

TÉCNICA DE MOIRÉ APLICADA AL ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN EL BAMBÚ *GUADUA*

MOIRÉ TECHNIQUE APPLIED IN COMPRESSION STRESS OF BAMBOO GUADUA

*Antônio Ludovico Beraldo¹; Daniel Albiero¹;
Antonio José da Silva Maciel¹; Inácio Maria Dal Fabbro¹; Silvestre Rodrigues¹.*

RESUMEN

El bambú es considerado como una materia prima muy importante para los países en vías de desarrollo, pues combina levedad con una elevada resistencia mecánica. Hasta ahora no se conoce adecuadamente el comportamiento del material cuando es sometido a los ensayos de caracterización mecánica. En este trabajo se buscó evaluar probetas de bambú (*Guadua angustifolia*) sometidas al ensayo de compresión simple. Se utilizó la técnica de *moiré* de sombra para mapear las deformaciones de las probetas en función de la cantidad de nudos presentes en ella (0, 1 ó 2). Los resultados obtenidos evidenciaron la adecuación de la técnica utilizada, permitiendo observar la distribución de las líneas de iso-deformación en el bambú.

Palabras claves: bambú, guadua, moiré

ABSTRACT

Bamboo is considered an important raw material in developing countries because its physical characteristics associate lightness with high mechanical resistance. However its behavior obtained from mechanical tests is not yet well defined. This research work had the objective of evaluating bamboo (*Guadua angustifolia*) testing specimens under simple uniaxial compression loading. Shadow *moiré* optical methods had been employed to generate deformation mapping as function of knots (0, 1 or 2). Obtained results indicate that the technique is well adequate in generating iso-deformation contour lines in bamboo specimens.

Keywords: bamboo, guadua, moiré

¹Profesores de la Facultad de Ingeniería Agrícola de Campinas – UNICAMP- CEP 13083-875 Campinas – SP – Brasil
Autor para correspondencia: daniel.albiero@agr.unicamp.br
Recibido: 06.09. 2006. Aceptado: 02.10. 2007

INTRODUCCIÓN

El bambú es considerado un material anisótropo, pues su comportamiento depende de forma significativa de la dirección anatómica considerada. Además de esto, otros factores también son responsables por la variabilidad en las características del bambú: especie, edad del tallo, presencia y cantidad de los nudos, posición a lo largo del tallo y contenido de humedad, entre otras (www.brasilis.pro.br).

En términos de ingeniería, se observa con interés la posibilidad de utilizar el bambú de manera estructural, en columnas, vigas y armaduras. Mientras que, poco se conoce, todavía, sobre la distribución de las tensiones durante una determinada condición de carga, principalmente porque la obtención de las deformaciones se presenta como una tarea complicada, siendo el nudo el mayor responsable por la concentración de las tensiones.

Una alternativa para estudiar el campo de las deformaciones en un material sometido a sollicitación es la técnica de *Moiré*.

La luz se propaga en forma de ondas, siendo descrita matemáticamente por una función de la onda (Saleh y Teich 1991). Cuando dos o más ondas luminosas coherentes con la misma frecuencia y amplitud se encuentran simultáneamente en la misma región del espacio, la función de la onda total es la suma de las ondas, y debido a la interferencia su intensidad depende de la relación de fases entre las ondas superpuestas (Saleh y Teich 1991). Esta interferencia puede generar un patrón de franjas, oscuras y claras, bajo las suposiciones que la geometría y la malla son correctas. Según Post et al. (1994) franjas *Moiré* de excelente visibilidad ocurren cuando están presentes las siguientes condiciones: el ancho de las barras y los espacios en la mallas son iguales; la malla es bien definida a través de los contornos de las barras; el ángulo de intersección entre la fuente de luz y la vista del observador es pequeño.

Cuando se mira a través de dos pantallas o mallas superpuestas, se nota la formación de patrones o franjas, que son el resultado de la combinación de las líneas de esas pantallas. Este hecho es llamado fenómeno o efecto de *Moiré*; las franjas producidas son llamadas de patrones o franjas de *Moiré*. Cloud, 1988; citó Tollenar que en 1945, estudiando ese fenómeno descubrió que las franjas de *Moiré* son en verdad amplificadoras de desplazamientos, y que podrían dar una alta sensibilidad a mediciones de movimientos relativos. Hu (2001) afirmó que las técnicas de *Moiré* (de Sombra y Proyección), son las técnicas perfilométricas más utilizadas debido, principalmente, a su simplicidad y rapidez de medición, y por esto ha sido centro de frecuentes estudios sirviendo para varios tipos de aplicaciones.

Los patrones *Moiré* pueden ser definidos como la superposición de dos ondas planas en ángulo entre sus direcciones de propagación. En las regiones en que las dos ondas están en fase, ocurre una interferencia constructiva, resultando en franjas claras y donde ellas están fuera de fase se generan franjas oscuras, debido a la interferencia destructiva (Malacara, 1992). Esta aproximación es derivada de la interferencia entre los patrones de franjas a través del uso de relaciones usualmente llamadas de modelos de transición inicial (Pisarev y Balavov 2001).

