

CMMoST 2021

6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON

Mechanical Models in Structural Engineering

01 – 03 December 2021

Escuela de Ingenierías Industriales
Universidad de Valladolid

Full Papers



UNIVERSIDAD DE GRANADA



UNIVERSIDAD DE SEVILLA



Universidad de Valladolid

Editors

Antolín Lorenzana Ibán

Luisa María Gil Martín

Enrique Hernández Montes

Margarita Cámara Pérez

Víctor Compán Cardiel

Andrés Sáez Pérez

Coordination and design

Álvaro Magdaleno González

Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid

Paseo del Cauce 59, 47009 Valladolid (Spain)

cmmost21@uva.es

ISBN: 978-84-09-39323-7



CMMOST 2021. Full Papers is licensed under CC BY-NC-ND 4.0

© 2022 Universidad de Valladolid

Without written permission of the editors and the authors it is forbidden to reproduce or adapt in any form or by any means any part of this publication. Requests for obtaining the right to reproduce or utilize parts of this publication should be addressed to the editors.



UNIVERSIDAD DE GRANADA



UNIVERSIDAD DE SEVILLA



Universidad de Valladolid

CONTENTS

Sponsors	iv
Contents	v
Organization	viii
Preface	x
Plenary speakers	xi
Full papers	1
Scalable and low-cost MEMS-based Structural Health Monitoring system. A. Izquierdo, J.J. Villacorta, L. del Val and A. Magdaleno	2
Evaluation of vibration transmission of L-shaped plates using finite element analysis. J. Magdaleno, E. Segovia, J. Carbajo, J. Ramis and M.A. Martín	17
Damage detection in slender structures based on a hybrid system of supervised learning algorithms and model updating to analyze raw dynamic data. C. Peláez, A. Magdaleno and A. Lorenzana	34
Estimation of short-term deflection in RC beams using effective moments of inertia. L.M. Gil-Martín, M.A. Fernández-Ruiz and J.F. Carbonell-Márquez	53
Avoiding failure propagation in steel truss bridges: a case study. M. Buitrago, E. Bertolesi, G. Caredda, M. Orrù, M.C. Porcu and J.M. Adam	67
The Octahedron family as a source of tensegrity structures: study of the equilibrium configurations considering different force:length ratios. M.A. Fernández-Ruiz, E. Hernández-Montes and L.M. Gil-Martín	79
Mechanical behaviour of demountable and reusable joints with welded studs. I. García-García, C. López-Colina, M.Á. Serrano-López and Y. C.-Wang	91
Progressive collapse assessment of precast reinforced concrete structures using the Applied Element Method (AEM). N. Makoond, M. Buitrago and J.M. Adam	100
Analysis of spherical shell structures using three-dimensional finite elements formulated in general curvilinear coordinates. J.M. Martínez-Valle	118
Modelling variable pedestrian dynamic loading factors induced on rigid surfaces. M. García-Diéguez, J.L. Zapico-Valle	129

Ultra-high performance concrete (UHPC) with substitution of cementitious matrix by waste. M.D. Rubio-Cintas, M.E. Parrón-Rubio, F. Pérez-García, J.M. García-Manrique and A. González-Herrera	140
Cost-efficient modeling for estimating the elastic properties of fiber-reinforced composites. J.C. García-Merino, C. Calvo-Jurado, L. Rodríguez-de-Tembleque, A. Sáez-Pérez and E. García-Macías	148
Dynamic response of a footbridge when used for a group of synchronized walkers. M. Cacho-Pérez, A. Iglesias-Pordomingo, A. Magdaleno and A. Lorenzana	161
Composite bridge deck optimization with trajectory-based algorithms. D. Martínez-Muñoz, A.J. Sánchez-Garrido, J.V. Martí and V. Yepes	174
Neutrosophic logic applied to the multi-criteria evaluation of sustainable alternatives for earth-retaining walls. A.J. Sánchez-Garrido, D. Martínez-Muñoz, I.J. Navarro and V. Yepes	188
Numerical simulation of high-efficiency one pass welding process in thick steel plates considering hardening effects. M. Vukovojac, B. Jalušić, M. Perić, I. Skozrit and Z. Tonković	204
Application of NSGA-II to design multiple mitigation devices in slender structures. E. Pérez-Vázquez, M. Posada-Calvo, A. Magdaleno and A. Lorenzana	214
Metamodeling of the additional plate in bending in beam-to-beam steel connections. M. López, A. Loureiro, R.M. Gutiérrez and J.M. Reinosa	229
Numerical model for the parametric analysis of the impact ball-paddle racquet. G. Castillo-López, F. García-Sánchez and J.M. conde-Calabrús	236
Estimation and validation of modal masses in constant mass-density systems. N. García-Fernández, R. Stufano, M. Aenlle and P. Fernández	246
Study of the reinforcement in a footbridge with vibration problems. N. García-Fernández, P. Fernández, M. Aenlle, M. Muñiz-Calvente and A. Álvarez-Vázquez	259
Detección de daño estructural en estructuras de madera laminada mediante la actualización de modelos de elementos finitos y análisis modal. R. Sánchez-Ruiz, R. Sancibrian, I. Lombillo, J. Peña-Laso and A. Gaute	272
Economic analysis about the influence of the direct connection micropile-foundation on the underpinning project costs. F. Pellicer-Martínez, V.S. Martínez-Lirón, A.M. Hernández-Díaz, J.A. López-Juárez and J. Pérez-Aracil	282
On modal analysis of phase-field fracture models. K. Jukić, T. Jarak, Z. Tonković and A. Lorenzana	301

