

OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE FORMA EN EL DISEÑO DE CAVIDADES EN ELEMENTOS PLANOS MEDIANTE ALGORITMOS EVOLUTIVOS

David Lozano, Fernando Velázquez y Antonio Zepeda

*Grupo de Diseño Mecánico Óptimo (GDMO), Facultad de Ingeniería,
Centro de Diseño, Manufactura e Innovación Tecnológica (CDMIT),
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Coyoacán, D.F., México, C.P. 04510,
email: davidlt6@yahoo.com.mx, fernvel@unam.mx, antonioz@unam.mx*

Palabras clave: Optimización, Optimización estructural de forma, Algoritmos evolutivos, Análisis por elementos finitos.

Resumen. La optimización de forma es un campo de investigación que busca integrar y desarrollar metodologías que permitan encontrar nuevos diseños, basados en la modificación de la forma de las estructuras, cumpliendo con criterios tales como: menor concentración de esfuerzo, vibraciones mecánicas, temperaturas, reducción de peso, factor de seguridad, etc., y que a su vez se fabriquen con la menor cantidad de material. En la actualidad, siguiendo este campo de investigación, en México, se ha creado el Grupo de Diseño Mecánico Óptimo (GDMO), en la Facultad de Ingeniería, perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que tiene como objetivo principal el formar ingenieros capaces de abordar problemas de diseño a partir de métodos de optimización que les permita, en todo sentido, obtener la mejor de las soluciones posibles, a problemas de ingeniería. Es entonces el propósito del presente trabajo, mostrar los resultados obtenidos por dicho grupo, al implementar un método de optimización estructural, que integra reglas evolutivas, para obtener la optimización de forma de piezas mecánicas, tales como bridas o tubos a presión, con el objetivo de generar cavidades, modeladas mediante curvas B-Spline, cuya forma optimizada produzca un nivel de esfuerzos homogéneo y con ello reducir el volumen de dicha pieza, con el paso del tiempo o iteraciones y utilizando el Análisis por Elementos Finitos (FEA), como herramienta de solución y siempre cumpliendo con un factor de seguridad establecido. Traduciendo todo lo anterior como una mejor utilización de material de manera más eficiente en la pieza optimizada.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el hombre ha llevado a cabo la "optimización" dentro de sus sistemas, con el fin de crear estructuras, mecanismos, ensambles y subensambles, al igual que diferentes componentes mecánicos, capaces de mejorar el desempeño propio y/o del sistema en el cual son utilizados. En un principio dichos métodos sólo lograban el mejoramiento de las cosas y no su optimización. Lo anterior debido, principalmente, a las limitaciones en cuanto a capacidad y tiempo requerido para la realización de cálculos. A partir de la Segunda Guerra Mundial, gracias al boom tecnológico que ésta implicó, se empezaron a utilizar verdaderos métodos de optimización, aunque al inicio no gozaron de su auge actual debido a la escasa capacidad de cálculo de la época.

En la actualidad la optimización es un proceso que tiene grandes aplicaciones en prácticamente cualquier área, con lo cual se logra un gran mejoramiento de procesos y productos que, por tanto, dan lugar a reducción de costos, tiempos, etc. En este sentido, la optimización se define como: "... un proceso a través del cual se busca obtener o determinar la mejor solución posible, de entre un grupo de resultados, que a su vez satisface las restricciones que presenta el sistema al cual se aplica" (Lozano y Velázquez, 2008). Matemáticamente, la optimización significa: "La búsqueda del máximo o mínimo de una función objetivo" (Annicchiarico, 2007).

En ingeniería, tiene más sentido describir la optimización como el cálculo de una o varias funciones objetivo, por ejemplo: peso, esfuerzo, costo, geometría, frecuencias naturales, temperatura, etc., que dependen de variables conocidas: cotas, sistemas de cargas, sistemas de restricciones, materiales, requisitos de fabricación, etc.

En la metodología habitual del diseño estructural, debido en gran parte a las limitaciones de tiempo, los procesos de diseño dependen en gran medida de la experiencia e intuición del diseñador (ver figura 1). Cuando el diseñador se enfrenta a un determinado problema, suele dedicar la mayor parte de su tiempo a analizar una posible solución al problema, comprobando el cumplimiento de la normativa aplicable al caso, en vez de una aplicación intensiva de la teoría de optimización (Lozano, 2010). En general, las actividades de un diseñador son: 1) Definir las especificaciones del problema; 2) Elegir criterios de diseño adecuados; 3) Modelar y evaluar; 4) Realizar cálculos empleando técnicas como FEA; 5) Interpretar y evaluar los resultados del FEA y 6) Elegir la mejor de las soluciones e incluso proponer mejoras. La última actividad, elegir la mejor solución y mejorarla, depende fuertemente de la experiencia del diseñador, por lo que no es simple. Además, el diseñador no dispone de los parámetros suficientes para asegurar que la última propuesta de solución que obtenga sea mejor, ya que le es físicamente imposible evaluar el espectro completo de posibles soluciones (Querin, 1997).

Ya que el diseño juega un papel muy importante dentro de la mecánica, para poder obtener resultados vanguardistas, se han desarrollado infinidad de análisis, métodos y técnicas con sus respectivas ventajas y/o limitaciones, entonces surge el

problema de diseño óptimo, que se entiende como: *determinar el valor de un conjunto de variables de diseño, de manera que se minimice el valor de una función objetivo, a la vez que se cumplen una serie de restricciones impuestas* (Querin, 1997). Los pioneros del diseño óptimo, aplicado a estructuras, fueron Maxwell y Michell quienes desarrollaron métodos para el diseño óptimo de estructuras tipo armadura.

La introducción de técnicas de optimización en el diseño estructural se hace necesaria a la vista de las ventajas que ofrece, reduciendo costos y tiempos en procesos productivos, etc., permitiendo a los diseñadores mayor dedicación a fases más creativas del diseño, y la posibilidad de considerar especificaciones, cada vez más numerosas y difíciles de cumplir, que se exigen a las estructuras actuales (ver figura 1).

