

Técnica de *Moiré* aplicada al análisis de tensiones en compresión en el bambú *Guadua*

Beraldo, A. L.; Dal Fabbro, I. M.; Albiero, D.; Rodrigues, S.

*Facultad de Ingeniería Agrícola de Campinas – UNICAMP
CEP 13083-970 Campinas – SP - Brasil*

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. Mientras, 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.

Palavras-claves: bambú, guadua, moiré

Abstract

Bamboo is considered an important raw material in developing countries because its physical characteristics associates 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

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 muestra con interés particular la posibilidad de la utilización del bambú de manera estructural, en columnas, vigas y armadura. Mientras que, poco se conoce, todavía, sobre la distribución de las tensiones durante un determinado cargamento, 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 próspera alternativa para efectuar el planeamiento de las deformaciones en un material sometido a determinado cargamento es la técnica de *Moiré*.

La luz se propaga en forma de ondas, siendo descrita matemáticamente por una función de la onda (Saleh, 1991). Cuando dos o mas 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, 1991). Esta interferencia puede generar un patrón de franjas, oscuras y claras.

Cuando se mira a través de dos pantallas o retículas 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 de fenómeno o efecto de *Moiré*; las franjas producidas son llamadas de patrones o franjas de *Moiré*. Cloud, 1988; citó que D. Tollenar, en 1945, estudiando ese fenómeno descubrió que las franjas de *Moiré* son en verdad amplificadoras de movimiento, 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 perfilo métricas mas 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, 2001).

En este trabajo serán omitidas las características electromagnéticas y cuánticas de la luz, por lo que, la misma será tratada apenas por la teoría ondulatoria que es suficiente para explicar los fenómenos descritos.

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 retícula de barras y espacios, adecuadamente dispuestos.

En este experimento fue utilizada la técnica de *Moiré* de sombra. Takasaki (1970, 1973) utilizó la sobre posición de una retícula sobre su propia sombra (*Moiré* de sombra) para medir el relieve de objetos y personas. En este caso las franjas de *Moiré* formadas son constituidas por un conjunto de puntos de la misma cota, semejantes a las curvas de nivel de mapas topográficos (Figura 2).

Según Post (1994) franjas *Moiré* de excelente visibilidad ocurren cuando están presentes las siguientes condiciones: el ancho de las barra y los espacios en la retículas son iguales; la retícula 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; la razón entre los espacios y las barras de la cuadrícula es menor que 1,05:1.

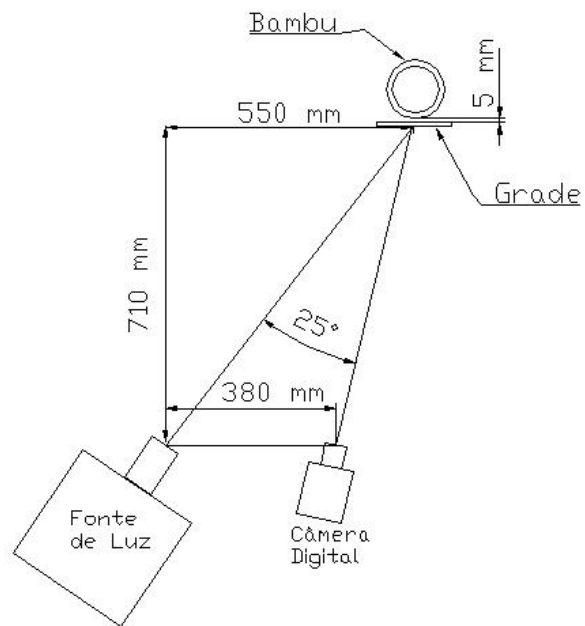


Figura 1. Montaje experimental para obtención de las franjas de *Moiré*.

