

Dagnóstico tecnológico y evaluación mecánica de vigas de madera antigua de *Picea abies*

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH

Resumen

Las estructuras de madera presentes en edificaciones con valor histórico y cultural requieren de diagnóstico para mantener su confiabilidad estructural. El objetivo de este trabajo fue precisar el estado tecnológico y mecánico de elementos estructurales de la madera antigua de *Picea abies*. Se examinó la excentricidad del eje longitudinal de las vigas, la velocidad de crecimiento, la cantidad, tipo y posición de nudos. Se midió la velocidad de ondas de esfuerzo en las direcciones longitudinal, radial y tangencial de la madera y se calcularon los módulos de elasticidad correspondientes. Las vigas contenían la médula y madera juvenil alrededor de ésta. Su aserrado estaba desalineado. Se detectaron fisuras a lo largo de la superficie de una de las caras de las vigas. La velocidad de las ondas de esfuerzo fue sensible a la posición en la viga donde fue medida y demostró diferencias en las mediciones a nivel local. La densidad promedio fue de 422 kg/m³ y los módulos de elasticidad fueron: en la dirección longitudinal 14,250 MPa, en la radial 1,076 MPa y en la tangencial 1,414 MPa.

Palabras clave: densidad, nudos, fisuras, ondas de esfuerzo, módulo de elasticidad

Abstract

The wood structures present in buildings with historical and cultural value require diagnostic to maintain their structural reliability. The objective of this work was to specify the technological and mechanical state of old wood structural elements of *Picea abies*. The eccentricity of the longitudinal axis of the beams, the growth velocity and the quantity, type and position of knots was examined. The speed of stress waves in the longitudinal, radial and tangential directions of the wood was measured, calculating the corresponding moduli of elasticity. The beams had some peculiarities, such as the pith included and juvenile wood around it, a misaligned sawing with respect to the natural anisotropy directions of the wood plane, a discontinuous growth rate of the wood tissue and cracks were detected along the surface of one side of the beams. The speed of the stress waves was sensitive to the position in the beam where it was measured and showed differences in local measurements. The average density was 422 kg/m³ and the moduli of elasticity were 14,250 MPa in the longitudinal direction, 1,076 MPa in the radial and 1,414 MPa in the tangential directions.

Key words: density, knots, cracks, stress waves, modulus of elasticity.

Introducción

Para fines de diagnóstico técnico, la madera antigua debe ser apreciada en función de la especie y de su calidad, independientemente del valor histórico, estético o cultural que ella posee. Al mismo tiempo, la valoración de la madera antigua debe integrar aspectos vinculados a su constitución biológica y a su condición tecnológica. El estado técnico de la madera antigua está en función de estos argumentos. Por otra parte, la calidad de una madera antigua, depende originalmente de sus propiedades físico-químicas y de sus características anatómicas y mecánicas, las cuales están ligadas directamente a su vocación para un uso específico (Sotomayor-Castellanos, 2008).

El análisis estructural de un maderamen, debe seguir un procedimiento de carácter científico. La metodología para la evaluación de estructuras antiguas de madera propuesta por Sotomayor-Castellanos y Cruz-de León (2008), se constituye de tres componentes: El diagnóstico, que tiene el objetivo de identificar las condiciones de la estructura, en relación a sus condiciones de servicio pasadas y presentes. La evaluación, la cual pretende precisar las condiciones tecnológicas de la madera y calcular la resistencia mecánica de los componentes estructurales del sistema. Y el tercer componente, que es la restauración de la estructura, lo cual, a partir de los resultados de las etapas de diagnóstico y evaluación, consiste en proponer las tareas de mantenimiento, de reparación y de consolidación necesarias para realizar una correcta restauración del sistema.

El presente trabajo, se concentra principalmente en el componente de evaluación. Particularmente en lo que respecta al diagnóstico tecnológico de la madera y a la evaluación de sus propiedades mecánicas.

El deterioro de la madera lo inician, por una parte, factores físicos como la exposición sin protección a las inclemencias del clima y por otra, factores constructivos como deficiencias en tratamientos de preservación (Figura 1, Sotomayor-Castellanos y Cruz-de León, 2008). Los primeros síntomas de deterioro son la erosión de la superficie, para posteriormente facilitar la llegada de agentes biológicos, como lo son los insectos xilófagos. Si el proceso de deterioro continúa, la capacidad portante de una estructura de madera y sus componentes estructurales, como lo son vigas y columnas, se verá reducida.

