

OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA CON CRITERIO DE CRECIMIENTO BIOLÓGICO PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS EN PLACAS CON PERFORACIONES TRANSVERSALES

Francisco Ramírez Cruz, Fco. Eugenio López Guerrero, Iván Romero Martínez.
Cuerpo Académico de Sistemas Integrados de Manufactura.
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Pedro de Alba s/n, Apdo. Postal 9-"F", CP. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L., México.
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904.
Correo electrónico: ramirez@uanl.mx, elopez@uanl.mx.

RESUMEN

El diseño de componentes mecánicos incluye normalmente secciones transversales no uniformes que junto con las inclusiones y defectos dentro de los materiales pueden dar lugar a un incremento en el valor de los esfuerzos. Es posible predecir la distribución de estos esfuerzos de forma analítica o mediante diferentes métodos, entre los que se encuentra el del elemento finito, lo que permite diseñar optimizando las zonas de concentración de esfuerzos.

Este trabajo presenta un método de optimización geométrica para placas con perforaciones transversales, geometrías ampliamente utilizadas en el diseño de máquinas. Se analizó la geometría bajo condiciones de tensión por medio de elemento finito y se encontró la transición óptima de la perforación para una distribución uniforme de esfuerzos utilizando criterios de crecimiento biológico, mejorando significativamente el factor de concentración de esfuerzos.

Palabras clave: elemento finito, crecimiento biológico, concentración de esfuerzos, diseño de máquinas, optimización de la forma.

ABSTRACT

The design of machines normally involves structural members with non uniform cross sections that added to material internal defects might cause an increase in stress concentrations.

This work presents a geometric optimization method for a flat bar with a transverse hole in tension. The flat bar was analysed under a load situation with a finite element system. A new shape was found with an optimal stress distribution with a biological growth optimization criteria.

Keywords: Finite element, bio-design, notch stress, biological growth, design of machines, shape optimization.

INTRODUCCIÓN

En la práctica de diseño de componentes mecánicos se analizan los aspectos funcionales, se dimensiona y se calculan los esfuerzos debidos a las cargas que soportarán. Además se analizan los aspectos del proceso de manufactura que influyen directamente con la forma última del producto. Debido al requerimiento de respuesta rápida que los mercados exigen, el ingeniero de diseño hoy en día utiliza sistemas computacionales que le permitan analizar eficaz y rápidamente las posibles zonas críticas que presenten las piezas antes de que éstas sean producidas.

Resulta deseable que las piezas sean mejoradas bajo criterios de minimización de los esfuerzos máximos y poder así garantizar la vida útil del componente por medio de técnicas de elemento finito y la aplicación de criterios de optimización [1, 2] basados en el crecimiento biológico.

En la figura 1 se ejemplifica el efecto del cambio de geometría en la concentración de esfuerzos.

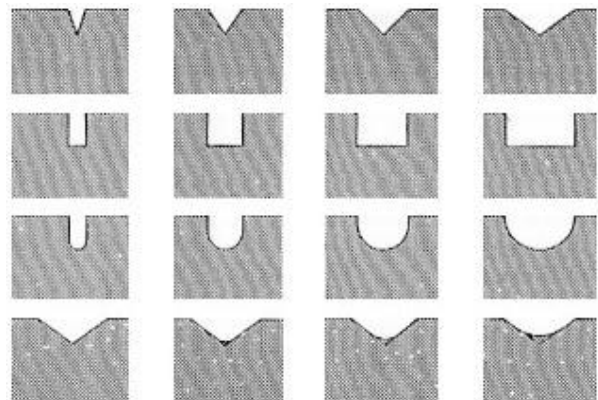


Figura 1. Efecto del cambio de geometría en la concentración de esfuerzos, ordenadas de acuerdo a su efecto en el flujo de esfuerzos (Decreciente de izquierda a derecha y de arriba abajo).

