

Aplicación de las técnicas de optimización en la enseñanza de las estructuras

P. Martí Montrull; P. Martínez Castejón; A. Tomás Espín; M.S. Torrano Martínez

Departamento de Estructuras y Construcción

Universidad Politécnica de Cartagena

Campus Muralla del Mar

30202 Cartagena (Murcia)

pascual.marti@upct.es; Tfno. 968 325517; Fax. 968 325378

Resumen

En la metodología habitual de la enseñanza de las estructuras, 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 de su tiempo a analizar exhaustivamente una posible solución al problema, comprobando el cumplimiento de la normativa aplicable al caso, en vez de estudiar diversas alternativas de solución al problema. Creemos que 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, pueden ser unas herramientas muy eficaces para 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.). 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 ver los cambios que se producen en el diseño final. Con la aplicación de estas técnicas se amplía la visión del diseño de estructuras que adquiere el alumno cuando se dedica, casi con exclusividad, a comprobar la validez de unas soluciones dadas. Como muestra de la utilidad de estas técnicas para la enseñanza de las estructuras, se presentan ejemplos de estructuras metálicas y de hormigón: el diseño de la geometría y el armado de una sección de hormigón sometida a una sollicitación general, el diseño de una viga metálica armada, y el diseño de las propiedades, geometría y topología de una estructura metálica para una carga y unas condiciones de apoyo dadas.

1. Introducción

En la metodología habitual de la enseñanza de las estructuras, 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 de su tiempo a analizar exhaustivamente una posible solución al problema, comprobando el cumplimiento de la normativa aplicable al caso, en vez de estudiar diversas alternativas de solución al problema.

La experiencia de los autores en la enseñanza del diseño de estructuras indica que muchos de los ingenieros recién titulados que entran a trabajar en las oficinas de diseño de estructuras, con frecuencia se encuentran desconcertados al enfrentarse a la tarea de diseñar una determinada estructura teniendo que entregar un resultado en un tiempo muy breve, tiempo que en muchas ocasiones es el que les puede llevar la obtención de las leyes de esfuerzos. No están preparados para producir un primer diseño aproximado, sino que están más preocupados en realizar análisis y comprobaciones de lo que normalmente es una primera elección de la solución estructural. Esto se produce, a menudo, debido a sus experiencias en el sistema educativo, el cual enfoca la ingeniería estructural como la aplicación de una determinada normativa para el diseño de los elementos de la estructura.

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. Debe haber, por tanto, un cambio en la enseñanza del diseño de estructuras, tanto en la Universidad como posteriormente.

Tietz [1] identifica el supuesto tradicional de que “las clases son el ingrediente vital en las asignaturas tradicionalmente más rigurosas” como algo inadecuado, siendo “la enseñanza basada en el estudio más beneficiosa”. También afirma que “una buena enseñanza del diseño requiere una experiencia en el mismo”.

Cairns y Chrisp [2] discuten que, aunque el desarrollo de un nuevo enfoque en la enseñanza del diseño estructural en la universidad es digno de alabanza, necesita ser ampliado por la vía del desarrollo de las estrategias “what if” a lo largo de todo el plan de estudios. Este es el valor del ordenador en la enseñanza del diseño estructural, al permitir a los estudiantes cambiar parámetros que les proporcione una mejor comprensión del comportamiento estructural. McLeod [3] ha expresado este tipo de conocimiento como un “material virgen de acción creativa” que necesita ser reconocido tanto en la educación como en el proceso de aprendizaje de los ingenieros.

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, pueden ser unas herramientas muy eficaces para 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.). Además, el uso de las técnicas de optimización en la enseñanza del diseño de estructuras permite desarrollar estrategias “what if”, mediante las cuales el alumno puede ir cambiando los criterios de diseño (parámetros, variables, función a optimizar, etc.) y ver los cambios que se producen en el diseño final. Con la aplicación de estas técnicas se amplía la visión del diseño de estructuras que adquiere el alumno cuando se dedica, casi con exclusividad, a comprobar la validez de unas soluciones dadas.