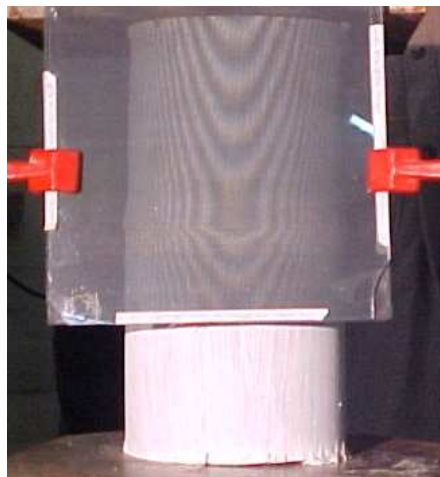


Figura 2. Curvas de nivel generadas por franjas de *Moiré* sobre cuerpo-de-prueba de bambú (*Guadua angustifolia*), con un nudo en la región central.

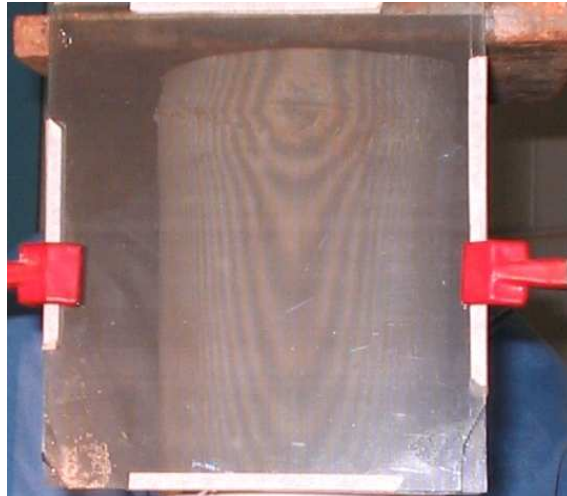


Figura 3. Curvas de nivel generadas por franjas de *Moiré* sobre cuerpo-de-prueba de bambú (*Guadua angustifolia*), con nudo en el extremo superior.



Figura 4. Curvas en nivel generadas por franjas de *Moiré* sobre cuerpo-de-prueba de bambú (*Guadua angustifolia*), sin nudo.

Los cuerpos-de-prueba fueron sometidos al ensayo no destructivo por ultra-sonido. 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 pequeña espesura, como es el caso de los tallos del bambú *Guadua*, se colocan los sensores en regiones determinadas de la muestra. En este caso, se buscó evaluar por el ultra-sonido la modificación en la velocidad de propagación de la onda ultra-sónica, cuando los sensores fuesen posicionados en tres regiones a lo largo de la espesura de la pared (interna, mediana y externa). Los tallos fueron ensayados en dos condiciones de humedad: verdes y después de secarse al aire (humedad en torno de 15%).

Seguidamente, los cuerpos-de-prueba de bambú (*Guadua angustifolia*) fueron sometidos a pequeñas cargas de compresión, siendo sus dimensiones indicadas en la Tabla 1. De estos cuerpos-de-prueba, 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 cuerpo-de-prueba fueron obtenidas diez fotos digitales relativas a diez niveles de tensión sobre la muestra, para efecto de estabilización de los cuerpos-de-prueba fue realizada una pre-carga de 870 kgf, y a partir de este valor fueron realizadas fotos digitales para seis niveles de tensión, Cuadro 1. 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%).

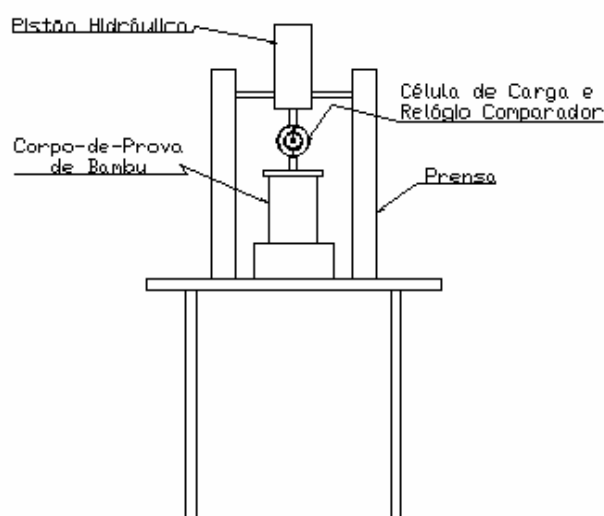


Figura 5. Montaje Experimental para compresión de los cuerpos-de-prueba.

