

## APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN EN LA ENSEÑANZA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

**Martí Montrull, P.; Tomás Espín, A. y Torrano Martínez, M.S.**

Departamento de Estructuras y Construcción

Campus Muralla del Mar. Universidad Politécnica de Cartagena

30202 Cartagena (Murcia)

Tfno. 968 325517 Fax. 968 325378 E-mail: pascual.marti@upct.es

### Resumen

*En la metodología habitual de la enseñanza de las estructuras de hormigón, y debido en gran parte a las limitaciones de tiempo que imponen los nuevos planes de estudio, la formación que se le da al alumno hace que, cuando éste se enfrenta a un determinado problema, dedique la mayor parte del tiempo a analizar exhaustivamente una posible solución y a comprobar el cumplimiento de la normativa aplicable al caso, en vez de estudiar diversas alternativas de solución al problema. Las técnicas de optimización, utilizadas en un entorno de continuo avance en la potencia de los ordenadores y en las capacidades gráficas de los mismos, son unas herramientas muy eficaces para obtener y visualizar una serie de diseños alternativos que resuelven el problema, cumpliendo las condiciones de diseño del mismo (normativa, condiciones constructivas, etc.) de una forma "óptima" (peso mínimo, costo mínimo, rigidez máxima, etc.). Como muestra de la utilidad de estas técnicas, se presentan dos ejemplos: uno de optimización de geometría y armado de secciones y otro de optimización de forma de una lámina.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En la metodología habitual del diseño de estructuras, y debido en gran parte a las limitaciones de tiempo, 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 estudiar diversas alternativas de solución al problema. El ordenador proporciona al ingeniero la posibilidad de reducir el tiempo dedicado al análisis de la respuesta y de la seguridad de la estructura, pero la mayoría de los programas realizan estas comprobaciones sobre una estructura inicial definida por el usuario. Este procedimiento, que puede ser adecuado para un ingeniero experimentado, puede ser muy peligroso en manos de otro con poca experiencia.

Las técnicas de optimización, utilizadas en un entorno de continuo avance en la potencia de los ordenadores y en las capacidades gráficas de los mismos, son unas herramientas muy eficaces para visualizar una serie de diseños alternativos que resuelven el problema, cumpliendo las condiciones de diseño del mismo de una forma "óptima". Además, el uso de las técnicas de optimización en la enseñanza del diseño de estructuras permite desarrollar lo que se denominan estrategias "what if", mediante las cuales el alumno puede ir cambiando los criterios de diseño (parámetros, variables, función a optimizar, etc.) y observar los cambios que se producen en el diseño final.

### 2. EL PROCESO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS

El diseño de estructuras se realiza habitualmente siguiendo un proceso iterativo (Fig. 1). Se parte de un diseño inicial, que es analizado para conocer su respuesta a las acciones exteriores y comprobar si esta respuesta es adecuada y segura. En el caso de que esta comprobación resulte satisfactoria, se finaliza el diseño; en caso contrario, se realiza un proceso de síntesis que, a partir de los resultados del análisis, proporciona un nuevo diseño, el cual se analiza de nuevo y el proceso se repite hasta alcanzar un resultado satisfactorio.

Este método, denominado de prueba y error, presenta el inconveniente de que las modificaciones dependen totalmente de la experiencia del diseñador, lográndose soluciones buenas pero no las mejores, y además con un alto precio en tiempo del diseñador.