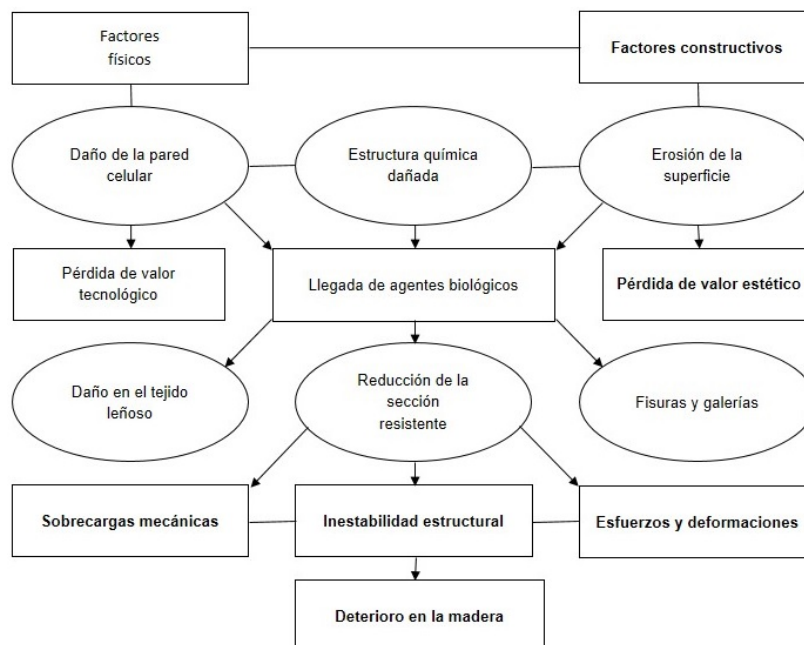


Figura 1. Proceso de deterioro de la madera (Adaptado de Sotomayor-Castellanos y Cruz-de León, 2008).

Para conservar la confiabilidad estructural de una edificación de madera, es recomendable mantener en buen estado el material y en caso necesario, evaluar el estado tecnológico y mecánico de la madera, y de acuerdo al diagnóstico, realizar el tipo de intervención necesaria.

Respecto a la evaluación del estado tecnológico de la madera, en la Tabla 1, adaptada de Zabel y Morrell (1992), citados por Sotomayor-Castellanos y Cruz-de León (2008), se presentan las tipologías principales de deterioro sufrido por la madera, su agente causal y la descripción del daño. Información sobre tecnología de protección y deterioro de la madera puede ser consultada en Cruz-De León (2010 y 2011) y Ávila-Calderón y col. (2012).

TABLA 1 Tipos de deterioro de la madera (Adaptado de Zabel y Morrell, 1992).		
Tipo de daño	Agente causal	Descripción
Intemperismo	Luz ultravioleta, oxidación, contracción y expansión de la madera, desfibrado	Superficie color gris y rugosa.
Descomposición térmica	Alta temperatura	< 200 °C, Superficie frágil. >200 °C, Carbón en ausencia de oxígeno. Combustión a temperatura de 275 °C.
Descomposición química	Químicos cáusticos	Por efecto de ácidos: color café, superficie fragilizada. Por efecto de bases color blanco y superficie desfibrada.
Daño mecánico	Fuerzas mecánicas, ruptura del tejido leñoso	Erosión de la superficie en zonas de fricción mecánica. Esfuerzos y deformaciones no admisibles.
Daño por insectos	Termitas	Cavidades con forma de panal y rellenas con desperdicio.
	Carcoma	Túneles, cavidades y galerías.
	hormigas	Cavidades con forma de panal y canales limpios.
Deterioro por hongos	Moho, hongos	Pudrición blanca: bolsas fibrosas blancas o de textura rugosa. Pudrición café: bolsas fibrosas con figura cúbica-cuadrada. Pudrición suave: superficie fragilizada y delaminada en pequeños fragmentos.
Manchado	Moho, hongos	Albura descolorida color gris, negra, café azulada e intensificada en el parénquima de rayo.
Daño en la pared celular	Bacterias	Superficie suavizada, células de rayo destruidas y túneles microscópicos en la pared celular.

Para detectar y valorar los diferentes tipos de daño que presenta un elemento estructural de madera, es necesario utilizar diversos tipos de técnicas de acuerdo al estado de deterioro del material. La Tabla 2, adaptada de Zabel y Morrell (1992), citados por Sotomayor-Castellanos y Cruz-de León (2008), resume las técnicas de inspección para detectar diferentes estados de deterioro de la madera.

La evaluación de las propiedades mecánicas de elementos estructurales de madera que se encuentran funcionando en edificaciones antiguas aún es realizada aplicando las reglas para la clasificación visual recomendadas por la normalización vigente, como la norma EN 318 (ECS, 1997). Este enfoque clasifica la calidad de la madera en relación a la influencia que pueden tener los defectos tecnológicos del material en su capacidad portante. De esta forma, el tamaño y la posición relativa de nudos, desviación del hilo, así como la densidad y la velocidad de crecimiento, son indicadores para asignar una categoría a todos los miembros de un sistema estructural, con base en el miembro en el que se detectó la más baja calidad (Dietsch y Köhler, 2010).

TABLA 2

Técnicas de inspección para detectar el estado de deterioro de la madera (Adaptado de Zabel y Morrell, 1992).

Estado de deterioro de la madera			
Incipiente	Temprano	Intermedio	Avanzado
← Pruebas mecánicas escala pequeña →			
	← Técnicas acústicas y de vibraciones →		
		Pruebas mecánicas escala real →	
		Tomografía asistida por computadora →	
		Rayos X →	
← Higrometría →			
← Pruebas químicas →			
← Cultivo de tejidos →			
← Técnicas de microscopía →			
		← Técnicas de taladrado →	
			← Martillado →

Ocasionalmente, este proceso de clasificación visual se complementa con el empleo de técnicas con carácter no destructivo, tales como el ultrasonido, las vibraciones y las ondas de esfuerzo (Sotomayor-Castellanos, 2012).