On the natural boundary conditions in the mixed collocation methods for elasticity problems. B. Jalušić and T. Jarak	321
Modelling crowd-structure interaction on an ultra-lightweight FRP footbridge. C. Gallegos-Calderón, J. Naranjo-Pérez, M.D.G. Pulido, J.M. Goicolea and I.M. Díaz	335
Sensor placement optimization using convex L_0 norm relaxations. M. Jokić and J. Rožić	345
Design and performance of a hysteretic dissipator. M. Diaferio, D. Foti, M. Lerna and M.F. Sabbà	357
Extending the fatigue life of slender steel footbridges with Tuned Mass Dampers. J.F. Jiménez-Alonso, J.M. Soria, I.M. Díaz and A. Sáez	366
Numerical analysis of aluminium lattice structure with K-joints. N. Nikolić and B. Šćepanović	374
M_{cr} -L curves for hot rolled I sections. P. Subotić and B. Šćepanović	391
A fast approach to study the dynamic response of railway bridges accounting for soil-structure interaction. P. Galvín, A. Romero, E. Moliner, D.P. Connolly and M.D. Martínez-Rodrigo	400
Parametric analysis of serviceability limit state verifications in reinforced concrete elements subjected to bending. M. Sáez Fernández, J. Pereiro-Barceló and F.B. Varona-Moya	409
Parametric structural analysis of reinforced lightweight concrete beams for buildings. I. Vives, A.J. Tenza and F.B. Varona-Moya	429
Mechanical behavior of TRM masonry panels previously damaged by high temperatures. B. Torres, F.B. Varona-Moya, F.J. Baeza, L. Estevan and S. Ivorra	449
Forensic analysis taken after the collapse of a historical bell. S. Ivorra, B. Torres, L. Estevan and D. Bru-Orts	462
Structural optimization of lively composite floors with integrated constrained layer damping. P. Vidal-Fernández, C.M.C. Renedo, I.M. Díaz and J.H. García-Palacios	474
Author index	488

ORGANIZATION

Organizers

Antolín Lorenzana Ibán	Universidad de Valladolid
Luisa María Gil Martín	Universidad de Granada
Enrique Hernández Montes	Universidad de Granada
Margarita Cámara Pérez	Universidad de Sevilla
Víctor Compán Cardiel	Universidad de Sevilla
Andrés Sáez Pérez	Universidad de Sevilla

Local committee

Álvaro Magdaleno González	Universidad de Valladolid
Jesús Fernández Vizán	Universidad de Valladolid
Mariano Cacho Pérez	Universidad de Valladolid
José María García Terán	Universidad de Valladolid
Elena Pérez Vázquez	Universidad de Valladolid

Conference Secretariat

Álvaro Magdaleno González	Universidad de Valladolid
Natividad Cabrerros Martínez	Universidad de Valladolid
Ismael Martín Villa	Universidad de Valladolid