En trabajos anteriores se ha investigado la factibilidad de reproducir las condiciones de forma de estructuras biológicas y su posible utilización en el diseño de componentes mecánicos [3, 4, 5, 6, 7] (ver figura 2).

A través de múltiples análisis a estructuras biológicas se ha comprobado con el método de elementos finitos que dichas estructuras se encuentran optimizadas respecto a su carga y que para todas ellas es válido el principio de superficies con esfuerzos constantes [8]. En este contexto debe ponerse especial atención a Nachtigall [9] cuya variedad de publicaciones expone muchos fenómenos interesantes en la naturaleza.

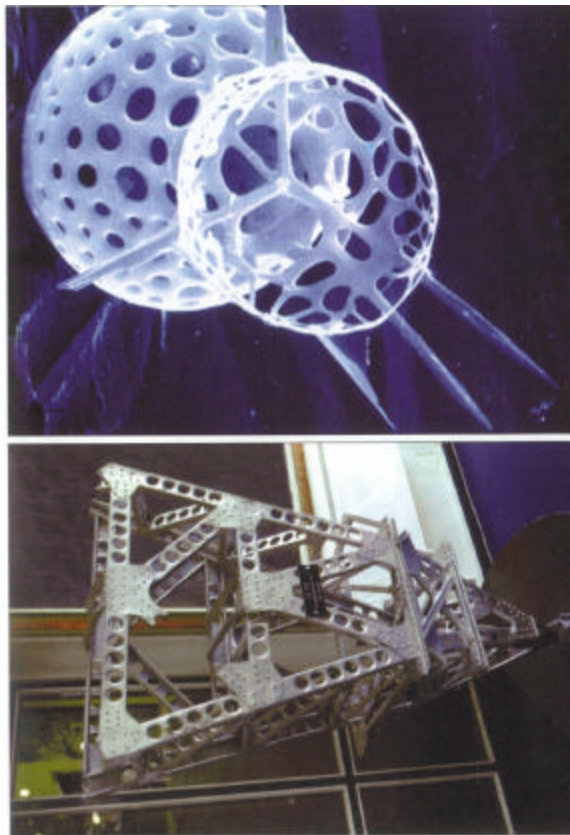


Figura 2. Estructura representativa del crecimiento biológico.

Este artículo presenta la implementación de los resultados obtenidos en trabajos anteriores [10, 11, 12], para optimizar la perforación en una placa bajo condiciones de tensión y una distribución de esfuerzos mejorada.

OBJETIVOS

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Calcular la distribución de los esfuerzos en una placa perforada mediante una simulación de elemento finito.
- Reducir la concentración de esfuerzos máximos aplicando la optimización de la forma basados en el crecimiento biológico.
- Comparar los resultados geométricos antes y después de la optimización.

CRITERIOS DE CRECIMIENTO BIOLÓGICO

Se ha comprobado ampliamente que tanto las plantas como los animales están perfectamente adaptados a su respectiva función. De forma natural, las estructuras biológicas tratan de evitar los picos de esfuerzo; por ello, el reproducir el mecanismo de crecimiento de estructuras biológicas se convierte en un poderoso método de optimización para la ingeniería de diseño. La regla mecánica subyacente que determina una concentración de esfuerzos igualmente distribuidos es el axioma de esfuerzos constantes formulada por Mattheck [3].

La secuencia de pasos para la solución de un problema de optimización geométrica bajo las condiciones antes mencionadas es:

- Modelar la estructura con elementos finitos.
- Definir las variables de diseño.
- Definir restricciones del movimiento de nodos (de acuerdo al proceso de manufactura y funcionalidad).
- Especificar los objetivos de optimización (minimización del esfuerzo máximo).

Una explicación más detallada acerca de la optimización de la forma basada en el crecimiento biológico puede ser consultada en trabajos anteriores [4,5].

ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS A TRAVÉS DEL FEM

El material seleccionado para la simulación es hierro nodular. El coeficiente de Poisson, el módulo de elasticidad y el esfuerzo aplicado se muestran en la tabla I.