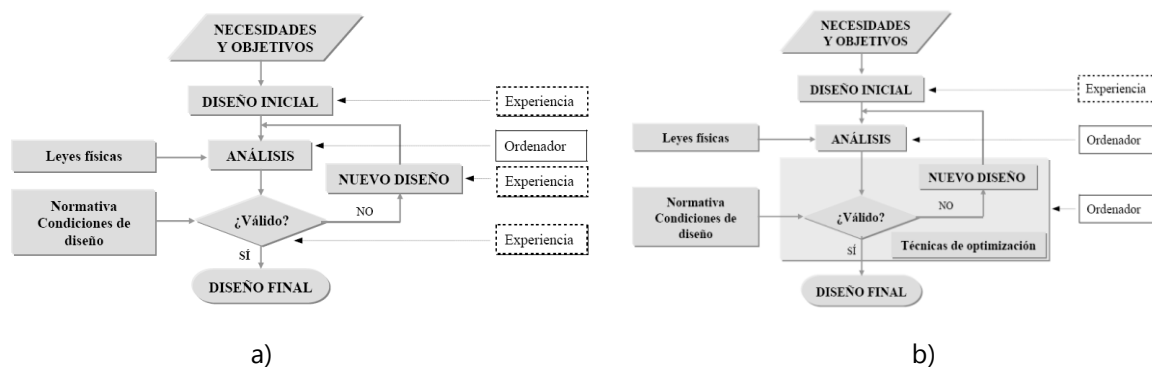


Fig. 1. a) Proceso de Diseño y b) Proceso de Diseño Óptimo.

1.1 Optimización estructural.

Desde hace varias décadas, se han realizado estudios en el campo de optimización estructural. El desarrollo de metodologías eficientes para encontrar estructuras óptimas es muy importante, debido a que facilitaría resolver problemas complejos en áreas como la arquitectura, la ingeniería civil y la mecánica. Entonces la definición de optimización estructural: *"...es una fusión en las áreas de ingeniería, matemáticas, ciencia y tecnología, que tiene la meta de obtener la mejor función de una estructura, como puede ser un puente, un vehículo espacial o simplemente un elemento mecánico, bajo un sistema de cargas y restricciones."*(Velázquez, 2009)

Hacia la década de los 40's dieron lugar a lo que hoy se conoce como Inteligencia Artificial (AI por sus siglas en inglés), las cuales tomaron importancia gracias al desarrollo de equipos de cómputo a partir de la misma década. Ejemplos de estos métodos son: Redes Neuronales, Lógica Difusa, Algoritmos Genéticos y Recocido Simulado, entre otros. Lo que tienen en común estos métodos con los de diseño es que abordan problemas complejos, es decir con múltiples: variables, escenarios, objetivos, criterios e incluso soluciones. Por medio de la adaptación de los métodos de AI al contexto de los problemas de diseño es posible determinar soluciones óptimas a estos. La cantidad de ejemplos es muy vasta y abarca problemas de diseño

estructural (Velázquez y Santillán, 2006), diseño herramental, diseño automotriz, entre muchos más.

Por otra parte, varios métodos de optimización dirigidos concretamente al diseño óptimo de problemas de ingeniería han sido desarrollados a partir de la década de 1990. De estos los que se destacan, por su importancia en varias ramas de la ingeniería, son los métodos de optimización estructural. Ejemplos de estos son: Evolutionary Structural Optimization ESO (Xie y Steven, 1992), Biological Growth, Computer Aided Optimization CAO and Soft Kill Option SKO, entre otros.

El uso de los métodos de optimización en problemas de ingeniería ha sido promovido por el acelerado desarrollo de métodos de análisis robustos que son capaces de analizar problemas muy complejos de manera simple. Los métodos más importantes que pueden mencionarse son: método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés), método de los elementos frontera (BEM por sus siglas en inglés), método de los volúmenes finitos (FVM por sus siglas en inglés), etc.

2. GRUPO DE DISEÑO MECÁNICO ÓPTIMO (GDMO)

Los métodos de optimización, que han surgido desde diferentes ramas del conocimiento, plantean formas de resolver problemas complejos obteniendo soluciones cercanas a las óptimas. La aplicación de dichos métodos a problemas de ingeniería representa un área de oportunidad que, gracias a la gran capacidad de las computadoras actuales, ha empezado a desarrollarse tanto académicamente como industrialmente. Por lo anterior, en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (FI-UNAM) se formó el Grupo de Diseño Mecánico Óptimo (GDMO) con el objetivo principal de formar ingenieros que sean capaces de abordar problemas de diseño a partir de métodos de optimización que les permita, en todo sentido, obtener la mejor de las soluciones posibles. Bajo la coordinación de académicos expertos en diversos tópicos de la Ingeniería de Diseño (diseño mecánico, de productos, automotriz, análisis por elementos finitos, inteligencia artificial y optimización), y con la participación entusiasta de alumnos de Ingeniería Mecánica, el grupo desarrolla proyectos académicos dirigidos a la optimización aplicada al diseño mecánico.

2.1 Motivación

La gran variedad de aplicaciones que tienen los métodos de optimización y la necesidad de generar mejores soluciones a problemas complejos han propiciado la creación de importantes grupos de investigación alrededor del mundo, comprometidos con el desarrollo y aplicación de métodos sofisticados de diseño óptimo. De esta forma estos grupos forman recursos humanos con conocimientos de vanguardia y de gran valía tanto académica como industrialmente, al mismo tiempo que generan nuevos conocimientos. La incorporación de estos recursos humanos fortalece en gran medida, tanto a la academia como a la industria, ya que les da la

capacidad de abordar problemas de mayor complejidad, mejorar sus formas de trabajo, al mismo tiempo que reducen costos, tiempos de diseño y rediseño, desperdicios, etc.

Los objetivos en la creación del grupo de trabajo son: 1) cultivar recursos humanos con habilidades, competencias y conocimientos sólidos en la aplicación de métodos de optimización e inteligencia artificial a problemas de ingeniería de diseño; 2) desarrollar herramientas computacionales propias 3) utilizar dichas herramientas a problemas en ingeniería de diseño en donde se justifique la optimización estructural.

