

CÓDIGO: 1.7**METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN, EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO
MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DEL ESTADO ESTRUCTURAL DE
PUENTES DE MADERA EN ESPAÑA****Rodríguez, Soledad^{1*}; Vivas, Julio²; Vega, Abel¹; Baño, Vanesa³**

1: Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias CETEMAS. Asturias, España.

srodriguez@cetemas.esavega@cetemas.es

2: Media Madera, Ingenieros Consultores, S.L. Asturias, España.

juliovivas@mediamadera.com3: IET, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo,
Uruguayvanesab@fing.edu.uy**PALABRAS CLAVE:** Puentes de madera, inspección, técnicas no destructivas, vibraciones, pérdida de capacidad portante.**RESUMEN**

El uso de la madera en obra civil es relativamente nuevo en España, aunque en los últimos 20 años se ha incrementado considerablemente la ejecución de puentes de madera, destinados principalmente a uso peatonal. La mayoría de los puentes fueron realizados en madera de pino impregnada con sales hidrosolubles mediante presión en autoclave, por lo que la garantía de vida útil de los puentes viene dada por la del tratamiento protector.

En la actualidad, la edad de muchos de estos puentes ya ha superado la garantía de dicho tratamiento protector, por lo que se planteó la necesidad de una evaluación del estado estructural de los mismos. El presente trabajo presenta una metodología de inspección, evaluación y diagnóstico de su estado sanitario y estructural. El objetivo del mismo es definir dicha metodología, basándose en las indicaciones de la normativa de ámbito nacional y diferentes normativas y recomendaciones internacionales.

Para ello se definió una metodología de inspección del estado de los puentes de madera que incluye, entre otras acciones, las siguientes: inspección visual, detección de pudriciones mediante el empleo de equipos no destructivos y análisis dinámico para la determinación de las frecuencias naturales de vibración. El estudio de las frecuencias de vibración características de los diferentes puentes y su variación a lo largo de la vida útil de los mismos fue validado como método de detección de anomalías en las estructuras, complementado con las inspecciones visuales y el uso de otras tecnologías de carácter no destructivo.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de puentes de madera exige el conocimiento del material, un diseño adaptado al mismo y una correcta ejecución, variando las tipologías en función del destino de los mismos (uso peatonal o vehicular), las luces a salvar, los condicionantes del entorno y las exigencias de los clientes. Así mismo, requieren de un control y mantenimiento que, si bien es dependiente del correcto diseño y ejecución de la estructura, viene marcado por las condiciones ambientales, por las modificaciones que se puedan haber realizado sobre el diseño original y por las características naturales de la madera.

La mayoría de los puentes de madera en España son diseñados para el uso peatonal. Actualmente no existe una normativa específica nacional para el diseño y cálculo de los mismos, por lo que es necesario recurrir a diferente normativa nacional y europea sobre cálculo de estructuras de madera. La determinación de las acciones que inciden sobre los puentes se realiza conforme a la IAP-11 “Instrucción de acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera”[1], considerándose una sobrecarga de uso de 5 kNm^{-2} en los puentes, que sustituye a la sobrecarga de 4 kNm^{-2} , considerada en los puentes diseñados con anterioridad al 2011. En cuanto al cálculo resistente, en España es de obligado cumplimiento el Código Técnico de la Edificación[2], pero como su propio nombre indica está desarrollado para su aplicación en edificación, no en ingeniería civil. Como normativa de referencia europea, y previa a la existencia del CTE, se emplea el Euro código 5, con un documento específico para el cálculo de puentes de madera [3], si bien sigue dejando muchas indeterminaciones al estar centrado sistemas de construcción de tableros de madera tensados, no presentes en nuestro país.