Como ejemplo de la utilidad de estas técnicas para la enseñanza de las estructuras, se presentan ejemplos de estructuras metálicas y de hormigón. Para las estructuras de hormigón, a nivel de sección, se proponen como variables de diseño la geometría de la sección y el armado de la misma. Mediante las variables de geometría, pueden obtenerse un conjunto de soluciones que van desde la forma más general hasta formas más simples y adecuadas desde el punto de vista constructivo. Para las estructuras metálicas, a nivel de diseño de elementos aislados, se propone el diseño de una viga metálica armada, considerando variables de espesores y geometría. De esta forma pueden obtenerse un conjunto de soluciones que van desde el caso más sencillo (viga armada sin rigidizadores) hasta la forma más general (viga con rigidizadores transversales y longitudinales). A nivel de estructura completa, se propone la elección de la tipología más adecuada para una luz y un estado de cargas dado. Mediante las técnicas de optimización es posible

explorar diferentes tipologías, que van desde la de mínimo número de nudos y barras hasta otras mucho más complejas y difíciles de construir.

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. Este diseño se analiza de nuevo y el proceso se repite hasta alcanzar un diseño satisfactorio.



Fig. 1 - Diseño por prueba y error

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.

Desde la aparición del ordenador se han realizado grandes esfuerzos para su aplicación al diseño de estructuras. La parte 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 dinámica no lineal 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. En la Fig. 2 se muestra un diagrama de flujo correspondiente al proceso de diseño con técnicas de optimización.

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 dinero 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.

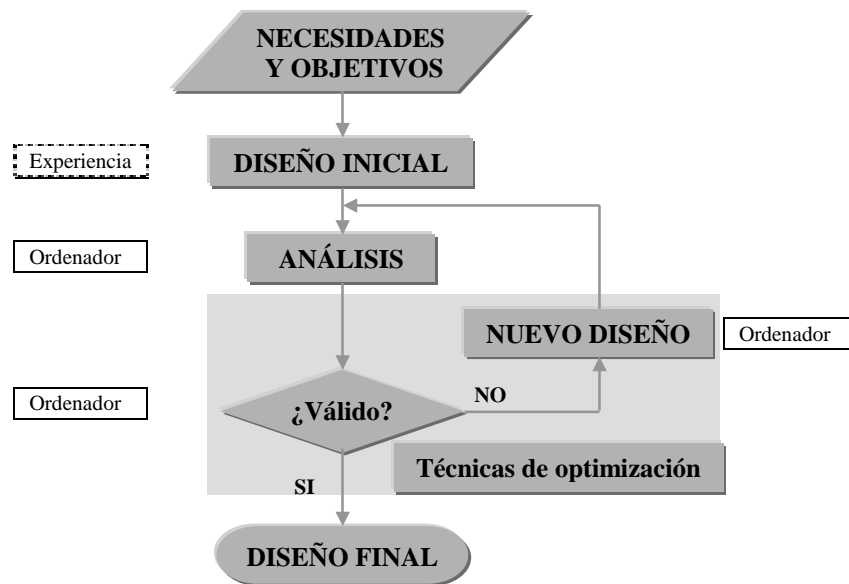


Fig. 2 - Diseño con técnicas de optimización

3. Formulación 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 mismas 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 (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 que cumplieran las condiciones de diseño, 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 relacionadas con el costo. Asimismo, pueden emplearse como función objetivo otras cantidades, tales como la fiabilidad, el desplazamiento de algún punto, la rigidez, la frecuencia fundamental, etc.

Las *restricciones* son condiciones que debe cumplir el diseño para que pueda ser considerado válido. Las restricciones pueden ser de dos tipos: restricciones de igualdad y restricciones de desigualdad. Las *restricciones de igualdad* suelen estar asociadas a las relaciones que fijan el comportamiento de la estructura, tales como condiciones de equilibrio, compatibilidad, ley de comportamiento del material, etc. Otras relaciones de igualdad están asociadas a las relaciones entre las variables de diseño del problema (igualdad de secciones de diferentes elementos, condiciones de simetría, etc.). Las *restricciones de desigualdad* suelen estar asociadas a limitaciones impuestas a la respuesta de la estructura, tales como tensiones máximas, deformaciones máximas, pandeos locales, pandeos globales, frecuencias de vibración, etc. Otro tipo de restricciones de desigualdad son las que delimitan el rango de posibles valores de las variables.

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

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

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; x_i^I el límite inferior de la variable i , y x_i^S el límite superior de la variable i .