Actualmente el GDMO se enfoca a la optimización estructural, sin embargo se contempla a mediano plazo, una vez que se llegue a un estado de madurez adecuado, abordar la optimización desde los puntos de vista de fabricación, ergonomía, entre otros.

Las herramientas computacionales que se desarrollan en el GDMO están sustentadas en un amplio conocimiento de mecánica de materiales, metodologías de diseño, matemáticas avanzadas, FEM, BEM y en lenguajes de programación. Inicialmente, se implementan las principales metodologías de optimización estructural (ESO, CAO y SKO), a la vez que se emplea software comercial de optimización para la validación de resultados.

En el GDMO se establecen, siguiendo los lineamientos, realizando las siguientes actividades:

- ⊕ Investigar el estado del arte en el campo del diseño óptimo
- ⊕ Resolver problemas de análisis en proyectos de diseño mecánico
- ⊕ Solucionar problemas de optimización estructural por medio de software comercial
- ⊕ Desarrollar aplicaciones de cómputo para el diseño mecánico óptimo
- ⊕ Capacitarse en el uso de software comercial en optimización estructural

3. OPTIMIZACION ESTRUCTURAL DE FORMA MEDIANTE ALGORITMOS EVOLUTIVOS.

Los problemas de diseño en la ingeniería mecánica están relacionados con una gran variedad de disciplinas tales como: diseño estructural, selección de materiales, transferencia de calor, manufactura, ergonomía, estética, economía, entre otras. Aunque los métodos tradicionales de diseño brindan maneras de resolver dichos problemas, las soluciones generadas difícilmente son las mejores posibles debido, principalmente, a la cantidad de propuestas de solución que un equipo de diseñadores son capaces de manejar simultáneamente de manera práctica y el gran número de variables de diseño involucradas.

El desarrollo de componentes mecánicos incluye normalmente secciones no uniformes que pueden dar lugar, por ejemplo, a concentradores de esfuerzos. En el diseño de estos, se analizan aspectos funcionales, se dimensionan y realizan cálculos

de esfuerzo debido a las cargas que soportan, así como 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 permiten analizar eficaz y rápidamente las posibles zonas críticas que presenten las piezas antes que éstas sean producidas (Cañavate, 2004). En la actualidad debido a la complejidad presentada por los componentes, es deseable introducir simplificaciones en orden, para reducir el tamaño del problema y con ello todavía tener soluciones razonablemente precisas además de reducir tiempos y altos costos computacionales. Las simplificaciones más comunes son el esfuerzo plano y la deformación plana (Bhatti, 2005).

Hoy en día, la optimización de forma es un campo de investigación, que busca integrar y desarrollar metodologías que permitan encontrar nuevos y mejores diseños estructurales, basados en la modificación de la forma.

Algunos ejemplos que involucran optimización estructural de forma son: el diseño del diámetro de tuberías: una red de distribución de agua, en el área médica: las placas de sujeción para injertos, como puede ser: en la columna vertebral, en el fémur, en la cadera, etc., donde se busca que estén bajo un estado mecánico íntimo al hueso, ya que esto promueve una mayor estabilidad y duración de la placa, además se reduce el número de cirugías durante la vida del paciente. Otro ejemplo es el hormigón: las placas alveolares pre-tensadas, por su alta calidad y bajo consumo de materiales, éstas se utilizan sobre todo en edificios de oficinas, hospitales, colegios, centros comerciales, edificios de apartamentos, etc.

Siguiendo esta línea de investigación como lo es la optimización estructural de forma, en GDMO se analizó el problema que involucra la generación de cavidades en elementos planos, mediante la implementación de una rutina de programación, utilizando algoritmos evolutivos.

El propósito del presente trabajo es implementar un método de optimización estructural, para obtener la optimización de forma de piezas mecánicas, tales como placas con cavidades, bridas, tubos a presión, etc., con el objetivo de generar cavidades cuya forma produzca un nivel de esfuerzos homogéneos en las piezas, para con ello reducir el volumen de dicha pieza.

La implementación de la herramienta de optimización estructural de forma, presentada en este trabajo, integra las ventajas que ofrecen las reglas evolutivas, con base en reglas sencillas de lógica AND y OR, y las facilidades que brindan las herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD por sus siglas en inglés), de manera que la geometría de las piezas sea optimizada de tal forma que, con el paso del tiempo, el esfuerzo en cada región de las piezas tenga un valor homogéneo sin la presencia tanto de concentradores de esfuerzo así como zonas de bajo nivel de esfuerzo. Lo anterior se traduce como una utilización de material eficiente. En particular el método implementado es este trabajo utiliza el modelado geométrico mediante curvas B-Spline y el Análisis por Elementos Finitos (FEA por sus siglas en inglés), como herramienta de solución.

3.1 Descripción del método de optimización.

En la figura 2 se muestra de manera general un diagrama de flujo, correspondiente a la metodología de optimización de forma en este trabajo. Aquí se muestra la aplicación de un mallador adaptativo (Lozano y Velázquez, 2008), generado específicamente para este trabajo, basado en las características del modelado geométrico, lo que provocará una mayor aproximación a la solución final durante la optimización de forma.