Scientific committee

Manuel Aenlle López	Universidad de Oviedo, Spain
Francisco Javier Baeza de los Santos	Universidad de Alicante, Spain
Aitor Baldomir García	Universidade da Coruña, Spain
Manuel T. Braz Cesar	Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
Juan Francisco Carbonell Márquez	Universidad de Málaga, Spain
Federico Carlos Buroni Cuneo	Universidad de Sevilla, Spain
Germán Castillo López	Universidad de Málaga, Spain
Manuel Chiachío Ruano	Universidad de Granada, Spain
Juan Chiachío Ruano	Universidad de Granada, Spain
Manuel Alejandro Fernández Ruiz	Universidad de Cádiz, Spain
Dora Foti	Politecnico di Bari, Italy
Alberto Fraile de Lerma	Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Pietro Gambarova	Politecnico di Milano, Italy
Marta García Diéguez	Universidad de Oviedo, Spain
Enrique García Macías	Universidad de Granada, Spain
Jaime García Palacios	Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Felipe García Sánchez	Universidad de Málaga, Spain
José María Goicolea Ruigómez	Universidad Politécnica de Madrid, Spain
María Dolores Gómez Pulido	Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Salvador Ivorra Chorro	Universidad de Alicante, Spain
Lourdes Jalón Ramírez	Universidad de Granada, Spain
Tomislav Jarak	University of Zagreb, Croatia
Javier Fernando Jiménez Alonso	Universidad de Sevilla, Spain
María Jesús Lamela Rey	Universidad de Oviedo, Spain
Fouzia Larbi Chaht	Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Algeria
Stefano Miccoli	Politecnico di Milano, Italy
Olga Mijuskovic	University of Montenegro, Montenegro
Carlos Moutinho	Universidade do Porto, Portugal
Iván Muñoz Díaz	Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Pablo Pachón García	Universidad de Sevilla, Spain
Michele Palermo	Università di Bologna, Italy
Stavroula J. Pantazopoulou	York University, Canada
Emiliano Pereira González	Universidad de Alcalá, Spain
Jorge Pérez Aracil	Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Paul Reynolds	University of Exeter, United Kingdom
Luis Rodríguez de Tembleque	Universidad de Sevilla, Spain
Mario E. Rodríguez Rodríguez	Universidad Nacional Autónoma de México
Biljana Scepanovic	University of Montenegro, Montenegro
Stefano Silvestri	Università di Bologna, Italy
José Manuel Soria Herrera	Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Alberto Taliercio	Politecnico di Milano, Italy
Tomaso Trombetti	Università di Bologna, Italy
Dimitrios Vamvatsikos	National Technical University of Athens, Greece

Detección de daño estructural en estructuras de madera laminada mediante la actualización de modelos de elementos finitos y análisis modal

Sánchez-Ruiz, Rebeca¹; Sancibrian, Ramón²; Lombillo, Ignacio³; Peña-Laso, Juan⁴; Gaute, Alvaro⁵

ABSTRACT

El artículo propone un procedimiento basado en la actualización de elementos finitos para obtener las variaciones de rigidez en vigas de madera laminada debido a la presencia de defectos. El módulo de elasticidad dinámico se ha obtenido a partir del análisis modal experimental, comparándolo con resultados teóricos ofrecidos por el método de elementos finitos. Para ello se realiza un procedimiento de optimización formulando una función de error que compara modos y frecuencias naturales. En una primera fase se considera que la rigidez de la viga es constante y homogénea a lo largo de toda su longitud. Cuando esta hipótesis no resulta precisa y no permite reducir el error formulado, se realiza una segunda fase que considera la variabilidad de la rigidez empleando métodos de optimización basados en partículas de enjambre. Los resultados permiten reducir el error entre el modelo de elementos finitos y los resultados experimentales proporcionando la variación de la rigidez a lo largo de la viga.

Keywords: Laminated wood, Structural damage, Evolutionary optimization, Modal analysis.

1. INTRODUCCIÓN

La madera laminada, también conocida como Glulam, es un producto que cada vez se emplea más en construcción de estructuras de muy distinta índole (p.ej. instalaciones deportivas, aeropuertos, pasarelas, etc.). Los motivos de este creciente interés por este producto son varios, pero cabe destacar dos como los principales. En primer lugar, es un material ecológico y sostenible. El empleo de este material en construcción es una de las mejores formas de lograr un comportamiento respetuoso con el medio ambiente [1]. En segundo lugar está el aspecto estético, ya que estas estructuras generan

¹ Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Universidad de Cantabria (España). rebeca.sanchez@unican.es

² Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Universidad de Cantabria (España). sancibr@unican.es (Corresponding author)

³ Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Universidad de Cantabria (España). ignacio.lombillo@unican.es

⁴ Departamento de Puentes. WSP (España). jupena@louisberquer.com

⁵ Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Universidad de Cantabria (España). Alvaro.gaute@unican.es

ambientes confortables y que se amoldan mejor a los espacios naturales (ver Fig. 1). Además, hay que tener en cuenta que los avances en las tecnologías de fabricación permiten obtener productos fabricados en este material con alto rendimiento, generando geometrías curvas en vigas y columnas de gran tamaño.