La especie de madera mayoritariamente utilizada en la fabricación de puentes en España es el *Pinus sylvestris*, con propiedades estructurales reconocidas en la normativa europea, que proveen una clase resistente que varía entre una C14 y una C30 en función del país de procedencia [4]. En el caso de los elementos estructurales de madera laminada encolada, la clase resistente para la madera de *Pinus sylvestris* es una GL24h [5]. La durabilidad natural del *Pinus sylvestris* es considerada como sensible al ataque de hongos e insectos y como impregnable en albura, según normativa europea [6]. Según las indicaciones propias de su clase de uso (clase 3) [7], los elementos estructurales de los puentes de madera necesitan una protección media o incluso profunda [8], por lo que la madera utilizada es impregnada con sales hidrosolubles, aplicadas en profundidad mediante ciclos de vacío-presión-vacío en autoclave. La mayoría de los puentes en España presentan como único tratamiento protector la aplicación del tratamiento químico, siendo escasos los puentes que presentan protección por diseño suficiente, por ejemplo puentes cubiertos. Por este motivo, la garantía de vida útil que se venía asignando a los puentes fabricados desde hace veinte años, era la que el proveedor del tratamiento químico podía garantizar. A modo de ejemplo, para una clase de uso 3, un tratamiento protector basado en sales hidrosolubles aplicadas en profundidad aseguraba una duración de los elementos de madera entre 15 y 30 años, según los datos facilitados por los proveedores de los productos químicos. Esto podría variar en función de función de diferentes factores, como son las condiciones específicas de exposición, las condiciones climáticas específicas, la situación geográfica o el mantenimiento de la estructura. Transcurrido el tiempo de esta garantía, se hace necesaria la realización de inspecciones sobre los mismos con el fin de estudiar su estado estructural actual, ejecutar las medidas necesarias para su continuidad y permitir una estimación de la vida útil de la que aún dispone la estructura.

Países con tradición en construcción de puentes de madera cuentan, entre sus publicaciones, con manuales de buena ejecución de los mismos, que aseguren su durabilidad [9], sobre inspección de puentes construidos con madera[10], [11], [12]. Varias publicaciones recogen desde hace varios años distintas técnicas no destructivas enfocadas a la inspección estructuras de madera y algunas específicas para puentes [13].

El objeto del presente artículo es definir una metodología de inspección del estado de los puentes de madera colocados en España, incluyendo las acciones siguientes: inspección visual, detección de pudriciones mediante el empleo de equipos no destructivos, pruebas de carga estáticas y análisis dinámico para la determinación de las frecuencias naturales de vibración.

2. METODOLOGÍA

2.1. Evaluación de los elementos estructurales del puente

2.1.1. Estudio previo de los puentes e inspección visual

Previo a la inspección visual in situ de la estructura, es necesario un estudio inicial del diseño y fabricación del puente, recopilando la documentación sobre el mismo, facilitada por la empresa fabricante o por el propietario. En los casos en los que se disponga de una memoria técnica del proyecto, se consultará, en el pliego de condiciones, los datos referentes a la especie de madera utilizada, las medidas de tratamiento preventivo aplicadas y la certificación de las mismas. Asimismo, se tendrán en cuenta los mantenimientos y controles previos, si estos se hubieran realizado.

La inspección visual de la estructura se centrará en tres aspectos: existencia de medidas de protección preventiva y/o por diseño de los elementos, estado actual de la estructura y existencia de daños de origen abiótico y biótico, y selección de elementos susceptibles a una evaluación mediante técnicas no destructivas. En el caso de los puentes de madera totalmente expuestos a la intemperie, la falta de medidas de protección por diseño a evaluar están relacionadas con la posibilidad de acumulación de agua en los elementos portantes y estaría indicada por factores como: la existencia de contacto entre las piezas de madera y el terreno, encuentros entre piezas de madera que no permitan la evacuación de agua, tableros de piso que no permitan una correcta ventilación, y escasa protección en los elementos no estructurales, como barandillas y pasamanos. Estos factores pueden hacer cambiar la clase de uso del puente y, por lo tanto, provocar que la protección inicial adoptada sea insuficiente para las nuevas condiciones. Por ejemplo, el ajardinamiento de una zona puede provocar que la viga principal de madera, inicialmente ventilada y con una clase de uso 3, pase a estar en contacto con el terreno, provocando que la clase de uso pase a ser 4, Figura 1-a. En este caso, la protección aplicada para la condición inicial se hace insuficiente para esta nueva clase de uso.