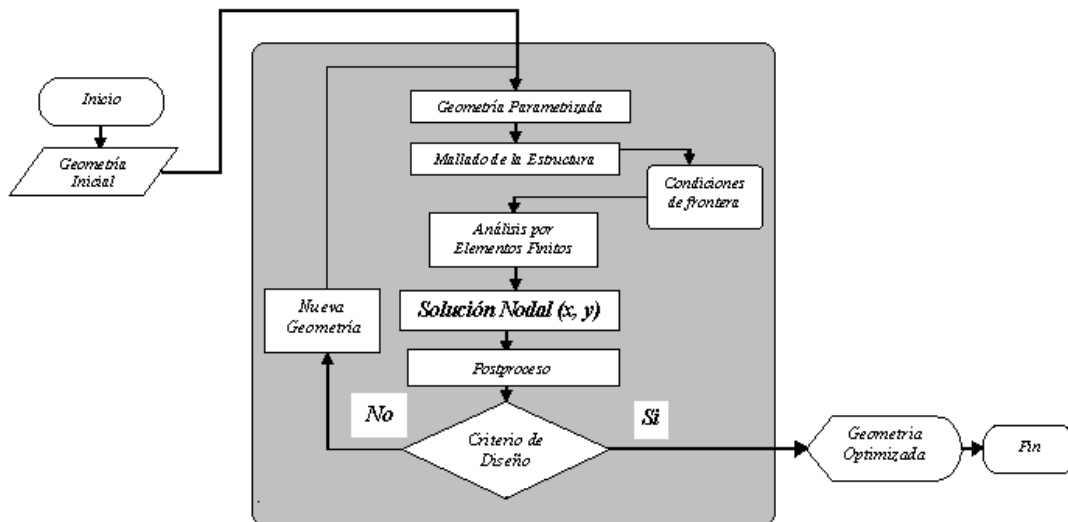


Fig. 2. Diagrama de flujo de la metodología de optimización.

En resumen el algoritmo de optimización de forma (Lozano, 2010), es el siguiente:

1) Definir la geometría de la pieza se mediante curvas B-Spline.

Las curvas B-Spline son curvas suaves, es decir, que no presentan cambios bruscos de dirección. De esta forma, al modificar la geometría de una pieza que se optimiza, se evita la aparición de concentradores de esfuerzos. Además, los cambios realizados en la posición en un punto de la curva, implica que la curva se ajuste en una región bien definida, quedando el resto sin cambios, como se observa en la figura 3.

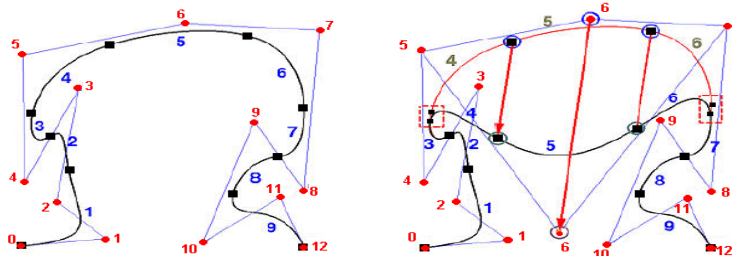


Fig. 3. Curva B-Spline. Cambio de posición en un punto.

Una curva B-Spline es una curva polinomial definida por segmentos de la siguiente manera:

$$C(u_i) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad (1)$$

Las funciones $N_{i,p}(u)$ son las funciones de ponderación de la posición de los puntos de control (P_i) sobre la forma de la curva B-Spline $C(u_i)$.

2) Mallar el modelo de la pieza.

El mallado en elementos finitos del modelo es parte del preproceso del FEA. En este caso se emplea un mallador adaptativo desarrollado anterior a este trabajo (Lozano y Velázquez, 2008), el cual tiene la capacidad de adaptar el tamaño de los elementos finitos en las fronteras de las cavidades que se estén optimizando (ver figura 4). El cual esta basado en el modelado de las curvas B-Spline.

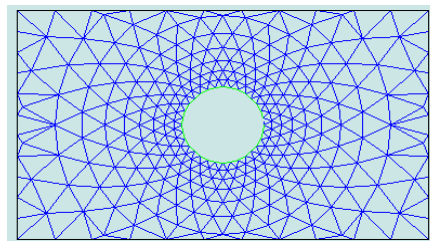


Fig. 4. Malla empleada para la optimización.

3) Determinar el esfuerzo de von Mises de los nodos en la malla a través de FEA.

El esfuerzo de von Mises se calcula en los nodos y este valor es el empleado para determinar el estado de esfuerzos nodal y localizar con ello, aquellas regiones de las cavidades susceptibles a ser modificadas en cada iteración del proceso de optimización. La optimización de forma se realiza mediante cambios graduales de la frontera de las cavidades del modelo (Velázquez y Santillán, 2006). Las regiones modificables se identifican mediante las siguientes reglas:

$$\sigma_i \leq TR^* \sigma_R \quad (2)$$

$$\sigma_i \geq TA^* \sigma_R \quad (3)$$

La ecuación (2) indica qué nodos en la frontera de la pieza deben sufrir remoción de material, mientras que los que satisfacen (3) sufrirán adición. Los valores TR y TA son las tasas de remoción y adición de material. Durante el proceso de optimización se presentan estados en los que (2) y (3) no son satisfechas por ningún nodo en la frontera de las cavidades, el cual se conoce como Estado Permanente. Cada vez que

se presenta un estado permanente los valores de TR y TA son incrementados de manera que el proceso de optimización se hace más estricto, generando así que el nivel de esfuerzos en la pieza se eleve. El uso de incrementos pequeños de un estado permanente a otro permite que el nivel de esfuerzo en la pieza sea homogéneo (Velázquez, 2009).

4) Modificar la forma de la pieza removiendo y adicionando material.

La remoción y adición nodales de material, definidas de acuerdo con las ecuaciones (2) y (3), se realizan iterativamente mediante desplazamientos pequeños en direcciones interior y exterior a la pieza respectivamente (ver figura 5), aplicados sobre los puntos de control de la curva que define la cavidad.

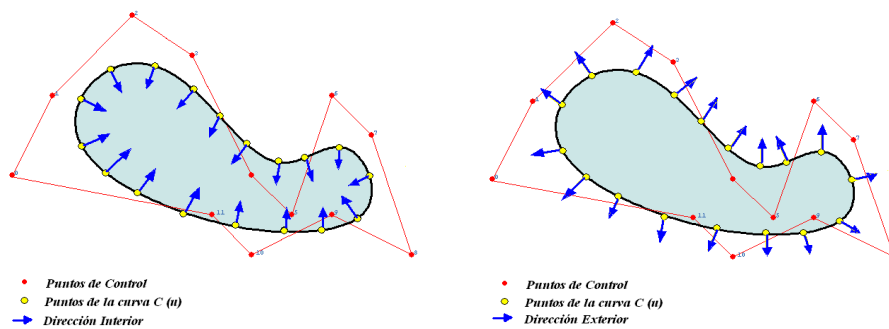


Fig. 5. Cavity and its interior (removal) and exterior (addition) directions to the piece.

