

ESTUDIO DE METODOS DE DISEÑO GEOMETRICO Y DIMENSIONAMIENTO OPTIMOS EN ESTRUCTURAS, ESTATICAMENTE INDETERMINADAS, MEDIANTE TECNICAS DE PROGRAMACION MATEMATICA CON FUNCION OBJETIVO EXPLICITA*

(STUDY OF METHODS OF GEOMETRICAL DESIGN OPTIMUM DIMENSIONING IN STATICALLY INDETERMINATE STRUCTURES THROUGH TECHNIQUES OF MATHEMATICAL PROGRAMMING WITH EXPLICIT OBJECTIVE FUNCTION)

José Antonio Entrenas Angulo

Director de Tesis: Prof. Dr. Luis Parras Galán

Departamento de Estructuras. E.T.S.I.A. Universidad de Córdoba.

450-20

RESUMEN

Se plantean en este trabajo el estudio y el desarrollo de un modelo de optimización estructural con función objetivo explícita.

Las estructuras optimizadas pertenecen al grupo de estructuras de esqueleto, articuladas, planas o espaciales. El modelo puede ser utilizado tanto para estructuras estáticamente determinadas como para aquellas que presentan hiperestaticidad interior y/o exterior. Como funciones objetivo pueden ser seleccionadas el coste o el peso de la estructura; el modelo permite la inclusión de funciones de restricción, así como la selección de variables de diseño referidas tanto al dimensionamiento de secciones como a la propia definición topológica y geométrica de la estructura.

Los criterios de dimensionamiento de secciones son los de la NBE/MV-103, contemplándose la posibilidad de combinación de acciones de distinta naturaleza, formulación de la(s) hipótesis más desfavorable(s), y utilización de series discretas de perfiles contenidos en las NBE/MV-102 y NBE/MV-108.

SUMMARY

This piece of work deals with the study and development of a model of structural optimization with an explicit objective function.

Optimized structures belong to the group of skeleton structures (articulated, flat or spacial).

The model can be used equally for statically determinate structures as for those which present interior and/or exterior hyperstaticity. As objective functions the cost and price of the structures can be selected; the model allows the inclusion of functions of restriction, as well as the selection of variables of design referring as much to the dimensions of sections as to the proper topological and geometrical definition of the structure.

The criteria of dimensioning of sections are those of the NBE/MV 103, with the possibility of the combination of actions of a different nature, formulation of the most favourable hypothesis/hypotheses, and use of discreet series of profiles contained in the NBE/MV-102 and NBE/MV-108.

INTRODUCCION

Han sido numerosos los estudios concernientes a la optimización estructural desde los iniciales de Mitchell (7) —basado en métodos variacionales—, hasta nuestros días, produciéndose recientemente un desarrollo espectacular con el avance del cálculo electrónico en las últimas décadas.

(*) Tesis presentada el 4 de febrero de 1986, en la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de Córdoba y leída el 7 de marzo del mismo año. Obtuvo la calificación de apto cum laude.

La mayoría de los métodos de optimización que se han propuesto están basados en técnicas iterativas, es decir, buscan el diseño mejor en sucesivas aproximaciones, apoyándose en diseños óptimos relativos obtenidos en cálculos precedentes. Dichos métodos pueden clasificarse en tres grandes grupos: métodos de la "estructura densa", métodos geométricos y métodos híbridos. En los llamados de la "estructura densa" se comienza seleccionando un conjunto de posibles posiciones de los nudos dentro del espacio de diseño y conectando cada nudo con los demás, obteniendo así una estructura densa, eliminándose posteriormente duran-

te el proceso de optimización las barras cuya área tienda a cero. Trabajos de este tipo han sido realizados por investigadores como Dorn, Gomory y Greenberg (2), Haja y Ashley (4), etc.

Los métodos geométricos se denominan así por considerar como variables de diseño tanto a las coordenadas de los nudos de la estructura, como a las propiedades de las secciones transversales de las barras, Corcoran (1), Pedersen (13), Parras (12), Saka (15), etcétera.

Los métodos híbridos permiten tener en cuenta consideraciones topológicas en algunos estadios del proceso de optimización, estando generalmente separadas las variables de diseño en dos grupos o espacios de diseño. Estos métodos han sido utilizados por Vanderplaats (16), Kuan-Chen Fu (5), Lev (6), etcétera.