En la inspección visual, se marcará la presencia de daños abióticos (radiación solar y lluvia, principalmente) en los elementos que componen el puente de madera. Se identifican por la presencia de colores grisáceos y aparición de surcos y fendas en los elementos más expuestos. Si bien no causan una pérdida de las propiedades mecánicas de la madera, es importante su valoración ya que facilitan la acción de agentes de deterioro biótico. Así mismo, el efecto estético de las mismas podría requerir una sustitución de los elementos afectados.

En los daños de origen biótico se diferenciará la presencia de insectos xilófagos y de hongos. La presencia de los primeros se determinará mediante la búsqueda de indicativos tales como galerías y agujeros en la madera de tipología variable en función de la especie. La existencia de daños por insectos xilófagos supondría una degradación de la madera así como una pérdida de las propiedades mecánicas. La aparición de hongos xilófagos está determinada por la existencia de unas condiciones adecuadas para su desarrollo, principalmente una humedad en el elemento comprendida entre el 25 y el 55% [14]. Por este motivo, la inspección visual se centrará en la búsqueda de pudriciones generadas por hongos en los puntos mencionados anteriormente (Figura 1-b). Aunque la presencia más dañina para la madera es la de los hongos de pudrición, que en el caso de las coníferas generan pudriciones pardas y blandas, las cuales provocan una pérdida de las propiedades físico-mecánicas, la presencia de mohos y otros hongos

cromógenos es indicativa de situaciones idóneas para el comienzo de procesos de degradación, por lo que deben ser tenidas en cuenta en la inspección.



Figura 1. a) Contacto entre la viga principal y el terreno; b) Pudrición parda en una viga en contacto con el terreno.

2.1.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad de referencia de la madera estructural, con respecto al cual se relacionan las propiedades mecánicas, es del 12%. El contenido de humedad de la madera de *Pinus sylvestris* en puentes expuestos a la intemperie en España, debería variar entre un 18 y 25%. Esta diferencia de contenido de humedad se considera en el cálculo estructural mediante la aplicación de factores de corrección que penalizan la resistencia de la estructura. Un contenido de humedad mayor al expuesto, puede ser un indicador de la presencia de hongos degradantes de la madera.

2.1.3. Estimación de las propiedades mecánicas de la madera mediante el uso de NDT

En el caso concreto de los puentes peatonales, el cambio de normativa en las exigencias de sobrecarga de uso, hace necesaria la comprobación de su comportamiento estructural frente a las nuevas cargas. Cuando no existe información de los cálculos estructurales de los puentes, se hace necesaria la estimación de sus propiedades mecánicas. Para ello, se propone seleccionar los elementos del puente sin daños aparentes y estimar el módulo de elasticidad y/o densidad mediante el uso de técnicas no destructivas (NDT). Las más habituales en el ámbito de las estructuras de madera son las técnicas de propagación de onda para la estimación del módulo de elasticidad dinámico, a partir del cual se puede estimar el estático: ultrasonidos, ondas de impacto y análisis de vibraciones.

Para el *Pinus sylvestris* de procedencia española, las ecuaciones de correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y el estático presentan un R^2 de 0.74 para la técnica de ultrasonidos, empleando el equipo Sylvatest Duo y R^2 de 0.76 para la técnica de vibraciones con el equipo PLG- Fakopp [15].

De los tres valores empleados para la caracterización de una especie, módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad, el módulo de elasticidad es el valor limitante para el *Pinus sylvestris*, por lo que se puede asignar una clase resistente en base a este valor [16] [5].