Al espacio n -dimensional definido por el vector de variables \mathbf{x} se le denomina espacio de diseño. Las restricciones definen hipersuperficies que acotan un entorno en el espacio de diseño. Un conjunto de variables de diseño define un punto en el espacio de diseño. Si un punto del espacio es tal que se cumplen todas las restricciones, ese punto es un diseño válido; si, por el contrario, viola alguna restricción, el punto del espacio de diseño corresponde a un diseño no válido.

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

4. Aplicación de las técnicas de optimización en la enseñanza de las estructuras

El modo de enseñar el diseño de estructuras, proponiendo una solución inicial que se comprueba y variando algún parámetro para ver el efecto en el diseño, creemos que no es el único enfoque válido. Los profesores deben utilizar otras técnicas en la enseñanza del diseño de estructuras. Las investigaciones y trabajos con el empleo de las técnicas de optimización han demostrado el potencial existente en las mismas a la hora de efectuar una búsqueda, dentro de un complejo espacio de diseño, para obtener la mejor solución a un determinado problema. En algunas Universidades y centros de investigación se dispone de programas de diseño de estructuras basados en técnicas de optimización [4,5], y algunos de estos programas son fáciles de utilizar, de forma que pueden usarlos los alumnos en la Universidad y los ingenieros en sus labores de diseño. El empleo de estos programas capacita al ingeniero para resolver rápidamente un problema y poder variar parámetros cuando sea necesario para poder llegar a la solución óptima.

Los autores de esta comunicación sostenemos que el diseño de estructuras debe ser enseñado por profesores con experiencia en el mismo y con el empleo de técnicas de optimización, de forma que el alumno aprenda a desarrollar la heurística del diseño, la cuál ha estado en el pasado dominada fundamentalmente por el ingeniero experimentado.

5. Los ordenadores en la enseñanza del diseño de estructuras

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

Debido a las limitaciones de tiempo, el diseño de estructuras es a menudo enseñado en las escuelas de ingeniería como una aplicación de las normas existentes. Evidentemente, este es un enfoque parcial que, además, no coincide con el objetivo último que es el diseño de la estructura completa.

La creatividad y el talento de los alumnos y diseñadores son a menudo prisioneros de la rigidez de las normas. Se lograría mucho más en el aprendizaje si se adoptara un enfoque más ajustado a las

necesidades reales, utilizando herramientas de diseño que permitiera a los alumnos explorar todas las soluciones del espacio de diseño.

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, pueden ser unas herramientas muy eficaces para 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.). 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 ver los cambios que se producen en el diseño final. Con la aplicación de estas técnicas se amplía la visión del diseño de estructuras que adquiere el alumno cuando se dedica, casi con exclusividad, a comprobar la validez de unas soluciones dadas.

6. Aplicaciones

Se presentan a continuación tres aplicaciones para mostrar las posibilidades de las técnicas de optimización en la enseñanza del diseño de estructuras.

6.1 Diseño de geometría y armado de secciones de hormigón sometidas a una sollicitación cualquiera

En el diseño de estructuras de hormigón el dimensionado del armado de cada elemento estructural viene precedido de una definición previa de la disposición de los distintos elementos estructurales y de las dimensiones de su sección transversal. Quiere esto decir que, asegurada la rigidez de la estructura, el proceso de armado queda como algo secundario, recurriéndose a tablas, ábacos, escalas, etc. para determinarlo.

Introduciendo las técnicas de optimización en el diseño de secciones de hormigón armado, el alumno puede explorar posibles diseños, actuando sobre diferentes variables del problema, que responden a las siguientes opciones:

- fijar las dimensiones de la sección y hacer variable la distribución de armaduras;
- dejar variables las dimensiones y la distribución de armaduras, y
- dejar variables la geometría y la distribución de armaduras.

Siendo muy importantes los aspectos constructivos de un determinado diseño, en la enseñanza es importante abrir el más amplio abanico de posibilidades al alumno, y que de una forma natural, éste llegue a los diseños más adecuados, y no que parta de unos diseños convencionales y se limite a comprobar la validez de los mismos.

6.1.1. Planteamiento del problema

Se consideran tres tipos de *variables de diseño*: variables de geometría, variables de armado y variables de posición del eje neutro.

