

MEJORA ESTRUCTURAL DE UN SOPORTE TIPO BALANCÍN A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS TOPOLÓGICO

Francisco Ramírez Cruz, Fco. Eugenio López Guerrero, Cesar A. Salazar Caldera
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: Prof.Dr.Ramirez@gmail.com, Prof.Dr.Elopez@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta la implementación de un método de optimización topológica para la minimización de la energía de deformación en estructuras cargadas estáticamente. El caso de estudio es un soporte y palanca tipo balancín usado en suspensiones automotrices. La mejora propuesta está sujeta a minimizar el uso de material. El concepto de diseño resultante del proceso de mejora es sometido a un estudio de manufacturabilidad. Finalmente se realizó la modificación geométrica de la estructura para su fabricación utilizando como criterio una distribución de esfuerzos homogénea. La estructura se simuló utilizando el método de elementos finitos.

Palabras clave: Elemento finito, distribución de esfuerzos, optimización topológica, construcción ligera.

ABSTRACT

This work presents the implementation of a topology optimization method to minimize the strain energy in statically loaded structures. The case study is a carrier and rocker lever used in automotive suspensions. Improvement proposal is subject to minimize the use of material. The resultant design concept of the process is subjected to a machinability study. Finally performed geometric modification of the structure to manufacture using as criteria homogeneous stress distribution. The structure was simulated using the finite element method.

Keywords: Finite element, material distribution, topology optimization, light construction.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de piezas de máquina, además de cumplir el requisito de estabilidad, el peso mínimo es un factor determinante.

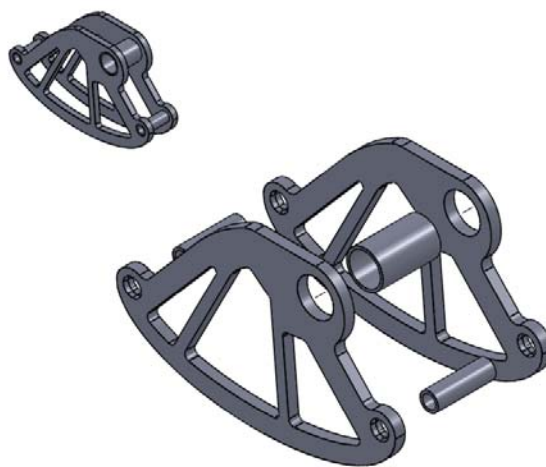


Figura 1.- Diseño estructural mejorado de un soporte tipo balancín.

Los resultados del análisis estructural se utilizan convencionalmente por los diseñadores con el propósito de mejorar el desempeño de las estructuras [UT12, OL11]. La integración de las herramientas de generación automática de mejora estructural gana importancia con el fin de ahorrar material y energía [TO12, SA08, BE03]. Así mismo acorta los tiempos de desarrollo de productos. En la construcción ligera de máquinas y mecanismos la mejora del diseño representa una alternativa económica para la sustitución de materiales [PA05, MA09].

Casi todas las piezas mecánicas contienen transiciones con sección transversal variable, por ejemplo muescas y orificios. En estas zonas se producen concentraciones de esfuerzo locales, que influyen sustancialmente en la resistencia de todo el componente [LE12, HU05]. La optimización de la forma en el "margen libre" en torno a estos lugares mejora la resistencia de todo el componente. Por lo que es deseable mejorar esas zonas que afectan el desempeño mecánico. Además muchos de los componentes están sobredimensionados, ya que a

menudo basta una simple forma debido al proceso de fabricación seleccionado (por ejemplo, la forja, estampado). En componentes estructurales que tienen cavidades en sitios que no soportan carga se asocia a un mayor costo de producción, que no necesariamente compensan la reducción del peso. Por lo que es necesario evaluar la manufacturabilidad del producto. La optimización de la topología resulta a menudo en formas complejas (por ejemplo, estructuras de armadura, cavidades, superficies curvas) que se pueden lograr sólo con un gran esfuerzo a través de los métodos de producción convencionales. En este sentido los paquetes computacionales para la optimización topológica han evolucionado considerando diferentes procesos de manufactura tales como el estampado, la fundición entre otros. Permitiendo de esta manera acortar los tiempos de diseño. 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 [MA90, RA04].