Desde el punto de vista estructural, una de las principales ventajas de la madera laminada frente a la madera aserrada son sus buenas propiedades mecánicas, donde se destaca la rigidez obtenida a través de su módulo de elasticidad (MOE). Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de este material es el desconocimiento existente en su comportamiento estructural y en la degradación que puede experimentar con el paso del tiempo. Esta degradación se traduce como una pérdida de rigidez y por tanto una variación del MOE. La madera es un material natural, lo que significa que el control sobre sus defectos es muy limitado (p.ej. la presencia de nudos, fisuras, etc.), además es marcadamente anisótropo e higroscópico y, por ese motivo, no tiene unas propiedades mecánicas tan definidas como ocurre en otros materiales. Estas diferencias no se producen solo entre especies, sino que se pueden encontrar dentro de una misma especie. Además, la madera laminada se combina con adhesivo, lo que le convierte en un material compuesto, más difícil de modelizar aún si cabe. Los procesos de deterioro (bióticos y abióticos) que afectan a este material son muy diversos [2], [3]. Las piezas individuales de material Glulam están clasificadas en clases resistentes, lo que permite un control más estricto de las propiedades logrando de este modo configuraciones con características más predecibles y una menor variabilidad de sus propiedades. Para obtener grandes dimensiones de vigas o columnas de madera laminada éstas se conectan mediante uniones denominadas *fingers*, permitiendo una unión íntima entre las tablas que forman los componentes estructurales. La presencia de estas uniones añade una mayor fuente de incertidumbre en el material.

Por los motivos expuestos anteriormente se hace necesario el desarrollo de metodologías no destructivas que puedan ser aplicadas in-situ para la detección de daño estructural en este tipo de material [4]–[7]. Varias técnicas de ensayo no destructivo han sido empleadas en madera aserrada, sin embargo, las más utilizadas a día de hoy son de carácter cualitativo, no cuantitativo. Las técnicas cualitativas consisten fundamentalmente en la inspección visual de la madera [2], [8]. Las técnicas cuantitativas se basan en ultrasonidos, resistencia a la penetración y métodos dinámicos.



Figura 1. Pasarela peatonal construida en madera laminada en la localidad de Cieza (Cantabria).

En este trabajo se presenta un estudio sobre el comportamiento dinámico de este tipo de material. Se ha desarrollado una metodología basada en la actualización por elementos finitos [9], [10] para la detección de daño o la variabilidad en las propiedades mecánicas basado en el comportamiento dinámico de los elementos estructurales. Para ello, se comparan los resultados experimentales con los resultados teóricos y se ajustan los parámetros mecánicos mediante optimización. En el caso de elementos dañados o con fuerte variabilidad de sus propiedades se emplea optimización por enjambre de partículas, procedimiento que ha demostrado tener una buena precisión en otros campos [11]. El procedimiento utilizado se basa en la formulación de una función objetivo que compara los modos y las frecuencias naturales. Para ello, se han realizado numerosos ensayos experimentales en elementos de madera mediante ensayo estático y análisis modal experimental en tablas simples y elementos de madera laminada (Fig. 2). Estos resultados muestran la fuerte influencia de la variabilidad de las propiedades del material y el influjo de los defectos en los parámetros modales.

2. PROGRAMA DE EXPERIMENTOS

2.1. Descripción de las vigas estudiadas

El programa de experimentos se llevó a cabo en Laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander. Este estudio experimental tiene por objeto el valorar la capacidad de detectar anomalías estructurales en vigas de madera laminada. En concreto el análisis se ha centrado en la variación de MOE. El estudio se ha llevado a cabo sobre elementos estructurales sencillos con el objeto de poder realizar estudios más exhaustivos en el futuro empleando elementos estructurales más complejos. En este caso se han estudiado vigas de madera simple y vigas de madera laminada denominadas de tipo Duo, de las especies forestales pino silvestre y abeto. Las vigas simples son tablas de madera aserrada, que serán utilizadas posteriormente en la fabricación de vigas de madera laminada. El objeto de estudiar este tipo de elementos es poder valorar el comportamiento dinámico de la madera sin la presencia del adhesivo ni de la interacción con otros componentes. Las vigas de madera tipo Duo consisten en dos tablas de madera unidas mediante una capa adhesivo. En este caso se trata de la viga de madera laminada más simple con la que se puede trabajar. La utilización de esta tipología permite valorar el efecto del adhesivo y la interacción entre los componentes. La tabla 1 muestra el número de vigas ensayadas de cada especie incluyendo la presencia o no de uniones *finger*.

Tabla 1. Tipología y especie de las vigas ensayadas

Tipo	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Uniones	Pino silvestre	Abeto
Simple	1.56	0.16	0.05	Sin fingers	14	16
				Con fingers	--	---
Duo	1.55	0.17	0.07	Sin fingers	9	2
				Con fingers	3	3
Total					26	21

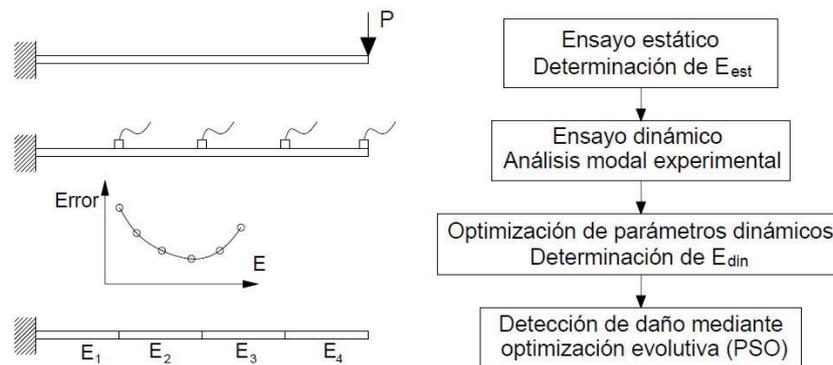


Figura 2. Procedimiento para la obtención de la distribución de rigidez en las vigas.