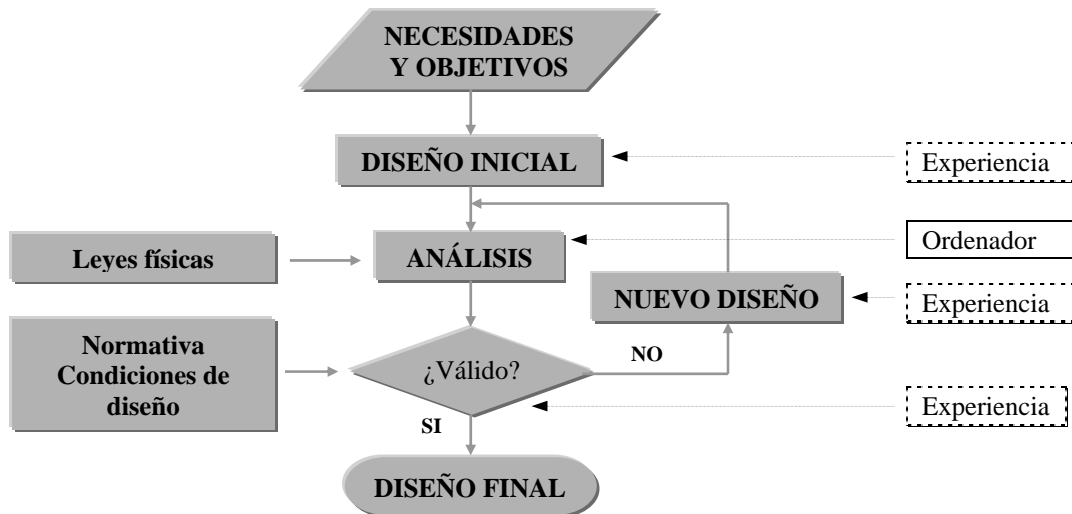


Figura 1 Diseño por prueba y error.

Debido a las limitaciones de tiempo, el diseño de estructuras se realiza a menudo como un análisis seguido de una comprobación de la seguridad mediante la normativa aplicable al caso. La creatividad y el talento de los diseñadores son a menudo prisioneros de esta metodología y de la rigidez de las normas. Se obtendrían mejores resultados utilizando herramientas que permitieran a los diseñadores explorar todas las soluciones del espacio de diseño. Desde la aparición del ordenador se han realizado grandes esfuerzos para su aplicación al diseño de estructuras. La fase del proceso de diseño que más se ha desarrollado ha sido la de análisis. Así, desde los primeros años de la década de los cincuenta se han ido realizando programas cada vez más generales, hasta llegar a los programas de elementos finitos actuales, capaces de analizar, de forma muy eficiente, la respuesta de estructuras de gran tamaño y complejidad. Al mismo tiempo se han realizado muchos intentos para realizar totalmente el diseño con el ordenador, automatizando la fase de síntesis, o de modificación del diseño a partir de la información del análisis, mediante el empleo de técnicas de optimización (Fig. 2).

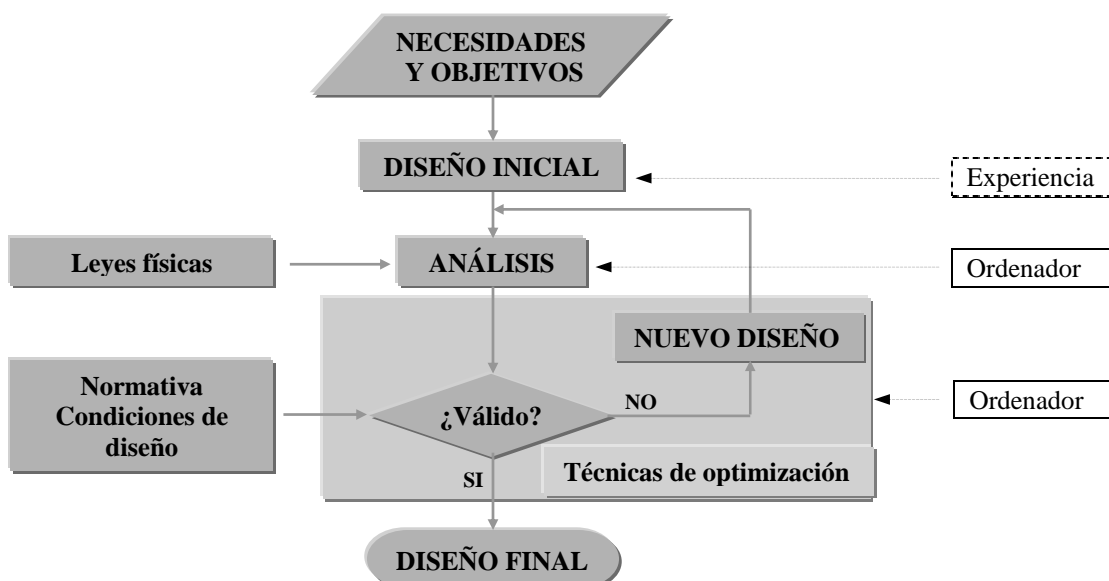


Figura 2 Diseño con técnicas de optimización.

La mayoría del software comercial disponible para el diseño de estructuras analizan y comprueban la seguridad de una estructura inicial definida por el usuario. Este es un método adecuado para el ingeniero con experiencia, pero puede ser peligroso si es usado por otro ingeniero sin experiencia, ya que comprueba una solución inicial concreta y obvia todas las posibles soluciones existentes en el espacio de diseño.

