Jiménez, arquitecta por la USM, doctora en ingeniería de la construcción por la Universitat Politècnica de Catalunya y académica del Departamento de Arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM). Su trabajo se centra en principalmente el análisis estructural, sísmico y rehabilitación arquitectónica de las construcciones históricas.

Ramiro Bazález, ingeniero civil y magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil por la USM, doctor en Ingeniería Civil de Portland State University, Estados Unidos. Ramiro es académico en el Departamento de Obras Civiles de la USM. Su trabajo de investigación está principalmente orientado al área de diseño y evaluación sísmica de estructuras, como también en medidas de reforzamiento y aplicación de sistemas de protección sísmica.