Las condiciones de contorno seleccionadas para los ensayos experimentales han sido de tipo viga empotrada-libre. La razón por la que se ha seleccionado la condición de empotramiento en un extremo de la viga es la de garantizar fielmente su reproducibilidad. En efecto, debido a la ligereza de los elementos ensayados, otras condiciones de contorno, como pueden ser biarticuladas, pueden generar problemas bajo ensayos dinámicos debido a la separación de apoyo durante la excitación.

2.2. Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo llevado a cabo en este trabajo se muestra en la Figura 2 y se divide en las 5 partes siguientes:

1. Obtención experimental del módulo de elasticidad estático. Con las condiciones de contorno establecidas anteriormente se someten las vigas a una carga puntual en su extremo libre, obteniendo la relación carga-deformación y consecuentemente el módulo de elasticidad estático (MOE_{est}) del material a flexión.
2. Ensayo modal teórico. Mediante elementos finitos se modeliza el sistema y se obtienen los cuatro primeros modos y frecuencias naturales que serán utilizados como referencia.
3. Ensayo modal experimental. Se obtienen los cuatro primeros modos y frecuencias naturales mediante ensayo modal excitando el sistema con un martillo de impacto y recogiendo la respuesta con 4 acelerómetros.
4. Obtención del módulo de elasticidad dinámico mediante optimización. Se establece una función de Error para la comparación de las frecuencias naturales y modos teóricos-experimentales. Mediante un algoritmo de optimización se busca el mínimo error, utilizando como variable de diseño el módulo de elasticidad dinámico (MOE_{din}). Para ello se considera la viga en estado sano y con un módulo de elasticidad homogéneo en todas sus dimensiones.
5. Detección de daño a través de la variación de la rigidez en la longitud de la viga. Cada viga ensayada se modeliza en elementos finitos dividiéndose en tramos. A cada tramo se le asigna una variable que representa el módulo de elasticidad dinámico. Mediante optimización, empleando un algoritmo evolutivo basado en partículas de enjambre (PSO), se reduce el error entre el modelo experimental y teórico.

Para obtener la suficiente precisión en la determinación del MOE_{din} en el análisis modal se han considerado los cuatro primeros modos y frecuencias naturales del sistema [12]. Consecuentemente se

han empleado cuatro acelerómetros (Kistler K-Beam tipo 8316A01), un martillo instrumentado para la excitación de la viga de nivel de fuerza media (2000 N) (Kister tipo 8724A). Para el procesado de datos se ha empleado el software de análisis modal Artemis©.

3. OPTIMIZACIÓN Y OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Los pasos 4 y 5 del procedimiento establecido requieren la actualización de un modelo de elementos finitos mediante optimización de una función de error para obtener el módulo de elasticidad dinámico. La función de error establecida de basa en el conocido como Modal Assurance Criterion, comúnmente denominado MAC, y que responde a la siguiente formulación,

$$MAC_i = \frac{(\Phi_{ti}^T \Phi_{ei})^2}{|\Phi_{ti}^T \Phi_{ti}| |\Phi_{ei}^T \Phi_{ei}|} \quad (1)$$

Donde Φ_{ti} y Φ_{ei} son las formas modales del sistema obtenidas para el modo i de forma teórica y experimental respectivamente. Por tanto, la función que mide la diferencia entre el modelo teórico y experimental es formulada de la siguiente forma,

$$F = \sum_{i=1}^{nm} \mu_i \Delta\omega_i + \sum_{i=1}^{nm} \nu_i (1 - MAC_i) \quad (2)$$

donde,

$$\Delta\omega_i = \frac{|\omega_{ti} - \omega_{ei}|}{\omega_{ei}} \quad (3)$$

representa la diferencia entre las frecuencias naturales obtenidas del modelo teórico y los resultados obtenidos experimentalmente. Los coeficientes μ_i y ν_i representan los coeficientes de ponderación y nm es el número de modos considerados en la comparación.