La optimización de sistemas estructurales puede definirse como el desarrollo y aplicación de técnicas de ordenador, interactivas o automáticas, para mejorar los diseños. Se pretende obtener los diseños de costo mínimo que cumplan todas las condiciones de diseño. En general, con la optimización se llega a un resultado que podría haber obtenido un diseñador experimentado, siempre que hubiera podido disponer del tiempo y de los recursos necesarios para explorar directamente todas las alternativas del diseño. La introducción de técnicas de optimización en el diseño estructural se hace necesaria a la vista de las ventajas que ofrece, entre ellas: reducción de costes; ahorro de tiempo a los diseñadores, permitiéndoles mayor dedicación a las fases más creativas del diseño, y la posibilidad de considerar las especificaciones de diseño, cada vez más numerosas y difíciles de cumplir, que se exigen a las estructuras actuales.

### 3. FORMULACIÓN Y RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE DISEÑO ÓPTIMO DE ESTRUCTURAS

El objetivo del diseño óptimo de estructuras es obtener un diseño, es decir, un conjunto de valores de las *variables de diseño*, que haga mínima una *función objetivo* y cumpla una serie de *restricciones* que dependen de las variables.

Las *variables de diseño* de una estructura pueden ser: propiedades de la sección transversal de los elementos (áreas, espesores, momentos de inercia, etc.); geometría de la estructura (coordenadas de nudos, cantos de vigas, etc.); topología de la estructura (nudos y conexiones de los elementos), y propiedades del material de la estructura. El tipo de optimización a realizar dependerá del tipo de variables que se consideren. Tradicionalmente se ha buscado el diseñar las estructuras de peso mínimo, lo que ha conducido a que la *función objetivo* más habitual sea el peso de la estructura. Sin embargo, en otras aplicaciones el peso no es el factor determinante y se recurre al empleo de otras funciones objetivo, tales como el costo, la fiabilidad, la rigidez, etc. Las *restricciones* son las condiciones que debe cumplir el diseño para que pueda ser considerado válido.

En términos matemáticos, el problema de diseño óptimo se puede formular como:

$$\begin{array}{ll} \text{Encontrar el vector de variables de diseño } \mathbf{x} \text{ que} \\ \text{minimice:} & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujeto a:} & h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_i \\ & g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_d \\ & x_i^l \leq x_i \leq x_i^s \quad i = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

siendo:  $\mathbf{x}$  el vector *n-dimensional* de variables de diseño;  $f(\mathbf{x})$  la función objetivo;  $h_j(\mathbf{x})$  la restricción de diseño de igualdad  $j$ ;  $g_j(\mathbf{x})$  la restricción de diseño de desigualdad  $j$ ;  $m_i$  el número de restricciones de igualdad;  $m_d$  el número de restricciones de desigualdad;  $n$  el número de variables, y  $x_i^l$  ( $x_i^s$ ) el límite inferior (superior) de la variable  $i$ .

El problema planteado de esta manera se puede resolver, de forma transparente al usuario, mediante diferentes métodos (Programación Matemática, Algoritmos genéticos, etc.).

#### 4. EJEMPLOS

Se presentan a continuación dos ejemplos para mostrar las posibilidades de las técnicas de optimización en la enseñanza del diseño de estructuras de hormigón. Otros ejemplos pueden encontrarse en Martí-Montrull y Company-Calleja (1996).

##### 4.1. Diseño de geometría y armado de secciones de hormigón sometidas a una sollicitación cualquiera

El objetivo del diseño es que el costo del elemento estructural por unidad de longitud sea mínimo. Se han considerado como condiciones de diseño las tensiones máximas en el acero y en el hormigón; la cuantía mínima de las armaduras longitudinales, y las dimensiones máximas y mínimas de la sección. En la Fig. 3 se muestra el ejemplo propuesto, las variables de diseño empleadas en los cinco casos estudiados y los parámetros de diseño del problema.

