

Tema A1a Diseño Mecánico: Optimización estructural de forma

Validación fotoelástica de modelos basados en estructuras biológicas

Francisco Ramírez Cruz^a, Fco. Eugenio López G.^a, Fco. Javier De La Garza S.^a, Luis A. Arteaga H.^a

^aPostgrado en Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL, Pedro de Alba, 66450 San Nicolás de los Garza, México

*Francisco. Ramírez Cruz, Email: francisco.ramirezcr@uanl.edu.mx

RESUMEN

El axioma de los esfuerzos constantes citada por Mattheck en estructuras biológicas como la bifurcación de las ramas de un árbol presentan un cambio en su geometría debido a los esfuerzos ocasionados por las cargas inducidas durante su crecimiento. Considerando como área de diseño el contorno interno de la horquilla se plantean dos modelos de estudio, de curvatura semicircular y de B-Spline de tercer orden. En este trabajo se presentan los resultados mediante elementos finitos de la distribución de esfuerzo a lo largo de la curvatura de la horquilla que son contrastados experimentalmente con la técnica de fotoelasticidad que exhibe, al aplicar luz polarizada, franjas de colores que identifican el grado de deformación en la probeta preparada. Los resultados muestran la homogeneidad y minimización de esfuerzos producto del crecimiento adaptativo.

Palabras Clave: Fotoelasticidad, Elemento Finito, Estructura Biológica, Validación.

ABSTRACT

The axiom of constant stress cited by Mattheck in biological structures such as bifurcation of the branches of a tree shows a change in its geometry due to the stresses caused by the loads induced during its growth. Considering the internal contour of the bifurcation as a design area, two study models of semicircular curvature and B-Spline of third order are proposed. In this work the results are presented by means of finite elements of the distribution of stress along the curve of the fork that are experimentally contrasted with the photoelasticity technique that shows, when applying polarized light, color bands that identify the degree of deformation in the prepared specimen. The results show the homogeneity and minimization of stress product of adaptive growth.

Keywords: Photoelasticity, Finite Element, Biological Structure, Validation

1. Introducción

La capacidad de cambio de la naturaleza, en cuanto a la forma se refiere, ha impactado en el diseño mecánico de piezas y estructuras de tal manera que se ha asociado su geometría en, por mencionar algunos ejemplos, soportes de puentes, armazones de aviones, implantes quirúrgicos ortopédicos. En trabajos recientes se presenta el estudio de estructuras biológicas que evidencian el axioma de los esfuerzos constantes planteada por Mattheck entre otros [1-3].

La naturaleza es la guía práctica del diseñador donde las estructuras biológicas inmejorables han sido transformadas en su capacidad de resistencia de cargas a través de los años, que sin duda favorece la estructura interna y externa ya sea desde la garra de un león hasta el cambio en la forma de un hueso e incluso el crecimiento de un árbol, que es ahí donde se centrará el tema del presente trabajo.

La evaluación que realiza un proyectista entonces en su diseño de aplicación mecánica basado en la naturaleza persigue la mínima inversión de material, evitar que la distribución de esfuerzos y deformación en los componentes sea concentrada, la disminución de costos y que la técnica de fabricación sea la más adecuada de acuerdo con las necesidades de producción entre otros factores.

Biomecánicamente al hablar de la estructura de un árbol, la capacidad de resistir a fuertes corrientes de aire, el peso generado en la copa del árbol sustentado por sus ramas y la particularidad de crecimiento estrecho por árboles vecinos origina cambios en el tallo de tal manera que se adapta para soportar los esfuerzos de un momento de flexión para resistir una menor deformación. Si la disminución de material de la adaptación sigue los puntos críticos de esfuerzo entonces la estructura se refuerza, en comparación a los puntos de menor esfuerzo donde se desacelera el crecimiento. Estas observaciones ya estudiada por Claus Mattheck [1], asegura el crecimiento geométrico en los puntos de mayor esfuerzo y por consecuencia un aumento en la resistencia de la pieza.