La tipología de los sistemas de madera integrados en edificaciones históricas es compleja. No es sencillo determinar las propiedades del material con métodos estandarizados, por lo que se hace necesario emplear técnicas numéricas para su análisis. Derivado de esta situación, el análisis estructural de edificaciones antiguas de madera emplea el método del elemento finito en el modelado del comportamiento estructural (Cointe y col., 2007).

Este enfoque numérico tiene una actualidad y futuro incuestionables. Sin embargo, los programas informáticos especializados requieren datos experimentales de las características físicas y mecánicas de la madera para poder prever la respuesta del sistema en estudio en diferentes situaciones reales o hipotéticas.

Información sobre las características y el comportamiento físico-mecánico de la madera puede ser consultada en Tsoumis (1991), Haygreen y Bowyer (1996) y Smith y col. (2003). Esta información proviene de experimentos normalizados que estipulan dimensiones y cualidades de las probetas. Sin embargo, cuando se trata de emplear estos datos técnicos en el modelado y/o en el análisis estructural, resulta que esta información está dispersa y algunas veces es difícil de interpretar. Para el caso de elementos estructurales de madera antigua, es aún más notoria la ausencia de datos accesibles. Esta paradoja sugiere

la necesidad de suministrar al Ingeniero especialista en restauración, información confiable de las características mecánicas de madera que forma parte de edificaciones con mérito histórico.

Dado que la autenticidad de los edificios históricos debe ser respetada, solo en ocasiones excepcionales es posible tener acceso a elementos estructurales de madera antigua y tener la oportunidad de realizar pruebas mecánicas en condiciones de laboratorio. En la presente investigación, se estudia madera que formó parte del techo de la estación ferroviaria *Masaryk* (*Praha Masarykovo nádraží*, en Checo), de la ciudad de Praga, República Checa. En 2010, el maderamen fue renovado y sus elementos constitutivos fueron removidos de su función original. De esta estructura, con una antigüedad estimada de 100 años, se rescataron para su caracterización mecánica, cinco vigas de madera de *Picea abies*.

La especie *P. abies*, (L.) Karst (spruce wood en inglés, picea en español) es una de las más empleadas en estructuras de madera en Europa (Drdácký y col., 2006). Por su parte, la madera del género *Picea* y sus propiedades físico-mecánicas, son adoptadas como referencias en Ciencias, Tecnología e Ingeniería de la madera (Kollmann y Côté, 1968).

Las ondas de esfuerzo han sido empleadas para estudiar el deterioro de elementos de madera en edificaciones antiguas entre otros autores, por Martínez y col. (2010). La detección de nudos en la madera con dimensiones de empleo ha sido estudiada por Grabianowski y col. (2006). Por su parte, Yamasaki y Sasaki (2010) y Yamasaki y col. (2010) proponen un método numérico para evaluar el módulo de elasticidad de elementos estructurales de madera basado en simulación *Monte Carlo*. Este enfoque es usado para aproximarse a las complejas y costosas formas de evaluar con exactitud.

La característica mecánica de módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo, muestra correlaciones significativas con el módulo de elasticidad estimado en condiciones estáticas. Sin embargo, los valores estimados dinámicamente, son mayores a los calculados con velocidades lentas de deformación (Liang y Fu, 2007).

Respecto a la tecnología desarrollada por *Fakopp*®, ésta ha sido utilizada para medir la velocidad de onda en la madera en especímenes de grandes dimensiones, y que al ser ponderada con la densidad de la madera, permite calcular el módulo de elasticidad (Baar y col., 2011; Yamasaki y Sasaki, 2010; Yamasaki y col., 2010 y Grabianowski y col., 2006).

Los autores revisados trabajan con elementos estructurales o probetas de madera que satisfacen las normas para realizar pruebas en laboratorio, empleadas para la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de elementos estructurales de madera. Por ejemplo, la norma ISO 13822 (ISO, 2003), y las normas europeas EN 408 (ECS, 2003) y EN 384 (ECS, 2004). Estas normas regulan la configuración de las pruebas, pero sobre todo, las dimensiones y las características de las probetas. Esta normalización es específica para ensayos en condiciones estáticas. No existen normas para realizar ensayos dinámicos y de carácter no destructivo en vigas de madera. El método de evaluación aplicado en la práctica, es seguir los criterios para la clasificación visual para madera de uso estructural recomendados por la norma EN 318 (ECS, 1997).

En el caso de estudio que aquí se presenta, se propone un protocolo experimental específico para las condiciones particulares de las vigas empleando pruebas no destructivas, como son las ondas de esfuerzo.

Objetivos

Diagnosticar el estado tecnológico de la madera que constituye la muestra de cinco vigas de *Picea abies*, con una antigüedad estimada de 100 años en servicio.

Evaluar el módulo de elasticidad con ondas de esfuerzo en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera.