In an iteration, the displacement vectors to modify the shape of the cavity are calculated according to the following equations:

$$\hat{d}_i = \frac{\vec{d}'_i}{|\vec{d}'_i|} \tag{4}$$

$$|\vec{d}'_i| = \frac{|\bar{D}_q|}{\text{Max}(|\bar{D}_1|, |\bar{D}_2|, \dots, |\bar{D}_m|)} * e_{size} * fm \tag{5}$$

where, \hat{d}_i is the direction of the displacement that must suffer the i -th control point to modify the shape of the cavity, $|\hat{d}_i|$ is the magnitude of the displacement over the i -th control point, \bar{D}_q is the displacement over the q -th node over the B-Spline curve, e_{size} is the average size of the finite elements in the mesh, fm is a mesh factor to regularize the magnitude of the displacements. This factor attenuates the magnitude of the displacements $|\hat{d}_i|$ as the optimization process approaches a permanent state. In figure 6 the observations are

desplazamientos sobre los puntos de control de una cavidad con forma circular, aquí se aprecia cómo la magnitud depende del nivel de esfuerzo.

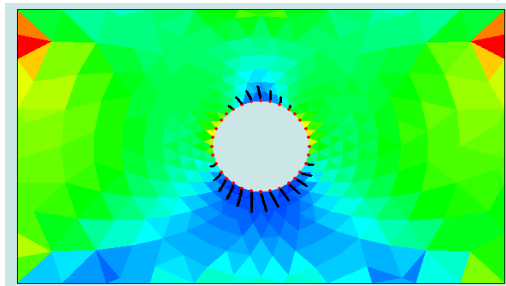


Fig. 6. Desplazamientos sobre los puntos de control de una cavidad.

5) Los puntos 2, 3 y 4 se repiten hasta que no es posible modificar la forma de la cavidad.

Esta imposibilidad de modificación de la forma, (Qurin, 1997) y (Velásquez y Santillán, 2006), se puede deber a que se han alcanzado: zonas que no deben invadirse por restricciones de forma, dimensiones o espesores; los valores límite de TR y TA; un límite de iteraciones; el valor límite de esfuerzo o deformación; y/o finalmente, se satisface el criterio de paro por nivel de esfuerzo definido por las siguientes ecuaciones:

$$N\sigma = \sum_{e=1}^{ne} (\sigma_e - \sigma_r)^2 \quad (6)$$

$$cp = \text{Absoluto} \left[\frac{N\sigma_{t+1} - N\sigma_t}{N\sigma_t} \right] \leq 10^{-5} \quad (7)$$

Donde, $N\sigma$ es el nivel de esfuerzo de la estructura, σ_e es el esfuerzo del elemento finito e-ésimo, σ_r es un esfuerzo de referencia (el de fluencia, por ejemplo), cp es el valor de paro.

4. CASOS DE APLICACIÓN DEL METODO DE OPTIMIZACIÓN DE FORMA

Para todos los casos de estudio presentados, la función objetivo es el peso de las piezas. Además de considerar un factor de seguridad como criterio de diseño.

4.1 Caso de estudio 1

En este caso de estudio se presenta el diseño de la forma interna de un cuerpo de acero enterrado y sometido a presión interna de 110 [MPa] (el cual puede ser un tubo o un contenedor), con forma externa circular de diámetro 4 cm. La forma inicial de la cavidad, como se muestra en la figura de abajo, es un rombo.

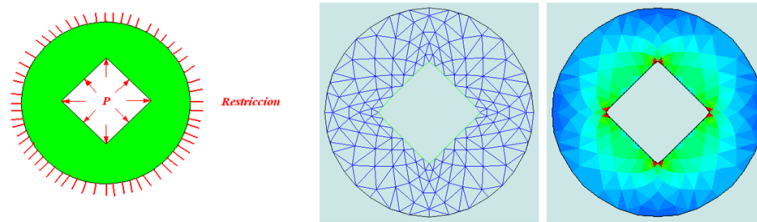


Fig. 7. Caso de estudio 3, sistema de cargas y restricciones.

Además, se emplea para el diseño un factor de seguridad de 2. En este caso se restringe el problema para un espesor de pared de 1 cm. En la figura 7 se observa dicho sistema, el mallado generado para esta estructura y la distribución de esfuerzos al interior de la misma.

Los parámetros de optimización utilizados son: $TR = 0.6$, $TA = 0.9$; el incremento para ambos parámetros es de 0.01 y el tamaño de los elementos finitos de 0.01. Del historial de optimización observado en la serie de imágenes de abajo se aprecia que las zonas concentradoras de esfuerzo, dadas por los vértices del rombo interno, son suavizadas en primer lugar para, posteriormente, optimizar la forma de la cavidad simplemente modificando su diámetro. Se puede decir que la optimización se lleva a cabo en dos etapas: eliminación de concentradores de esfuerzo y optimización de dimensiones. Por otra parte, en la misma serie de imágenes, es evidente cómo el nivel de esfuerzos llega a la homogeneidad a partir de que los concentradores de esfuerzo son eliminados.

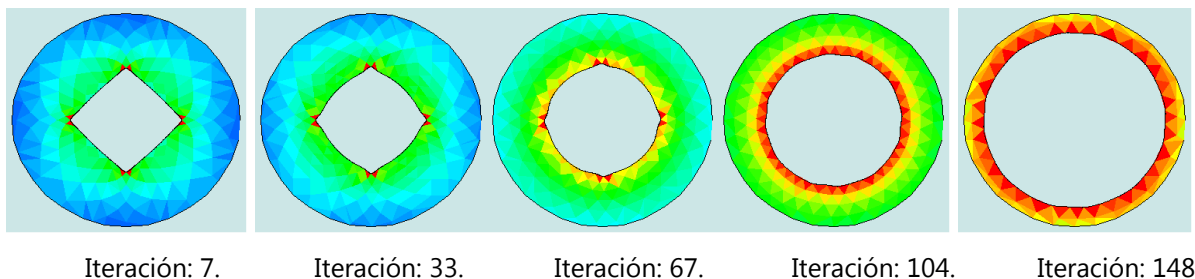


Fig. 8. Historial de evolución de la estructura.