Los métodos actuales para resolver la mejora estructural de forma están basados en el método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) donde se trata de conseguir que la energía potencial sea mínima en cada uno de los nodos de los elementos [3]. Este método, sin embargo, ocasiona un procesamiento de miles de nodos, que de manera tradicional su solución no sería viable, por lo tanto, se procesa en paquetes comerciales de estudio FEM donde se utilizan métodos numéricos para comportamientos estáticos y dinámicos [2].

El estudio del profesor Mattheck [1] que se consideró en el presente trabajo propone una geometría en forma de horquilla típica de las bifurcaciones en los árboles. A partir de esta forma se modela con elementos finitos y determinó una distribución de esfuerzos a lo largo de la curva interna de dicha bifurcación.

El presente trabajo valida a través de la técnica de fotoelasticidad la distribución de esfuerzos encontrada por Mattheck et al. Además, se realizó una segunda construcción de una horquilla con radio de curvatura constante con la finalidad de comparar la eficiencia mecánica de ambas.

El estudio fotoelástico facilita la identificación cuantitativa de las deformaciones a través de un material birrefringente ante la presencia de ondas electromagnéticas polarizadas. Es así como los resultados de este caso de estudio proponen la validación del modelo de elementos finitos y los resultados fotoelásticos.

2 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo consistió en comparar la distribución de esfuerzos del modelo de elementos finitos de la estructura biológica en 2D y los resultados del comportamiento experimental de las horquillas y su recubrimiento fotoelásticos. Y así poder evidenciar la condición de forma mejorada en la estructura biológica versus geometría regular.

Los objetivos particulares del presente trabajo son:

- Determinar la distribución de esfuerzos de las bifurcaciones utilizando el FEM.
- Fabricar y recubrir las piezas resultantes para determinar la distribución de esfuerzo utilizando la técnica de fotoelasticidad.
- Comparar los resultados de las piezas en la curvatura de la horquilla producida por FEM y la técnica de fotoelasticidad.

3 Metodología

La figura 1, muestra a detalle la secuencia metódica del presente trabajo para la validación del modelo de elementos finitos y los resultados fotoelásticos experimentales.

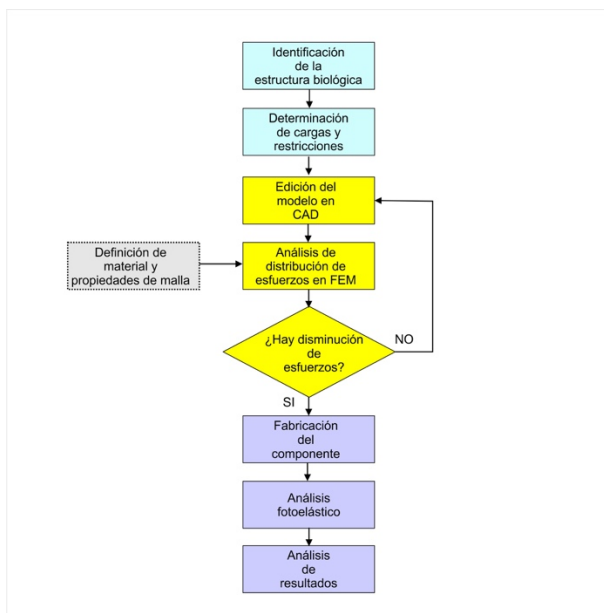


Figura 1. Secuencia de etapas para la validación

Un árbol tiende a crecer de forma erecta para lograr el mejor soporte de su tallo de tal manera que los efectos ocasionados por gravedad sean disminuidos en la capacidad de resistir de sus ramales, geotropismo [1]. Las reacciones ocasionadas en su estructura interna siguen el axioma de la uniformidad de esfuerzos que consigue añadir material en las zonas más críticas de esfuerzos [4].