Materiales y métodos

El material experimental consistió en cinco vigas de madera de *P. abies*, con dimensiones de 96 mm de grueso, correspondiente a la dirección tangencial (T) del plano leñoso, 230 mm de ancho, que es la dirección radial (R) y 3500 mm de largo referente a la dirección longitudinal (L) de la madera (Figura 2). Una vez desmontadas de la estructura original, las

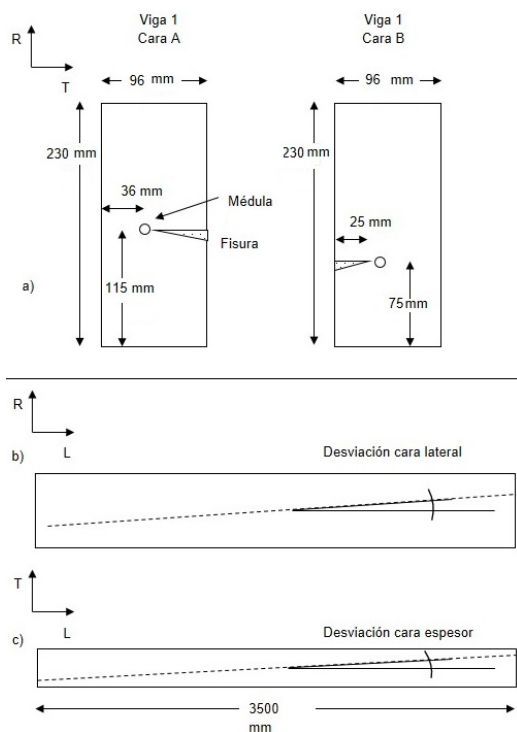


Figura 2. Excentricidad de la médula y dirección de la fibra de la viga 1. R: dirección radial; T: dirección tangencial; L: dirección longitudinal.

vigas se limpiaron y se conservaron durante un año en un almacén con una temperatura promedio de 20 °C y una humedad relativa del 65 %.

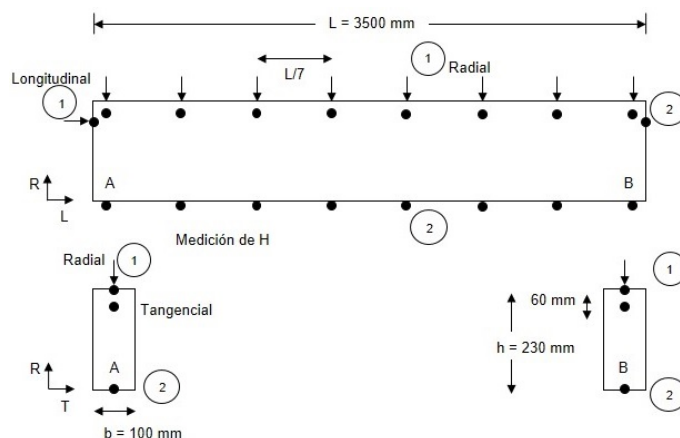
Por comparación de características macroscópicas con otras vigas de madera presentes en construcciones históricas en República Checa, la especie fue identificada por un experto regional en edificaciones antiguas de madera (P. Kuklik, 2011, Universidad Técnica Checa en Praga, República Checa; comunicación personal). Para soportar esta propuesta, Drdácý y col. (2006) opinan que la madera de *P. abies* es la especie más usada en edificaciones antiguas correspondientes al periodo constructivo y a la localización geográfica de este caso de estudio.

De acuerdo con autores especialistas en la evaluación de estructuras antiguas de madera, entre otros: Bonamini y col. (2001); Bonamini y Noferi (2004) y Kasal y Anthony (2004), en casos de estudio como el que aquí se trata, es complejo aplicar un sistema de clasificación estandarizado, de tal forma que la inspección realizada por un experto, llega a reemplazar el enfoque de clasificado visual apegado a normas. De aquí, que se practicó una inspección detallada de cada una de las vigas.

Para evaluar el estado tecnológico de la madera, se inspeccionó en las vigas la velocidad de crecimiento, expresada como el número de anillos por unidad de longitud en la dirección radial a partir de la médula, la orientación de las vigas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso, la desviación de la fibra, así como la presencia de nudos y rajaduras. La Figura 2 presenta como ejemplo, las direcciones y distancias que se midieron para calcular la posición de la médula en la sección transversal de la viga 1, así como su pendiente de la dirección de la fibra en las caras (Plano formado por las direcciones radial y tangencial) y en los cantos (Plano formado por las direcciones radial y longitudinal).

Las pruebas de ondas de esfuerzo siguieron el protocolo propuesto por Sotomayor-Castellanos (2012). Los experimentos consistieron en medir el tiempo de transmisión de la onda de acuerdo a la configuración de cada tipo de ensayo: vibraciones longitudinales en

Figura 3. Pruebas de ondas de esfuerzo. 1) Posición del emisor, 2) Posición del receptor.



la dirección longitudinal (L) de las vigas, y vibraciones transversales en las direcciones radial (R) y tangencial (T) del plano leñoso. Los tiempos de transmisión de onda correspondientes a las diferentes direcciones R, T y L, se midieron en intervalos de $L/7$, en ocho puntos distribuidos a lo largo de la viga (Figura 3). Para análisis posteriores, se estimó el valor promedio de estas mediciones.