TABLA I. Valores utilizados en la simulación.	
Coeficiente de Poisson.	0.28
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	170,000
Esfuerzo aplicado (N/mm ²)	110

En la modelación se asignaron las condiciones frontera tales que en el extremo lateral izquierdo de la placa perforada se aplicó un desplazamiento inicial sobre los

nodos en el plano XY, mientras que en el extremo derecho una carga de tensión es aplicada de forma uniforme.

La figura 3 presenta la distribución de esfuerzos von Mises en la placa perforada antes de la optimización, se puede observar una concentración de esfuerzos en el cambio de sección con $\sigma_{\max} = 331 \text{ N/mm}^2$.

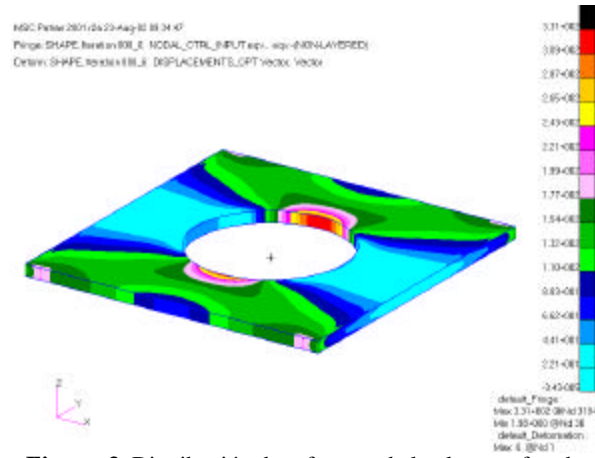


Figura 3. Distribución de esfuerzos de la placa perforada antes de la optimización geométrica.

CASOS DE ESTUDIO

Este trabajo comprende el análisis de dos casos. En ambos, el objetivo de la optimización es reducir la concentración de los niveles de esfuerzo en las zonas de cambio en la sección transversal. En el caso A se restringió el movimiento de los nodos a lo largo de los ejes X y Y, permitiendo modificar su posición a lo largo del eje Z.

Es posible que las condiciones del ensamble o la función de la placa perforada limiten la reducción de los niveles de esfuerzo mediante el incremento el espesor. El caso B plantea esta situación, obteniendo resultados similares mediante la optimización la forma del contorno de la perforación. En este caso, se restringió el movimiento de los nodos a lo largo del eje Z, dando libertad al movimiento de los nodos en X y Y.

OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA

A partir del análisis estático de la distribución de los esfuerzos máximos a través del método de elementos finitos de una placa perforada es posible definir la zona crítica a optimizar comprobando que, para coordenadas polares (ver figura 4), la componente de esfuerzo en el punto P está dada por:

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}\sigma\left[1 - \left(r^2/\rho^2\right)\right] - \frac{1}{2}\sigma\left[1 + 3\left(r^4/\rho^4\right)\right]\cos 2\theta \quad (1)$$

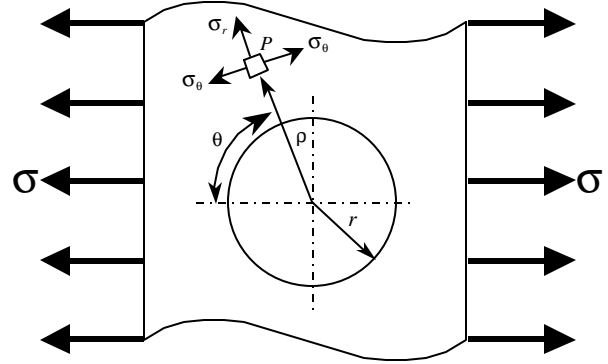
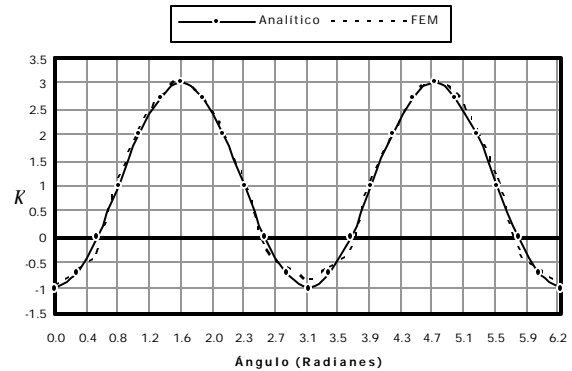


Figura 4. Placa con una perforación circular.