2.1.4. Evaluación del grado de daño de los elementos mediante el empleo de NDT: Resistógrafo

Técnicas de resistencia a la penetración resultan más claras en la mayoría de las inspecciones de puentes de madera. El equipo comúnmente utilizado es el resistógrafo [17], que consiste en un taladro mecánico que realiza una perforación de 2 a 3 mm de diámetro en la dirección radial de la sección de la pieza, evaluando la resistencia que ofrece la madera a la perforación según el taladro avanza en la perforación de la sección de la pieza (Figura 2). El equipo facilita un perfil gráfico de la sección a tiempo real, detectándose la resistencia que muestra la madera debido a diferencias de densidad, como por ejemplo la madera de verano y de primavera [14]. Cuando existen pudriciones u oquedades en la madera, la

resistencia a la perforación es mucho más baja, por lo que se puede detectar la ubicación del año en la sección de la pieza (Figura 2). El resistógrafo permite la evaluación de la presencia de pudriciones en zonas de difícil acceso para el empleo de otras técnicas no destructivas, así como la localización de daños internos no apreciados en la evaluación visual.

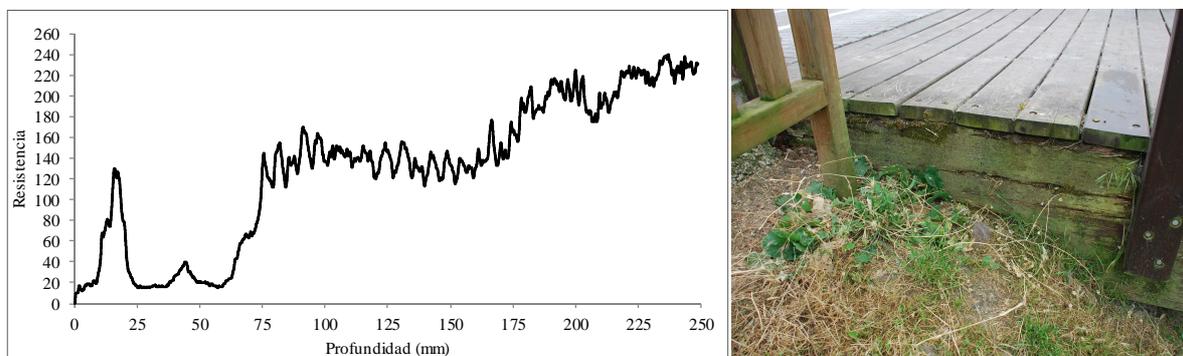


Figura 2. Detalle de medición resistográfica sobre una viga, en la que se aprecia una pudrición que afecta a una profundidad de 75 mm de la sección.

2.2. Evaluación del comportamiento global de la estructura

2.2.1. Pruebas de carga estáticas

La realización de pruebas de carga estáticas se emplea para la obtención de valores de flecha para la aplicación de cargas, evaluadas dentro del tramo elástico de comportamiento de la madera. Se aplica una carga uniformemente distribuida a lo largo del tablero del puente y la flecha obtenida en el centro del vano del puente se compara con la teórica según resistencia de materiales, para los valores de módulos de elasticidad de la madera asignados en el cálculo. En caso de no conocer el módulo de elasticidad de la madera, se podrá estimar mediante la aplicación de técnicas no destructivas según lo descrito en el apartado 2.1.3. Dado que la madera presenta deformaciones diferidas, parte de ellas no recuperables, la metodología empleada considera la aplicación de cargas pequeñas durante un breve período de tiempo, de modo que la deformación remanente del puente sea la menor posible.

A falta de una norma de pruebas de carga en puentes de madera, se desarrolló un protocolo basado en la norma de ensayos de carga estática en estructuras de madera [18] y en las instrucciones y recomendaciones de pruebas de carga en puentes para materiales diferentes a la madera [19] [20]. El ensayo se plantea en dos escalones de carga, de modo que no se le aplique al puente la sobrecarga de uso total considerado en el cálculo. En el primer escalón se aplica una carga de $\frac{1}{4}$ de la sobrecarga de uso considerada en el cálculo y en el segundo escalón de $\frac{1}{3}$. Si los resultados de ambas flechas son menores a las consideradas en el cálculo, se considera que el puente no se encuentra dañado. Si las flechas experimentales son mayores a las teóricas, se considera que existe un fallo estructural en el puente, que implicaría un estudio en profundidad de las causas que lo provocaron.