Se calculó la densidad de la madera (ρ_H) con la relación peso/volumen y se midió su contenido de humedad (H) con un higrómetro eléctrico *sy/vatest®* en ocho posiciones cercanas a los puntos de medición del tiempo de transmisión en la dirección radial (Figura 3).

El módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo se calculó con la fórmula:

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_H \quad (1)$$

Donde:

E_{oe} = Módulo de elasticidad (Pa)

v_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)

ρ_H = Densidad de la madera con un contenido de humedad H (kg/m^3)

Resultados y discusión

Diagnóstico tecnológico

El aserrado de las piezas es central radial en el plano transversal del tronco. Esto implica la presencia de la médula y de madera juvenil, en algunos casos hasta de 150 mm a partir de la médula (Tabla 3). Las vigas estuvieron aserradas cerca, pero no necesariamente en el centro geométrico de las trozas de los árboles de donde se obtuvieron. Las vigas no estaban aserradas de tal forma que sus aristas correspondieran a las direcciones de anisotropía de la madera, es decir, las vigas no estaban perfectamente alineadas a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. En consecuencia, la dirección del hilo en las vigas 4 y 5, presentaba una pendiente en el plano TL, notable en el caso de las vigas 2 y 3, y muy fuerte en la viga 1 (Tabla 3).

La madera no presentó deterioro biológico ocasionado por insectos u hongos. Sin embargo, se observaron rasgos de intemperismo, tales como manchado, desfibrado superficial y pequeñas fisuras en los extremos de las vigas. Se presume que este estado fue resultado de un descuido constructivo y de mantenimiento del techo del cual las vigas formaron parte, de tal forma que estuvieron desprotegidas en las conexiones (juntas) entre estructura y cubierta del techo. El monto estimado de pérdida de masa por el intemperismo fue mínimo y se evaluó en menos de 1 %, por lo que se supone que este estado de la superficie de la madera no influyó en la evaluación mecánica del material.

TABLA 3 Posición relativa de la médula y pendientes.							
Viga	Cara	Dirección R (Normal al canto)		Plano RL Distancia (%)	Dirección T (Normal a la cara)		Plano TL (%)
		Distancia (mm)	Pendiente (mm)		Pendiente (mm)	(mm)	
1	A	130	-	2.72	0	-	31.00
	B	-	115		-	41	
2	A	130	-	3.64	30	-	15.64
	B	-	110		-	23	
3	A	115	-	7.24	25	-	12.73
	B	-	75		-	36	
4	A	180	-	12.73	58		0.73
	B	-	110		-	36	
5	A	135	-	3.64	35	-	3.64
	B	-	105		-	36	
Media	-	-	5.99	-	-	12.75	
Mínimo	-	-	2.72	-	-	0.73	
Máximo	-	-	12.73	-	-	15.64	

Las vigas presentaron indicios de trabajos anteriores de restauración. Las caras de las vigas que se mostraban hacia el interior de la estructura (el edificio) mostraron al menos dos capas de pintura. Se presume que estas capas sirvieron como agente protector de las vigas. Para la evaluación mecánica, la pintura fue removida de las vigas.

La Figura 2 esquematiza la excentricidad de la médula y desviación de la dirección de la fibra de la viga 1, y la Tabla 3 especifica la posición relativa de la médula y las pendientes de la dirección del hilo para las cinco vigas. De acuerdo con Dinwoodie (1981), las características mecánicas de la madera juvenil son diferentes en comparación con la madera adulta. Esta proposición, implica que la sección cercana a la médula reaccionó de manera diferente según la dirección de las ondas de esfuerzo en las vigas. De tal forma, que esta heterogeneidad del medio fue factor de variación en los resultados.

TABLA 4
Anillos de crecimiento, nudos y rajaduras.

Viga	Cara	Anillos de crecimiento					
		Distancia desde la médula 0-50 mm		Distancia desde la médula 50-100 mm		Distancia desde la médula 100-150	
		Número	Grueso (mm)	Número	Grueso (mm)	Número	Grueso (mm)
1	A	30	1.67	30	1.67	30	1.67
	B	30	1.67	30	1.67	30	1.67
2	A	10	5.00	22	2.27	30	1.67
	B	8	6.25	30	1.67	35	0.70
3	A	10	5.00	16	3.13	30	1.67
	B	13	3.85	32	1.56	32	1.56
4	A	12	4.17	16	3.13	30	1.67
	B	16	3.13	16	3.13	30	1.67
5	A	18	2.78	24	2.08	32	1.56
	B	22	2.27	40	1.25	30	1.67
Promedio	16.9	3.58	25.6	2.16	30.9	1.55	
Viga	Cara	Nudos			Rajaduras		
		Nudos Plano RL	Diámetro mínimo (mm)	Diámetro máximo (mm)	Profundidad R (mm)	Ancho T (mm)	Largo L (mm)
1	A	9	10	30-40	10 - 45	0 - 10	60 - 300
2	A	10	10	30-40	30 - 60	0 - 10	60 - 300
3	A	9	10	30-40	25 - 36	0 - 10	60 - 300
4	A	10	10	30-40	10 - 58	0 - 13	60 - 300
5	A	9	10	30-40	25 - 35	6 - 10	60 - 300
Promedio	9.4	10	30-40	20-40	0-10	60-300	