OBJETIVOS

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Mejorar un componente automatizado a través de un análisis topológico.
- Modificar la geometría para mejorar el desempeño utilizando como criterio una distribución de los esfuerzos homogénea.
- Asegurar que la mejora geométrica no afecte la manufacturabilidad del componente.

METODOLOGÍA

- 1.- Plantear la geometría y las condiciones de frontera del componente.
- 2.- Determinar la función objetivo y restricciones en un ambiente de elementos finitos.
- 3.- Estudiar el concepto estructural y asegurar su fabricación.

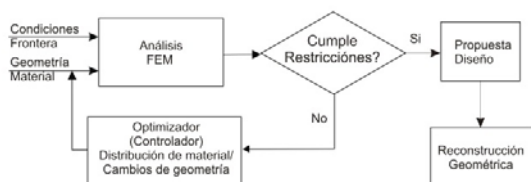


Figura 3.- Diagrama de flujo para la mejora estructural usando el optimizador como un controlador.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Para lograr el máximo de la rigidez se utilizan el peso y las dimensiones como restricciones. Las variables de diseño están a menudo sujetas a las limitaciones

del espacio de diseño o dominios discretos. La sensibilidad de un problema caracteriza el cambio de la función objetivo debido a los cambios en las variables de diseño. Este análisis de sensibilidad tiene que ser implementado por el algoritmo de optimización.

Puesto que hay un conjunto de métodos para algoritmos de optimización disponibles, por lo general se basan en métodos deterministas (programación matemática) o en métodos estocásticos (es decir, algoritmos evolutivos), uno tiene que elegir un algoritmo adecuado para el problema dado. Algoritmos de optimización basado en la programación matemática a menudo utilizan métodos basados en gradiente que implican el cálculo de los gradientes de la función objetivo y la determinación de una dirección de búsqueda en un espacio de la solución multidimensional. Uno de tales métodos es el método de los multiplicadores de Lagrange, a menudo se utiliza en los códigos de optimización de topología.

La función objetivo de la mayoría de los problemas de optimización estructural consiste en encontrar el mínimo de la energía de deformación $C(\mathbf{x})$ de una estructura por un cambio en la distribución de la masa o, en una geometría fija (de volumen), la distribución de densidades. Por consiguiente, la función objetivo puede ser definida como:

$$C(\mathbf{x}) = \mathbf{F}^T \mathbf{u} \quad (1)$$

Esta energía de deformación es el producto escalar de dos vectores y se asemeja al trabajo realizado por el vector de fuerza \mathbf{F} a lo largo de los desplazamientos calculados \mathbf{u} . Por lo tanto la expresión dada es en realidad un potencial de trabajo similar a las formulaciones comunes para el equilibrio de la energía potencial en un sistema. De este modo el vector de fuerza \mathbf{F} es igual al desplazamiento multiplicado por la matriz de rigidez estructural $\mathbf{K}(\mathbf{x})$, donde \mathbf{K} es la rigidez global y es función de \mathbf{x} , y \mathbf{x} es la variable de diseño:

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}) \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2)$$

La transformación de la función objetivo puede ser escrita como en la ecuación (3). La energía de deformación aquí es una combinación lineal de las energías de deformación de cada elemento formulado en el modelo de elementos finitos.

$$\min_{\mathbf{x}} C(\mathbf{x}) = \sum_{e=1}^N \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e(\mathbf{x}_e) \mathbf{u}_e \quad (3)$$

Puesto que es un valor normalizado, la variable de diseño sólo puede oscilar entre los valores 0 (sin efecto) y 1 (sólido) y por lo tanto tiene que ser restringido. Para la prevención de posibles singularidades en las matrices del sistema, las densidades no están restringidas a cero, pero si por un límite inferior como se muestra en la ecuación (4).