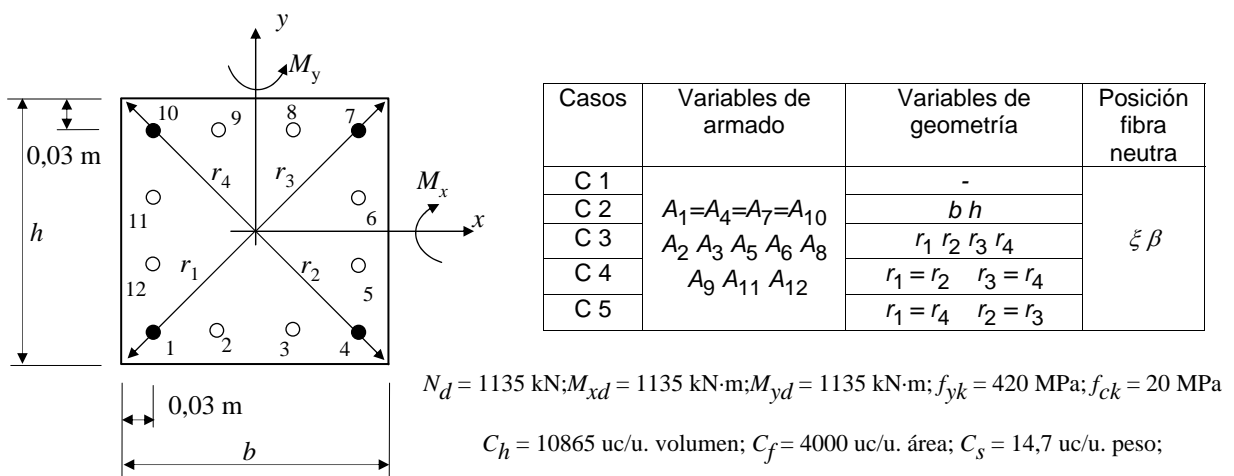


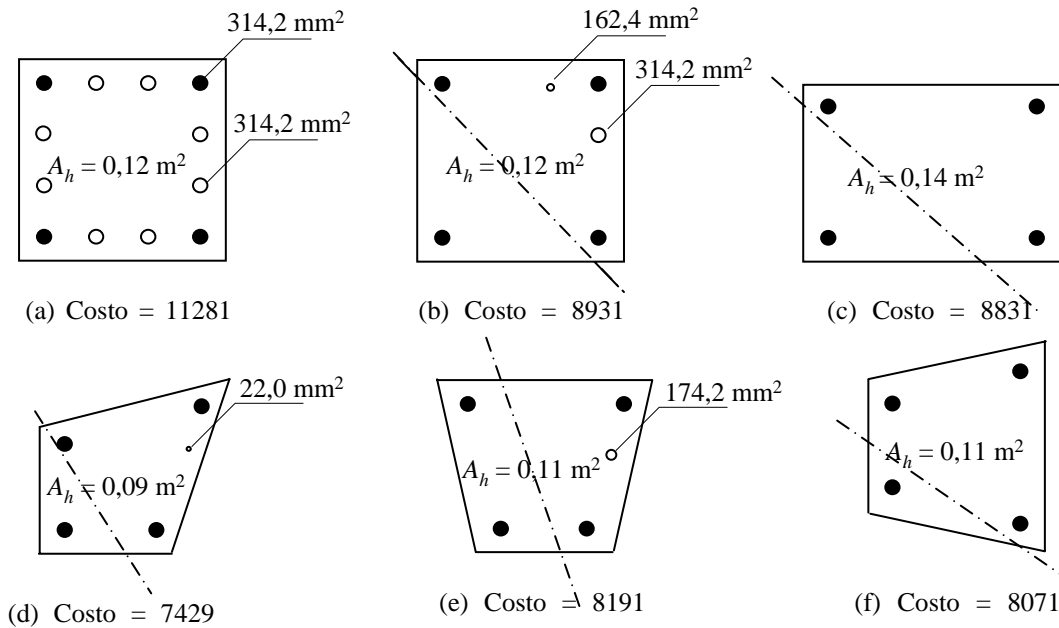
Figura 3 Modelo, variables y parámetros de diseño.

Los ejemplos han sido resueltos con la formulación desarrollada en Torrano y Martí (1998) implementada en el programa DISHA (Torrano, 2000), desarrollado en el entorno del programa de cálculo numérico MATLAB, aprovechando la facilidad de implementación y las herramientas gráficas de que dispone dicho entorno. Este programa considera un comportamiento no lineal del hormigón, utilizando como ley de comportamiento el diagrama parábola-rectángulo. Al acero se le considera un comportamiento elástico-perfectamente plástico. La optimización se ha realizado mediante un algoritmo de Programación cuadrática sucesiva. En la Fig. 4 se muestran los resultados obtenidos para los cinco casos estudiados.