Como era de esperarse, dada la geometría circular de la pieza, y tal como se muestra en las figuras 8 y 9, el volumen tiene una clara tendencia a disminuir indefinidamente. Por supuesto, el límite para tal disminución es el punto donde se igualan los diámetros interior y exterior. Sin embargo, dicho punto no se alcanza puesto que para la iteración 140, mostrada, se alcanza una relación del esfuerzo de fluencia sobre el esfuerzo máximo igual a 1.999.

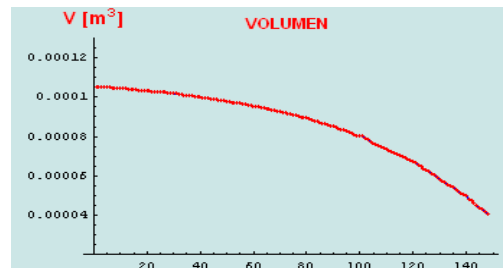


Fig. 9. Historial de Volumen.

En este caso el aumento de esfuerzo fue de 30.3 % y reducción de volumen de 52.8 %. Con este caso de estudio se demuestra el correcto funcionamiento del algoritmo de optimización de forma, al pasar de un perfil cuadrangular a uno circular, tal y como sucede con otras técnicas, que demuestran esto mismo (Annicchiarico, 2007), entre otros. En la figura 10, se muestran la comparación entre la estructura inicial (Vol.: 105.367 [cm³], Esf.: 382.221 [MPa]) y la estructura optimizada (Vol.: 049.7272 [cm³], Esf.: 498.242 [MPa]).

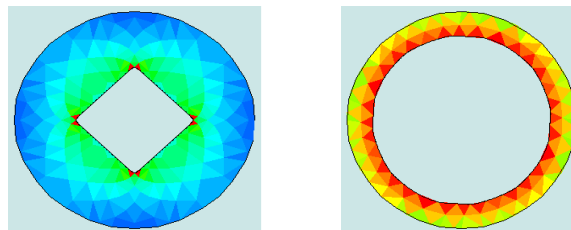


Fig. 10. Geometría del perfil: Inicial y Optimizado (Iteración 140).

4.2 Caso de Estudio 2

En el siguiente caso de estudio, se analiza una parte tipo viga corta, con una cavidad al centro de 4 cm de diámetro, la cual es fijada por medio de dos tornillos y sometida a una carga puntual vertical de 110 [N] en un extremo, tal como se muestra en la figura 11. El material empleado es un aluminio (módulo de elasticidad 70 [GPa] y coeficiente de Poisson de 0.33) con dimensiones 22x12 [cm] y espesor de 2.54 [cm]. El factor de seguridad se fija en $F_s = 1.3$.

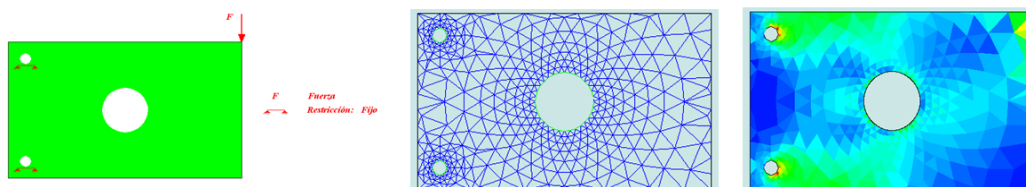


Fig. 11. Pieza a optimizar, mallado por elementos finitos y distribución de esfuerzos.

Los parámetros de optimización utilizados para este caso particular son: TR= 0.6, TA= 0.99, TER= 0.02, TEA= 0.0001 y Tamaño del elemento= 0.03.

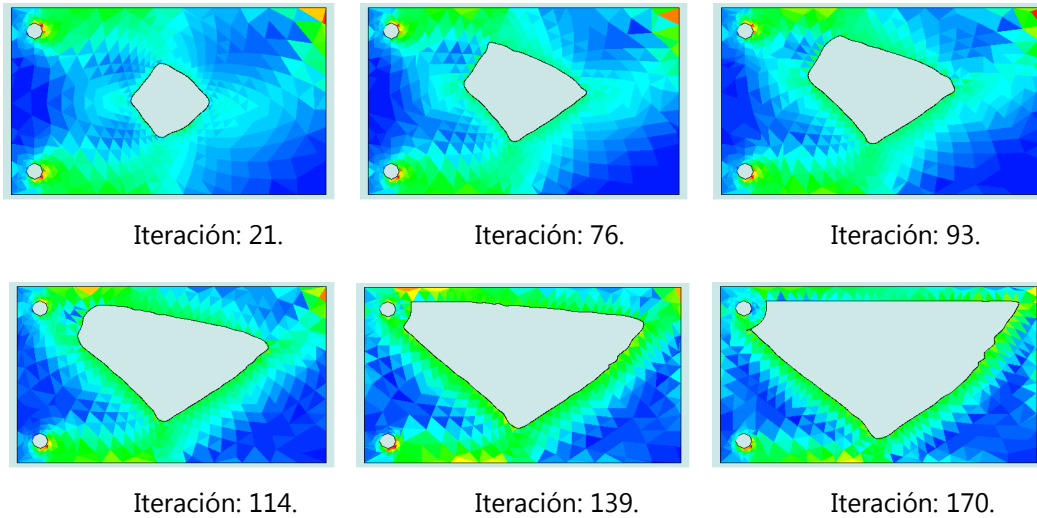


Fig. 12. Historial de evolución de la estructura del caso de estudio 2.

Como se observa en las figuras 12 y 13, no se alcanza una homogeneidad completa en los esfuerzos sobre la estructura ni tampoco un valor estable, asintótico, de volumen. No obstante, el factor de seguridad calculado en la estructura es de 1.29, valor muy próximo al límite establecido de 1.3. En este punto el valor de TR alcanza 0.82, lo cual indica que, aunque el esfuerzo no es homogéneo, toda la parte está al menos al 82% del esfuerzo máximo en la misma.