El valor máximo del esfuerzo en las zonas críticas de las piezas se encuentra multiplicando el esfuerzo nominal por un factor K de concentración de esfuerzos (ver ecuación 2). Los factores de concentración de esfuerzos han sido determinados para una gran variedad de formas geométricas y tipos de carga [18].

$$K = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{nom}} \quad (2)$$

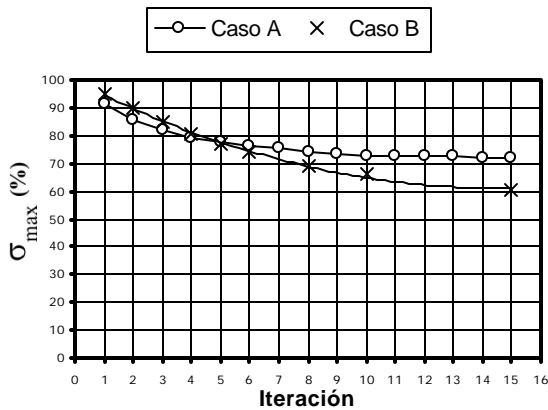
En la gráfica 1 se muestran los resultados del cálculo de los valores de esfuerzo para el caso en estudio, mediante el método analítico y el FEM.



Gráfica 1. Factor de concentración de esfuerzos K en la placa perforada bajo condiciones de tensión.

RESULTADOS

En la gráfica 2 se puede observar, para ambos casos, el porcentaje de esfuerzo máximo obtenido mediante el FEM, después de la optimización geométrica, con respecto al valor de esfuerzo máximo de la pieza antes de la optimización, para las primeras 15 iteraciones.



Gráfica 2. Porcentajes de esfuerzo máximo después de la optimización geométrica.

En la figura 5 se muestra la distribución de esfuerzos von Mises después de la optimización geométrica para el caso A. Para obtener una mejor distribución de esfuerzos fue necesario incrementar el espesor en las zonas de concentración de esfuerzos.

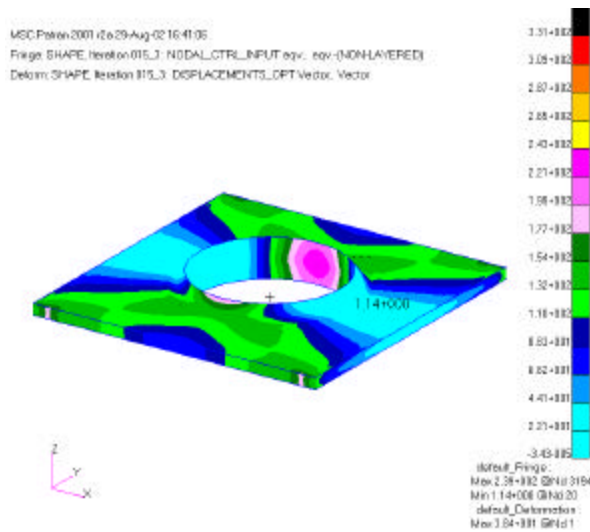


Figura 5. Distribución de esfuerzos de la placa perforada después de la optimización geométrica.

Después de 15 iteraciones la región crítica presenta un esfuerzo máximo de 239 N/mm², consiguiendo de esta manera una reducción de esfuerzos entre la geometría original y la geometría resultante de aproximadamente

un 27.8%. Los niveles de esfuerzo se redujeron de forma considerable, requiriendo solamente un aumento de masa del 10%.