Las variables de geometría utilizadas son el canto total (h) y el ancho (b) de la sección. Si se considera variación de forma, las variables de geometría son los módulos de los vectores (r_i) los cuales tienen su origen en un punto fijo y los extremos son los vértices de la sección. La dirección de estos vectores se mantiene fija durante todo el proceso de optimización. Las variables de armado son las áreas de los redondos distribuidos en la sección. Las variables de posición del eje neutro son ξ y β , y son las indicadas en la Fig. 3a.

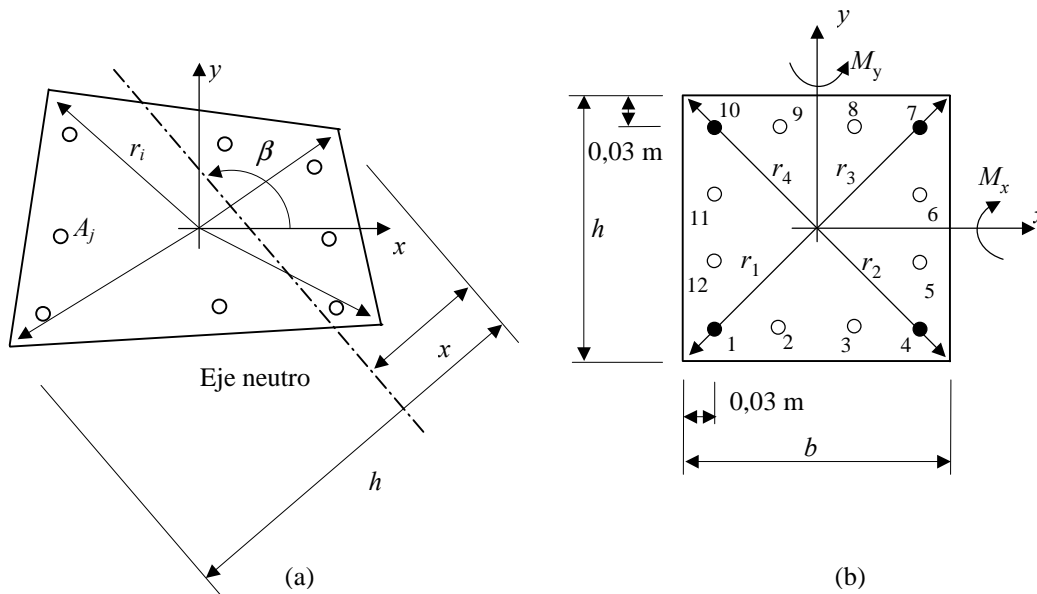


Fig. 3 - a) Variables de diseño. b) Ejemplo numérico

El *objetivo del diseño* es que el costo del elemento estructural por unidad de longitud sea mínimo. Se han considerado como *condiciones de diseño*:

- la resistencia del acero y del hormigón;
- la cuantía mínima de las armaduras longitudinales, y
- las dimensiones máximas y mínimas de la sección.

6.1.2. Aplicación numérica

Consideremos la sección mostrada en la Fig. 3b. En la tabla 1 se indican las variables de diseño utilizadas en cada caso. Sobre la sección se han distribuido de forma uniforme 12 redondos. Los redondos 1 a 4 son fijos en posición y área. El resto de los redondos son fijos en posición y su área puede variar.

Casos	Variables de armado	Variables de geometría	Posición fibra neutra
Caso 1	$A_1 = A_4 = A_7 = A_{10}$ $A_2 A_3 A_5 A_6 A_8 A_9 A_{11} A_{12}$	-	$\xi \beta$
Caso 2		$b h$	
Caso 3		$r_1 r_2 r_3 r_4$	
Caso 4		$r_1 = r_2 \quad r_3 = r_4$	
Caso 5		$r_1 = r_4 \quad r_2 = r_3$	

Tabla 1 - Casos estudiados. Variables de diseño

Los *parámetros de carga* son: carga axial (N) 1135 kN; momento flector alrededor del eje x (M_x) 92,25 kN·m y momento flector alrededor del eje y (M_y) 115,32 kN·m.

Los *parámetros de los materiales* son: límite elástico de proyecto de las armaduras (f_{yk}) 420 MPa; resistencia de proyecto del hormigón a compresión (f_{ck}) 20 MPa; peso específico del acero (ρ_s) 78,5 kN/m³; módulo de elasticidad longitudinal del acero (E_s) 210 GPa y módulo de deformación del hormigón (E_c) 25 GPa.