Objetivos

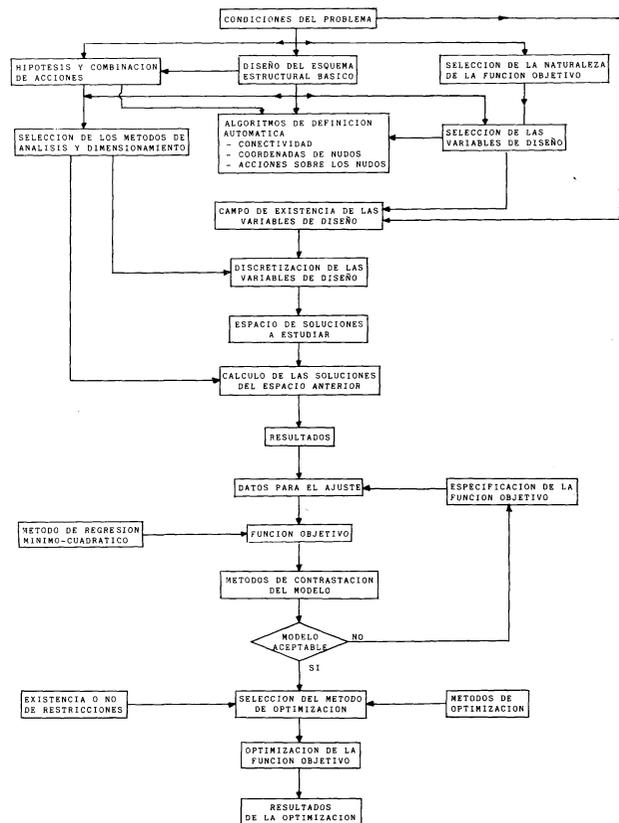
A pesar del elevado número de investigaciones realizadas dentro del campo del diseño y dimensionamiento óptimos de estructuras articuladas, no hemos encontrado en la recisión bibliográfica modelos que aborden el problema de optimización mediante la especificación explícita de la función objetivo en función de las variables de diseño, siendo éste el objetivo fundamental del presente trabajo de investigación.

Material y Métodos

Se presenta a continuación una visión general de las distintas etapas que forman el modelo de optimización estructural con función objetivo explícita que se propone. De la observación del esquema que se adjunta, puede deducirse la existencia de multitud de decisiones puntuales en sus diferentes estadios, presentándose en realidad, bajo un esquema general único, un gran número de posibilidades muy diferentes entre sí desde un punto de vista práctico.

En nuestra opinión, la aportación fundamental respecto a modelos de optimización estructural anteriormente utilizados radica, precisamente, en la utilización de una función objetivo explícita que, tras su especificación y ajuste, es finalmente optimizada. Por otra parte, la metodología que aquí se propone presenta la ventaja fundamental de establecer una separación clara entre los métodos estructurales y los de optimización.

La resolución completa de un modelo de optimización estructural adaptado a nuestra metodología arranca del establecimiento de sus condiciones iniciales. A partir de dichas condiciones, se deben desarrollar las siguientes tareas:



— Diseño del esquema estructural básico que mejor se adapte a las condiciones iniciales.

— Selección de la naturaleza de la función objetivo: las funciones normalmente utilizadas corresponden al peso de la estructura aunque, alternativamente, pueden ser introducidas funciones de coste en las que, además del peso, sean considerados otros factores como materialización de los nudos, montaje, etc.

— Basándose en las condiciones del problema, deben ser establecidos en forma genérica una relación de las acciones sobre la estructura, un mecanismo que permita cuantificarlas en cada caso y, finalmente, los criterios de su combinación en hipótesis de acciones.

— Fuertemente relacionada con el esquema estructural básico que se haya definido, se encuentra la fase de selección de los métodos de análisis y de dimensionamiento que vayan a ser incluidos en el modelo.

— En función de la naturaleza de la función objetivo y del esquema estructural básico se debe pasar a continuación a la selección de las variables de diseño.

— Una de las labores posiblemente menos sistemática dentro del modelo y que —en función del esquema estructural básico, de las acciones que lo solicitan y de las variables de diseño seleccionadas— puede re-

presentar un mayor o menor esfuerzo por parte del analista; es la puesta a punto de los algoritmos de definición automática de la estructura.

— Nuevamente deben ser consideradas las condiciones del problema para definir el campo de la existencia de las variables de diseño. En esta etapa, el analista, en función de su experiencia y apoyándose en las condiciones iniciales del problema, debe definir los valores extremos, superior e inferior, para cada una de las variables de diseño seleccionadas.