Considerando como variable el peso soportado de la copa en un árbol, así como la fuerza de las corrientes de viento que se ejerce en una rama, el efecto de compresión que ocasiona forma un momento cuyo flujo de fuerzas internas se puede apreciar en la figura 2.

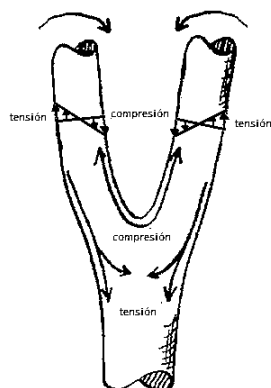


Figura 2. Fuerzas internas en el contorno de las horquillas debido a un efecto de compresión. [1]

Si, en términos biomecánicos, se traduce la figura 2 a condiciones de carga y de soporte, se tiene entonces que la parte superior de las horquillas ocasiona un momento

flexor hacia el interior con un empotramiento en la base que correspondería a las raíces del propio árbol.

El concepto se basa en la figura 3 cuyo modelo inicial de la estructura corresponde al contorno rojo y que será modelado de acuerdo con la curvatura natural para mantener la uniformidad de sus esfuerzos.

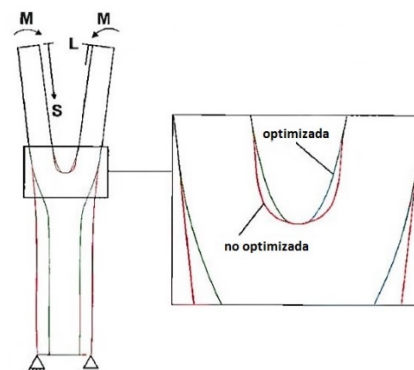


Figura 3. Detalle en el contorno interno de las horquillas. [1]

La estructura inicial modelada en el paquete de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés), se puede apreciar en la figura 7.

El área de diseño de la curva interna formada por un semicírculo es modificada de tal forma que una curva de Bézier o B-Spline pueda describir la curvatura real. Estas curvas son descritas por funciones polinómicas que se interpolan o aproximan a los puntos de control que tienen influencia sobre la forma de la curva [5].

Se consideran las propiedades mecánicas para el modelado FEM y para la fabricación del espécimen de prueba en aluminio estructural 6061 T6 cuyos datos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 – Propiedades mecánicas del Aluminio 6061-T6.

Propiedad	
Densidad	2.7 g/cm ³
Módulo de Elasticidad, E	70 GPa
Coefficiente de poisson, ν	0.33
Límite elástico	270 Mpa

4 Análisis fotoelástico

La técnica de fotoelasticidad permite determinar los esfuerzos a partir de la medición de la deformación, esto es a través de la incidencia de luz polarizada en la superficie del recubrimiento. Una fuente de luz emite

ondas electromagnéticas que pasan a través de un polarizador que las mantiene en un plano, que al incidir en la superficie de un material birrefringente, se forman líneas isocromáticas que van de acuerdo a la deformación del recubrimiento, que se aprecian una vez reflejada la luz retardada en un segundo polarizador, véase figura 4.

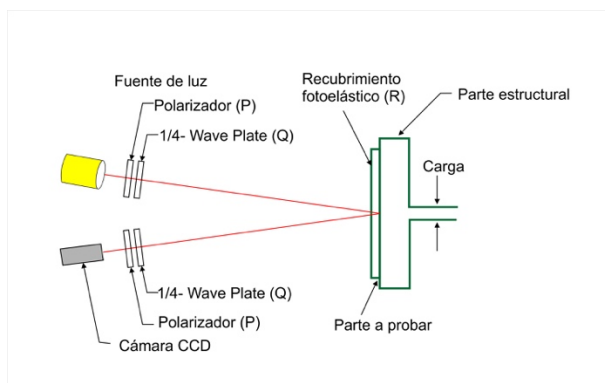


Figura 4. Representación esquemática de un polariscopio de reflexión

Las piezas sometidas a prueba deben acondicionarse previamente con un recubrimiento [6], cuya información técnica se encuentra en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades fotoelásticas de la hoja PS-1.