Las velocidades de crecimiento de la madera no eran regulares, lo que ocasionó que el ancho de sus anillos de crecimiento fueran variables en cada viga y entre ellas. De acuerdo con Kollmann y Côté (1968), el ancho de los anillos de crecimiento es una de las características anatómicas que influyen de manera importante en las propiedades mecánicas de la

madera. A medida que el ancho de los anillos aumenta, las características mecánicas disminuyen. En el caso que nos ocupa, dado la variación en los tejidos de crecimiento y en una escala de observación local, las propiedades mecánicas varían. Desde una perspectiva a escala global, el módulo de elasticidad disminuirá en relación a la cantidad relativa de tejidos no homogéneos.

En el mismo contexto, las vigas contenían nudos distribuidos a lo largo de su geometría y fisuras en las caras correspondientes a los planos RL (Tabla 4). Su proyección en el plano transversal formado por las direcciones radial-tangencial fue poco profunda, alrededor de 20 mm, pero sus diámetros fueron entre 30 y 40 mm, de tal forma que el factor de área de nudos (knot area ratio, KAR en inglés) llegó a representar 15 %.

El tamaño y posición de los nudos modifican las propiedades mecánicas de miembros estructurales de madera (Haygreen y Bowyer, 1996). Ambos son dos de los criterios más importantes para su clasificación según el Eurocódigo del Comité Europeo para normalización (ECS, 2004).

Actualmente, no existe una norma de evaluación que se pueda aplicar a elementos estructurales de madera de edificaciones históricas y con valor cultural, como es el caso de las normas europeas EN 318 (ECS, 1997) e ISO 13822 (ISO, 2003). Estos cánones tienen aplicación generalizada en evaluación de edificaciones existentes construidas principalmente en piedra y mampostería. En este caso de estudio, fue difícil asignar una clase estructural a las vigas, sustentada en el tamaño, posición y factor de área de nudos (Tabla 4).

Respecto a la presencia de fisuras, su profundidad fue de entre 20 y 40 mm en la dirección radial y con aberturas en la superficie de las caras laterales de las vigas de 10 a 15 mm (Tabla 4). El largo de las fisuras fue de 300 a 600 mm, alineadas en la dirección longitudinal. Las fisuras comenzaban en la médula y se extendían hasta una orilla de una cara lateral. El número promedio en cada viga fue de 12, formando una fisura continua lo largo de las vigas. Esta peculiaridad en las vigas, considerada como un defecto, puede ser resultado de las propiedades de anisotropía en la higrócontracción de la madera, las cuales son más pronunciadas cerca del centro geométrico del tronco. Este proceso pudo haber ocurrido durante los primeros ciclos de humidificación y desecado una vez que las vigas fueron instaladas en el techo del edificio de la estación ferroviaria.

Evaluación mecánica

La Tabla 5 presenta el contenido de humedad (H), la densidad (ρ_H), las velocidades de transmisión de la onda (v) y los módulos de elasticidad (E) en las direcciones longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) para cada una de las cinco vigas estudiadas. Los estadísticos que se presentan son la media ($\bar{X}$), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV) correspondientes.

TABLA 5
Densidad y características mecánicas.

Viga	H (%)	ρH (kg/m ³)	$V_{oe} L$ (m/s)	$V_{oe} R$ (m/s)	$V_{oe} T$ (m/s)	$E_{oe} L$ (MPa)	$E_{oe} R$ (MPa)	$E_{oe} T$ (MPa)
1	13.1	448	6,056	1,656	1,863	16,430	1,229	1,555
2	11.0	414	5,631	1,866	2,001	13,127	1,442	1,658
3	11.8	449	5,741	1,897	1,884	14,799	1,616	1,594
4	11.4	366	5,395	1,301	1,538	10,653	619	866
5	12.2	433	6,124	1,047	1,798	16,239	475	1,400
$\bar{X}$	11.9	422	5,790	1,554	1,817	14,250	1,076	1,414
σ	0.79	34	302	369	172	2,409	505	321
CV	0.07	0.08	0.05	0.24	0.09	0.17	0.47	0.23

Velocidad de las ondas de esfuerzo

Los valores promedio de las velocidades de las ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal, presentados en la Tabla 5, son similares a los resultados de Baar y col. (2012), quienes empleando un equipo *Fakopp®*, calcularon para un grupo de cinco maderas angiospermas, con densidades variando de 765 a 856 kg/m³ y un contenido de humedad de 8 %, la velocidad de onda en el rango que va de 4,473 a 5,296 m/s. Es importante hacer notar que las diferencias entre resultados pueden ser debidas a las desigualdades en las densidades y en los contenidos de humedad de la madera, así como por las desigualdades entre los especímenes estudiados en las características estructurales como velocidad de crecimiento y presencia de nudos y fisuras.