— La siguiente etapa consiste en la discretización de las variables de diseño. Su relación con los métodos de análisis y de dimensionamiento es muy íntima, ya que el esfuerzo de cálculo —referido lógicamente al equipo disponible— y la repercusión económica del problema estudiado, serán fundamentalmente las circunstancias que aconsejen un mayor o menor barrido del campo de existencia de las variables de diseño.

— La combinación de los distintos valores anteriormente discretizados define el espacio de soluciones a estudiar; cada punto de este espacio es ya analizado automáticamente por el ordenador, haciendo uso de los métodos de análisis y de dimensionamiento y de los algoritmos de definición automática previamente elaborados.

— Los resultados de los cálculos anteriores, modificados de acuerdo a la especificación deseada para la función objetivo, proporcionan una matriz de datos que, adecuadamente tratada con el método de regresión mínimo-cuadrática, conduce finalmente al establecimiento, en forma explícita, de la función objetivo. Dicha función es aceptada o no tras los clásicos análisis de contrastación de modelos.

— A partir de aquí el analista plantea el problema de optimización estableciendo, como se ha indicado anteriormente, una discontinuidad —en nuestra opinión muy ventajosa desde diferentes puntos de vista— entre los métodos estructurales y los de optimización.

De acuerdo con la existencia o no de condiciones de restricción, de la especificación finalmente adoptada para la función objetivo, y de los métodos de optimización disponibles, en nuestro caso hemos puesto a punto los métodos del descenso de máxima pendiente (steepest descent), del gradiente conjugado (Fletcher-Reeves), de Newton, de la variable métrica (Davidon-Fletcher-Powell) y de proyección del gradiente de Rosen Rao (14), Fletcher (3), se realiza una selección del método a emplear. El tratamiento de la función objetivo y, eventualmente, de sus condiciones de restricción, con el método de optimización seleccionado, proporcionará la solución óptima.

RESULTADOS Y DISCUSION

Con objeto de contrastar la metodología propuesta se han desarrollado cinco aplicaciones prácticas de optimización. A continuación se muestran los resultados de dos de ellas:

Aplicación n.º 1

Se propone el problema de optimización de la estructura de cubierta de una nave a dos aguas, simétrica, resuelta mediante cerchas enlazadas con articulaciones fijas a las cabezas de soportes de igual altura e inercia.

La estructura se considera sometida a las acciones correspondientes según la NBE/MV 101, estableciéndose las combinaciones de acciones según la NBE/MV 103.

Como variables de diseño se han adoptado el número de recuadros, la pendiente de la cubierta y la posición de los nudos del cordón inferior.

Esta aplicación se realiza con los siguientes valores numéricos:

- Luz entre ejes: $L = 16$ m.
- Altura de los pilares: 4 m.
- Posición de los nudos del cordón inferior:
 - $LR/2 < X_1 < LR/2$, siendo LR la longitud del recuadro: $LR = L/X_3$
- Pendiente de la cubierta: $0,1 < X_2 < 0,6$.
- Número de recuadros: $X_{\min} < X_3 < X_{\max}$, siendo los extremos función de las separaciones mínima y máxima entre correas; en esta aplicación se han adoptado 1 y 2 m respectivamente.

El coste óptimo global se obtiene para 8 recuadros, con $X_1 = -40,38$ y $X_2 = 0,38$. La disminución relativa del coste entre el valor medio de los datos y el del punto óptimo citado es del 39,5%.

El diseño óptimo puede apreciarse en la figura.

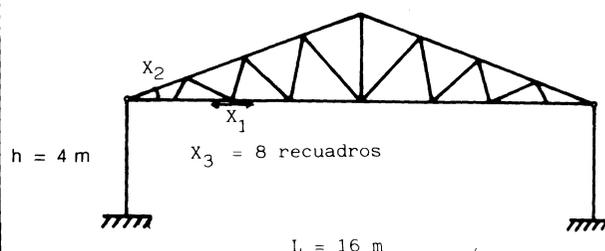


Fig. 1

Aplicación n.º 2

Esta aplicación corresponde a una estructura articulada espacial, compuesta por dos capas de barras paralelas unidas entre sí mediante barras diagonales y apoyada en los nudos de los vértices de la capa superior:

- Dimensión mayor de la malla: 24 m.
- Dimensión menor de la malla: 16 m.
- Longitud de las barras de las caras superior e inferior de la malla comprendida entre 2 y 4 m.
- Encaje de dimensiones exacto.
- Altura de la malla: $1,5 < X_1 < 4,5$.
- Relación entre las áreas de las barras de las caras superior e inferior (A_c) y las áreas de las diagonales (A_D):

$$1 < X_2 < 2$$
- Carga uniformemente repartida sobre la cara superior de la malla: 150 kg/m^2 .
- Parámetros de costes unitarios: 500 ptas/nudo. 105 ptas/kg de acero.