Tabla 1. Dimensiones de los cuerpos-de-prueba de *G. angustifolia*.

Cuerpo-de-Prueba	Espesura (mm) $\pm 0,005$ mm	Altura (mm) $\pm 0,005$ mm	Diámetro Externo (mm) $\pm 0,005$ 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

Cuadro 1. Tensiones aplicadas a los cuerpos-de-prueba de *G. angustifolia*.

Cuerpo de Prueba	Tensión (kPa)	Cuerpo de Prueba	Tensión (kPa)	Cuerpo de Prueba	Tensión (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 los cuerpos-de-prueba 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 (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 kpíxels de resolución.
- 2-Prensa Solotest
- 3-Cuadrícula con separación de 0.4 mm y espesura de la barra de 0.4 mm
- 4-Retroproyector 150 W de potencia.

Resultados y Discusiones

En la Figura 6 se presentan los valores medios de la velocidad de propagación de la onda ultra-sónica a través de los cuerpos-de-prueba 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 do ultra-sonido 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 mas próximo de las camadas externas del tallo mayor es la concentración del grupo de fibras y, como se observa, mayor es la velocidad de propagación de la onda ultra-sónica. También se puede observar, como ejemplo de lo que ocurre con la madera, donde la velocidad de propagación aumenta a medida que disminuye el contenido de humedad del tallo.

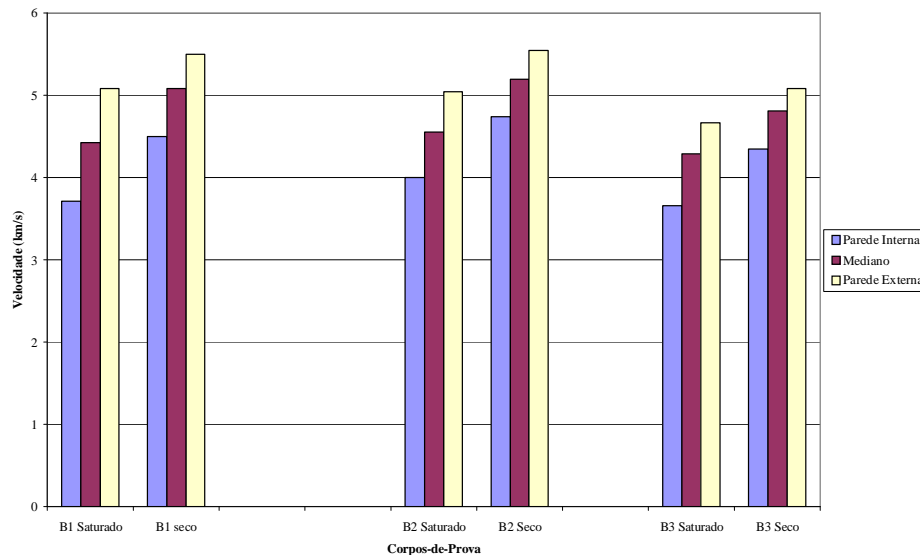


Figura 6 - Efecto de la posición analizada y del contenido de humedad en a velocidad de propagación de la onda ultra-sónica a través de tallos de *G. angustifolia*.

El resultado obtenido por el procesamiento de las imágenes, puede ser observado en el Anexo 1 y 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.