En este trabajo serán omitidas las características electromagnéticas y cuánticas de la luz, por lo que, ésta será tratada apenas por la teoría ondulatoria que es suficiente para explicar los fenómenos descritos. El objetivo de este trabajo es evaluar usando la técnica de *Moiré*, los esfuerzos de compresión en probetas de bambú (*Guadua angustifolia*) y evaluar la metodología de *Moiré* de sombra para la determinación de la distribución de los esfuerzos de compresión en probetas de bambú.

MATERIALES Y MÉTODOS

La fase experimental de este trabajo fue realizada en el Laboratorio de Materiales y Estructuras, de la Facultad de Ingeniería Agrícola, de la Universidad Estatal de Campinas, ciudad de Campinas, São Paulo, Brasil. El montaje experimental para la obtención de las franjas de Moiré es mostrado en la Figura 1, tratándose básicamente de una fuente de luz, una cámara fotográfica digital y de una malla de barras y espacios, adecuadamente dispuestos.

En este experimento fue utilizada la técnica de *Moiré* de sombra. Takasaki (1970) utilizó la sobreposición de una malla sobre su propia sombra (*Moiré* de sombra) para medir el relieve de objetos y personas. En este caso las franjas de *Moiré* formadas fueron constituidas por un conjunto de puntos de la misma cota, semejantes a las curvas de nivel de mapas topográficos (Figuras 2, 3 y 4).

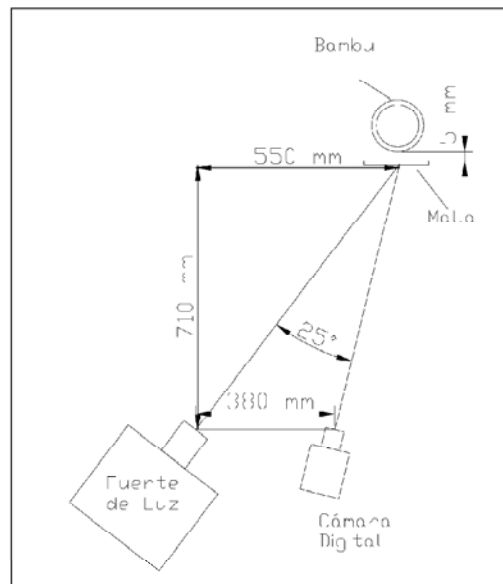


Figura 1. Montaje experimental para obtención de las franjas de *Moiré*.

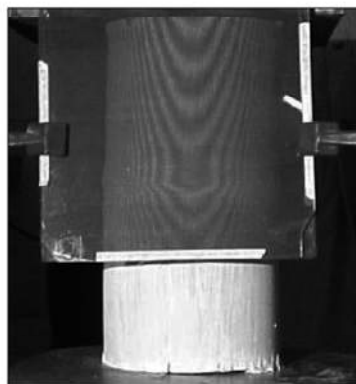


Figura 2. Curvas de nivel generadas por franjas de *Moiré* sobre probetas de ensayo de bambú (*Guadua angustifolia*), con un nudo en la región central.

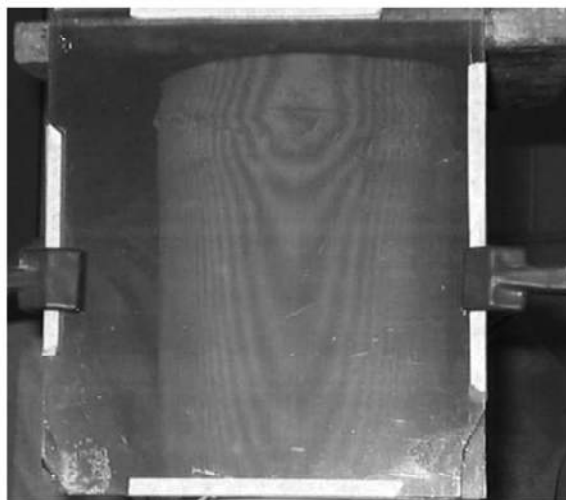


Figura 3. Curvas de nivel generadas por franjas de *Moiré* sobre probetas de ensayo de bambú (*Guadua angustifolia*), con nudo en el extremo superior.

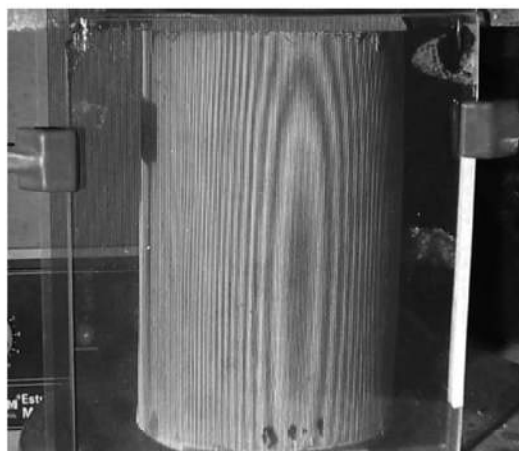


Figura 4. Curvas de nivel generadas por franjas de *Moiré* sobre probetas de ensayo de bambú (*Guadua angustifolia*), sin nudo.