Por su parte, Martínez y col. (2010) e Iñiguez y col. (2010) calcularon velocidades de ondas de esfuerzo en las direcciones transversales en madera de *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* con densidades promedio de 592 kg/m³ y con un contenido de humedad de 11 %. La magnitud de sus velocidades, con un valor promedio de 1,375 m/s, es comparable con los resultados de la presente investigación que corresponden a las de las direcciones radial y tangencial presentadas en la Tabla 5.

El coeficiente de variación para la dirección radial es mayor que los correspondientes a las direcciones longitudinal y tangencial. De acuerdo a la configuración de las pruebas radiales (Figuras 2 y 3), las ondas en la dirección radial atravesaron la médula y tejido de madera juvenil, lo cual alteró su tiempo de transmisión y en consecuencia su velocidad. La diferencia anatómica y de la densidad entre los tejidos de crecimiento de madera juvenil y los de madera normal, atenuaron de manera diferente la velocidad de transmisión de la onda.

La onda de esfuerzo es sensible a la posición en la viga donde fue medida. De acuerdo con Livingstone (2001), los cambios en la velocidad de onda difieren si la madera presenta nudos, fisuras o deterioro por intemperismo, y pueden ser ocasionados por la existencia de micro fisuras en el material. Comparando los resultados particulares a cada viga, éstos varían y gravitan alrededor de un rango de variación, con excepción de la viga 4 que denota valores comparativamente bajos.

TABLA 6 Comparación de resultados entre los métodos de ondas de esfuerzo y de ultrasonido.							
Método	Referencia	VL (m/s)	VR (m/s)	VT (m/s)	EL (MPa)	ER (MPa)	ET (MPa)
oe	*	5,790	1,554	1,817	14,250	1,076	1,414
us	**	5,713	1,769	1,588	13,863	1,353	1,069
oe/us	-	1.01	0.88	1.14	1.03	0.80	1.32
* Esta investigación; ** Sotomayor-Castellanos (2012).							

Módulo de elasticidad

La Tabla 6 presenta la comparación de los resultados de esta investigación, indicados en la Tabla 5 y los resultados obtenidos en la misma muestra de vigas pero empleando una técnica de ultrasonido (us) (Sotomayor-Castellanos, 2012). Bien que las magnitudes son comparables, lo que sugiere cierta asertividad de la técnica aquí utilizada, se advierte que el método de ondas de esfuerzo genera valores mayores de velocidad de onda y del módulo de elasticidad para las direcciones longitudinal y tangencial. Sin embargo, cuando se hacen mediciones con ondas de esfuerzo que atraviesan la médula y la madera juvenil, como es el caso para la dirección radial, los valores son menores.

En Ingeniería de la madera, los especímenes normalizados para pruebas mecánicas son considerados como un material sólido, con propiedades elásticas, con una estructura homogénea a una escala de observación macroscópica, con geometría regular y con la densidad y contenido de humedad distribuidos uniformemente en todo el volumen del ejemplar en cuestión.

En el caso que aquí se diagnostica, se trata de elementos estructurales con dimensiones reales de uso, las cuales son grandes en comparación con las de las probetas de madera empleadas en pruebas normalizadas de laboratorio. En consecuencia, las vigas no pueden satisfacer estas suposiciones. Con el objeto de simplificar el análisis, es necesario aceptar abstracciones sobre las propiedades de ortotropía de la madera, de las discontinuidades y alteraciones del material y sobre otras consideraciones de carácter reológico, por ejemplo, los efectos mecano-sorcivo y viscoso.

El módulo de elasticidad fue calculado a partir de mediciones locales en toda la geometría de la viga. Sin embargo, el promedio de estas mediciones puede considerarse como la respuesta global de las vigas y como una propiedad individual de cada una de ellas.

Conclusiones

El protocolo experimental utilizado facilitó la realización del diagnóstico tecnológico y la evaluación mecánica de vigas de madera antigua de *P. abies*, con una antigüedad estimada de 100 años en servicio.

La técnica de ondas de esfuerzo permitió evaluar el módulo de elasticidad en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera. La madera antigua presentó irregularidades en su estructura, sin embargo, esta condición no disminuyó de manera importante sus características mecánicas.

Agradecimientos

Este trabajo fue elaborado durante la preparación de la Maestría Avanzada en Análisis Estructural de Monumentos y Construcciones Históricas (*Erasmus Mundus Program*), gracias a un permiso para actualización profesional otorgado al autor por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. La investigación fue asesorada por el Doctor Petr Kuklik, Profesor de la Universidad Técnica Checa, en Praga, Republica Checa.