Para el caso B, los resultados se muestran en la figura 6. Después de 35 iteraciones, la distribución de esfuerzos von Mises en la placa perforada en el cambio de sección presentó un valor de $\sigma_{\max} = 185$ N/mm². No sólo se redujeron en más del 40% los valores de esfuerzo, también se obtuvo un ahorro de material del 4%.

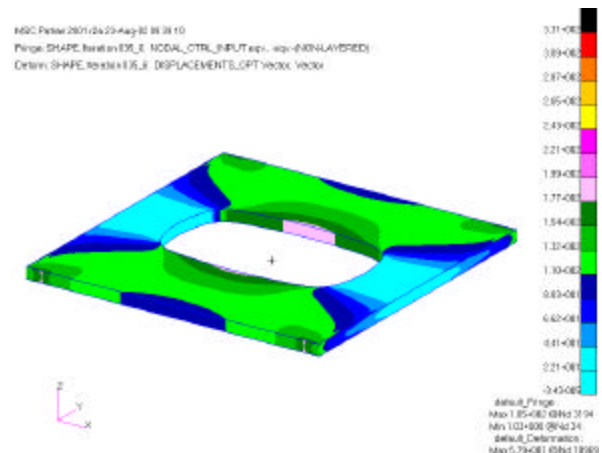


Figura 6. Distribución de esfuerzos de la placa perforada después de la optimización geométrica.

CONCLUSIONES

La distribución de esfuerzos después de la optimización es bastante uniforme. Con la optimización de la forma basada en el crecimiento biológico se obtuvo una reducción de esfuerzos de hasta 44.4% después de 40 iteraciones. La relación de esfuerzo en la pieza mejorada con respecto al valor máximo en la geometría original es del 55.6%. Esto significa un aumento en la capacidad de carga mayor al 80%.

Los resultados obtenidos en este trabajo presentan la posibilidad de mejorar la resistencia de los productos mediante componentes de maquinaria que contengan matemática de curvas y superficies libres para obtener una distribución uniforme y optimizada de esfuerzos, como la que se encuentra en la naturaleza. Incluso plantea la opción de hacerlo reduciendo la cantidad de material para su fabricación.

El presente estudio contempla solamente la mejora en la distribución de esfuerzo y no las condiciones de manufactura impuestas por el diseño resultante.

REFERENCIAS.

- [1] Zienkiewicz, O., R. Taylor, "The finite element method". Ed. Mc Graw Hill, 1967.
- [2] Engeln-Müllges. Numerik Algorithmen. VDI Verlag, 1996.
- [3] Mattheck, K. Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister. Freiburg im Breisgau: Rombach 1992.
- [4] 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, Sept. 2003.
- [5] 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, UANL Enero-Marzo 2004.
- [6] Sauter, J. Beanspruchungsmini-mierung mit biologischer Intelligenz, ANSYS Users' Meeting, Tagungsband, 23-25. Oktober 1991, Bamberg.
- [7] Sauter, J. CAOS oder die Suche nach der optimalen Bauteilen durch eine effiziente Gestaltoptimierungs-strategie, XX. Internationaler Finite Elemente Kongress, Tagungsband, 18-19. November 1991, Baden-Baden, 1991.
- [8] Mattheck, K. Why they grow, how they grow – the mechanics of trees, arboricultural Journal 14 (1990).
- [9] Nachtigall, W. Biotechnik, Heidelberg; Quelle & Meyer, 1971.
- [10] Ramírez, F., "Validating of optimization models for the Bio-Casting-Design". Master Thesis, Technische Univesität Hambrug-Harburg, 2001.
- [11] Ramírez, F., "Konstruktionselemente in grossen Sandgussteilen". Interner Bericht, Heidenreich & Harbeck, 2001.
- [12] Schmidt, Th., "Kerbwirkung in rotationssymmetrischen Bauteilen". Interner Bericht, Heidenreicht & Harbeck, 2001.