$$0 < x_{\min} \leq x \leq 1 \quad (4)$$

También, puesto que este método de optimización es, básicamente, una redistribución de material, la masa tiene que ser limitada por la razón de volúmenes, tanto del volumen deseado $V(x)$ entre el volumen original del componente V_0 , ecuación (5).

$$\frac{V(x)}{V_0} = f \quad (5)$$

El planteamiento del problema de optimización topológica completa para minimizar la energía de deformación se representa por la función objetivo, en este caso minimizar la energía de deformación, limitada a las funciones de razón de volumen y la ecuación de equilibrio del sistema, queda como sigue: ecuación (6).

$$\min_x C(x) = \sum_{e=1}^N u_e^T K_e(x_e) u_e \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{V(x)}{V_0} = f \\ K(x) u = F \\ 0 < x_{\min} \leq x \leq 1 \end{cases}$$

CASO DE ESTUDIO

El diseño de suspensiones consiste entre otros objetivos, determinar los centros teóricos de cada unión y articulaciones. Posteriormente se analizan las cargas en la suspensión para diseñar la estructura.



Figura 4.- Suspensión automotriz con soporte tipo balancín.

En el diseño automotriz es altamente deseable que cada componente sea rígido, ligero y de bajo costo. La selección del caso de estudio se fundamenta en un problema de carga estático sobre una estructura soporte y palanca tipo balancín como se ilustra en la figura 4.

MALLADO DE ELEMENTOS FINITOS Y SUS PROPIEDADES:

La discretización se realizó empleando un espacio de diseño construido en un ambiente de CAD procesado como placa sólida como se muestra en la fig. 5.

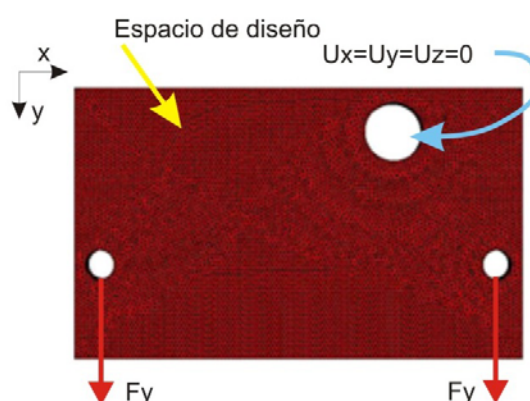


Figura 5.- Espacio de diseño modelado con elementos finitos y condiciones frontera.

La tabla I muestra los datos de los parámetros utilizados en el programa de elementos finitos, así como también las propiedades mecánicas del material (Aluminio 6061).

Tabla I.- Datos usados en el programa de FEM.	
Tipo de análisis	Estático
Tipo de elemento	Tetraedro 10 nodos
Coeficiente de Poisson.	0.33
Módulo de elasticidad (GPa)	72

CONDICIONES DE FRONTERA:

El empotramiento de la estructura en un sistema de coordenadas cartesiano son para el barreno superior, los grados de libertad transitorios iguales a cero ($u_x=u_y=u_z=0$). La carga actúa sobre los barrenos inferiores en dirección de y. La tabla II presenta las magnitudes de las cargas usadas en este caso de estudio.

Tabla II.- Datos usados en la definición de la carga (N).			
Lugar	Fx	Fy	Fz
Barrenos inferiores	0	1900	0

FUNCIÓN OBJETIVO Y RESTRICCIONES

La función objetivo para el espacio de diseño propuesto es minimizar la energía de deformación que como consecuencia maximiza la rigidez del componente. La restricción es minimizar el volumen del componente a un 35% del volumen inicial.

PROPUESTA CONCEPTUAL DE DISEÑO

En la figura 6a se muestra la iteración 6 del proceso de optimización. Las oquedades amorfas representan las zonas de nula concentración energética y por lo tanto son huecos en la estructura.