En el paso 4 del procedimiento se busca el valor del módulo de elasticidad dinámico, que considerando la viga como sana, afecta de forma homogénea a la longitud completa de la viga. Para ello se minimiza la función proporcionada la Ecuación (2), determinando el valor de E como el valor que proporciona la menor diferencia entre el modelo teórico y experimental. En este paso se ha considerado que la viga está sana, es decir, no presenta defectos importantes que afectan a su rigidez cuando la diferencia en las frecuencias naturales es menor del 5%. En caso de que alguna de las cuatro frecuencias naturales supere este valor se ha procedido a determinar la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud de la viga (paso 5). En el paso 5 se ha obtenido la variación longitudinal del módulo de elasticidad dinámico, centrándose fundamentalmente en aquellas vigas que han mostrado una diferencia mayor del 5% en las frecuencias naturales. Para ello se ha utilizado un algoritmo de optimización evolutivo, basado en la técnica optimización de partículas de enjambre (Particle Swarm Optimization, PSO). La Figura 3 muestra el modelo de elementos finitos utilizado en la optimización. Dicho modelo se ha realizado en Matlab® y consiste en 3748 elementos tetraédricos de orden cuadrático que ha sido verificado mediante un modelo analítico. El modelo de la viga se ha dividido en cuatro tramos (en diferentes colores en la figura) y a cada uno de ellos se le ha asignado un módulo de elasticidad. Es decir,

$$E = [E_1 \quad E_2 \quad E_3 \quad E_4] \quad (4)$$

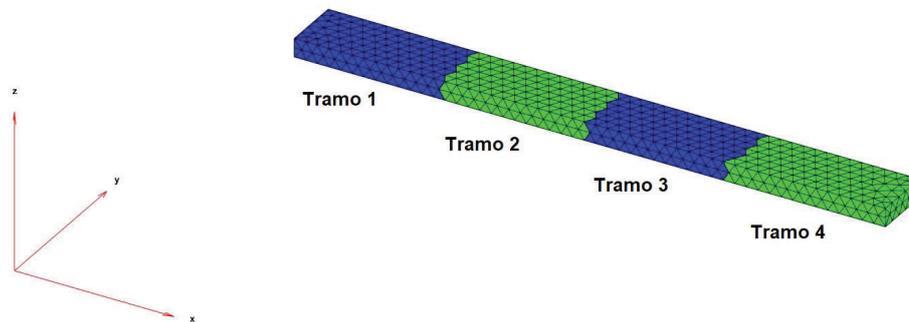


Figura 3. Modelo de elementos finitos empleado en la optimización PSO.

El número de tramos considerado en este trabajo se ha seleccionado en función de la variación de las propiedades estimadas a lo largo de la longitud de viga. Sin embargo, un estudio en mayor profundidad del número de tramos óptimo sería deseable, aunque este aspecto ha quedado fuera del trabajo aquí realizado. El criterio de convergencia se ha establecido en el número máximo de cincuenta iteraciones.

4. RESULTADOS

La Figura 4 muestra la disposición de la viga y los acelerómetros durante ensayos dinámicos en laboratorio. Las Tablas 2 a 4 muestra as diferencias entre el MOE_{est} y el MOE_{din} tanto en vigas sanas y dañadas en tablas simples de pino silvestre (Tabla 2), de abeto (Tabla 3), y en tablas Duo de pino silvestre (Tabla 4) y abeto (Tabla 5). Cabe destacar que el MOE_{din} es más pequeño que el MOE_{est} y esta diferencia varía entre un 12% y 20% en vigas consideradas sanas. Por otro lado, en las vigas dañadas ocurre lo mismo en cuanto al menor valor del MOE_{din} , sin embargo, las diferencias presentan una mayor variabilidad. Esta variabilidad es en su mayor parte debido a los diferentes tipos de defectos que presentaban las vigas ensayadas.

Por su parte, y como se ha mencionado previamente, las vigas dañadas se sometieron a un ajuste más exhaustivo mediante la optimización por el algoritmo PSO. En este algoritmo se empleó una población de 50 individuos y se consideró la convergencia del algoritmo en la generación 30. Dado el carácter aleatorio de este procedimiento de optimización el mismo problema se ejecutó 12 veces, seleccionando como solución el caso con el menor error dado por la expresión de la Ecuación (2). La Figura 5 muestra la evolución del algoritmo hasta la solución óptima en uno de los casos considerados (viga dúo sin fingers). En la parte superior de esta figura se muestra la evolución de la función objetivo formulada en la Ecuación (2), y en la parte inferior la evolución del MOE_{din} en los cuatro tramos considerados (ver Figura 3). La Figura 6 muestra los resultados en la distribución del módulo de elasticidad dinámico en los cuatro tramos para los doce casos de ejecución en una de las vigas considerada. Se observa que la tendencia es uniforme, aunque el mejor resultado se obtuvo para un error de $F = 0.000395$, siendo éste el considerado como solución del problema. Finalmente, la Tabla 6 muestra la comparación de las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente con las frecuencias obtenidas mediante simulación en elementos finitos en uno de los casos considerados. En la segunda columna se muestran los valores de las frecuencias naturales obtenidas en la simulación con un MOE_{din} constante en toda la viga,

obtenido por la optimización del paso 4. En la última columna se muestran las frecuencias obtenidas por simulación con MOE_{din} variable en los cuatro tramos. Como puede observarse, la optimización por tramos permite un ajuste mucho más preciso del modelo teórico.