En los cuerpos-de-prueba con nudos en el extremo superior, Figuras 7 e 8 e 9, en la condición saturada, se percibe que ocurrió una distribución de isodeformaciones más compleja de la mostrada en relación a los cuerpos-de-prueba secos (Anexo 1). Este hecho puede se explicado por la separación entre las fibras del bambú cuando el material está saturado, en contraposición al material seco, en vista a este poseer mayor resistencia, deformándose menos, como puede ser observado por la mejor definición de los campos de isodeformación.

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

Los cuerpos-de-prueba 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. El cuerpo-de-prueba de la Figura 15 ya presentaba una rajadura en la región central, hecho este evidenciado por la alta deformación que ocurrió en esta región. Los cuerpos-de-prueba 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 del cuerpo-de-prueba de la Figura 14, y en el centro del cuerpo-de-prueba de la Figura 15, regiones éstas donde se localizaban las rajaduras.

Según Post, 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 cuerpo-de-prueba (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 substracciones 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 substracción de un píxel de una imagen de un cuerpo-de-prueba no solicitada por un píxel de un cuerpo-de-prueba 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 algebraicos (+ o -) no deben ser entendidos como deformación positiva o negativa, mas 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 el cuerpo-de-prueba de bambú.

Debe ser resaltado que el análisis realizado es cualitativo, particular para cada cuerpo-de-prueba, 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 los cuerpos-de-prueba.

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 comenten errores y este efecto es llamado de efecto "Gap". Según Post, 1994; para evitarse 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 posibilitaría una mejor homogeneidad en la intensidad luminosa, y una mejor definición de las franjas generadas.

Conclusión

Se concluyó que la metodología de *Moiré* de sombra ofreció resultados satisfactorios en la determinación de la distribución de las tensiones en los cuerpos-de-prueba de bambú, siendo inferida por los mapas de isodeformaciones. En las regiones donde hubo una mayor deformación pudiendo subentenderse que haya ocurrido mayor tensión. En este experimento pudo ser observado la complejidad de los cuerpos-de-prueba no isotrópicos, de tal forma que la concentración de tensión sobre estos cuerpos-de-prueba en sollicitación 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 los cuerpos-de-prueba.

Referencias Bibliográficas

Cloud, G. (1998). Optical method of engineering analysis. Cambridge University Press, Cambridge.

Hu, Q. 3-D Shape measurement techniques. <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. v.9, n.6, p. 1457-52, out, Washington.

sitio www.brasilis.pro.br, aceso em 01/06/2004.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Prof. Jansle Vieira Rocha, por la posibilidad del uso del Laboratorio de Geo-Procesamiento.

Anexo 1

Tallos saturados

Cuerpos-de-prueba con nudo en el extremo superior:

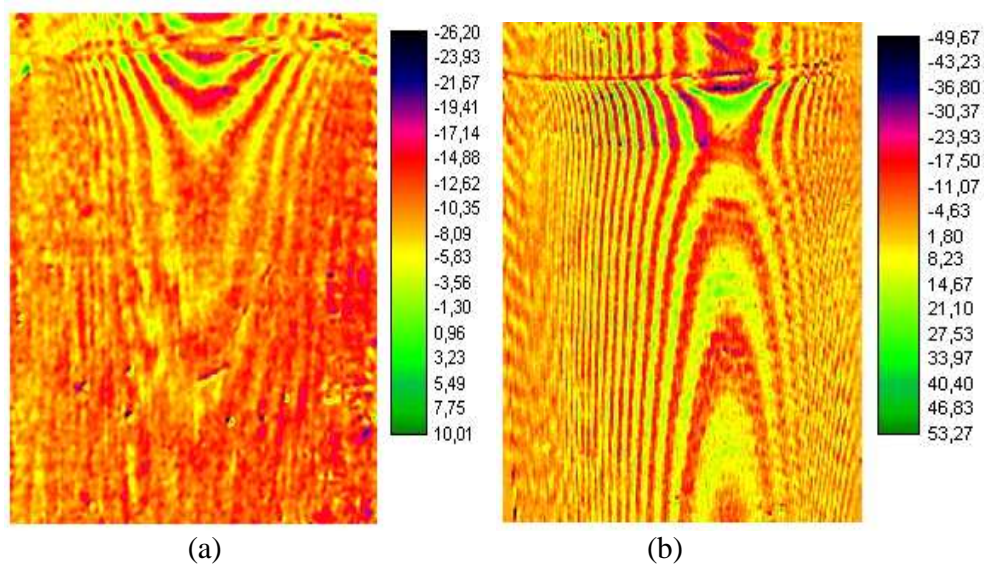


Figura 7 – Mapas de isodeformaciones de la muestra B31, con nudo en el extremo superior: a) Saturado; b) Seco.

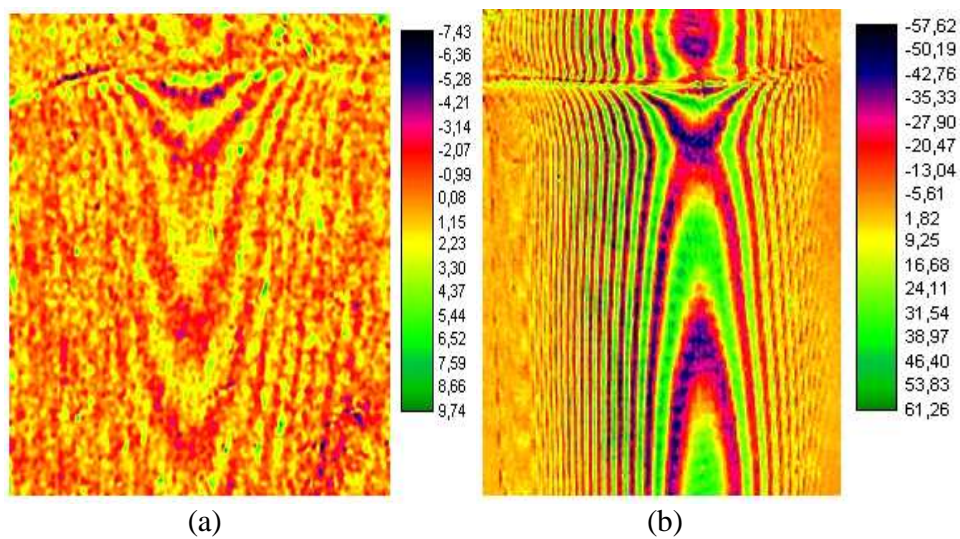


Figura 8– Mapas de isodeformaciones de la muestra B32, con nudo en el extremo superior: a) Saturado; b) Seco.