El alumno, interactuando con el programa y modificando parámetros de diseño tales como el costo, las resistencias, las cargas, etc., obtiene los diseños óptimos para tales parámetros. Pero no sólo puede interactuar sobre los parámetros del problema; la interacción sobre las variables de armado y de forma le ofrece un abanico aún mayor de posibilidades, que se alejan de los diseños convencionales, abriendo al alumno nuevos interrogantes: ¿Por qué esta forma y no otra?, ¿Por qué esta distribución de armado? etc., que le ayudarán sin duda a un mejor entendimiento del comportamiento de las secciones de hormigón armado.

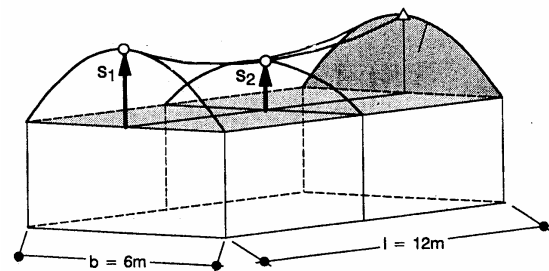
##### 4.2. Optimización de forma de una lámina de hormigón

Presentamos en este ejemplo el caso de la optimización de forma de una lámina de hormigón, sometida a su peso propio y a una sobrecarga vertical, para distintos criterios de diseño. Este ejemplo se basa en el utilizado por Bletzinger y Ramm (1993), sólo que aquí se amplían los casos para distintas condiciones de contorno.



**Figura 4** a) Diseño inicial, b) Caso 1, c) Caso 2, d) Caso 3, e) Caso 4, f) Caso 5.

Se trata de una lámina de 5 cm de espesor y 6 m de luz por 12 m de profundidad. El material es un hormigón de propiedades  $E = 30 \text{ GPa}$  y  $\nu = 0,2$ . La lámina se encuentra solicitada por una carga vertical de  $5 \text{ kN/m}^2$ . Las variables de diseño son  $S_1$  y  $S_2$  (Fig. 5). La lámina puede estar simplemente apoyada en los bordes rectos, en los curvos o en todos.



**Figura 5** Modelo de optimización.

El modelo inicial adopta el valor 3 m para las variables de forma  $S_1$  y  $S_2$ . Este modelo se ha optimizado (Fig. 6) con dos criterios distintos según la función objetivo adoptada (energía de deformación o peso). En el primer caso no se adopta restricción alguna. En el segundo caso se han restringido las tracciones a 2 MPa y las compresiones a 20 MPa. Los ejemplos han sido resueltos mediante los módulos de análisis y optimización del programa de elementos finitos ANSYS.