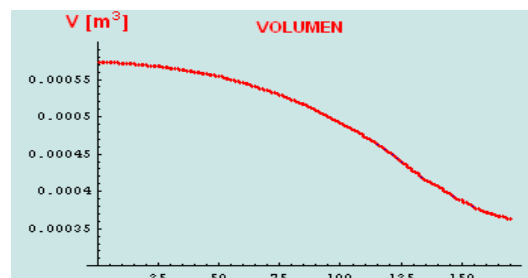


Fig. 13. Historial de Volumen.

Este ejemplo es comparable con algunos encontrados en la literatura de ESO (Xie y Steven, 1997), una viga en cantiliver con una carga en una de sus extremos, sujeta en una de sus lados. En la figura 14, se muestran la comparación entre la estructura inicial (Vol.: 578.62 [cm³], Esf.: 62.3269 [MPa]) y la estructura optimizada (Vol.: 362.587 [cm³], Esf.: 114.37 [MPa]). Para este caso de estudio la reducción de volumen fue de 36.7694 % y un aumento de esfuerzo de 83.5181 %.

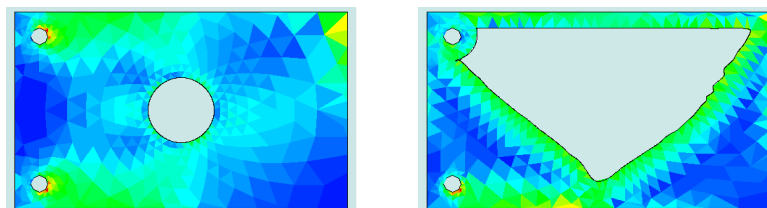


Fig. 14. Geometría del perfil: Inicial y Optimizado (Iteración 170).

4.3 Caso de Estudio 3

Se aplica una fuerza de presión de 110 [MPa] a una estructura circular de Acero comercial (ASTM A36), en toda su región interior. Con un diámetro exterior de 5 [cm], una región interior circular de diámetro 2 [cm] y una longitud de 10[cm], para el análisis se toma una rodaja de dicha estructura de espesor de 2.54 [cm]. Se encuentra sujeta en los tres barrenos. En la figura 15 se muestra dicho sistema. Se pretende obtener la estructura óptima que cumpla con el criterio de diseño, factor de seguridad $F_s \leq 1.3$.

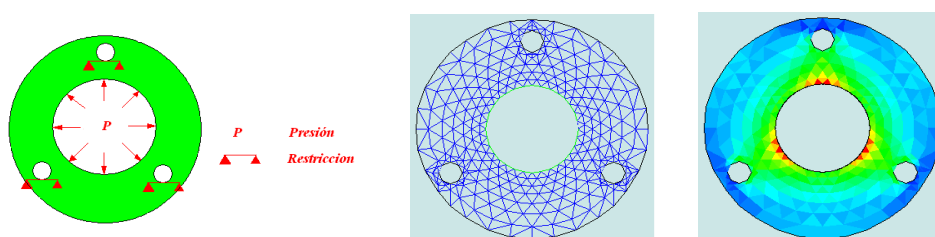


Fig. 15. Caso de estudio 4, sistema de cargas y restricciones.

Los parámetros de optimización utilizados para este caso son: TR = 0.6, TA= 0.99, TER = 0.001, TEA = 0.0 y Tamaño del elemento = 0.01.

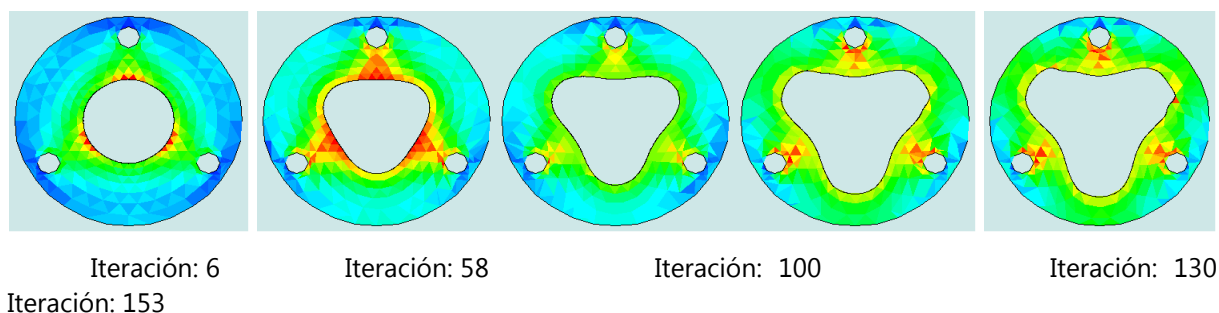


Fig. 16. Historial de evolución de la estructura.

Como era de esperarse, dada la geometría circular de la pieza, y tal como se muestra en la figura 16 y 17, el volumen tiene una clara tendencia a disminuir indefinidamente. Por supuesto, el límite para tal disminución es el punto donde se igualan los diámetros interior y exterior, así como de un espesor que se debe guardar alrededor de los barrenos. Sin embargo, dicho punto no se alcanza puesto que para la iteración 131, mostrada, se alcanza una relación del esfuerzo de fluencia sobre el esfuerzo máximo igual a 1.2441.

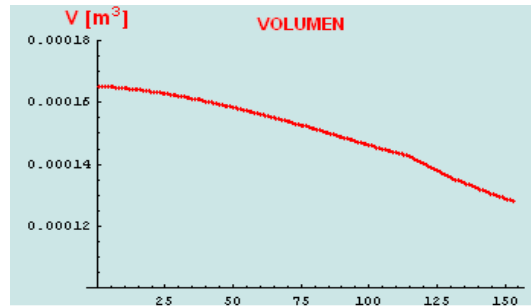


Fig. 17. Historial de Volumen.