Las muestras fueron sometidas al ensayo no destructivo por ultrasonido. Se utilizó un equipamiento Ultrasonic Tester BP-7, de marca Steinkamp, disponiéndose de sensores piezoeléctricos, con secciones exponenciales, de frecuencia de resonancia de 45 kHz. Ese dispositivo permite, para el caso de materiales de pequeño espesor, como es el caso de los tallos del bambú *Guadua*, colocar los sensores en regiones determinadas de la muestra. En este caso, se buscó evaluar por ultrasonido la modificación en la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, cuando los sensores son posicionados en tres regiones a lo largo del espesor de la pared (interna, mediana y externa). Los tallos fueron ensayados en dos condiciones de humedad: verde y seco al aire (humedad en torno de 12%).

Seguidamente, las probetas de bambú (*Guadua angustifolia*) fueron sometidas a pequeñas cargas de compresión, siendo sus dimensiones indicadas en la Tabla 1. De estas probetas, tres presentaban nudos en las extremidades (B3i), tres presentaban nudos en la región central del inter-nudo (B2i) y tres no presentaban nudos (B1i). Para cada probeta fueron obtenidas diez fotos digitales relativas a diez niveles de esfuerzos sobre la muestra, para efecto de estabilización de las probetas fue realizada una pre-carga de 870 kgf, y a partir de este valor fueron realizadas fotos digitales para seis niveles de esfuerzos, Tabla 2. Las cuatro primeras fotos no fueron aprovechadas en el experimento, sirviendo apenas para que ocurriese la estabilización de la muestra, visto que las bases de la misma no estaban perfectamente paralelas. El experimento fue conducido para dos condiciones de humedad: tallos recién-cortados (saturados) y tallos secos al aire (humedad en torno de 12%).

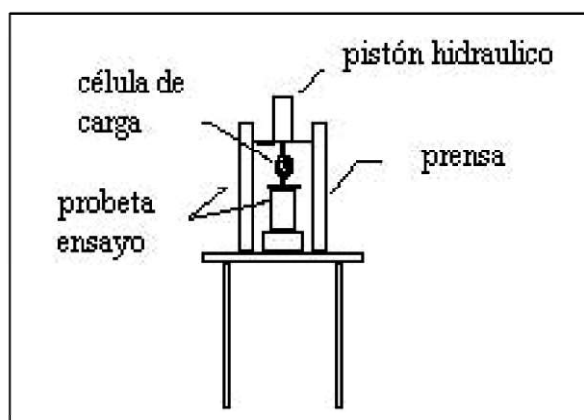


Figura 5. Montaje experimental para los ensayos de compresión.

Tabla 1. Dimensiones de los probetas de ensayo de *G. angustifolia*.

Probetas de ensayo	Espesor (mm) ± 0,005 mm	Altura (mm) ± 0,005 mm	Diámetro Externo (mm) ± 0,005 mm
B11	18,39	147,10	101,90
B12	18,07	169,91	101,44
B13	17,13	163,54	103,23
B21	14,03	198,85	101,98
B22	14,42	199,89	101,58
B23	14,74	204,43	99,98
B31	19,26	205,43	99,65
B32	19,65	196,29	99,42
B33	19,35	202,66	99,63

Tabla 2. Esfuerzos de compresión aplicados a los probetas de ensayo de *G. angustifolia*.

Probeta n°	Compresión (kPa)	Probeta n°	Compresión (kPa)	Probeta n°	Compresión (kPa)
B11	1304	B21	1302	B31	1364
	1565		1563		1637
	1825		1823		1909
	2087		2083		2182
	2348		2344		2455
	2609		2605		2728
B12	1316	B22	1313	B32	1370
	1580		1575		1645
	1842		1837		1918
	2106		2100		2192
	2369		2363		2467
	2633		2626		2741
B13	1271	B23	1355	B33	1364
	1525		1626		1638
	1779		1896		1910
	2033		2168		2183
	2288		2439		2456
	2542		2710		2729

Todas las fotos fueron obtenidas en formato JPEG, y sufrieron un tratamiento de transformación para BMP en tonos de grises, siendo convertidas por el software GIMP, donde el nivel 0 fue definido como el color negro y el nivel 255 para el color blanco.

Cada conjunto de fotos de las probetas fueron procesadas por el software IDRISI, con el auxilio del cual fueron retirados todos los ruidos y errores de los datos, a través de filtros específicos. Fue utilizado el método de procesamiento Substracción de Campo Entero, definido por Post *et al.* (1994), donde se efectuó la substracción píxel a píxel de una foto con un nivel de carga X_i de una otra foto de nivel X_{i+1} . Este método es usado para determinar la deformación sufrida por la muestra que ocurre entre dos diferentes niveles de carga.