Propiedad	
Coefficiente óptico, K	0.15
Módulo de Elasticidad, E	2.5 GPa
Coefficiente de poisson, ν	0.38
Grosor, t	270 Mpa

El estudio de fotoelasticidad se realizó a través de un sistema computarizado con polariscopio de reflexión para el análisis de esfuerzos de campo completo LF/Z-2 de la compañía Vishay Precision Group [7-8].

La estructura física de experimentación, fabricada con perfil de aluminio, dispone de una prensa tipo C de 2.5 mm de paso y un medidor marca Epsilon que mide el desplazamiento generado, ver figura 5.



Figura 5. Estación de fotoelasticidad LF/Z-2.

5 Modelo de elemento finito

El diseño de la geometría de las estructuras del árbol consideró las sujeciones donde se presentarían los desplazamientos y restricciones del modelo, estas se pueden apreciar en la figura 6. Las perforaciones corresponden a pernos de 6 mm de diámetro con un grosor de 6.35 mm.

El área para la colocación del recubrimiento hace posible que se pueda tener un rango de puntos de medida posibles en la curvatura interna debido a la longitud de las astas de las horquillas.

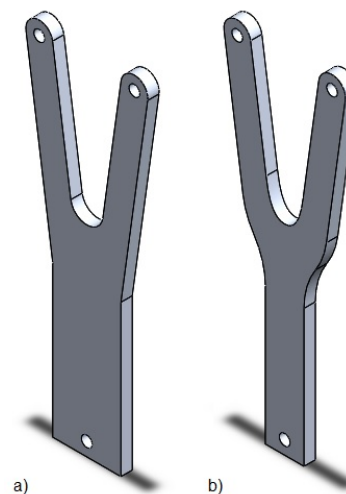


Figura 6. Geometrías a) Semicircular b) biológica, modeladas en CAD.

El estudio FEM se realizó en el software de cálculo Ansys, en el que al importar el modelo de la figura 6, se acondicionaron los parámetros de material, de malla, de

condiciones de carga y restricción, así como el tipo de respuesta a solucionar.

La malla constituye el principal factor de análisis pues dependerá, de acuerdo con el tamaño del elemento, los resultados obtenidos. El elemento de análisis se asigna un elemento hexaedro pues la complejidad de la geometría no requiere el uso de tipo tetraedro, así mismo el tamaño del elemento se asigna a 1 milímetro con una condición de mallado estructurado.

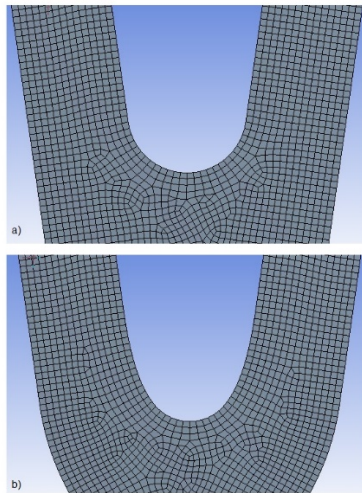


Figura 7. Malla a) curva semicircular, b) curva biológica, con elementos estructurados.

La malla que se aprecia en la figura 7, fue formada por un elemento estructurado cuya estadística se encuentra en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de malla.

	Curva semicircular	Curva biológica
Tipo de elemento	Hexaedro	Hexaedro
Tamaño de elemento	1 mm	1 mm
No. Elementos	48349	37338
No. Nodos	57968	45368

De acuerdo con la biomecánica, la condición de fuerza será dado en un desplazamiento de compresión determinado en 0.8mm como máximo valor, con una fijación en la parte inferior de los grados de libertad en el eje transversal de la pieza $U_x=U_y=0$, con una restricción de movimiento en una de las astas; esto con el fin de representar la carga ejercida por la intensidad de las corrientes de aire.

Las condiciones y restricciones aplicados se pueden observar en la figura 8.

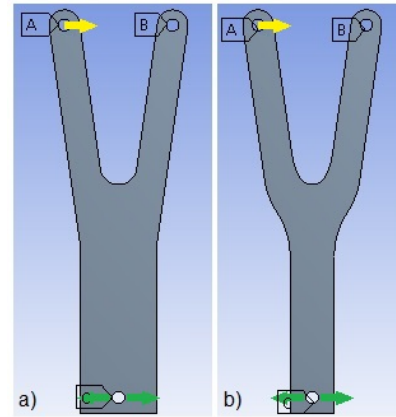


Figura 8. Condiciones de estructura a) curva semicircular b) curva biológica. Para la etiqueta A le corresponde un desplazamiento de 0.8 mm máximo, B es fijo, y C $U_x=U_y=0$.

Resultado de la simulación, la distribución de esfuerzos (Figura 9 y figura 10) que se presenta en la curvatura interna es identificada mediante una serie de 19 puntos de prueba a los cuales se le ha asignado un sistema de coordenado de referencia. Estos puntos, razón de la capacidad de procesamiento del software de fotoelasticidad, se presentan en la tabla 6 para ambas estructuras.

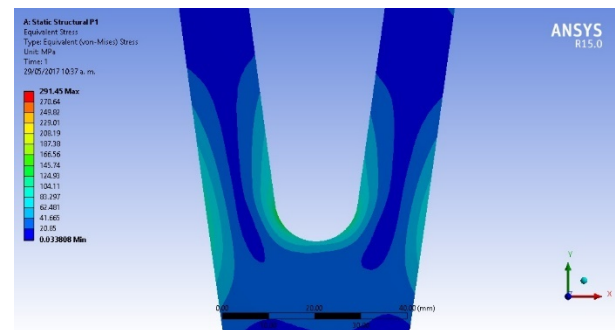


Figura 9. Distribución de esfuerzos en la curva semicircular

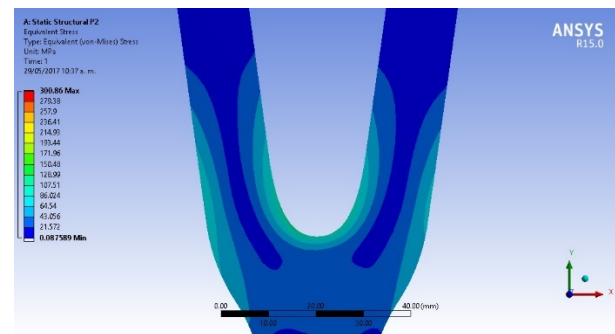


Figura 10. Distribución de esfuerzos en estructura biológica.

La figura 11, muestra la gráfica de esfuerzos en cada uno de los puntos de la curvatura interna calculados a través del modelo de elementos finitos de ambas geometrías.

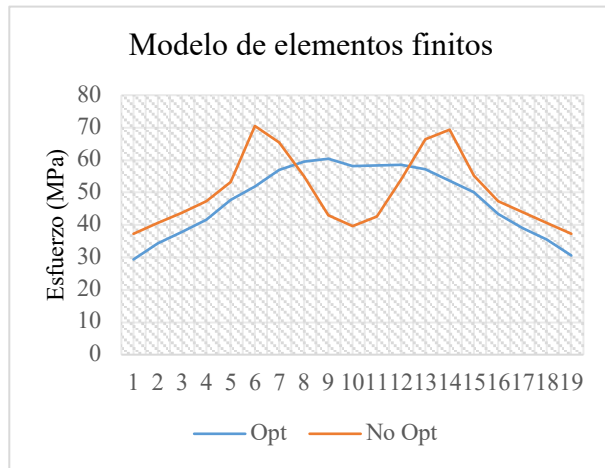


Figura 11. Comportamiento de curvatura interna con FEM.