En la figura 18, se realiza una comparación entre la estructura inicial y la estructura optimizada (Vol.: 1651.6 cm³, Esf.: 247.41 [MPa]) y la estructura optimizada (Vol.: 1340.06 cm³, Esf.: 311.029 [MPa]). En dicha figura también se observa que el perfil de la cavidad, no tiene distorsiones importantes. En este caso, el aumento de esfuerzo fue de 25.7145 % y la reducción de volumen de 18.2574 %.

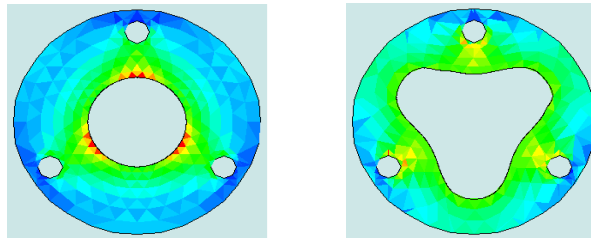


Fig. 18. Geometría del perfil: Inicial y Optimizado (Iteración 131).

5. CONCLUSIONES

La elección de la Optimización Estructural Evolutiva como metodología de optimización de forma permitió realizar de manera sencilla el cálculo del desplazamiento de los puntos de control que definen la curva que modela la cavidad, factor crítico en los métodos de optimización de forma. Además de sus ventajas de búsqueda global, facilidad de implementación, presenta una gran versatilidad, eficacia y eficiencia en el problema de optimización de forma.

Los resultados mostrados en los historiales de optimización de las partes presentadas demuestran que los niveles de esfuerzo en cada una de ellas se vuelven homogéneos conforme el proceso de optimización avanza. Lo anterior demuestra que el método propuesto en (Velázquez, 2009) es aplicable al diseño de cavidades generando buenos resultados de manera eficiente al problema de optimización de forma.

Se logró reducir el volumen y con ello el peso de los elementos, de manera considerable en todos los casos de estudio, superiores al 25 % de reducción del valor inicial, pensando en una posible fabricación de las mismas, además de cumplir con un criterio de diseño impuesto a cada uno de los elementos en análisis o factor de seguridad (SF). Intentando reducir los costos y tiempos de fabricación.

El introducir un mallador adaptativo durante el FEA, permitió gracias a su capacidad para adaptarse a diferentes contornos, provocados tras cada iteración durante la optimización, una mejor aproximación o convergencia a la forma óptima de la cavidad, sin generar grandes distorsiones, como pudiera suceder cuando se intenta aproximar a una geometría con un mallado homogéneo, lo que genera grandes sesgos y provoca la aparición de concentradores de esfuerzo y con ello un alejamiento en la convergencia de la solución óptima o casi-óptima de forma.

Este tipo de metodología no solo se limita al problema de cavidades en elementos mecánicos, sino que además puede ser extendido a la optimización de la forma externa o contorno de la pieza, si como a otros problemas en los cuales intervengan además del volumen y esfuerzo, temperaturas, vibraciones, dimensiones, momentos de inercia, materiales lineales así como materiales no lineales, etc.

TRABAJOS A FUTURO

- ⊕ Introducir parámetros de manufactura al algoritmo actual de solución.
- ⊕ Implementación de un algoritmo, capaz de lograr la optimización de forma de un sistema tridimensional.
- ⊕ Realización de un análisis, posterior a la optimización, desde el punto de vista de procesos de manufactura, para verificar la factibilidad de fabricación de una estructura óptima.
- ⊕ Aumentar el rango de variables de diseño.

6. REFERENCIAS

Annicchiarico, William. *Una Metodología para la Optimización Estructural de Formas usando Principios Evolutivos*. IMME Boletín Técnico, Vol. 45, No. 1, Venezuela 2007, pp. 2-19.

Battaglia, Laura, Cardona Alberto. *Aplicación de métodos de optimización de Forma en el Diseño Estructural*. Revista Mecánica Computacional, Vol. XXI, Argentina 2002, pp. 2804-2823.

Bhatti, M. Asghar. *Fundamental Finite Element Analysis and Applications*. 2ª ed., Ed. John Wiley & Sons Inc., USA 2005, pp. 3-675.

Cañavate, Fernando. *Aplicación de curvas al Diseño Óptimo de Formas*. Universidad de Murcia, Cartagena, Colombia 2004, pp. 1-12.

Coello, Carlos. *La Computación Evolutiva en el Contexto de la Inteligencia Artificial*. 1ª ed., Ed. LANIA, A.C., México 1996, pp. 3-150.

Lozano, David, Velázquez Fernando, Zepeda, Antonio. *Propuesta de Mallador Adaptativo para el Modelado de Perfiles en Flujos Incompresibles*. XIV Congreso Anual de SOMIM, Septiembre 2008, pp. 1-8.

Lozano, David. *Optimización Estructural Evolutiva: Diseño de cavidades en Elementos Plano*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Enero 2010, pp. 5-132.

Martínez, Pedro. *Diseño Optimo Simultaneo de Topología y Geometría de Estructuras Articuladas mediante Técnicas Evolutivas*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, Julio 2003, pp. 37-241.

Paluzny, M., Prautzsch, H. *Bezier and B-Spline Methods*. 2ª ed., Ed. Springer, Berlín 2005, pp. 59-98.

Proos, Kaarel. *Evolutionary Structural Optimization as a Robust and Reliable Design Tool*. Thesis Doctoral, University of Sydney Australia, March 2002, pp. 7-218.

Querín, Osvaldo M. *Evolutionary Structural Optimization*. Thesis Doctoral, University of Sydney Australia, April 1997, pp. 15-246.

Velázquez, Fernando, Santillán, Saúl. *Diseño Óptimo Evolutivo*. Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología, Julio-Septiembre 2006, Vol. VII, número 3, pp. 139-150.

Velázquez, Fernando. *Optimización Estructural Evolutiva*. Tesis Doctoral, UNAM, Octubre 2009, pp. 1-90.

Xie, Y. M., Steven, G. P. *Evolutionary Structural Optimization*. 1ª ed., Ed. Springer, Great Britain 1997, pp. 1-40.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. *The Finite Element Method, Vol. 2: Solid Elastics*. 5ª ed., Ed. Butterworth-Heinemann, USA 2000, pp. 1-498.