2.2.2. Frecuencias naturales de vibración

Un modo más simple y económico para evaluar el comportamiento global de la estructura es el análisis de vibraciones del puente para la determinación de las primeras frecuencias naturales asociadas a sus correspondientes formas modales [21]. Los puentes se hacen vibrar mediante impacto y las respuestas se miden en acelerómetros colocados en las vigas principales de los puentes.

Las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente en el momento de la inspección se comparan con las frecuencias del puente en el momento de su fabricación, en caso de contar con estos datos. Si no existen datos experimentales del puente nuevo, se pueden comparar las frecuencias experimentales con las teóricas de cálculo, estimando un daño mayor en la estructura global cuanto más alejados estén estos dos valores. En caso de no conocer el módulo de elasticidad de la madera, se podrá estimar mediante la aplicación de técnicas no destructivas según lo descrito en el apartado 2.1.3.

La IAP del año 2011 incorpora, con respecto a la anterior de 1998, la obligatoriedad de realizar ensayos dinámicos que justifiquen que el puente no tiene riesgo de resonancia. Se consideran verificado este estado si las frecuencias naturales de la estructura están fuera del rango 1.25 a 4.60 Hz para las vibraciones verticales y de 0.5 a 1.20 Hz para las vibraciones laterales. Esta comprobación puede hacerse necesaria en el caso de que la inspección esté orientada a validar el comportamiento de los puentes bajo la normativa actual.

3. RESULTADOS

La figura 3 presenta el esquema metodológico de inspección en puentes de madera.

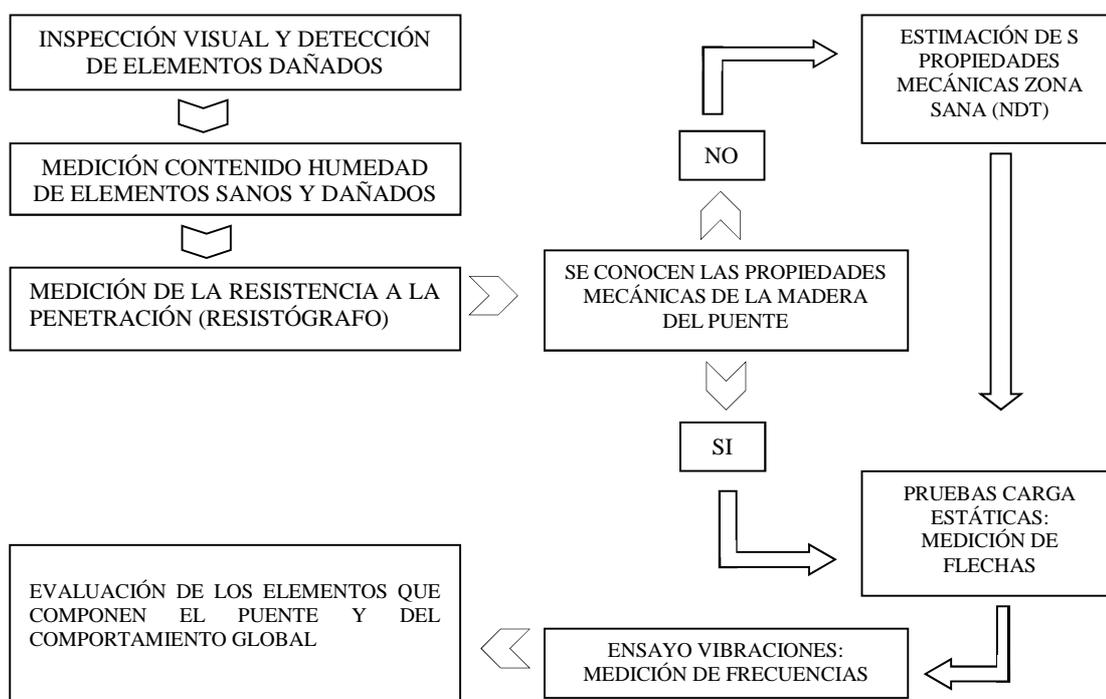


Figura 3. Esquema de la metodología de inspección desarrollada para puentes de madera.