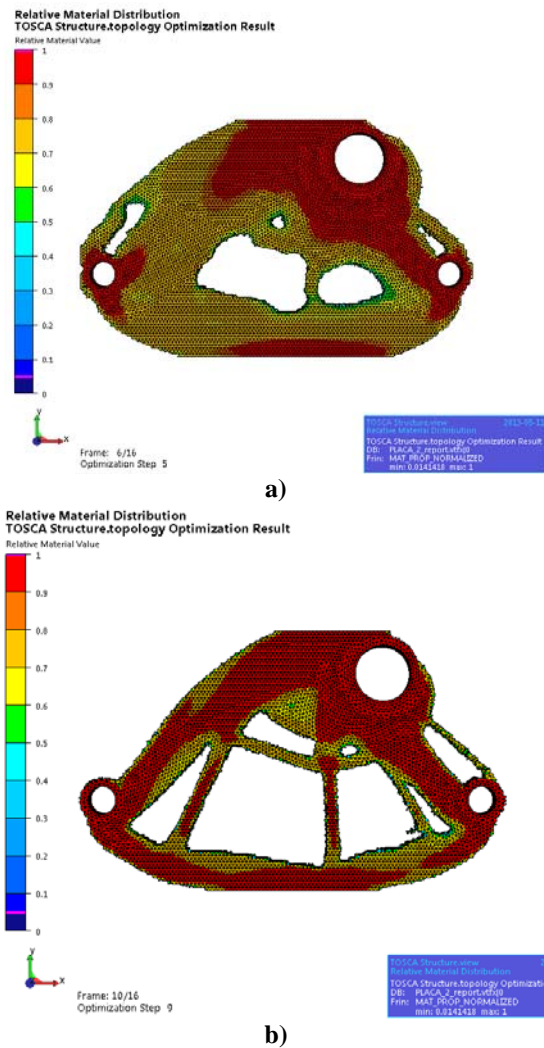


Figura 6.- a) Iteración 6 y b) iteración 10 del proceso de mejora estructural a) y b) 10.

RESULTADOS

La figura 7 muestra la gráfica del cambio de volumen a lo largo de las iteraciones del problema. La curva se aproxima al valor programado de la reducción del volumen total establecido como parámetro de optimización.

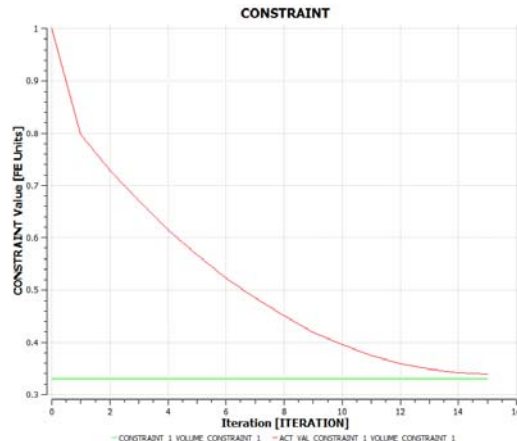


Figura 7.-Cambio de volumen por iteración.

En la gráfica de la figura 8 se presenta la evolución del comportamiento de la densidad de energía de deformación en relación a la variable de diseño por cada iteración. La curva muestra el incremento en la concentración de la energía de deformación sobre los elementos finitos restantes en cada iteración.

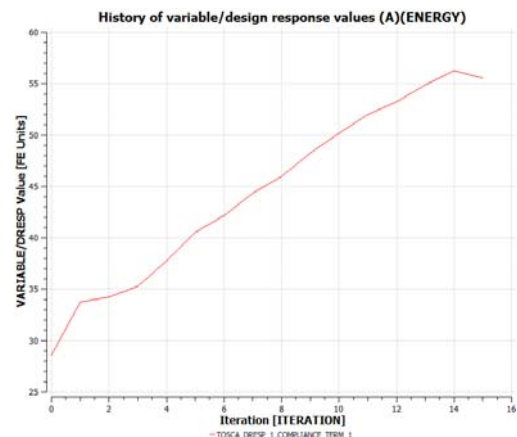


Figura 8.-Relación entre la densidad de energía de deformación y las iteraciones.

En la figura 9 se muestra la estructura óptima bajo las condiciones de máxima rigidez y 35% de volumen en 16 iteraciones.