El valor mínimo del coste se obtiene para $L = 4 \text{ m}$; $H = 3,26 \text{ m}$ y $A_c/A_D = 1,28$ con $C = 1997,1 \text{ ptas/m}^2$.

El coste medio de los datos generados es de $C = 2627,62 \text{ ptas/m}^2$ por lo que la disminución de coste respecto del coste medio de los datos es del 24%.

El diseño óptimo se muestra en la figura siguiente:

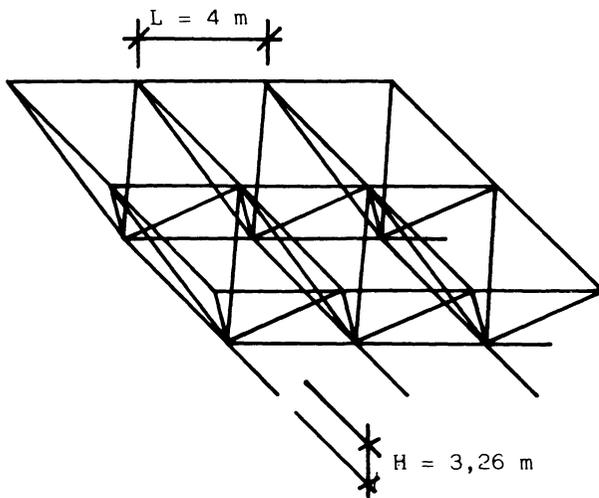


Fig. 2

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo de optimización de estructuras articuladas con función objetivo explícita. Las aplicaciones realizadas han permitido establecer no sólo la posibilidad de empleo de este tipo de modelos, sino un excelente comportamiento desde el punto de vista de su eficacia.

El empleo de modelos de optimización con función objetivo explícita, respecto a las variables de diseño, representa considerables ventajas en relación a aquellos en los que la citada función no es conocida, destacando, en nuestra opinión, las siguientes:

- El conocimiento de la función objetivo explícita facilita la estructuración de un modelo de optimización en partes claramente diferenciadas.
- Permite además utilizar los métodos de búsqueda que en general se consideran más eficientes, conocidos como métodos descendentes, ya que la evaluación de las primeras o segundas derivadas es inmediata.

Por el trabajo realizado se llega a la conclusión de que, en los modelos de optimización de estructuras articuladas, una función objetivo especificada como función cuadrática proporciona excelentes resultados. La conclusión anterior se ha visto confirmada en todas las aplicaciones, tanto desde el punto de vista de la bondad estadística del modelo, como desde el de su comportamiento frente a las distintas técnicas de optimización.

Respecto a los métodos de optimización utilizados en las distintas aplicaciones, podemos deducir.

- El método de Newton se presenta como el más eficaz, salvo en problemas que conducen a puntos de ensilladura.

— De los métodos restantes, aún con pequeñas diferencias entre sí, los resultados obtenidos indican un mejor comportamiento del método de Davidon-Fletcher-Powell respecto del Gradiente Conjugado, y de éste a su vez respecto del Steepest-Descent.

— De los métodos ensayados, es preferible el método de Rosen cuando la solución óptima se localiza fuera del espacio admisible de diseño.

Con el modelo de optimización que se ha desarrollado se ha demostrado la posibilidad de definir automáticamente la topología y la geometría de las estructuras de esqueleto. Las subrutinas realizadas para las distintas aplicaciones confirman este aspecto, si bien la experiencia acumulada durante la ejecución de nuestra investigación permite llegar a la necesidad de una referencia a un esquema estructural básico concreto.

Respecto a los bloques de análisis, es preferible —en especial con equipos informáticos de pequeña capacidad de memoria— la inclusión en el modelo de métodos específicos siempre que sea posible; la desventaja que supone en trabajo adicional, por la consiguiente pérdida de generalidad, queda compensada, con creces, por una mayor eficacia en los cálculos.

El modelo desarrollado es aplicable, con ligeras modificaciones, no sólo al conjunto de las estructuras articuladas sino a cualquier problema dentro del campo de la ingeniería estructural.