6 Experimentación por fotoelasticidad

Una vez preparadas las piezas de prueba, montada la estación de pruebas, y calibrada la estación [8], se realiza un estudio de las estructuras a la que se le aplicará 0.8 mm máximo en compresión. La figura 12 y 13 muestran las franjas isocromáticas en la posición final de la prueba [9-10].

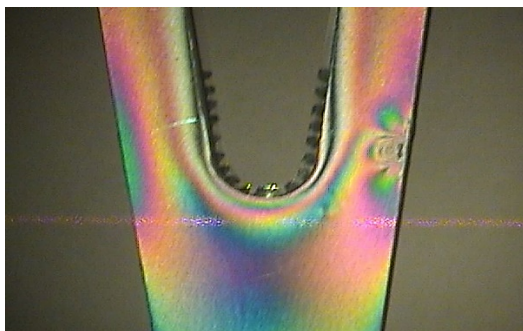


Figura 12. Franjas isocromáticas con detección de la línea isoclínica para la curvatura semicircular.



Figura 13. Franjas isocromáticas con detección de la línea isoclínica para la estructura biológica.

Graficando los datos obtenidos, se tiene el comportamiento del esfuerzo en la curvatura interna de ambas horquillas, véase figura 14.

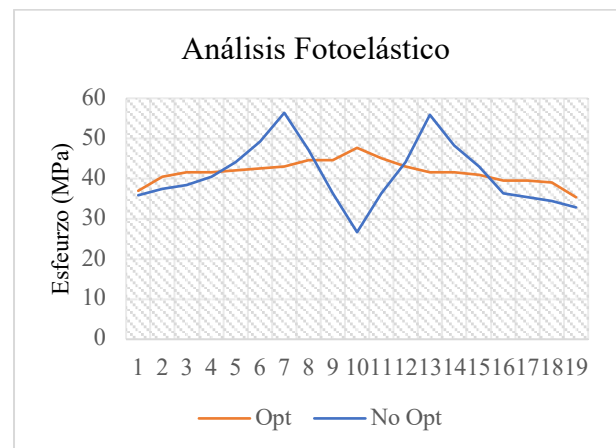


Figura 14. Comportamiento de curvatura interna a través de fotoelasticidad.

7 Validación

Se realizó una comparación entre los resultados de la técnica de fotoelasticidad y los del modelo de elementos finitos. En la figura 15 presenta una afinidad cualitativa respecto de la forma de la curva entre ambos resultados para la curvatura semicircular.

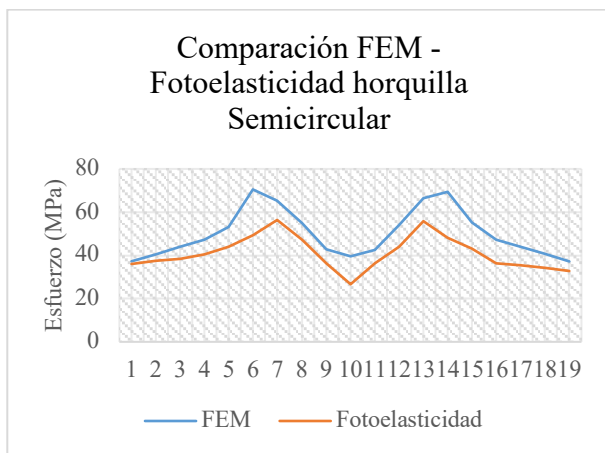


Figura 15. Comparación del esfuerzo en curvatura interna a través de fotoelasticidad versus FEM en horquilla semicircular.

Así mismo se comparó los resultados de la técnica de fotoelasticidad y los del modelo de elementos finitos para la estructura biológica. En la figura 16 se presenta una afinidad cualitativa respecto de la forma de la curva entre ambos resultados.