La geometría resultante representa el concepto de diseño propuesto para la fabricación (ver fig. 9).

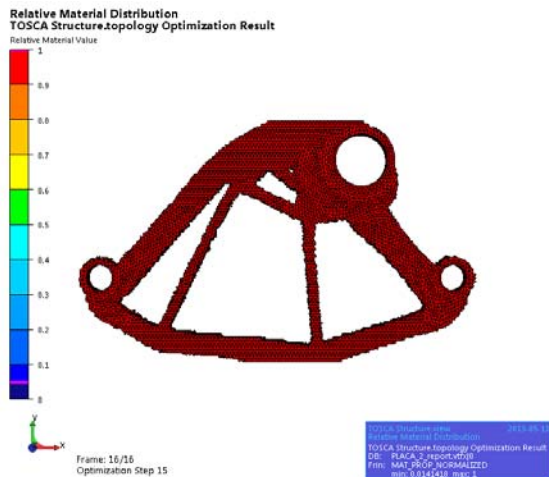


Fig. 9.-Estructura mejorada iteración 16.

Ahora es necesario estudiar la viabilidad para su manufactura y plantear los cambios geométricos para asegurar la construcción.

ESTUDIO GEOMÉTRICO

Se proyecta la modificación geométrica basada en la manufactura de producto.

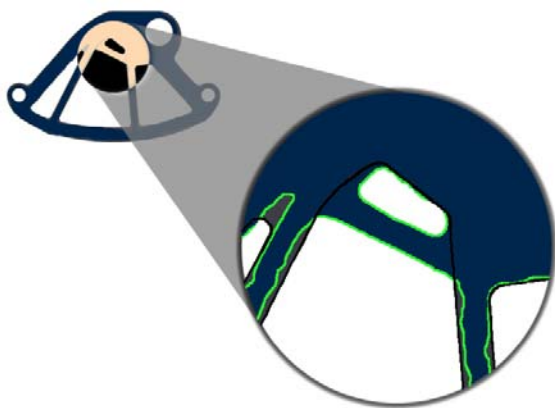


Figura 10.- Modificación geométrica para la manufactura del componente.

En la figura 10 se muestra en detalle una zona del componente resultante en línea verde y el perfil rectilíneo para el maquinado.

La figura 11 muestra un análisis de elementos finitos del componente en su forma final, es decir después de

la modificación geométrica para la manufactura del mismo.

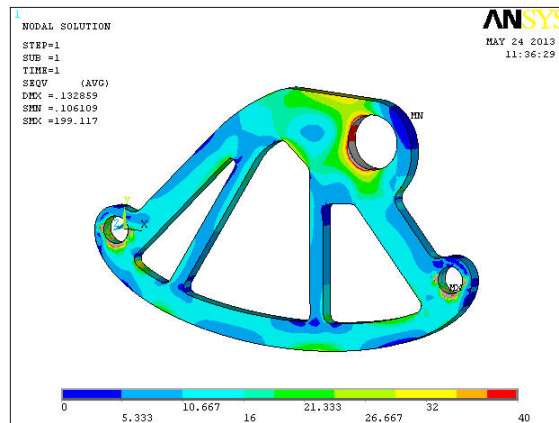


Fig. 11.-Distribución de esfuerzo Von Mises sobre la estructura modificada.

De acuerdo al principio de Saint Venant las zonas de apoyo y carga no representan influencia sobre el efecto global de la estructura. Teniendo en cuenta este principio la distribución del esfuerzo von Mises a través de la estructura se mantiene relativamente homogéneo como lo demuestra el histograma de la figura 12.