Los *parámetros de costo* utilizados son: costo del hormigón (C_h) 10865 u.c. por unidad de volumen; costo del encofrado (C_f) 4000 u.c. por unidad de área y el costo del armado (C_s) 14,7 u.c. por unidad de peso.

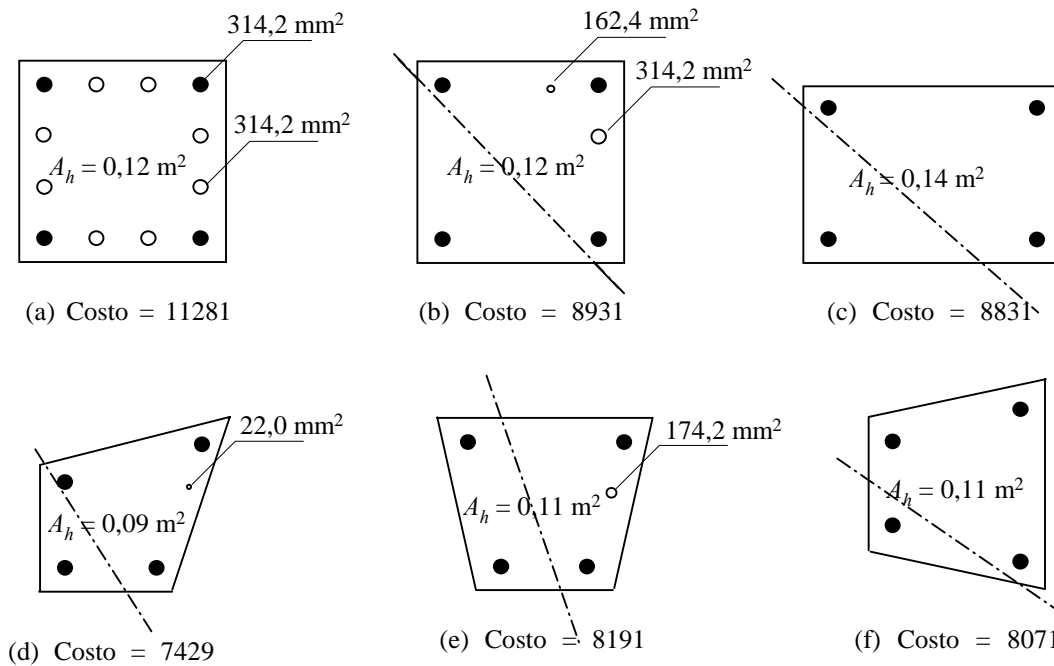


Fig. 4 - a) Diseño inicial, b) Caso 1, c) Caso 2, d) Caso 3, e) Caso 4, f) Caso 5

Los ejemplos han sido resueltos con la formulación anterior [6] implementada en el programa DISHA [7], 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 algoritmos de programación matemática, utilizando métodos de linealización, en concreto el de Programación cuadrática sucesiva.

El alumno, interactuando con el programa, modificando parámetros tales como el costo, las resistencias, las cargas, llega a unos 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.

6.2. Diseño de vigas armadas

El problema a resolver consiste en diseñar una viga metálica armada con sección transversal constante y simétrica respecto al eje vertical, de tal modo que su costo sea mínimo.

Puesto que se trata de soluciones con topología distinta, es necesario realizar una comparación entre los diseños óptimos obtenidos con los tres modelos estructurales siguientes: sin rigidizadores; con rigidizadores transversales (igualmente espaciados o con dos separaciones diferentes, S y $S/2$), s_a y con rigidizadores transversales y longitudinales.

Respecto de los rigidizadores transversales, se ha adoptado una separación constante para cada tramo así como las mismas dimensiones para toda la viga. En el caso de los longitudinales, se adopta uno sólo, dejando variable su longitud y su altura de colocación respecto del ala comprimida. Siguiendo una práctica bastante habitual, se adoptan rigidizadores transversales simétricos respecto al plano medio del alma de la viga, mientras que el rigidizador longitudinal se coloca sólo a un lado del alma.