El equipamiento utilizado en este experimento fue:

- 1-Máquina Fotográfica Digital Mavica, de 800 kpxels de resolución.
- 2-Prensa Solotest de 5 Toneladas.
- 3-Cuadrícula con separación de 0.4 mm y espesor de la barra de 0.4 mm
- 4-Retroproyector 150 W de potencia.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 6 se presentan los valores medios de la velocidad de propagación de la onda ultrasonica a través de los probetas de ensayo de bambú *G. angustifolia* (B1 sin nudo; B2 con nudo central; B3 con nudo en el extremo superior). Los resultados permiten evidenciar la sensibilidad del método de ultrasonido para evaluar el efecto de la distribución anatómica de los elementos constituyentes del tallo. El ejemplo del hormigón armado, constituido por una matriz reforzada con barras de acero, y bambú, también presenta un refuerzo debido a la presencia del conjunto de fibras: cuanto más próximo de las capas externas del tallo mayor es la concentración del grupo de fibras y, como se observa, mayor es la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. También se puede observar, como ejemplo de lo que ocurre con la madera, que la velocidad de propagación aumenta a medida que disminuye el contenido de humedad del tallo.

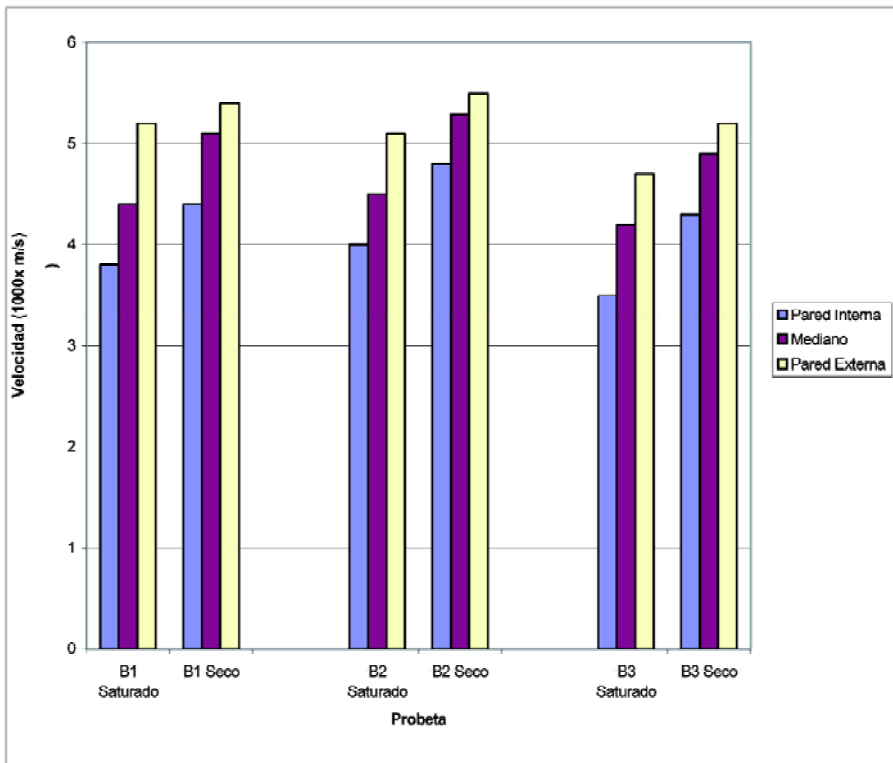


Figura 6 - Efecto de la posición analizada y del contenido de humedad en la velocidad de propagación de la onda ultrasónica través de tallos de *G. angustifolia*.

El resultado obtenido por el procesamiento de las imágenes, puede ser observado en las Figuras 7 hasta la 15. En los mapas de isodeformaciones, las regiones de igual deformación son identificadas por los grupos de píxeles del mismo color.

Tallos saturados

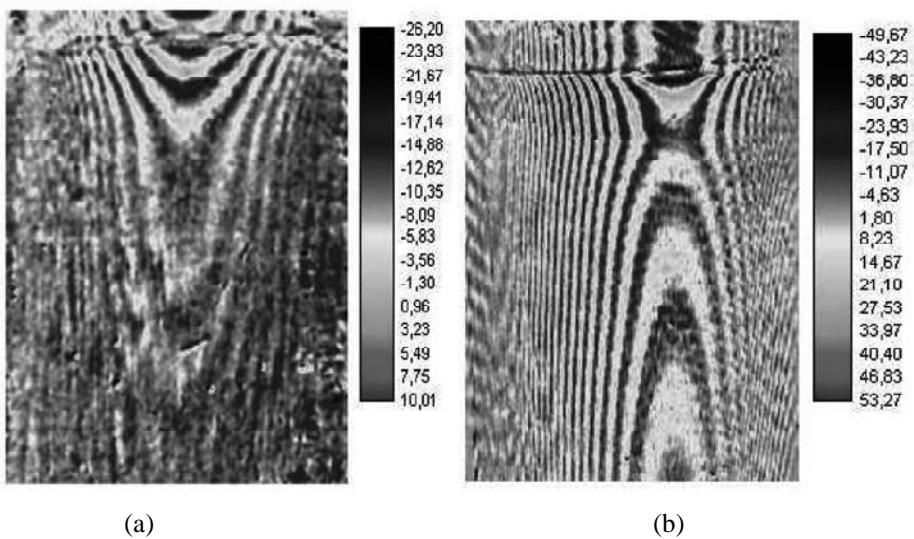


Figura 7 – Mapas de isodeformaciones de la muestra B31, con nudo en el extremo superior: a) Saturado; b) Seco.

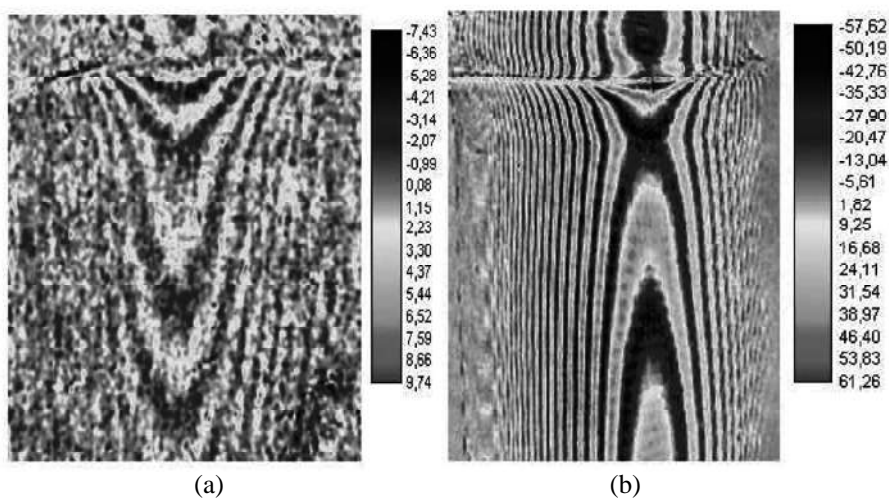


Figura 8– Mapas de isodeformaciones de la muestra B32, con nudo en el extremo superior:
a) Saturado; b) Seco.

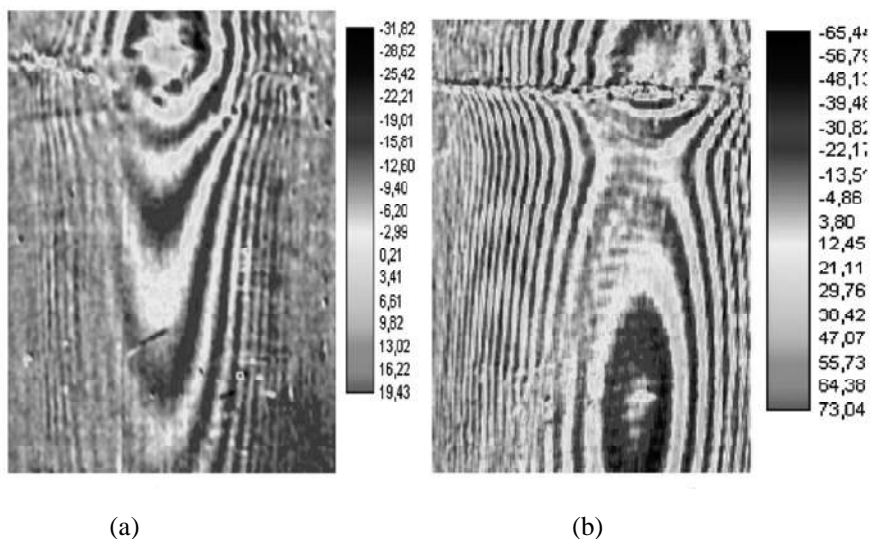


Figura 9– Mapas de isodeformaciones de la muestra B33, con nudo en el extremo superior:
a) Saturado; b) Seco.

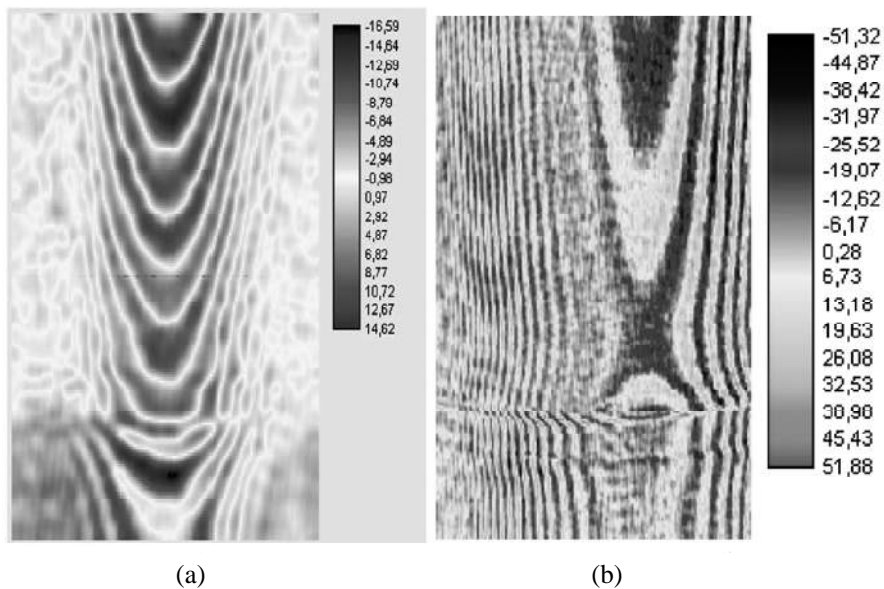


Figura 10 – Mapas de isodeformaciones de la muestra B21, con nudo central: a) Saturado; b) Seco.

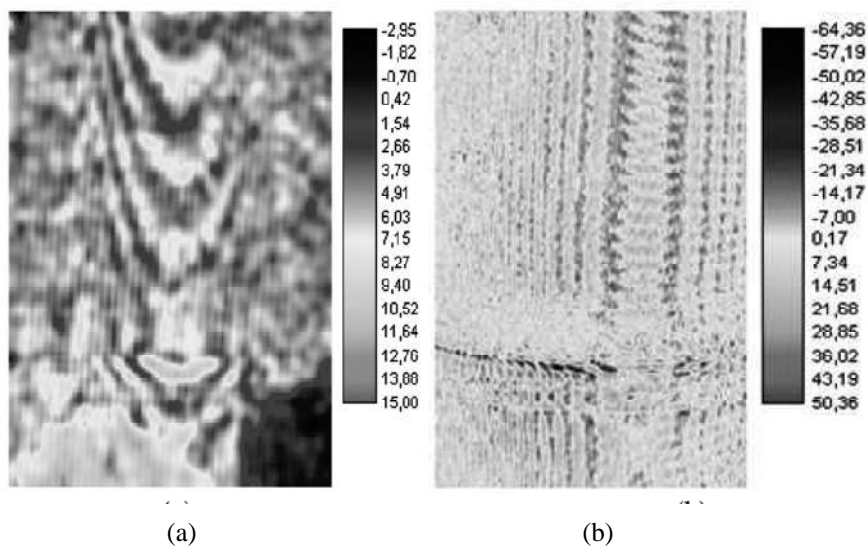


Figura 11 - Mapas de isodeformaciones de la muestra B22, con nudo central: a) Saturado; b) Seco.

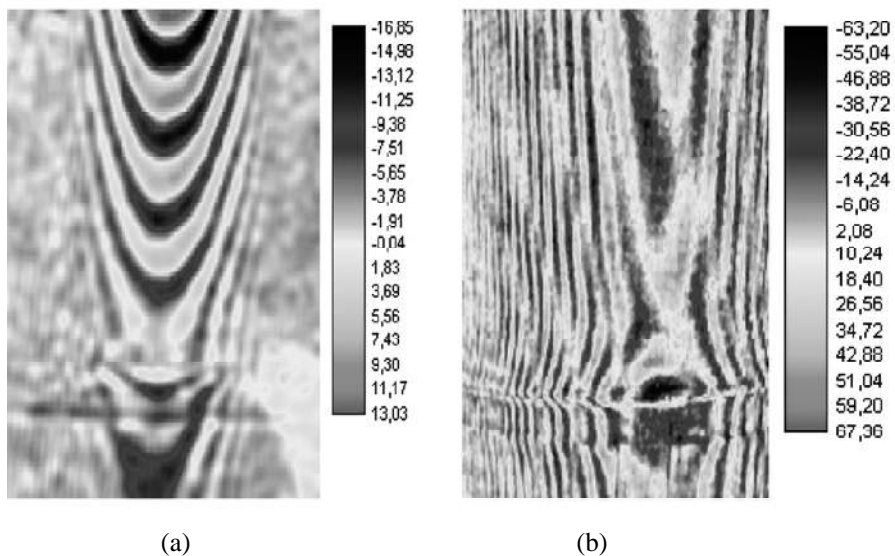


Figura 12 - Mapas de isodeformaciones de la muestra B23, con nudo central: a) Saturado; b) Seco.

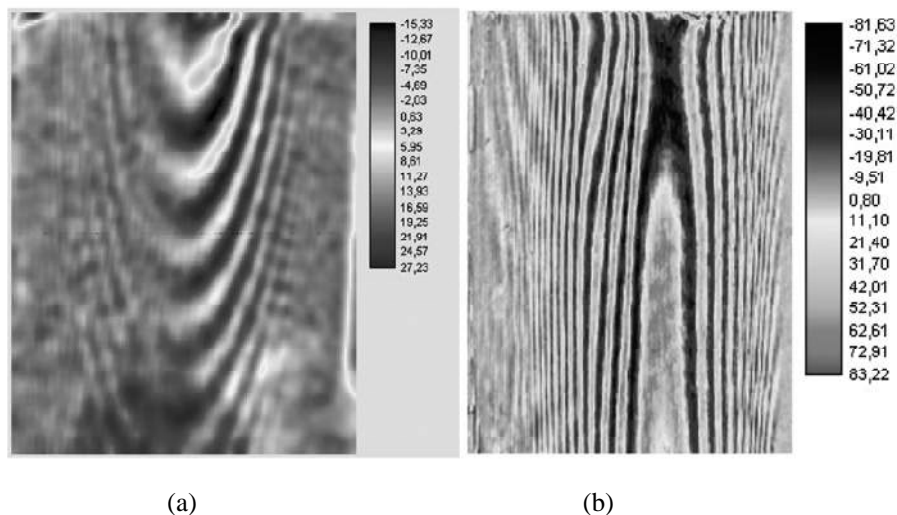


Figura 13 – Mapas de isodeformaciones de la muestra B11, sin nudo: a) Saturado; b) Seco

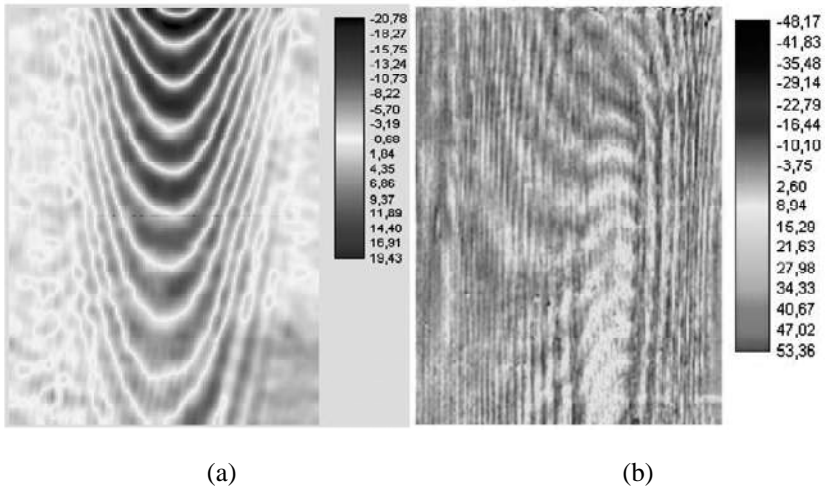


Figura 14– Mapas de isodeformaciones de la muestra B12, sin nudo: a) Saturado; b) Seco

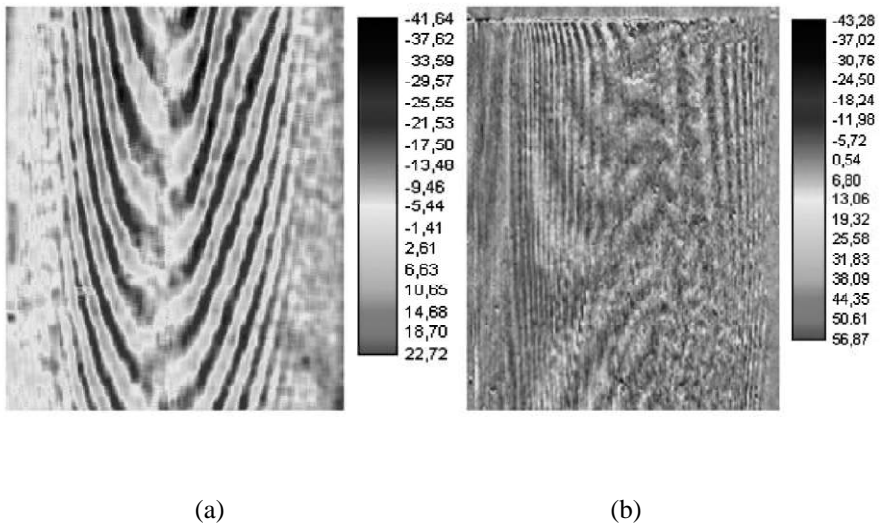


Figura 15– Mapas de isodeformaciones de la muestra B13, sin nudo: a) Saturado; b) Seco

Las probetas de ensayo con nudos en el extremo superior, Figuras 7 a 9, presentan una distribución de isodeformaciones más compleja en la condición saturada que la mostrada en las probetas en estado seco (Anexo 1). Este hecho puede ser explicado por la separación entre las fibras del bambú cuando el material está saturado, en contraposición al material seco, en vista a poseer éste mayor resistencia, deformándose menos, como puede ser observado por la mejor definición de los campos de isodeformación.

En relación a las probetas de ensayo con nudo en el centro, tanto las probetas saturadas, Figuras 10, 11 y 12, como las probetas en estado seco, muestran un comportamiento idéntico al caso anterior (probetas de ensayo con nudo en el extremo superior). Digno de notar fueron las deformaciones ocurridas en las probetas de ensayo saturado de la Figura 11; tal hecho puede ser explicado por la inclinación de la base de las probetas que no estaba ortogonal en relación a su largo, ocasionando el surgimiento de esfuerzos de torsión, presentándose una tendencia al pandeo (imperceptible visualmente, pero captada mediante el uso de la técnica propuesta), originando un mapa de isodeformaciones anormal, el cual, se supone se debe a la estructuración inadecuada de las fibras debido al esfuerzo diferencial sufrido, cuando el material estaba saturado.

Los probetas sin nudo, Figuras 13, 14 y 15, presentaron una tendencia al mismo comportamiento en relación al secado, siendo la distribución de isodeformaciones más compleja para el material saturado. La probeta ensayada B13 que se muestra en la Figura 15 ya presentaba una rajadura en la región central, evidenciado este hecho la alta deformación que ocurrió en esta región. Las probetas correspondientes a las Figuras 14 y 15 presentaban rajaduras de secado, en el momento del ensayo en la condición seco; este hecho explica la gran diferencia entre estos y el resultado presentado en la Figura 13, pudiendo verificar la tendencia de ocurrir mayor deformación del lado derecho de la probeta de ensayo de la Figura 14 y en el centro de la probeta de ensayo de la Figura 15, regiones éstas donde se localizaban las rajaduras.

Según Post et al. 1994; la técnica de *Moiré* de Sombra, capta las deformaciones fuera del plano de un objeto solicitado. De esta forma materiales anisótropos como el bambú son susceptibles de haber captado las deformaciones fuera del plano, formando patrones distintos para cada tipo de estructura, característica para cada tipo de probetas de ensayo (sin nudo, nudo en el medio, nudo en el extremo superior).

Las escalas de colores mostradas en las figuras, se refieren a los resultados de las subtracciones píxel a píxel de las matrices formadoras de estas imágenes. Cada píxel de estas imágenes es definido cuando tiene una intensidad luminosa referenciada en escala de gris (de 0 a 255 tonos), de tal forma que la subtracción de un píxel de una imagen de una probeta de ensayo no solicitada por un píxel de una probeta de ensayo solicitado, crea un píxel que tiene un valor cualitativo (con gran o pequeña deformación) referente a cuanto de la región de este píxel se deformó.

Estas escalas califican las regiones donde hubo deformaciones mas o menos acentuadas; o señales algebraicas (+ o -) no deben ser entendidas como deformación positiva o negativa, sino como mayor o menor deformación. Por tanto, se considera que las imágenes después de un adecuado procesamiento generan mapas de isodeformaciones, siendo posible hacer una inferencia de la distribución de tensiones sobre las probetas de ensayo de bambú.

Debe ser resaltado que el análisis realizado es cualitativo, particular para cada probeta ensayada, visto que se trata de diferencias de intensidades luminosas sobre un objeto específico, definiendo deformaciones relativas. El análisis cuantitativo no puede ser inferido de estas imágenes, siendo posible apenas comparaciones cualitativas, entre las probetas.

Debido a la deficiente resolución de la cámara fue necesario hacer un montaje experimental que optimizase el contraste entre las franjas. Debido a esta exigencia, ocurrió una deformación de las franjas formadas sobre el objeto, debido a la distancia de la cuadrícula al objeto y a la proyección del conjunto de luz, que siguió una geometría angular. Así, cuando la imagen es obtenida y procesada se cometen errores y este efecto es llamado efecto *gap*. Según Post et al. 1994, para evitar este efecto es preciso que la distancia entre la cámara y la fuente de luz sea la misma en relación al plano de referencia del objeto. Para la optimización del sistema en el montaje experimental y la adopción de una geometría apropiada, se torna necesaria la adopción de una fuente de luz coherente y colimada, que posibilite una mejor homogeneidad en la intensidad luminosa y una mejor definición de las franjas generadas.

CONCLUSIONES

Se concluye que la metodología de *Moiré* de sombra permite inferir satisfactoriamente de los mapas de isodeformaciones la distribución de los esfuerzos de compresión en probetas de bambú guadua. En este experimento pudo ser observado la complejidad de las probetas no isotrópicas, de tal forma que la concentración de esfuerzos en éstas cuando son solicitadas no es trivial.

En estudios futuros se pretende cuantificar estas deformaciones a través de métodos de medición de deformaciones fuera del plano, de tal forma que sea generada una escala de colores relativa a la deformación específica de las probetas.

REFERENCIAS

- Cloud, G. 1998.** *Optical method of engineering analysis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hu, Q. 2001.** 3-D Shape measurement techniques. [http://www.sinc.sunysb.edu/Stu/qhu / Chapter1.htm](http://www.sinc.sunysb.edu/Stu/qhu/Chapter1.htm), 06/09/2001.
- Malacara, D. 1992.** *Optical Shop Testing*. John Wiley & Sons, New York.
- Pisarev, V. S.; Balalov, V. V. 2004.** A role of fringe patterns catalogue in the course of interferometrically based determination of residual stresses by the hole drilling method. *Optics and Laser in Engineering*, V. 41, p. 411-462, London.
- Post, D.; Han, B.; Ifju, P. 1994.** *High Sensitivity Moiré*. Springer, New York.
- Saleh. B. E. A.; Teich, M. C. 1991.** *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, New York.
- Takasaki, H. 1970.** Moiré topography. *Applied Optics* 9(6) 1457-1462.