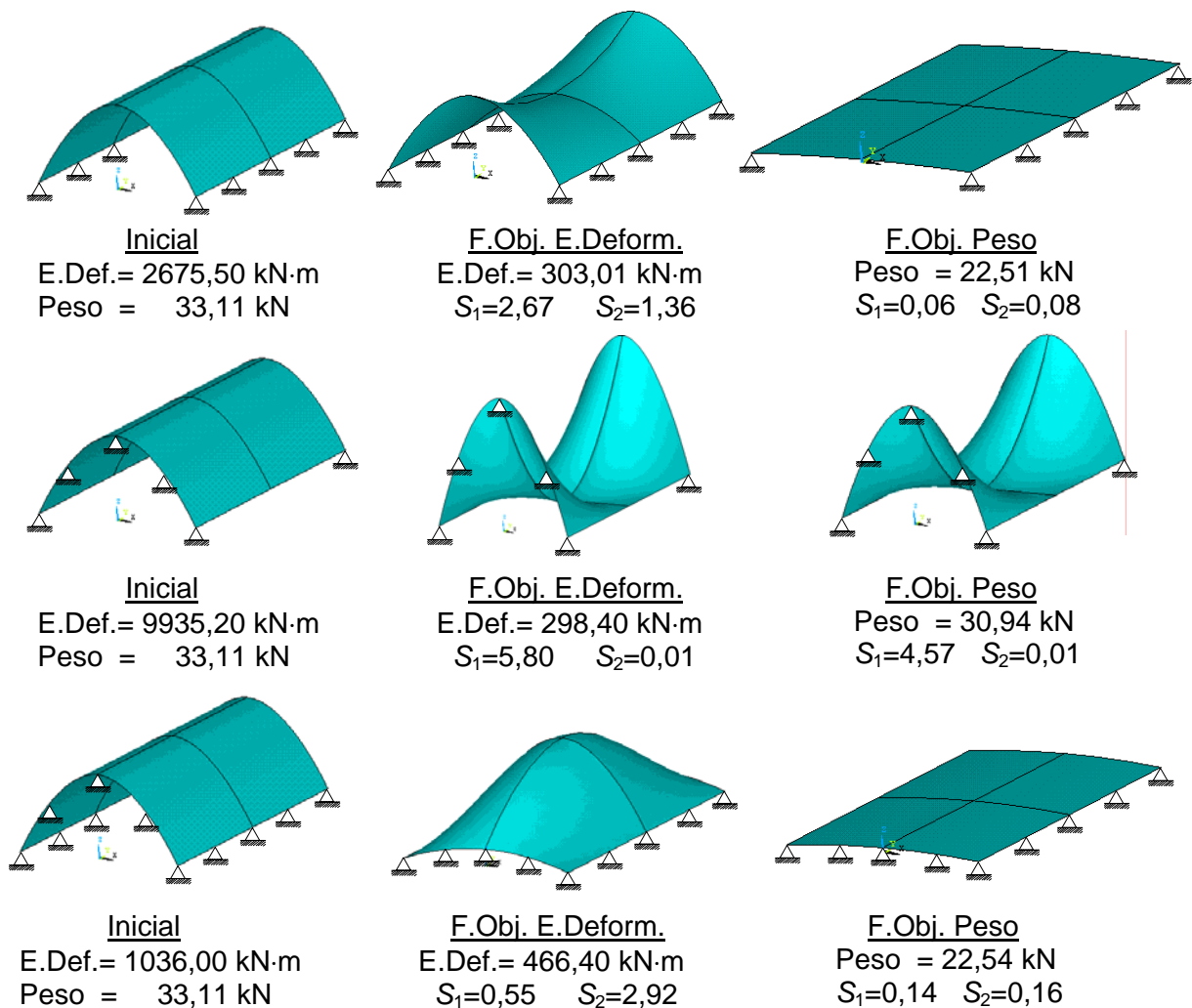
El alumno, interactuando con el programa, puede ir modificando parámetros tales como las resistencias, las cargas, las luces de la bóveda, etc., e ir obteniendo diseños óptimos para tales parámetros. Es interesante observar la forma que va adoptando la lámina en función de qué bordes estén apoyados, o de cuál sea la función objetivo a minimizar: la energía de deformación de la estructura (que tiende a formas que reducen al máximo las tensiones y las deformaciones), o el peso de la misma (que tiende a formas que minimizan la superficie, pues el espesor se mantiene constante).

## 5. CONCLUSIONES

Tradicionalmente, los ordenadores se han utilizado, dentro del proceso de diseño de estructuras, para analizar la respuesta de una estructura (definida por el usuario) y comprobar su seguridad para unas cargas dadas. Este uso puede ser adecuado para diseñadores con experiencia, pero no lo es para otros sin experiencia, como a menudo ocurre en el caso de los alumnos recién titulados. Para que la formación adquirida les sea

útil para su carrera profesional, es necesario que adquieran conocimientos de diseño global de estructuras, y no sólo de comprobación de elementos.

La utilización de las técnicas de optimización en la enseñanza de las estructuras de hormigón, amplía el campo de utilización del ordenador en el proceso de diseño y permite que el alumno obtenga los diseños óptimos para las condiciones de diseño fijadas por él. De esta manera, interactuando con el ordenador, puede asentar los conceptos adquiridos en las clases teóricas y, al mismo tiempo, adquirir una experiencia en el diseño de estructuras que hasta ahora sólo era posible conseguir con muchos años de experiencia profesional.



**Figura 6** Resultados de los procesos de optimización.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Bletzinger, K.-U. and Ramm, E. Form Finding of Shells by Structural Optimization. *Engineering with computers*, 1993, 9, pp. 27-35.
- [2] Martí-Montrull, P.; Company-Calleja, P. DISSENY: An Integrated System for the Structures and Structural Elements Optimal Design. *Advances in Optimisation for Structural Engineering*. B.H.V. Topping (Ed.). Civil-Comp, Edinburgh, 1996, pp. 23-29.
- [3] Torrano, S.; Martí, P.; Optimal Design of Shape and Reinforcement for Concrete Sections. "Proceedings of the Fourth World Congress on Computational Mechanics". Buenos Aires (Argentina), 1998.
- [4] Torrano, S.; "DISHA: Diseño interactivo de secciones de hormigón armado". Cartagena: Doc. de trabajo interno. Dto. Estructuras y Construcción. UPCT. 2000.