Referencias

- Anthony, R.W.; Dugan, K.D.; Anthony, D.J. 2009. A Grading Protocol for Structural Lumber and Timber in Historic Structures. *APT Bulletin: Journal of Preservation Technology*. 40(2): 3-9.
- Ávila Calderón, L.E.A.; Herrera Ferreyra, M.A.; Raya González, D. 2012. Preservación de la madera en México. UMSNH. Ediciones Michoacanas. México. 142 p.
- Baar, J.; Tippner, J.; Gryc, V. 2012. The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *European Journal of Wood Products*. 70(5): 767-769.
- Bonamini, G.; Noferi, M.; Togni, M. 2001. On-site grading of old timbers members. In: Bertolini Cestari, C. (Editor). 2001. *Wooden Handwork/Wooden Carpentry: European Restoration Sites*. Proceedings of Culture 2000 Project: Italian Action. Elsevier. France.
- Bonamini, G.; Noferi, M. 2004. On-site inspections of timbers members for the assessment of their condition and performance. In: Bertolini, C.; Marzi, T.; Seip, E.; Touliatos, P. (Editors). 2004. *Interaction between Science, Technology and Architecture in Timber Construction*. Proceedings of Culture 2000 Project: Greek, Norwegian and Italian Actions. Elsevier. France.

- Cointe, A.; Castéra, P.; Morlier, P.; Galimard, P. 2007. Diagnosis and monitoring of timber buildings of cultural heritage. *Structural Safety*. 29: 337-348.
- Cruz de León, J. 2010. Manual para la protección contra el deterioro de la madera. Comisión Nacional Forestal. México. 90 p.
- Cruz de León, J. 2011. Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera. Comisión Nacional Forestal. México. 46 p.
- Dietsch, P.; Köhler, J. 2010. Assessment of Timber Structures. COST Action E55. Modelling of the Performance of Timber Structures. European Science Foundation. Shaker Verlag. Deutschland. 128 p.
- Dinwoodie, J.M. 1981. Timber, Its Nature and Behaviour. Van Nostrand-Reinhold. USA. 272 p.
- Drdácký, M.F., M. Kloiber and M. Kotlíňová. 2006. Low invasive diagnostics of historic timber. In: In-Situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures. NSF/MŠMT supported US-Czech project and RILEM Workshop. Prague. Czech Republic.
- ECS. 1997. European Standard EN 318. Structural timber. Grading. Requirements for visual strength grading standards. Brussels.
- ECS. 2003. European Standard EN 408. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization. Brussels.
- ECS. 2004. European Standard EN 384. Structural timber—Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization. Brussels.
- ECS. 2004. Eurocode 5. EN 1995-1-1: Design of timber structures. Part 1-1: general-common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels.
- Grabianowski, M.; Manley, B.; Walker, J.C.F. 2006. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Science and Technology*. 40: 205-216.
- Haygreen, J.G.; Bowyer, J.L. 1996. Forest Products and Wood Science. An Introduction. Iowa State University Press. USA.
- ISO. 2003. International Standard ISO 13822: Bases for design of structures - Assessment of existing structures. International Organization for Standardization. Switzerland.
- Iñiguez, G.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Bobadilla, I.; González, C.; Martínez, R. 2010. In situ non-destructive density estimation for the assessment of existing timber structures. In: Proceedings of the 2010 World Conference in Wood Engineering. Italy. Archivo PDF: . 8 p.
- Kasal, B.; Anthony, R.W. 2004. Advances in *in situ* evaluation of timber structures. *Progress in Structural Engineering Materials*. 6: 94-103.

- Kollmann, F.F.P.; Côté, W.A. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag. Germany.
- Liang, S-q.; Fu, F. 2007. Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber. *Journal of Forestry Research*. 18(4): 309-312.
- Livingston, R.A. 2001. Nondestructive Testing of Historic Structures. *Archives and Museum Informatics*. 13: 249-271.
- Martinez, R.; Bobadilla, I.; Iñiguez, G.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Hermoso, E. 2010. Assessment of decay in existing timber members by means of wave velocity perpendicular to the grain. In: Proceedings of the 2010 World Conference in Wood Engineering. Italy. Archivo PDF: . 5 p.
- Smith, I.; Landis, E.; Gong, M. 2003. Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley & Sons. England.
- Sotomayor Castellanos, J. R. 2008. Deterioro y calidad de la madera antigua. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 4(1): 27-32.
- Sotomayor Castellanos, J. R.; Cruz de León, J. 2008. Ancient wood structures evaluation methodology. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 4(2): 16-31.
- Sotomayor Castellanos, J.R. 2012. Mechanical characteristics of historical beams of *Picea abies* wood. Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions. Thesis. Czech Technical University in Prague, Czech Republic and University of Minho, Portugal.
- Tsoumis, G. 1991. Science and Technology of Wood. Structure, properties, utilization. Van Nostrand Reinhold. USA.
- Yamasaki, M.; Sasaki, Y.; Iijima, Y. 2010. Determining Young's modulus of timber on the basis of a strength database and stress wave propagation velocity II: effect of the reference distribution database on the determination. *Journal of Wood Science*. 56: 380-386.
- Yamasaki, M.; Sasaki, Y. 2010. Determining Young's modulus of timber on the basis of a strength database and stress wave propagation velocity I: an estimation method for Young's modulus employing Monte Carlo simulation. *Journal of Wood Science*. 56: 269-275.
- Zabel, R. A.; Morrell, J. 1992. Wood Microbiology, Decay and Its Prevention. Academic Press. USA.