Aunque las chapas se suministran en espesores discretos, se admite que pueden variar de forma continua. Al final del proceso se adaptan los resultados a espesores disponibles.

6.2.1. Planteamiento del problema

En la Fig. 5 se representan las *variables de diseño* correspondientes a la viga armada. Además de las variables de la sección transversal, se puede adoptar como variables la separación entre rigidizadores transversales S_{rt} , la longitud del rigidizador longitudinal L_{rl} y la altura de colocación del mismo h_{rl} .

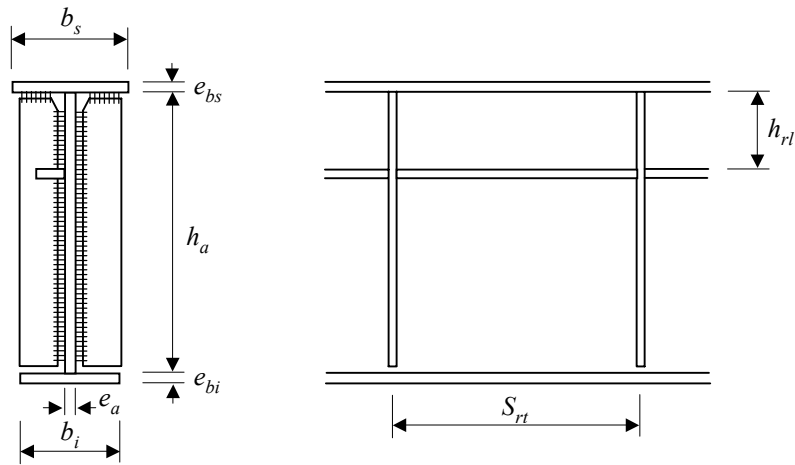


Fig. 5 - Variables de diseño de la viga

El *objetivo del diseño* es encontrar la solución de costo mínimo de entre todas las que satisfacen las condiciones de diseño, utilizando para ello una función que sea una suma ponderada de los pesos, asignando diferentes coeficientes de ponderación a cada uno de los elementos de la viga. En el caso de las vigas armadas, el costo total puede expresarse como suma del costo de los materiales de la viga, más el costo de preparación, más el costo de soldadura, más el costo de manipulación (que puede considerarse que es función de la altura de la viga).

Las *condiciones de diseño* se establecen en base a la norma NBE EA-95 y son las siguientes:

- resistencia del acero;
- desplazamiento máximo de la viga;
- pandeo lateral;
- pandeo local del ala comprimida;
- abolladura del alma, y
- restricciones constructivas.

6.2.2. Ejemplo de aplicación

La formulación del problema de diseño de vigas armadas [8] y el método de resolución del problema de optimización se han implementado en el sistema DISSENY [4,5]. En este apartado se presenta un ejemplo de aplicación numérica y se proporcionan los resultados obtenidos al emplear este sistema para diseñar la viga armada de la Fig. 6.

Los *parámetros de diseño constantes* son: módulo de elasticidad longitudinal $E = 210$ GPa ; módulo de elasticidad transversal $G = 81$ GPa; coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$; peso específico $\rho = 78,2$ kN/m³ ; límite elástico $\sigma = 260$ MPa ; separación entre puntos con arriostramiento lateral $L_b = 5$ m ; flecha admisible para cargas puntuales $f_{adm} = L/1000$, y coeficientes de mayoración de cargas: 1,33 para carga uniforme y 1,50 para cargas puntuales.

Con el objetivo de mostrar algunas de las posibilidades de la formulación adoptada, se propone realizar una optimización con variables continuas considerando los cuatro casos siguientes:

1. Restricciones de resistencia y pandeos locales. Costos relativos: $C_{alma} = 1$, $C_{alas} = 1$, $C_{rt} = 1$, $C_{rl} = 1$.
2. Restricciones de resistencia, pandeos locales y flecha. Costos relativos: $C_{alma} = 1$, $C_{alas} = 1$, $C_{rt} = 1$, $C_{rl} = 1$.

- Restricciones de resistencia y pandeos locales. Costos relativos: $C_{alma} = 1$, $C_{alás} = 1$, $C_{rt} = 3$, $C_{rl} = 3$.
- Restricciones de resistencia, pandeos locales y flecha. Costos relativos: $C_{alma} = 1$, $C_{alás} = 1$, $C_{rt} = 3$, $C_{rl} = 3$.

Siendo C_{rt} el costo de los rigidizadores transversales y C_{rl} el costo de los rigidizadores longitudinales. Los resultados obtenidos son los de la Fig. 7.

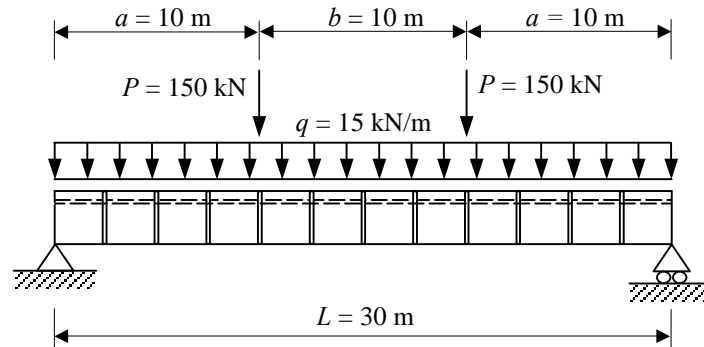


Fig. 6 - Geometría y cargas de la viga armada

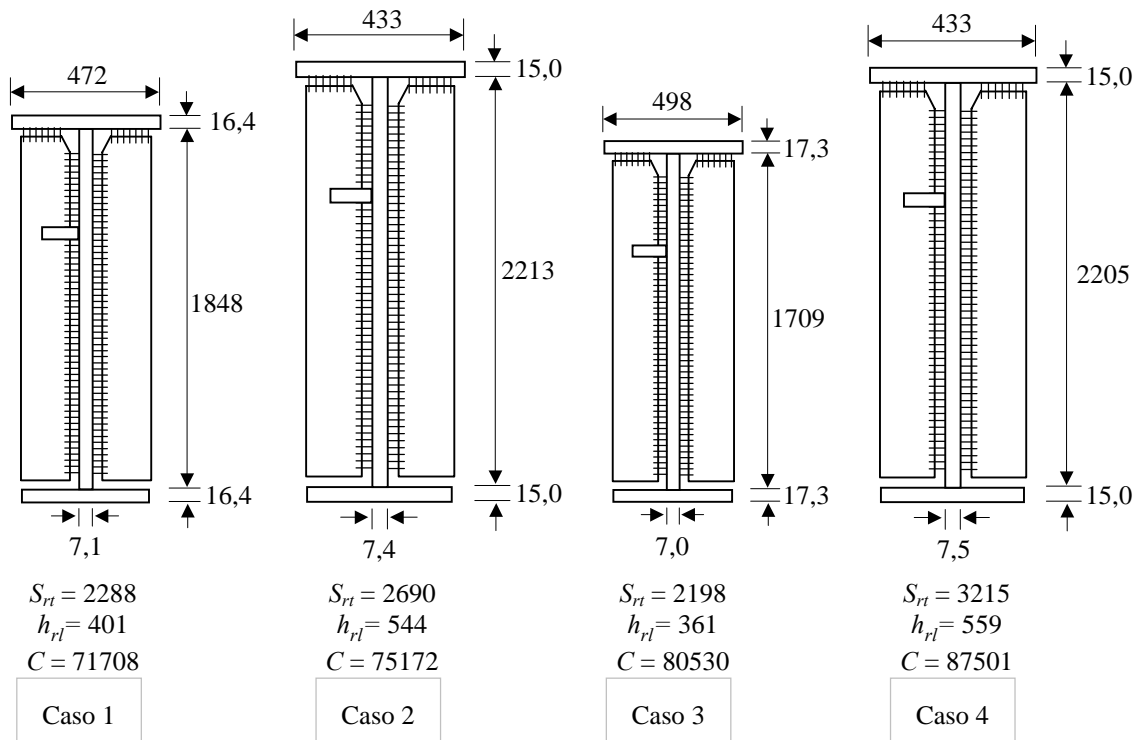


Fig. 7 - Diseños finales de la sección transversal

En los casos de restricciones de resistencia y pandeos locales, puede comprobarse cómo al establecer costos relativos mayores para los rigidizadores, el proceso tiende, por un lado, a disminuir el canto de la viga para obtener de este modo pesos inferiores de los rigidizadores, y por otro, a aumentar el espesor y el ancho de las alas para contrarrestar el aumento de las compresiones producido por la reducción del canto.