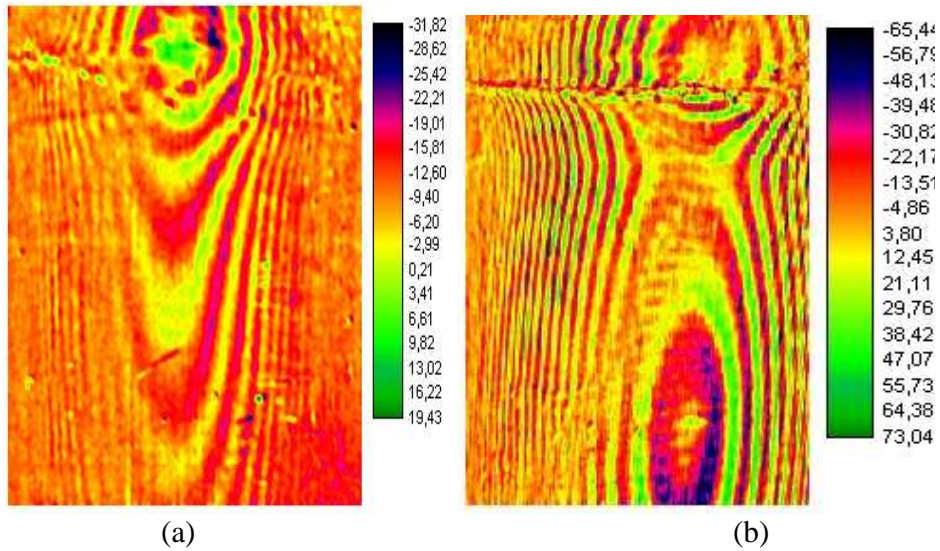


Figura 9– Mapas de isodeformaciones de la muestra B33, con nudo en el extremo superior: a) Saturado; b) Seco.

Cuerpos-de-prueba con nudo en la región central:

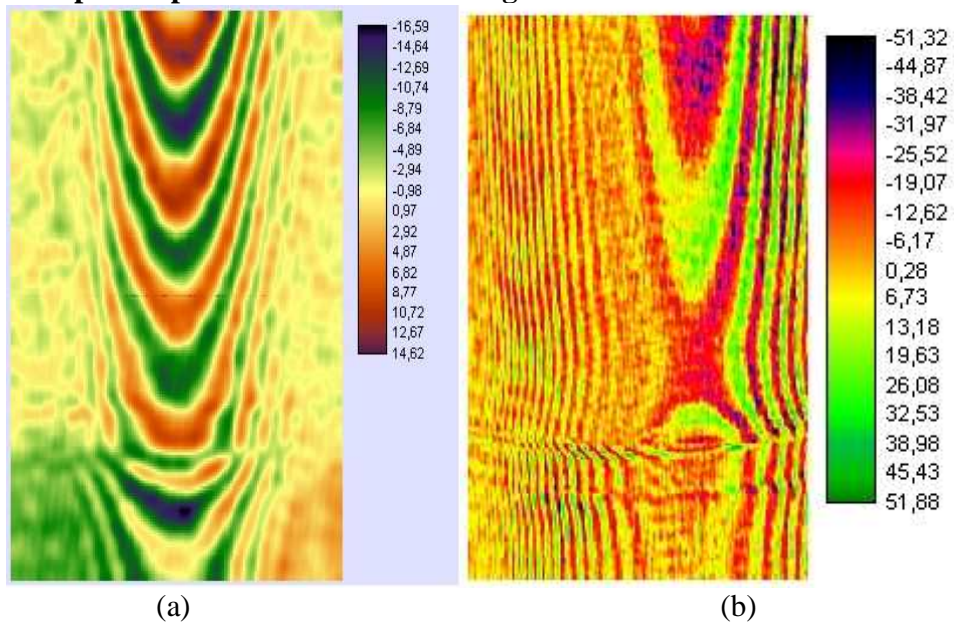


Figura 10 – Mapas de isodeformaciones de la muestra B21, con nudo central: a) Saturado; b) Seco.