4. CONCLUSIONES

Fue desarrollada una metodología de inspección del estado para puentes de madera colocados en España, que incluye las siguientes acciones: inspección visual, estimación de propiedades mecánicas y detección de pudriciones mediante el empleo de equipos no destructivos, y evaluación global de la estructura a través de la realización de pruebas de carga estáticas y análisis dinámicos para la determinación de las frecuencias naturales de vibración.

En el caso de los puentes de madera expuestos a la intemperie, la falta de medidas de protección por diseño presente en muchos provoca acumulaciones de agua en puntos clave de la estructura, haciendo estas zonas susceptibles al ataque de insectos y hongos xilófagos. El uso de equipos de carácter no destructivo como el resistógrafo permite a su vez determinar el grado de afección de los elementos dañados, y junto a las técnicas de propagación de onda una caracterización mecánica de los mismos.

La realización de pruebas de carga estática permite conocer la existencia de fallos estructurales en el puente a través del análisis de las flechas experimentales obtenidas con las esperadas de forma teórica, y unidas al análisis de las frecuencias naturales, permiten obtener unos datos de seguimiento en el tiempo para futuras evaluaciones de la estructura.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ministerio de Fomento, 2011. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). España.

[2] CTE-DB-SE-M, 2009. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural: Madera. España.

[3] UNE EN 1995-2:2010. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2. Puentes.

[4] UNE EN 1912:2012. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

[5] prEN 14081-1:2012. Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross-section. Part 1. General requirements.

[6] UNE EN 350-2:1995. Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: Guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa.

[7] UNE EN 335:2013. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Clases de uso: definiciones, aplicación a la madera maciza y a los productos derivados de la madera.

[8] UNE EN 351-1:2008. Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores. Parte 1: Clasificación de las penetraciones y retenciones de los productos protectores.

[9] Sétra, 2006. "Technical Guide. Timber Bridges. How to ensure their durability". Service d'Études techniques des routes et autoroutes. Ministère de l'Écologie du Développement et de l'Aménagement durables"

[10] Ritter M.A., 1990. "Timber Bridges. Design, construction, inspection and maintenance". Washington, DC: 944 p.

[11] Seavey R. and Larson T, 2002. "Inspection of timber bridges". Minnesota Department of Transportation Office of Research Services. MN 55155.

[12] Davalos J., Dickson B., Petro S- and GangaRao H., 2003. "Modern timber bridges: manual for inspection, quality control and assurance and load rating". Constructed Facilities Center. West Virginia University. Morgantown. CFC 03-104.

- [13] Emerson N, Pollock D G, Kainz J A, Fridley K J, McLean D L and Ross R, 1998. "Nondestructive evaluation techniques for timber bridges". Proceedings of 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland.
- [14] Arriaga Martitegui, F.; Peraza Sánchez, F.; Esteban Herrero, M.; Bobadilla Maldonado, I.; García Fernández, F. "Intervención en estructuras de madera". AITIM. 2002.
- [15] Íñiguez, G. (2007) Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural (Grading by non destructive techniques and assessment of the mechanical properties of large cross section coniferous sawn timber for structural use). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Montes. 223 p. PDF file: <http://oa.upm.es/415>
- [16] UNE EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes.
- [17] Rinn F., 2013. "Practical application of micro-resistance drilling for timber inspection". Holztechnologie 54, 4, pp. 32-38.
- [18] UNE-EN 380. Estructuras de madera. Métodos de ensayo: principios generales para los ensayos de carga estática.
- [19] "Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carreteras". Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. 2007.
- [20] "Instrucción sobre las inspecciones técnicas en los puentes de ferrocarril (TPF-05): capítulo 4 Pruebas de carga". Ministerio de Fomento.
- [21] Li, J.; Samali, B.; Crews, K., 2007. « A cost effective approach for integrity assessment of timber bridges ». Progress in Mechanics of Structures and Materials. Proceedings of the 19th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, ACMSM19, pp. 1037-1042.