Figura 4. Análisis modal experimental realizado en laboratorio.

Tabla 2. Comparación de los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico en la especie de pino silvestre en tabla simple.

Módulo de elasticidad	Sano			Dañadas		
	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia
Valor medio	12012.0	10625.3	13.05%	8590.1	8125.0	5.72%
Desviación estándar	537.86	375.00		412.02	375.00	

Tabla 3. Comparación de los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico en la especie abeto en tabla simple.

Módulo de elasticidad	Sano			Dañadas		
	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia
Valor medio	11223.5	9312.50	20.52%	8256.40	7437.50	11.01%
Desviación estándar	431.53	646.51		1171.86	990.19	

Tabla 4. Comparación de los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico en la especie de pino silvestre en tabla Duo.

Módulo de elasticidad	Sano			Dañadas		
	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia
Valor medio	10341.86	8916.67	15.98%	9520.93	8049.00	18.29%
Desviación estándar	360.94	1124.23		660.80	505.00	

Tabla 5. Comparación de los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico en la especie de abeto en tabla Duo.

Módulo de elasticidad	Sano			Dañadas		
	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia	Estático (MPa)	Dinámico (MPa)	Diferencia
Valor medio	10199.14	9041.67	12.80%	7637.93	7029.00	8.66%
Desviación estándar	257.47	412.48		419.42	504.00	

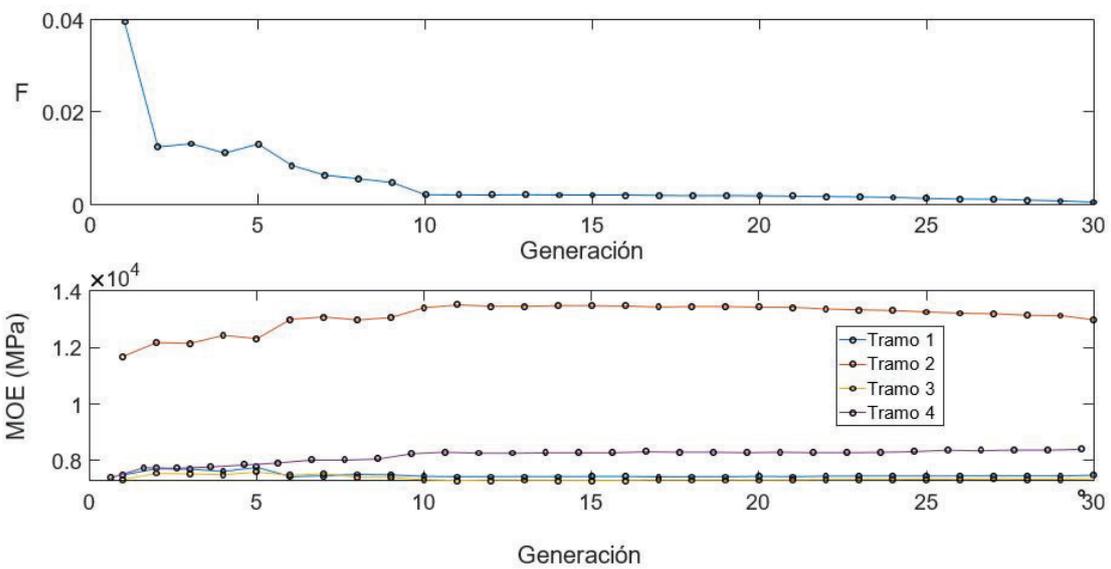


Figura 5. Evolución del módulo de elasticidad dinámico en el algoritmo PSO.

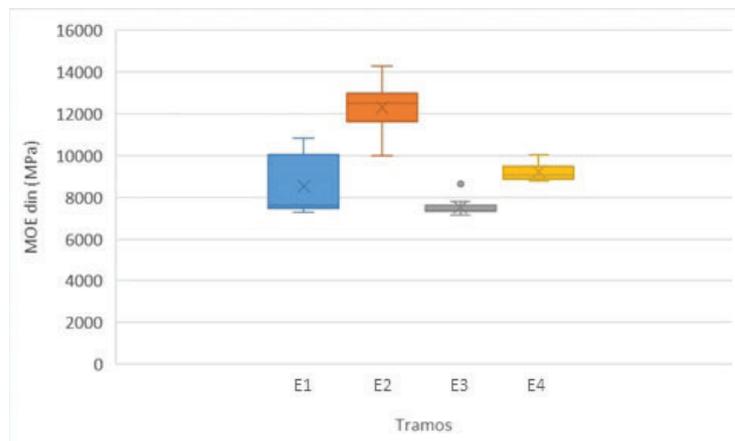


Figura 6. Resultados del MOE_{din} en los diferentes tramos de la viga (12 casos).