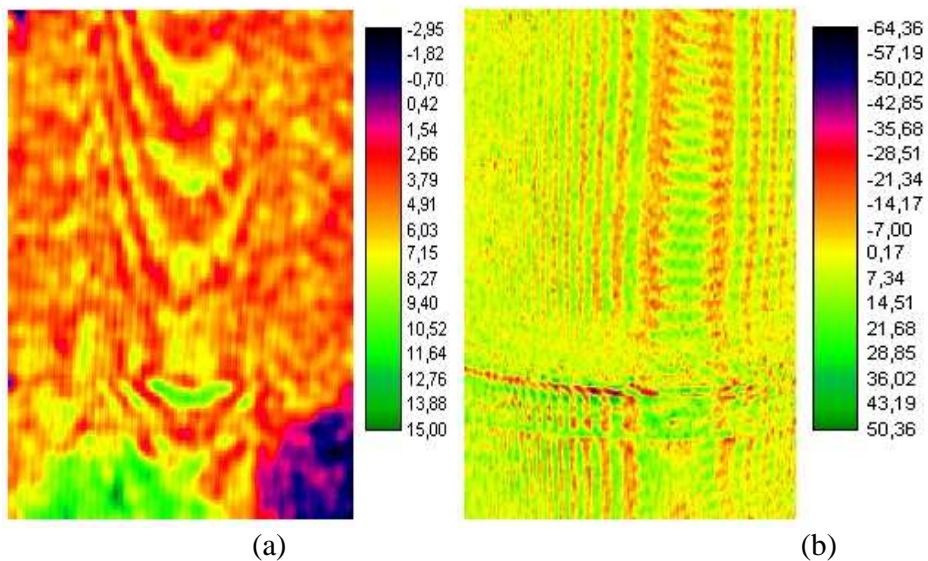


Figura 11 - Mapas de isodeformaciones de la muestra B22, con nudo central: a) Saturado; b) Seco.

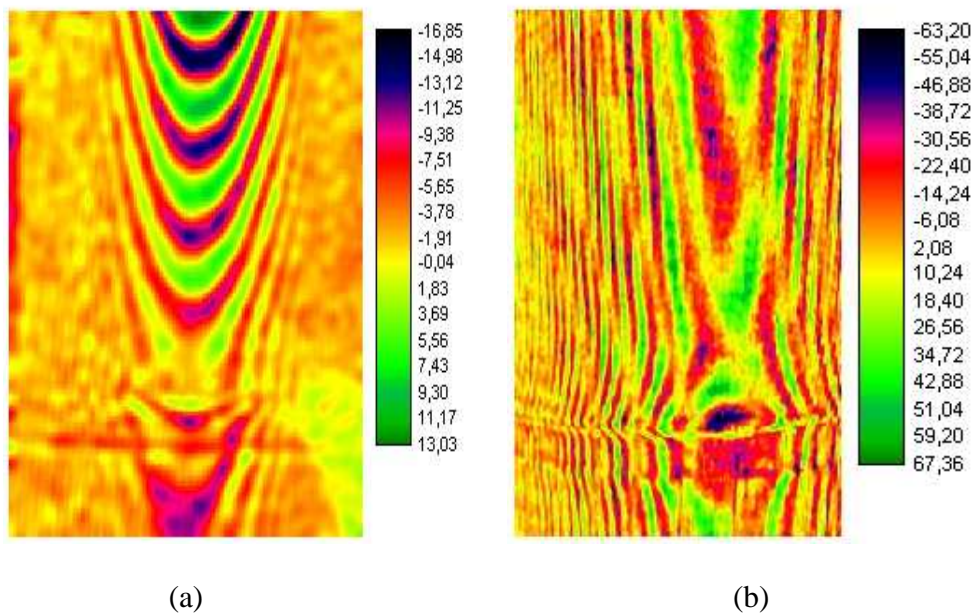


Figura 12 - Mapas de isodeformaciones de la muestra B23, con nudo central: a) Saturado; b) Seco.

Cuerpos-de-prueba sin nudo:

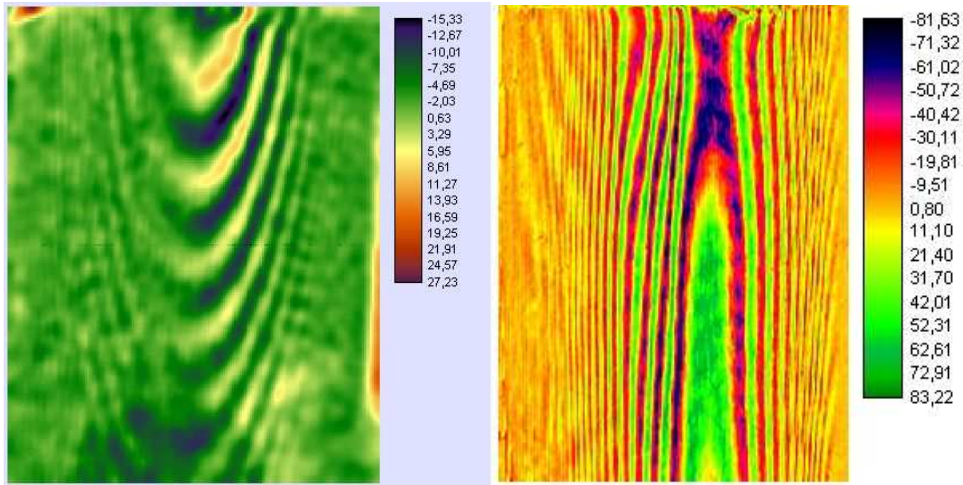


Figura 13 – Mapas de isodeformaciones de la muestra B11, sin nudo: a) Saturado; b) Seco

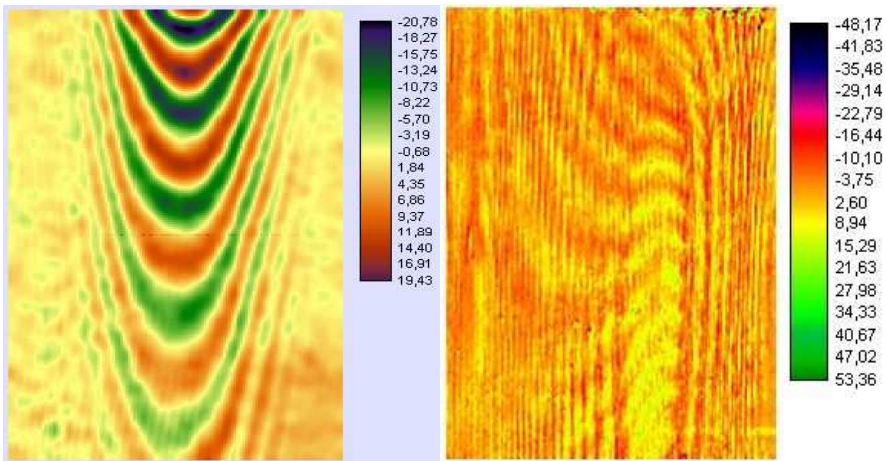


Figura 14– Mapas de isodeformaciones de la muestra B12, sin nudo: a) Saturado; b) Seco

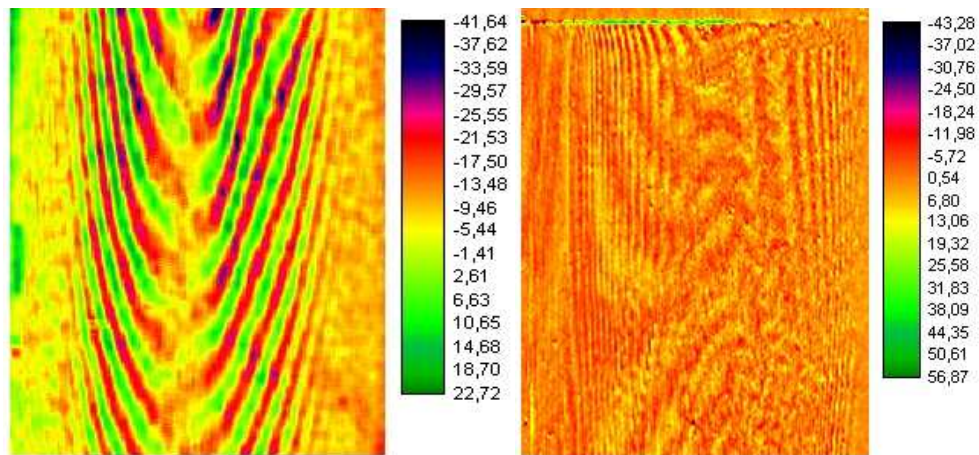


Figura 15– Mapas de isodeformaciones de la muestra B13, sin nudo: a) Saturado; b) Seco