BIBLIOGRAFIA

1. CORCORAN, P. J. 1970., Configurational Optimization of Structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 12. 459-462.
2. DORN, W. S.; GOMORY, R. E.; GREENBERG, 1964., Automatic Design of Optimal Structures. *Journal Mecanique*. Vol. 3, n.º 1.
3. FLETCHER, R.; REEVES, C. M., 1964., Function minimization by conjugate gradients. *Computer Journal*, Vol. 7, n.º 2, 149-154.
4. HAJELA, P.; ASHLEY, H. 1981., Hybrid Optimization of Truss Structures with Strength and Buckling Constraint. Proceedings, International Symposium on Optimum Structural Design. Tucson. Arizona. Octubre.
5. KUAN-CHEN FU. 1973., An Application of Search Technique in Truss Configurational Optimization. *Computers & Structures*. Vol. 3. 315-328.
6. LEV, O. E. 1981., Topology and Optimality of Certain Trusses. *Journal of the Structural Division*. ASCE, Vol. 107, n.º ST 2, Febrero, 383-393.
7. MICHELL, A. G. 1904., The Limits of Economy of Materials in Frame-Structures. *Philosophical Magazine*. Vol. 8. n.º 47. Noviembre.
8. NORMA MV-101/1962., Acciones en la Edificación. MOPU. Madrid.
9. NORMA MV-102/1975., Acero Laminado para Estructuras de Edificación. Ministerio de la Vivienda. Madrid.
10. NORMA MV-103/1972., Cálculo de Estructuras de Acero Laminado en la Edificación. Ministerio de la Vivienda. Madrid.
11. NORMA MV-108/1980., Perfiles Huecos de Acero para Estructuras de Edificación. MOPU. Madrid.
12. PARRAS, L. 1982., Métodos Alternativos de Optimización de la Geometría de Estructuras Articuladas. Tesis Doctoral. E.T.S.I.A. Universidad de Córdoba.
13. PEDERSEN, P. 1973., Optimal Joint Positions for Space Trusses. *Journal of the Structural Division*. Diciembre. 2459-2477.
14. RAO, R. R. 1984., Optimization theory and applications. Wiley Eastern Limited. New Delhi.
15. SAKA, M. P. 1984., Optimum Design of Space Trusses with Buckling Constraints. Third International Conference on Space Structures. Ed. H. Nooshin. U. K.
16. VANDERPLAATS, G. N., 1976. Structural Optimization via a Design Space Hierarchy. *International Journal for Numerical Methods*. Vol. 10, J. Wiley, England, 713-717.

* * *

monografías

del

INSTITUTO EDUARDO TORROJA
de la construcción y del cemento
i. e. f. c. c.

n. 376-377 Madrid, junio 1984

FISURACION Y CALCULO DE FLECHAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO

J. I. Alvarez Baleriola, F. Baquedano,
J. P. Gutiérrez y A. Recuero

Este trabajo desarrollado en el Instituto Eduardo Torroja es parte del proyecto "Análisis no lineal y rediseño de estructuras de edificación de hormigón armado".

Consta de seis capítulos:

1. Control de las deformaciones.
2. Modelos de cálculo.
3. Fisuración.
4. Cálculo de flechas.
5. Comprobación del método de cálculo.
6. Limitaciones de la magnitud de las flechas y abertura de fisuras.

Por último, en un Apéndice, se presentan varias subrutinas escritas en Fortran IV para cálculo de flechas, según el método simplificado.

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS

monografías

del

INSTITUTO EDUARDO TORROJA
de la construcción y del cemento
i. e. f. c. c.

n. 380 Madrid, abril 1985

MODELO E IDENTIFICACION DE PROCESOS DE CORROSION. ANALISIS DE LA RESPUESTA A SEÑALES ELECTRICAS. (MODELING AND IDENTIFICATION OF CORROSION PROCESSES. RESPONSE TO ELECTRIC SIGNALS).

S. Feliu y V. Feliu

Este trabajo —bilingüe— describe el estudio de un sistema electroquímico y, en particular, de un metal que se corroe. Resulta de la mayor utilidad el análisis de su respuesta a la aplicación de determinadas señales de excitación, como son: los escalones de potencial o de intensidad, rampas, señales triangulares, señales sinusoidales, etc. La representación del sistema en estudio, por un modelo o circuito equivalente, facilita el análisis de la relación entre aquellas señales de excitación y respuesta.

De acuerdo con las ideas expuestas en este trabajo se analizan, también, las posibilidades de aplicación de las técnicas electroquímicas a la medida de la velocidad instantánea de corrosión de las armaduras de acero, embebidas en el hormigón, haciendo hincapie en el uso de técnicas potencios-táticas de corriente continua.

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS