

FOTOGRAMETRÍA SFM DE BAJO COSTO PARA MONITORIZACION DE ENSAYOS SOBRE ESTRUCTURAS LAMINARES RETICULARES DE MADERA DEFORMADAS ELASTICAMENTE A ESCALA REAL

AFFORDABLE SFM PHOTOGRAMMETRY FOR MONITORING OF TESTS ON FULL SCALE ELASTIC TIMBER GRID SHELL STRUCTURES

*Juan Ortiz-Sanz*¹

<https://orcid.org/0000-0003-0717-0400>

*Mariluz Gil-Docampo*¹

<https://orcid.org/0000-0002-9037-9944>

Guillermo Bastos^{1,*}

<https://orcid.org/0000-0003-1984-4687>

*Antonio José Lara-Bocanegra*²

<https://orcid.org/0000-0001-7908-9631>

RESUMEN

Para validar modelos numéricos de resistencia de estructuras, es necesario medir su deformación bajo carga. La dificultad de dicha medición aumenta con su tamaño y su complejidad. En el presente estudio se determina la geometría de una estructura laminar reticular de gran tamaño tras una prueba de carga. La estructura fue cargada en sus cinco nodos centrales con un peso suspendido de 105 kg por nodo. Se generó el modelo 3D de la estructura sin carga y bajo carga, empleando fotogrametría usando software PhotoModeler Scanner y Metashape. El error máximo en la medida de las distancias sobre la escena fue 1,31 mm, que corresponde al 0,17 % respecto a la diagonal de la base de la estructura. El mayor error medio se dio bajo carga máxima, 0,70 mm de acuerdo a Metashape y 0,44 mm en PhotoModeler Scanner. El perfil de la estructura bajo carga es coherente con la deformación prevista. La calidad de medida del modelo 3D resultó ser altamente uniforme. Este estudio releva el uso de fotos que han sido tomadas varios años después, a través de la fotogrametría utilizando softwares avanzados.

Palabras clave: Precisión, fotogrametría, madera, PhotoModeler, Metashape, gridshell, modelo 3D.

¹Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Laboratorio de la Plataforma de Ingeniería de Madera Estructural (PEMADE). Lugo, España.

²Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Departamento de Estructuras y Física de Edificación. Madrid, España.

*Autor de correspondencia: guillermo.bastos@usc.es

Recibido: 03.05.2022 Aceptado: 25.10.2023

ABSTRACT

Numerical models of the resistance of structures must be validated through the measurement of their deformation under load, which is made difficult by size and complexity. In the present study, the geometry of a large reticular laminar structure is determined after a load test. The structure was loaded at its five central nodes with a suspended weight of 105 kg per node. The 3D model of the structure without load and under load was generated using the photogrammetric with using software PhotoModeler Scanner and Metashape. The maximum error in measuring the distances on the scene was 1,31 mm, corresponding to 0,17% concerning the diagonal of the structure's base. The largest mean error occurred under a maximum load of 0,70 mm according to all Metashapee, and 0,44 mm in PhotoModeler Scanner. The profile of the structure under load is consistent with the predicted deformation. The measurement quality of the 3D model turned out to be highly uniform. This study reveals the use of photos that have been taken several years later, through photogrammetry using advanced software.

Keywords: Precision, photogrammetry, wood, PhotoModeler, Metashape, gridshell, 3D model.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras laminares reticulares de madera (ELRM) son estructuras ligeras muy eficientes ideales para la construcción de cubiertas de medias y grandes luces. Su superficie de doble curvatura se consigue mediante el curvado en obra de láminas de madera. Los avances continuados de las herramientas de búsqueda de la forma, modelado 3D y fabricación digital han permitido a arquitectos e ingenieros explorar su potencial formal (Adriaenssens *et al.* 2014).

Para la construcción de este tipo de estructuras pueden utilizarse diferentes técnicas (Chilton and Tang 2016). Desde el empleo de elementos rectos de madera laminada y complejas uniones de acero, como en la cubierta del Pods Sports Academy, con 65 m de luz máxima (Harris *et al.* 2012), hasta elementos de madera laminada curvada y alabeada, como en el Centro Pompidou-Metz, con luces que alcanzan los 40 m (Lewis 2011). Ambas técnicas requieren de la fabricación de elementos singulares, con el correspondiente impacto en el coste de ejecución.

Sin embargo, existe otro procedimiento posible para la construcción de ELRM. Se fundamenta en el curvado en régimen elástico de láminas idénticas de madera de pequeña sección, unidas mediante sistemas de conexión sencillos. El uso de elementos de madera y de unión estandarizados las hace susceptibles de ser producidas a nivel industrial (Harris *et al.* 2004). Aunque su origen, tal y como las conocemos en la actualidad, se remonta a los años 70 (Otto *et al.* 1974), el desarrollo de las herramientas de diseño paramétrico y búsqueda de la forma ha generado un nuevo y renovado interés por parte de arquitectos, ingenieros e investigadores (Adriaenssens *et al.* 2014, Williams *et al.* 2014, Chilton and Tang 2016).

En los últimos 20 años, el estudio de las ELRM deformadas elásticamente se ha centrado principalmente en desarrollar metodologías para simular el proceso de deformación elástica de retículas (Hernández *et al.* 2011, Rombouts *et al.* 2019, Xiang *et al.* 2020). Sin embargo, investigaciones relativas al desarrollo de productos de madera específicos (Lara-Bocanegra *et al.* 2020a), de procesos constructivos (Lara-Bocanegra *et al.* 2020b) o de modelos numéricos contrastados experimentalmente son apenas inexistentes.

La realización de pruebas de carga sobre estructuras de gran tamaño supone el método más eficaz para comprobar el comportamiento previsto de este tipo de estructuras y validar y calibrar los modelos numéricos propuestos para su análisis estructural. Para ello resulta imprescindible la determinación precisa de la geometría de la estructura antes del proceso de carga y de su deformada durante la misma. Por tanto, poder medir desplazamientos en el espacio con precisión se convierte en uno de los objetivos principales de la prueba de carga. Esto resulta casi imposible mediante sensores convencionales de desplazamiento, los cuales trabajan en los dominios 1D o 2D (Park *et al.* 2015).

Para solucionar este obstáculo, la fotogrametría de objeto cercano ha probado ser útil para la verificación experimental del comportamiento de modelos de diversos materiales (Scaioni *et al.* 2014, Zhao and Li 2017, Mohamed *et al.* 2021, Uheida *et al.* 2021). La geometría y deformaciones de estructuras masivas como puentes

fueron medidas con esta técnica desde finales de los años 70, y con la rápida evolución de la computación y el procesado digital de imágenes, se fue incrementando la precisión de estos trabajos. Como ejemplo, se logró una desviación típica respecto a las medidas de referencia de entre 0,1 y 0,2 mm para un puente de con una luz de 27 m, fotografiado a 32 m de distancia (Albert *et al.* 2002, Jiang *et al.* 2008). En el caso particular de la madera, un estudio pionero para validar un criterio de rotura fue publicado en 1999 (Masuda *et al.* 1999). Actualmente, la fotogrametría es conocida por proporcionar sin contacto desplazamientos 3D, deformaciones, esfuerzos, y propiedades mecánicas de la madera en un conjunto de puntos (Armesto *et al.* 2009). Además, dada la gran flexibilidad de la madera en comparación con otros materiales de construcción, la fotogrametría puede aplicarse a este material para evaluar sus propiedades mecánicas o validar modelos de elementos finitos con gran precisión a bajo presupuesto (Guindos and Ortiz 2013). La tecnología fotogramétrica moderna nos permite obtener datos geométricos con gran fiabilidad, incluso con cámaras no métricas, usando un proceso de calibración sencillo (Mills and Barber 2004, Honório *et al.* 2021). Se encuentran ejemplos de esta aplicación en diversos campos empleando cámaras de móvil, tales como la estimación de volúmenes en la industria minera (Abbaszadeh and Rastiveis 2017) y la determinación de coordenadas 3D de puntos de edificios (Akinade 2020).

La fotogrametría permite a los laboratorios de ensayo de materiales extraer nueva información de ensayos hechos en el pasado, años después de su ejecución, simplemente volviendo a procesar con software más moderno las antiguas fotografías. Un avance clave para esta evolución son los algoritmos Structure from Motion (SfM). A diferencia de las primeras versiones de software, que trabajaban exclusivamente sobre puntos de las imágenes que eran seleccionados por el usuario manualmente, el software basado en SfM manipula matemáticamente de manera prácticamente automática los puntos de toda la imagen (Remondino and El-Hakim 2006, Westoby *et al.* 2012, Peña Villasenín 2020).

El presente trabajo describe la implementación y evaluación de un sistema fotogramétrico asequible de objeto cercano para capturar la deformación en 3D de la prueba de carga de una ELRM deformada elásticamente. El ensayo fue realizado hace cinco años respecto al presente trabajo, en 2017, cuando el software fotogramétrico SfM no había alcanzado aún los niveles de prestaciones, calidad y bajo coste actuales. Es decir, los modelos 3D fotogramétricos analizados en el presente artículo fueron creados años después de desmontar el ensayo sobre la estructura, utilizando como material de partida las fotografías que fueron tomadas en aquel momento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de la estructura analizada

La estructura analizada fue una ELRM deformada elásticamente construida a partir de tres direcciones de listones curvados de madera de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) La fotogrametría se aplicó para comparar la superficie de la estructura antes y después de ser cargada. El proceso constructivo de este prototipo se presentó en (Lara-Bocanegra *et al.* 2022), incluyendo el modelo numérico y un método novedoso de curvado. Sus dimensiones están recogidas en la Figura 1.

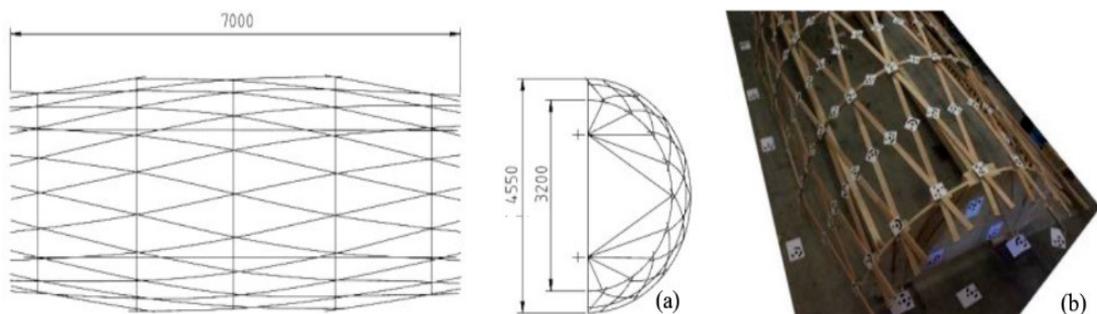


Figura 1: (a) Dimensiones (mm) de la estructura analizada; (b) Fotografía desde la pértiga.

Materiales

El equipo básico empleado incluyó una cámara Canon Eos 550D con un sensor CMOS de 18 megapíxeles, con dimensiones de 22,3 mm × 14,9 mm y un tamaño de píxel de 4,3 μm × 4,3 μm. Se usó junto a un Canon EF 20 mm 1:2,8 (Canon Inc., Ota, Tokyo, Japón, 1937). Un portátil en el que se instaló el software específico para controlar la cámara EOS Utility Ink, recibía la señal de vídeo de la cámara por cable, que también permitía modificar los parámetros de la cámara y dispararla.

Se usaron los programas fotogramétricos PhotoModeler Scanner (PS) v6 (2008) (Eos Systems Scanner, Canada, 2018) y Metashape v1.7.5 (Agisoft LLC, Rusia, 2021) para procesar las fotografías y generar los modelos 3D de la estructura (Martínez *et al.* 2013, Martínez *et al.* 2015). Ambos programas no solamente muestran la calidad de medida de la fotogrametría de objeto cercano, sino que sirven para comprobar la evolución del software fotogramétrico en la última década. Se realizaron unas hojas de cálculo en el programa gratuito LibreOffice Calc 4.2 (The Document Foundation, Alemania, 2014). Los croquizados se hicieron en el programa libre QCad (RibbonSoft GmbH, Alemania, 2018).

Se emplearon dianas codificadas de 14 bits generadas por el PS, mostradas en la Figura 2. Su finalidad es facilitar al software la identificación de un conjunto de puntos en distintas fotografías. Este proceso es necesario para determinar la posición de las cámaras en el momento en que fueron usadas, lo cual es la base para generar el modelo 3D a través de la identificación del resto de puntos en la mayor cantidad de fotografías posible. El uso de las dianas mejora la precisión y exactitud en la identificación de puntos o elementos de textura que se encuentran en más de una fotografía (Fraser 1997, Zou and Meng 2020).

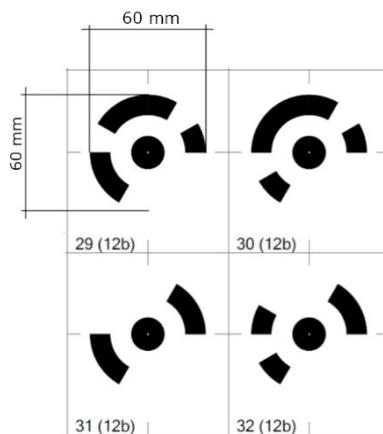


Figura 2: Dianas codificadas.

Las distancias sobre la escena de la ELRM que fueron usadas como referencia, fueron medidas con un flexómetro clase II (EUR-Lex 2014) de 5 m de longitud. Para elevar y disparar la cámara se usó un mástil telescópico de 5 m de longitud con un gimbal, el cual permitió modificar el ángulo entre el eje óptico de la cámara y el plano del suelo. Una persona sostenía el mástil y controlaba dicho ángulo, mientras otra persona disparaba la cámara desde el ordenador portátil, como se aprecia en la Figura 3. El gimbal fue fabricado con perfiles de aluminio. La inversión total en el equipo principal (cámara, lente, software (PS), trípode, mástil y gimbal) fue en torno a \$US 4660. Una licencia con actualizaciones limitadas \$US 3500 (2016) para el Metashape Professional, y US\$ 2995 costaría actualmente el PhotoModeler Premium, que es el producto que reemplazó al PS, adquirido en 2009. Un material adicional utilizado fueron cinco bidones de 50 L de agua con los que cargamos la estructura.

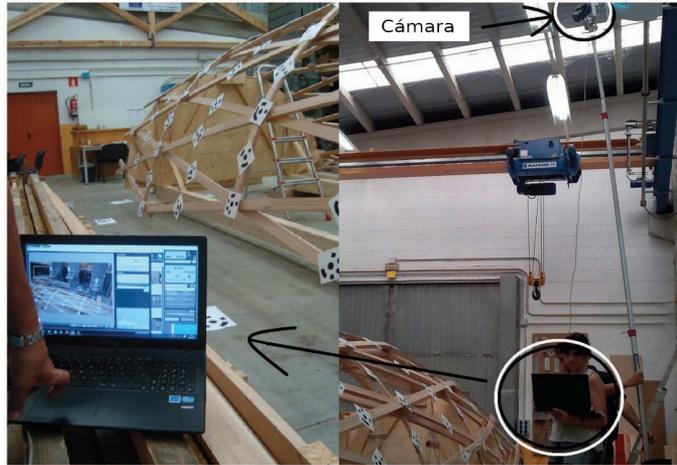


Figura 3: Principal equipo empleado en la sesión fotográfica.

Metodología

El método se compuso de los siguientes pasos:

Calibración de la cámara

La orientación interna de los elementos ópticos es necesaria para determinar los parámetros de la cámara. Se recurrió al propio módulo de calibración de los software fotogramétricos. Este módulo proporciona una hoja de calibración que debe ser impresa y fotografiada siguiendo las instrucciones proporcionadas por el desarrollador del software. Estas fotos son posteriormente procesadas por el módulo de calibración, que determina automáticamente los parámetros internos u orientación interna de la cámara, para corregir las distorsiones que la cámara introduce sobre las fotografías tomadas al objeto que se desea modelar.

Diseño y preparación de la sesión fotográfica

La planificación de la adquisición de fotografías comienza con la inspección visual de la escena. A continuación, se decide las distancias de fotografiado de las distintas trayectorias, así como los parámetros de la cámara (ISO, velocidad de obturación y apertura del diafragma). Se trazaron dos trayectorias alrededor de la estructura, desde el suelo y desde más altura con el mástil (Figura 4a y Figura 4b, respectivamente). Fue fotografiada en dos casos: descargada y bajo máxima carga, consistente en 105 kg de peso suspendidos por cada uno de los cinco nodos centrales, como se muestra en la Figura 4b.

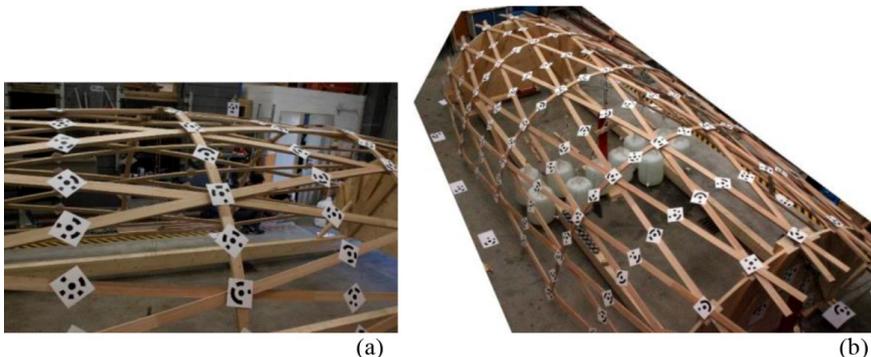


Figura 4: Fotografías de ambas trayectorias: (a) Desde el suelo y (b) Elevada con el mástil.

Se utilizaron dianas codificadas de 14 bits y 150 mm de diámetro, tamaño adecuado para que el software las identifique fácilmente en las fotografías. Para proporcionar una redundancia de datos que favorezca la precisión dimensional del modelo 3D generado, se colocó una cantidad de dianas superior a la mínima necesaria para contribuir a la orientación de las fotografías. Se instalaron sobre los nudos de la estructura, en los puntos intermedios de los elementos de madera entre los nudos, en las caras exteriores de las planchas semicirculares de cada extremo y, para usar como referencia por permanecer inmóviles durante la carga, sobre el suelo y las vigas principales. Algunas dianas fueron adoptadas como puntos de control— además de contribuir a la redundancia de datos—, utilizándose para escalar, trasladar y rotar el modelo 3D. En concreto, se usaron tres dianas para la traslación y rotación, y dos dianas para el escalado. Para evaluar la precisión del modelo 3D, cinco distancias entre diez dianas sobre puntos inmóviles fueron empleadas como puntos de verificación, se compararon las distancias medidas sobre la escena con el flexómetro con las medidas sobre el modelo.

Fotografiado del ensayo durante el proceso de carga

Se realizó una sesión fotográfica para cada estado de carga, descargada y bajo carga máxima. La redundancia de datos respecto a la cantidad de fotografías tiene un gran impacto sobre la densidad de puntos y la precisión del modelo 3D generado. Debe lograrse la mayor cantidad de fotografías posible sin llegar a provocar un tiempo de trabajo humano e informático excesivo. El laboratorio donde se tomaron las fotos contaba con iluminación natural difusa, lo cual es deseable para obtener fotografías en las que el objeto tenga un brillo y color uniformes.

La estructura fue fotografiada a lo largo de dos trayectorias circundantes. En la primera, el operador la fotografió a su altura, caminando alrededor de la estructura. En la segunda, se colocó la cámara en el gimbal, se elevó con el mástil, y de nuevo se fue fotografiando alrededor de la estructura (Figura 4). Para el estado descargado, se tomaron 112 y 53 fotos desde el suelo y desde el mástil, respectivamente. Para el estado cargado, 52 y 41, respectivamente. La distancia mínima entre la cámara y el objeto se encontró entre 3,3 y 3,5 m desde el mástil, entre 1,6 y 1,9 m desde el suelo enfocando los lados largos de la estructura, y entre 3,4 y 3,7 m desde el suelo enfocando los lados cortos de la misma. La distancia máxima fue de entre 3,9 y 4,4 m fotografiando frente a los lados cortos, y de 3,2 y 3,6 m desde los lados largos.

Procesado fotogramétrico

El proceso fotogramétrico es diferente en cada programa. PS detecta automáticamente las dianas en cada foto. Un primer modelo 3D, constituido solamente por los puntos de las dianas y los de las cámaras, lo crea de manera iterativa, determinando las coordenadas de cada diana y de cada cámara. Metashape, además de detectar también las dianas automáticamente, reconoce todos los rasgos discernibles en las fotos de la escena a escala de pixel, calculando sus coordenadas y generando una nube de puntos SfM. Este conjunto de puntos se convirtió en una superficie mediante el proceso de mallado, sobre el cual se puede incorporar un texturizado, extraído del color de los píxeles de las fotografías. Sobre este modelo 3D final se miden las distancias de verificación.

Análisis de la calidad de medida del modelo

La precisión del modelo creado se evaluó por comparación con la escena real a través de cinco distancias entre once puntos distintos. El error relativo se calculó en relación a la longitud de la diagonal de la base de la ELRM de 7696,8 mm. Para que la información de referencia fuese lo más fiable posible, estos once puntos de verificación fueron seleccionados sobre elementos estáticos del suelo alrededor de la estructura. Se adoptó la hipótesis de que el error en la medida sobre dichos puntos fijos es del mismo orden que el error sobre puntos de la estructura que fueron desplazados debido a la carga. Esta es precisamente una ventaja de la fotogrametría: la redundancia y solapamiento entre fotografías, junto con una distancia y ángulo de fotografiado uniformes, llevan a una precisión uniforme sobre la superficie del objeto. Además, cada punto del objeto será computado más fácilmente cuantas más fotografías lo contengan. Se determinó el error de cada una de las cinco distancias, y se computaron los estadísticos básicos correspondientes. Adicionalmente, se examinó el perfil pre- y post-carga de dos elementos, el arco central de la estructura y un listón longitudinal.

RESULTS AND DISCUSSION

La planificación de la red fotogramétrica necesitó 4 días. La estructura permaneció apoyada en el suelo de un laboratorio. Bajo las condiciones de luz dentro del mismo, se estableció una velocidad de obturación de $1/320$ s y un ISO 6,400, con una apertura de lente de $f/5,6$. Cada sesión fotográfica se completó en 10 minutos.

El resultado de la orientación de las fotos en ambos programas, para el caso de carga máxima, se muestra en la Figura 5.

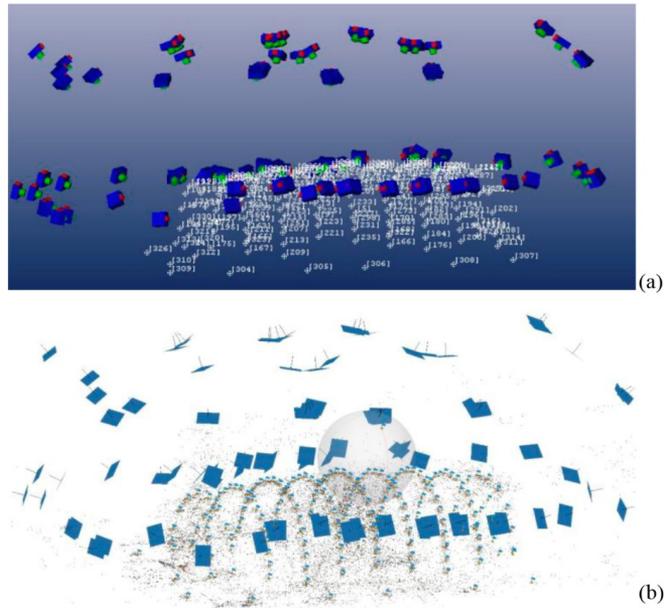


Figura 5: Posiciones de las cámaras y de las dianas codificadas: (a) PhotomodelerScanner; (b) Metashape.

Algunas detecciones de diana en PS fueron incorrectas: unas fueron falsos positivos sobre zonas oscuras de la escena, y otras se detectaron sobre dianas codificadas, pero su punto fue ubicado sobre la corona circular de la diana, en vez de en su centro. Fue necesario corregir estos errores manualmente, pues incrementaban notablemente la precisión del modelo creado. En este trabajo manual se invirtieron pocos minutos, pues PS ya cuenta con una herramienta para corregir la detección sobre coronas circulares: consiste en seleccionar el área de la diana problemática y repetir la detección. En el caso de Metashape, no fue necesaria la corrección o mejora de la detección automática de dianas. El procesado de las imágenes para cada estado de carga y cada software llevó 8 horas.

Las 5 distancias de verificación están trazadas sobre la Figura 6. En esta figura, el elemento A es un listón longitudinal, que conecta las caras semicilíndricas de los extremos de la estructura. El elemento B es el arco transversal central. El resultado de comparar sus mediciones usando flexómetro con las mediciones sobre los modelos 3D se presentan en las Tabla 1 y Tabla 2 para la estructura sin carga y bajo carga máxima, respectivamente.

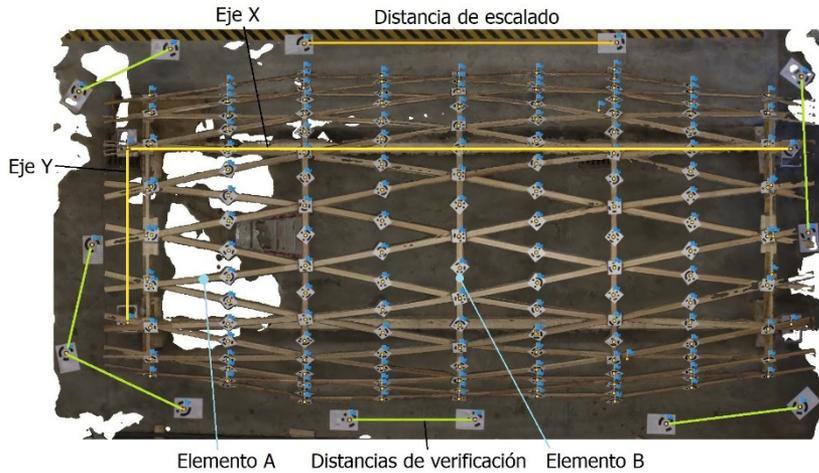


Figura 6: Puntos de la escena que fueron usados para escalar y orientar el modelo, y distancias con las que se evaluó su calidad métrica.

Tabla 1: Análisis de los errores en las mediciones sobre la estructura analizada sin carga.

Pares de puntos	Valor de referencia (mm)	PS			Metashape			
		Distancia (mm)	Error (mm)	Error (%)	Distancia (mm)	Error (mm)	Error absoluto (mm)	Error (%)
309, 310	1166,5	1167,07	0,57	0,07	1166,92	0,42	0,42	0,05
324, 326	1060,0	1060,03	0,03	0,00	1059,63	-0,37	0,37	-0,05
311, 325	1638,0	1638,14	0,14	0,02	1638,30	0,30	0,30	0,04
307, 308	1415,0	1415,07	0,07	0,01	1415,06	0,06	0,06	0,01
305, 306	1317,0	1317,36	0,36	0,05	1316,37	-0,63	0,63	-0,08
304, 309	1358,0	1358,45	0,45	0,06	1357,8	-0,20	0,20	-0,03
Valor medio (mm)			0,27				-0,07	0,33
Desviación estándar (mm)			0,22				0,40	0,20

PS: PhotoModeler Scanner

Tabla 2: Análisis de los errores en las mediciones sobre la estructura analizada bajo carga.

Pares de puntos	Valor de referencia (mm)	PS			Metashape		
		Distancia (mm)	Error (mm)	Error (‰)	Distancia (mm)	Error (mm)	Error (‰)
309, 310	1166,5	1167,21	0,71	0,09	1167,07	0,57	0,07
324, 326	1060	1060,10	0,10	0,01	1060,26	0,26	0,03
311, 325	1638	1638,50	0,50	0,06	1639,31	1,31	0,17
307, 308	1415	1415,50	0,50	0,06	1415,74	0,74	0,10
305, 306	1317	1317,56	0,56	0,07	1317,26	0,26	0,03
304, 309	1358	1358,26	0,26	0,03	1359,07	1,07	0,14
Valor medio (mm)			0,44				0,70
Desviación estándar (mm)			0,20				0,43

PS: PhotoModeler Scanner.

Fue realizado un análisis cualitativo de la deformación de la estructura, examinando los perfiles de dos elementos antes y después de aplicar la carga máxima de dos elementos, A y B, señalados en la Figura 6. En primer lugar, aprovechando la precisión de localización que proporcionan las propias dianas, se presenta en la Figura 7 el desplazamiento total de las mismas. Dado que la flecha en la coordenada Z es la deformación predominante, se muestran los valores negativos.

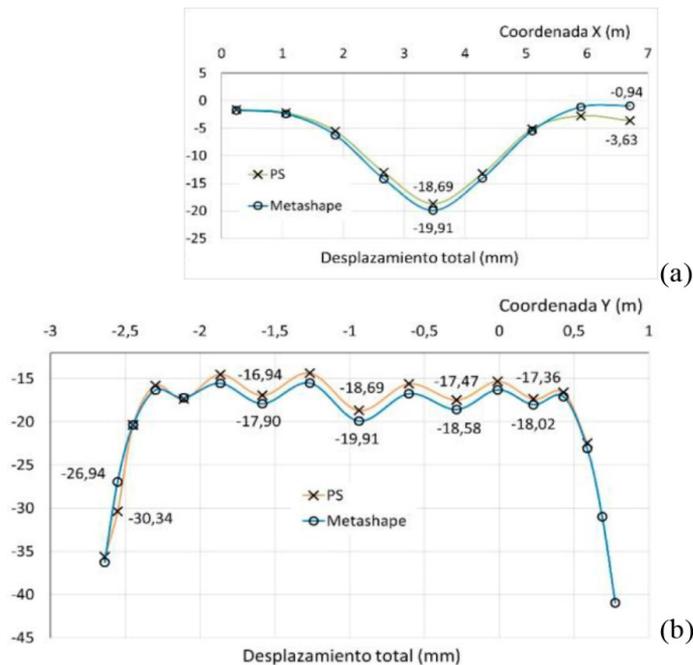


Figura 7: Desplazamiento en el espacio de las dianas en el estado cargado respecto al estado sin carga sobre: (a) El listón longitudinal A, proyectado sobre el eje X; (b) El arco transversal B.

En segundo lugar, se extrajeron las secciones sobre los mismos elementos en el modelo 3D generado en Metashape, mostrado en las Figura 8 y Figura 9. Aunque no están disponibles datos de referencia de las dimensiones acotadas en las figuras, las mostramos con un objetivo estimativo.

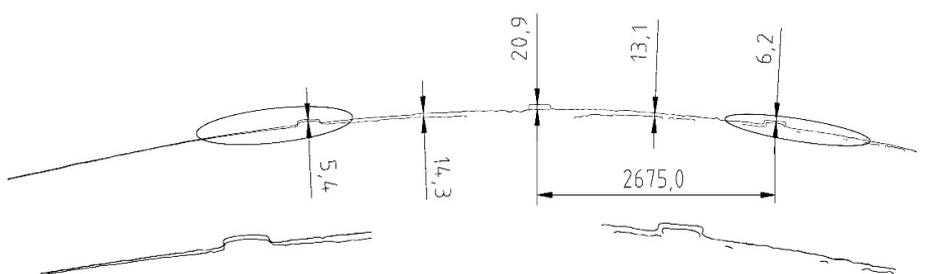


Figura 8: Perfiles de un listón de madera longitudinal para ambos estados de carga (dimensiones en mm).

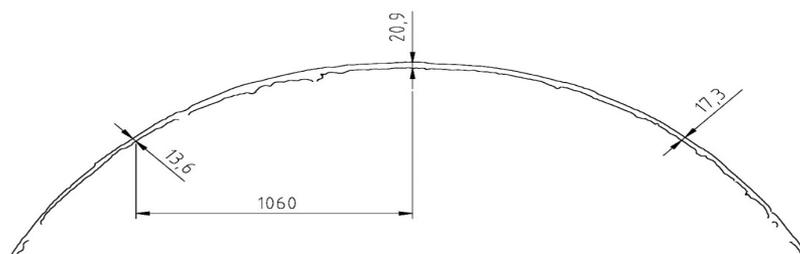


Figura 9: Perfiles del arco central para los dos estados de carga (dimensiones en mm).

Para mostrar cómo el número de fotos afecta a la calidad del modelo, la Figura 10 recoge el aspecto que presentan dos zonas del modelo en el elemento A, el listón, en el extremo izquierdo de la ELRM (donde se encuentra el origen de coordenadas), y en el extremo opuesto. El modelo de la Figura 6 corresponde a la estructura sin carga.



Figura 10: Detalle del modelo sobre elemento A en la estructura cargada en ambos extremos de la estructura.

La planificación y la preparación de este caso de estudio se realizaron en coordinación con el montaje de la estructura. La colocación de dianas se llevó a cabo simultáneamente a la preparación de los pesos muertos. Una vez colocadas, se realizó la sesión fotográfica durante 2 horas. El operador de la cámara tan sólo debía procurar que no se interpusiesen personas entre la cámara y el objeto. Posteriormente, la estructura fue cargada en cuestión de minutos, y volvieron a invertirse 2 horas en la nueva sesión fotográfica.

El mástil fue una herramienta suficiente para diseñar una red fotogramétrica adecuada en torno a la estructura. Toda la superficie exterior fue capturada por la cámara. Una herramienta sencilla como el mástil con un gimbal resultó efectiva y más económica que herramientas más avanzadas. El gran interés en fotogrametría por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV) (Liu *et al.* 2017) incluye, en menor medida, espacios interiores (Caroti *et al.* 2018, Lieret *et al.* 2021), pero la cámara en estos casos debe ser muy ligera, aspecto del que depende su calidad y, en consecuencia, el resultado final. El mástil es además más seguro para el operador que escaleras o plataformas elevadoras o cestas portaoperarios elevadas mediante puente grúa.

Se tomaron 165 fotografías sobre la estructura sin carga, y 93 bajo carga. El tiempo de computación de todas ellas no superó un día. En ambos casos resultaron suficientes para estimar las coordenadas de las dianas. Una buena redundancia de imágenes se logró con las 165 fotos en pre-carga, mientras que las 93 bajo carga fueron insuficientes para modelar toda la superficie exterior de los listones de madera, como se aprecia en la Figura 10.

Los errores reportados en las Tabla 1 y Tabla 2 validan los respectivos modelos 3D generados por fotogrametría, aunque hay que tener en cuenta que la fiabilidad de los modelos generados dependerá también de la tolerancia de ruido adoptada por el algoritmo que caracterice parámetros estructurales (Casero *et al.* 2020). Pese a que el número de puntos y distancias de control no es elevado, los resultados obtenidos muestran que ambos softwares logran una calidad de medida similar, con una exactitud (0,70 - 0,072 mm) del orden de entre 1:10995 y 1:106900 respecto a la diagonal (7696,8 mm) de la base del objeto.

Para el estado sin carga, PS y Metashape proporcionaron un error máximo en valor absoluto similar: 0,57 mm 0,63 mm, respectivamente. Por lo que se refiere a la exactitud, Metashape (-0,072 mm) fue muy superior a la de PS (0,27 mm), mientras que la precisión de PS (0,22 mm) sobrepasó a la conseguida con MS (0,40 mm). Para el estado con carga, PS proporciona resultados ligeramente mejores tanto en error absoluto máximo (0,71 mm < 1,31 mm), como en exactitud (0,44 mm < 0,70 mm) y precisión (0,20 mm < 0,43 mm). Cabría esperar unos resultados claramente mejores para Metashape y, sin embargo, no es así, probablemente porque el número de fotografías disponibles, tanto con la estructura sin carga como cargada, está lejos del óptimo necesario para este software. Los programas fotogramétricos SfM, como Metashape, se basan en el procesamiento de mayor cantidad de fotografías tomadas con menor separación y mayor solapamiento que las disponibles para el presente estudio, realizadas para optimizar el correcto trabajo de PS.

Los desplazamientos totales medidos sobre las dianas en los elementos A y B casi convergen en ambos programas, como se aprecia en la Figura 7. Sobre el elemento A, el promedio de las diferencias entre PS y Metashape es de 0,47 mm. Sobre el elemento B, este promedio es de sólo 0,05 mm. En la Figura 7a se aprecia una menor simetría en la gráfica reportada por PS. La razón puede deberse al modo en el que cada software genera el modelo: PS lo hace en base a la localización de las dianas, mientras que Metashape, como programa SfM, utiliza toda parte de cada foto que pueda ser identificable en otras fotos, usando la identificación de dianas

de manera complementaria. La cantidad de fotos en estado cargado, especialmente en la mitad derecha de la estructura, afectaría a la generación del modelo en PS.

En ambos perfiles extraídos de la nube de puntos de Metashape (Figura 8 y Figura 9) se constata que el número de fotografías sobre la estructura cargada fue insuficiente para obtener una superficie modelada continua, sin huecos. Se usaron 93 fotos para dicho estado de carga, frente a las 165 del estado descargado, con las que sí se aprecia en la Figura 8 un perfil continuo. En las distancias en las direcciones normales al listón de madera mostradas en la figura, se aprecia un patrón coherente: el desplazamiento máximo se da en el punto central, y decrece según el punto de medida se aleja del centro. La mayor deformación en un lado puede explicarse debido a la heterogeneidad de la madera y a imperfecciones de montaje, resultando una rigidez no simétrica de la estructura.

CONCLUSIONES

La regularidad en la distancia de fotografiado proporciona un modelo 3D del objeto con una precisión uniforme. Los programas modernos de fotogrametría SfM como el Metashape ofrecen resultados muy prometedores de cara a la obtención de la deformada de toda la superficie fotografiada completa, realizable tanto sobre la cara interior como la cara exterior de las estructuras laminares, resultado muy complejo de obtener mediante otras técnicas.

Otra ventaja de los programas SfM, basados en el procesamiento de grandes cantidades de fotografías con gran solapamiento, es que no es necesario colocar dianas en la escena para obtener nubes de puntos densas de la estructura. Esto, unido al reconocimiento automatizado de rasgos en dichas nubes de puntos, permitirá obtener una información más completa del ensayo. Será necesario determinar la calidad de medida de dichas nubes de puntos, diferente de la que se consigue mediante dianas.

El presente trabajo pone de manifiesto las posibilidades que proporcionan los nuevos softwares fotogramétricos, que permiten obtener mediciones adicionales con fotografías realizadas en ensayos ejecutados años atrás y procesadas, por segunda vez, con un nuevo software. La evolución de la calidad de esas nuevas medidas va ligada a la fiabilidad en la determinación de nubes de puntos de gran densidad. Los avances en estos aspectos posibilitarán también la estimación cada vez más precisa y exacta, mediante fotogrametría de bajo coste, de la posición de un elevado número de puntos, tanto del eje longitudinal como de las diferentes secciones transversales de cada listón de las ELRM. Esta información geométrica es un aspecto clave al validar modelos de cálculo numéricos, como los obtenidos mediante el método de elementos finitos.

Conviene remarcar la idoneidad de realizar una toma de fotografías con un número de fotos, distancia y posición de fotografiado concienzudamente planificados y alta redundancia. El solapamiento entre fotografías debe ser elevado, no solamente para obtener un modelo 3D fiable en el presente, sino también previendo la aparición de un nuevo software con prestaciones más avanzadas que permita obtener un mayor rendimiento de las fotografías sin tener que repetir los ensayos. De hecho, una vez que las estructuras están en uso, la conservación de las fotografías es lo que posibilita profundizar el análisis de deformaciones sobre ellas.

DECLARACION DE AUTORIAS

J. O-S.: Conceptualización, metodología, investigación, redacción – revisión y edición. M. G-D.: Supervisión, adquisición de fondos. G. B.: Redacción – borrador original, Software, análisis formal, visualización. A. J. L-B.: Investigación, conceptualización, redacción – revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco de proyecto de investigación EcoTimberCell: Sistemas estructurales celulares ecológicos para una edificación modelo de mitigación de cambio climático y puesta en valor del sector forestal (2017-PI177) Ref.LIFE17 CCM/ES/000074 y del proyecto de I+D+i PID2020-112954RA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Además, está ligado a las Ayudas para la consolidación y estructuración de unidades de investigación competitivas y otras acciones de fomento en las universidades del Sistema Universitario de Galicia, Ref. ED431B 2020/25. Agradecemos a María José

Rodríguez González su colaboración en las tareas del estudio. Este trabajo fue posible gracias también a la Agencia Estatal de Investigación (AEI), ya que el Dr. Bastos fue contratado a través de la beca postdoctoral Juan de la Cierva – Formación (FJC2019-039743-I/AEI/10.13039/501100011033).

REFERENCIAS

- Abbaszadeh, S.; Rastiveis, H. 2017.** A comparison of close-range photogrammetry using a non-professional camera with field surveying for volume estimation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-4/W4: 1-4. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-1-2017>
- AGISOFT LLC. 2021.** Agisoft. Metashape: Rusia. <https://www.agisoft.com>
- Akinade, B.A. 2020.** Investigation of the accuracy of photogrammetric point determination using amateur/non-metric cameras. *World Scientific News* 145: 298-312. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.psjd-c06c1b48-eaae-4cb8-8cb7-97b0ba4117a9>
- Albert, J.; Maas, H.G.; Schade, A.; Schwarz, W. 2002.** Pilot studies on photogrammetric bridge deformation measurement. https://www.researchgate.net/profile/Hans-Gerd-Maas/publication/334786265_Pilot_studies_on_photogrammetric_bridge_deformation_measurement/links/5d4185814585153e59309b28/Pilot-studies-on-photogrammetric-bridge-deformation-measurement.pdf?origin=publication
- Armesto, J.; Lubowiecka, I.; Ordóñez, C.; Rial, F.I. 2009.** FEM modeling of structures based on close range digital photogrammetry. *Automation in Construction* 18(5): 559-569. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.11.006>
- Adriaenssens, S.; Block, P.; Veenendaal, D.; Williams, C. 2014.** Shell structures for architecture: Form finding and optimization. Routledge: Londres, Reino Unido. 340 p. <https://doi.org/10.4324/9781315849270>
- Caroti, G.; Piemonte, A.; Zaragoza, I.M.E.; Brambilla, G. 2018.** Indoor photogrammetry using UAVs with protective structures: Issues and precision tests. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42(3W4): 137-142. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-137-2018>
- Casero, M., Covián, E.; González, A. 2020.** Regularization methods applied to noisy response from beams under static loading. *Journal of Engineering Mechanics* 146(6): e4020038. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001765)
- Chilton, J.; Tang, G. 2016.** *Timber gridshells: Architecture, structure and craft*. Routledge: Londres, Reino Unido. <https://doi.org/10.4324/9781315773872>
- Eos Systems Scanner. 2018.** PhotoModeler Scanner. Vancouver BC, Canada. <https://www.photomodeler.com/products/scanner>
- EUR-Lex. European Union Law. 2014.** Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (recast). EU: Luxembourg. <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/32/2015-01-27>
- Fraser, C.S. 1997.** Innovations in automation for vision metrology systems. *The Photogrammetric Record* 15(90): 901-911. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00099>
- Guindos, P.; Ortiz, J. 2013.** The utility of low-cost photogrammetry for stiffness analysis and finite-element validation of wood with knots in bending. *Biosystems Engineering* 114(2): 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.11.002>
- Harris, R.; Dickson, M.; Kelly, O. 2004.** The use of timber gridshells for long span structures. En: Proceedings of the 8th International Conference on Timber Engineering. Lahti, Finland. <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/the-use-of-timber-gridshells-for-long-span-structures>

Harris, R.; Gusinde, B.; Roynon, J. 2012. Design and construction of the pods sports academy, Scunthorpe, England. En: World Conference of Timber Engineering 2012. pp. 510-517). <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=84871979269&partnerID=8YFLogxK>

Hernández, E.L.; Gengnagel, C.; Sechelmann, S.; Rörig, T. 2011. On the materiality and structural behaviour of highly-elastic gridshell structures. En: Gengnagel, C.; Kilian, A.; Palz, N.; Scheurer, F. (Eds.). *Computational Design Modeling*. Springer-Verlag: Heidelberg, Alemania. pp 123-135. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23435-4_15

Honório, L.M.; Pinto, M.F.; Hillesheim, M.J.; de Araújo, F.C.; Santos, A.B.; Soares, D. 2021. Photogrammetric process to monitor stress fields inside structural systems. *Sensors* 21(12): e4023. <https://doi.org/10.3390/s21124023>

Jiang, R.; Jáuregui, D.V.; White, K.R. 2008. Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement* 41(8): 823-834. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2007.12.005>

Lara-Bocanegra, A.J.; Majano-Majano, A.; Arriaga, F.; Guaita, M. 2020a. Eucalyptus globulus finger jointed solid timber and glued laminated timber with superior mechanical properties: Characterisation and application in strained gridshells. *Construction and Building Materials* 265: e120355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120355>

Lara-Bocanegra, A.J.; Roig, A.; Majano-Majano, A.; Guaita, M. 2020b. Innovative design and construction of a permanent elastic timber gridshell. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*. 173(5): 352-362. <https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00083>

Lara-Bocanegra, A.J.; Majano-Majano, A.; Ortiz, J.; Guaita, M. 2022. Structural analysis and form-finding of triaxial elastic timber gridshells considering interlayer slips: Numerical modelling and full-scale test. *Applied Sciences* 12(11): e5335. <https://doi.org/10.3390/app12115335>

Lewis, B. 2011. Centre Pompidou-Metz: Engineering the roof. *The Structural Engineer: journal of the Institution of Structural Engineer* 89(18): 20-26. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3734367>

Lieret, M.; Kogan, V.; Hofmann, C.; Franke, J. 2021. Automated exploration, capture and photogrammetric reconstruction of interiors using an autonomous unmanned aircraft. En: 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation - ICMA 2021. Takamatsu, Japón. pp. 301-306. <https://doi.org/10.1109/ICMA52036.2021.9512707>

Liu, L.; Sun, M.; Ren, X.; Liu, X.; Liu, L.; Zheng, H.; Li, X. 2017. Review on methods of 3D reconstruction from uav image sequences. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* 53(6): 1165-1178. <http://xbna.pku.edu.cn/EN/10.13209/j.0479-8023.2017.052>

Martínez, S.; Ortiz, J.; Gil, M. 2015. Geometric documentation of historical pavements using automated digital photogrammetry and high-density reconstruction algorithms. *Journal of Archaeological Science* 53: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.10.003>

Martínez, S.; Ortiz, J.; Gil, M.L.; Rego, M.T. 2013. Recording Complex Structures Using Close Range Photogrammetry: The Cathedral of Santiago de Compostela. *The Photogrammetric Record* 28(144): 375-395. <https://doi.org/10.1111/phor.12040>

Masuda, M.; Iwabuchi, A.; Murata, K. 1999. Analyses of fracture criteria using image correlation method. En: Boström, L. (Ed.). First RILEM Symposium on Timber Engineering. RILEM Publications SARL, Marne la Vallée Cedex 2, Francia. pp. 151-160. https://www.rilem.net/publication/publication/13?id_papier=1358

Mills, J.; Barber, D. 2004. Geomatics techniques for structural surveying. *Journal of Surveying Engineering* 130(2): 56-64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:2\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:2(56))

Mohamed, A.; Deng, Y.; Zhang, H.; Wong, S.H.F.; Uheida, K.; Zhang, Y.X.; Zhu, M.C.; Lehmann, M.; Quan, Y. 2021. Photogrammetric evaluation of shear modulus of glulam timber using torsion test method and dual stereo vision system. *European Journal of Wood and Wood Products* 79(5): 1209-1223. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01729-8>

Otto, F.; Henniecke, J.; Matsushita, K. 1974. IL 10 - Gitterschalen. Grid Shells. Institut für leichte Flächentragwerke. Universidad de Stuttgart, Stuttgart, Alemania. ISBN-13: 9783782820103

Park, S.W.; Park, H.S.; Kim, J.H.; Adeli, H. 2015. 3D displacement measurement model for health monitoring of structures using a motion capture system. *Measurement* 59: 352-362. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.063>

Peña Villasenín, S. 2020. Aplicaciones de la fotogrametría de bajo coste al estudio de patrimonio arqueológico y arquitectónico. Ph.D. Thesis, Universidad de Santiago de Compostela, EPSI, Lugo, España. <http://hdl.handle.net/10347/20867>

Remondino, F.; El-Hakim, S. 2006. Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record* 21(115): 269-291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>

RibbonSoft GmbH. 2018. QCAD - 2D CAD for Windows, Linux and Mac. Sarnen, Suiza. <https://www.qcad.org/en>

Rombouts, J.; Lombaert, G.; De Laet, L.; Schevenels, M. 2019. A novel shape optimization approach for strained gridshells: Design and construction of a simply supported gridshell. *Engineering Structures* 192: 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.101>

Scaioni, M.; Barazzetti, L.; Giussani, A.; Previtali, M.; Roncoroni, F.; Alba, M.I. 2014. Photogrammetric techniques for monitoring tunnel deformation. *Earth Science Informatics* 7(2): 83-95. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0152-8>

The Document Foundation. 2014. LibreOffice. Berlín, Alemania. <https://www.libreoffice.org>

Uheida, K.; Deng, Y.; Zhang, H.; Galuppi, L.; Gao, J.; Xie, L.; Huang, S.; Qin, X.; Wong, S.H.F.; Guo, J.; Zhang, G.; Mohamed, A. 2021. Determining equivalent-sectional shear modulus in torsion tests for laminated glass beams using photogrammetry method. *Composite Structures* 276: e114572. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114572>

Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Williams, N.; Bohnenberger, S.; Cherrey, J. 2014. A system for collaborative design on timber gridshells. In Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2014). The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA): Kyoto, Japón. pp. 441-450. https://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2014_124.content.pdf

Xiang, S.; Cheng, B.; Zou, L.; Kookalani, S. 2020. An integrated approach of form finding and construction simulation for glass fiber-reinforced polymer elastic gridshells. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 29(5): e1698. <https://doi.org/10.1002/tal.1698>

Zhao, X.; Li, Q. 2017. A review on measurement technology for structural testing in civil engineering. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology* 49(1): 48-55. <https://doi.org/10.15986/j.1006-7930.2017.01.008>

Zou, J.; Meng, L. 2020. Design of a new coded target with large coding capacity for close-range photogrammetry and research on recognition algorithm. *IEEE Access* 8: 220285-220292. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043044>