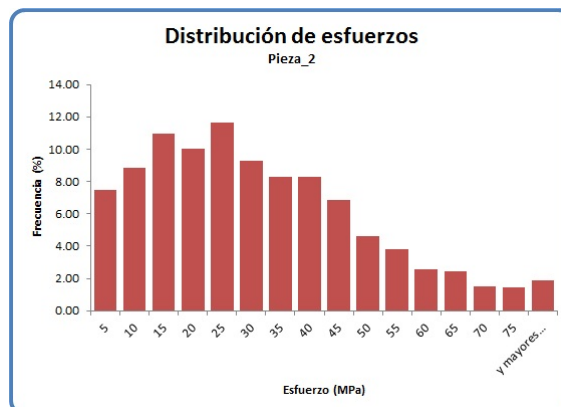


Figura 12.-Distribución de la energía de deformación von Mises en el componente modificado.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología para la mejora estructural topológica basada en un ambiente de elementos finitos bajo restricciones de minimización del volumen.

A través de los resultados mediante FEM del soporte tipo balancín de una suspensión automotriz y su respectiva optimización topológica se comprobó que es posible obtener una distribución mejorada de la energía de deformación.

Es deseable que los componentes de maquinaria contengan oquedades para obtener una distribución homogénea de la energía de deformación como la que se encuentra en la naturaleza.

La modificación geométrica de la propuesta conceptual resultante de la mejora estructural posee características de manufacturabilidad del componente bajo métodos de fabricación modernos.

El rediseño de elementos mecánicos representa una importante alternativa para obtener componentes mejorados en los que se maximiza la rigidez estructural y minimiza el volumen.

RECONOCIMIENTOS Y EQUIPO UTILIZADO

El presente trabajo fue realizado en el marco de la línea de generación y aplicación de conocimiento LGAC L2: “Optimización geométrica de productos” del Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL como parte del proyecto de investigación 103.5/11/6844 P/CA-166 patrocinado por SEP-PROMEP y del proyecto PAYCIT 2010 con clave IT587-10 de la UANL.

Se utilizó el equipo de las instalaciones del Departamento de Mecatrónica de la FIME-UANL:

- Licencia de software TOSCA Structure v7.1
- ANSYS v.12
- SolidWorks v2011
- Equipo de cómputo PC DELL Precision M70, 1.32GHz, 2 GB RAM y HD de 80 GB

REFERENCIAS

[BE03]	M. P. Bendsoe., O. Sigmund, Topology Optimization, Theory Methods and applications, Springer Verlag ISBN 3-540-48992-1, 2003
[SA08]	Saleem W., Lu H. y Yuqing F.: Topology Optimization- Problem Formulation and Pragmatic Outcomes by integration of TOSCA and CAE tools. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, USA, 2008.

[RA04]	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, Enero-Marzo 2004.
[TO12]	TOSCA Structure Version 7.1.1, General documentation and user manual, FE-DESIGN GmbH, 2012
[MA90]	Mattheck, C.: Design and growth rules for Biological structures and their application to Engineering, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol 13, No. 5, 535-550, 1990.
[UT12]	Utpat L., Dattatraya C., Yeolekar N., Sahasrabudhe A. y Mandke S.: Design Optimization of Robotic Arms. International Journal of Engineering Research & Technology, 2012
[OL11]	Oliveri M., Cali M., Squenzia G., Fatuzzo G.: Structural and Topological Optimization in Robot Design. International conference on Innovative Methods in Product Design, Venezia, Italy, 2011
[SA91]	Sauter, J. Beanspruchungsminimierung von Bauteilen durch Gestaltoptimierung mit biologischer Intelligenz, ANSYS Users` Meeting, Tagungsband, 23.-25. Oktober 1991, Bamberg.
[PA05]	París J., Muñoz I., Navarrina F., Colominas I. y Casteleiro M.: A minimum weight FEM formulation for Structural Topological Optimization with local stress constraints. 6thWorld Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization. Brazil, 2005
[HU05]	Hus M. y Hus Y. Generalization of two- and three-dimensional structural topology optimization. Engineering Optimization Vol. 37, No. 1, 83–102, 2005
[MA09]	Marjanovic N., Isailovic B. y Blagojevic M.: Structural optimization in cad software. Machine Design ISSN 1821-1259, 2009
[LE12]	Lee E., James K. y Martins J.: Stress-Constrained Topology Optimization with Design-Dependent Loading. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012