Tabla 6. Comparación de las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente, mediante MEF con MOE uniforme, y mediante MEF con MOE variable por tramos en uno de los casos de viga dúo.

Frecuencia natural	Experimental (Hz)	Uniforme (Hz)	4 Tramos (Hz)
F1	13.16	13.25	13.15
F2	82.70	86.30	82.66
F3	234.54	229.06	234.30
F4	448.75	446.39	449.30

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un procedimiento teórico-experimental que permite determinar el módulo de elasticidad dinámico en estructuras de madera laminada. Para ello se ha determinado en primer lugar el módulo de elasticidad estático mediante procedimientos convencionales. Este MOE_{est} sirve en este trabajo como referencia y comparación del mismo módulo en el caso dinámico. El MOE_{din} se ha obtenido experimentalmente mediante análisis modal, comparando estos resultados con los obtenidos mediante elementos finitos. En una primera fase se ha considerado que la rigidez de la viga es uniforme en toda su longitud, obteniendo buenos resultados en las vigas consideradas como sanas. En una segunda optimización se ha considerado la variación longitudinal de rigidez en la viga, y se ha obtenido esta variación mediante optimización utilizando un algoritmo PSO.

En este trabajo se han utilizado tablas simples para la fabricación de madera laminada y tablas de tipo Duo. La sencillez de estos casos permite un estudio fiable al presentar pocas fuentes de incertidumbre. Los resultados demuestran que si los elementos no tienen defectos se puede obtener un MOE_{din} de forma sencilla. Pero en el caso en el que se presentan defectos es necesario recurrir a una optimización más compleja considerando varios tramos de rigidez variable a lo largo de la viga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer el soporte proporcionado por la empresa YOFRA S.A. a través del convenio financiado por la Sociedad para el Desarrollo Regional de Cantabria (SODERCAN) en el marco del Programa I+C+D 2018 – Apoyo a Proyectos de I+D.

REFERENCIAS

- [1] M. Ruy, R. Gonçalves, D. M. Pereira, R. G. M. Lorensani, and C. Bertoldo, "Ultrasound grading of round Eucalyptus timber using the Brazilian standard," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 76, no. 3, pp. 889–898, 2018.
- [2] P. Dietsch and H. Kreuzinger, "Guideline on the assessment of timber structures: Summary," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 11, pp. 2983–2986, 2011.
- [3] J. Parracha *et al.*, "Assessment of the density loss in anobiid infested pine using x-ray micro-computed tomography," *Buildings*, vol. 11, no. 4, 2021.
- [4] L. Acuña *et al.*, "Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de

- especies de madera," *Mater. Constr.*, vol. 61, no. 303, pp. 451–464, 2011.
- [5] G. López, L. A. Basterra, and L. Acuña, "Infrared thermography for wood density estimation," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 89, pp. 242–246, 2018.
- [6] G. López, L. A. Basterra, G. Ramón-Cueto, and A. De Diego, "Detection of singularities and subsurface defects in wood by infrared thermography," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 8, no. 4, pp. 517–536, 2014.
- [7] D. F. Llana, G. Íñiguez-González, J. Montón, and F. Arriaga, "In-situ density estimation by four nondestructive techniques on Norway spruce from built-in wood structures," *Holzforschung*, vol. 72, no. 10, pp. 871–879, 2018.
- [8] G. Fink and J. Kohler, "Quantification of different NDT/SDT methods in respect to estimate the load-bearing capacity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 1181–1187, 2015.
- [9] R. Perera, S. E. Fang, and C. Huerta, "Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, no. 3, pp. 752–768, Apr. 2009.
- [10] P. Liu, S. Huang, M. Song, and W. Yang, "Bayesian model updating of a twin - tower masonry structure through subset simulation optimization using ambient vibration data," no. 0123456789, 2020.
- [11] W. Zhang, G. Li, W. Zhang, J. Liang, and G. G. Yen, "A cluster based PSO with leader updating mechanism and ring-topology for multimodal multi-objective optimization," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 50, no. June, p. 100569, 2019.
- [12] G. Kouroussis, L. Ben Fekih, and T. Descamps, "Assessment of timber element mechanical properties using experimental modal analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 254–261, 2017.