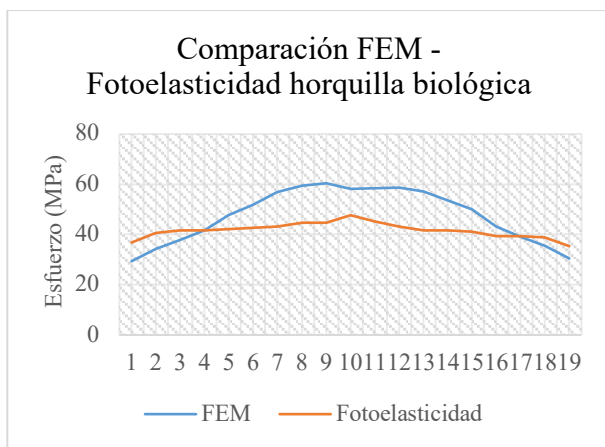


Figura 16. Comparación del esfuerzo en curvatura interna a través de fotoelasticidad versus FEM en horquilla biológica.

8 Conclusiones

Los resultados de la validación estructural entre la técnica experimental usada y el modelo de elementos finitos se comprobaron que la naturaleza realiza un proceso de mejora de la forma conforme va creciendo adaptativamente dentro del ambiente de cada estructura. El resultado puede facilitar el proceso de mejora de piezas mecánicas utilizadas en la industria y la

investigación basándose en el ejemplo de las estructuras biológicas que han evolucionado durante millones de años para sobrevivir a todo tipo de condiciones.

Las estructuras biológicas ofrecen un amplio repertorio en el diseño de geometrías complejas con el fin de minimizar y homogenizar el máximo los esfuerzos en los contornos evitando así los concentradores.

Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado en el marco de la línea de generación y aplicación de conocimiento “Optimización geométrica de productos” del Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL con el apoyo financiero de la misma.

REFERENCIAS

- [1] Mattheck, Claus, Design in Nature. Der Baum als Lehrmeister. 1997 Research Center Karlsruhe. Rombach Wissenschaft.
- [2] Ramírez, F., López, E. Ortiz, U., Guzmán, R. “Reducción de la concentración de esfuerzos para piezas de fundición por medio del método de elementos finitos utilizando algoritmos de crecimiento biológico”. IX Congreso Anual SOMIM 2003 vol. VI, pág. 25.
- [3] Ramírez, F., López, E. Ortiz, U. “Diseño óptimo de elementos mecánicos usando algoritmos de crecimiento biológico”. Revista Ingenierías Vol. VII, No. 22, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2004.
- [4] F. Eugenio López Guerrero, Francisco Ramírez Cruz, Carlos I. Romero Martínez, F. Javier de la Garza Salinas, José L. Castillo Ocañas.: Relación de la geometría de elementos mecánicos con el cambio de formas en la naturaleza como criterios de diseño”. XVI Congreso Anual SOMIM 2010.
- [5] Olason, Anton; Tidman, Daniel. Methodology for topology and shape optimization in the design process. Chalmers University of technology, 2010, Suecia.
- [6] Vishay Measurements Group Inc., “Calibration of photostress coatings”, Vishay Measurements Tech Note 701-1, Raleigh, North Carolina, USA, 2003.
- [7] Reflection Polariscopes Manual (LF/Z-2), Vishay Measurements Group Inc., Raleigh, North Carolina, USA.
- [8] Tae Hyun BAEK, “Measurement of Stress Distribution Around a Circular Hole in a Plate Under Bending Moment Using Phase-shifting

- Method with Reflective Polariscope Arrangement". Journal of solid mechanics and materials engineering, 2008.
- [9] J. M Vasco, F. A. Díaz, R. Doradro, R. López "Cálculo de los factores de intensificación de tensiones mediante técnicas ópticas de campo completo" 2012.
- [10] F. Trebuna, J. Jadlovsy, Z. Baksiova, A. Kostelnikova "Further Possibilities of Using Software PhotoStress for Separation of Principal Normal Stresses". 2010