En los casos de restricciones de resistencia, pandeos locales y flecha, al aumentar los costos relativos de los rigidizadores, el proceso tiende, para obtener pesos inferiores en los rigidizadores, a disminuir nuevamente el canto de la viga, aunque esta vez es una reducción pequeña para que no se viole la restricción de la flecha, y sobre todo, a aumentar la separación de los rigidizadores transversales para que disminuya su número; por contra, hay un pequeño aumento del espesor del alma para contrarrestar los efectos que ese aumento de la separación de los rigidizadores tiene sobre la abolladura del alma.

El empleo del programa de ordenador permite ir modificando criterios de diseño, tales como la resistencia del acero, la condición de flecha o las restricciones constructivas, además de los costos de los materiales. Con esta forma de actuar, el alumno obtiene una serie de diseños que le permiten, por una parte, asentar los conceptos adquiridos en las clases teóricas y, por otra parte, adquirir una visión más amplia de las diferentes alternativas de diseño de las vigas armadas.

6.3. Diseño de una estructura metálica

En el procedimiento clásico de diseño de estructuras el ingeniero debe dar un diseño inicial con las propiedades, geometría y topología de la estructura, lo que supone que debe tener experiencia para elegir un buen diseño. Con las técnicas de optimización lo que se pretende es que sea el programa de ordenador el que genere la estructura óptima, tanto en propiedades como en geometría como en topología. Mediante los procedimientos de optimización de propiedades, geometría y topología de estructuras metálicas, el alumno puede obtener los diseños más adecuados sin la necesidad de partir de un diseño inicial. Así pues, mediante la utilización de las técnicas de optimización, el alumno obtiene el diseño óptimo sin tener que adoptar una estructura inicial.

6.3.1. Planteamiento del problema

Las *variables de diseño* son de tres tipos: variables de propiedades, variables de geometría y variables de topología. Las variables de propiedades son las áreas de la sección transversal de las barras; las variables de geometría son las posiciones de los nudos, y las variables de topología son los nudos de la estructura y las barras que los conectan.

El *objetivo del diseño* es minimizar el costo de la estructura.

Las *condiciones de diseño* son:

- resistencia del acero;
- pandeo de las barras de la estructura;
- esbeltez máxima, a tracción y a compresión, de las barras de la estructura, y
- valores máximos y mínimos de las áreas de las barras de la estructura.

El usuario puede limitarse a definir el valor y la posición de las cargas que debe soportar la estructura, la posición de los apoyos y las propiedades del material de las barras a añadir; el método de optimización se encarga de buscar las propiedades, la geometría y la topología óptimas.

6.3.2 Ejemplo de aplicación

Se ha considerado como ejemplo una carga vertical que debe transmitirse a una zona de apoyo, de altura h , situada a una distancia L (Fig. 8), que se ha resuelto con el programa TOPO [9].

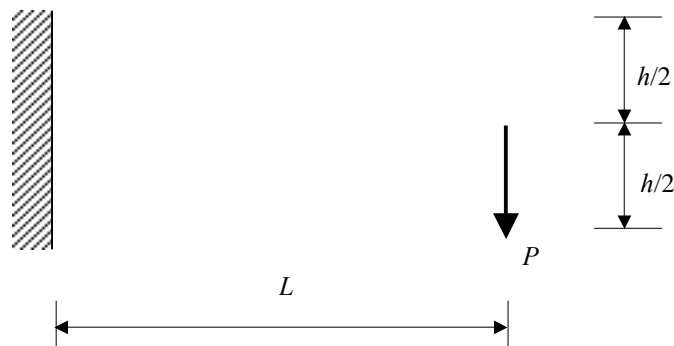


Fig. 8 - Condiciones de carga y de apoyo

En la Fig. 9 se muestra, para una relación longitud / altura = 2, el punto de partida y el diseño óptimo sin añadir nudos y los diseños óptimos obtenidos añadiendo 1, 2, 3 y 23 nudos.

En la Fig. 10 se muestra, para una relación longitud / altura = 4, el punto de partida y el diseño óptimo sin añadir nudos y los diseños óptimos obtenidos añadiendo 1, 2, 3 y 23 nudos.

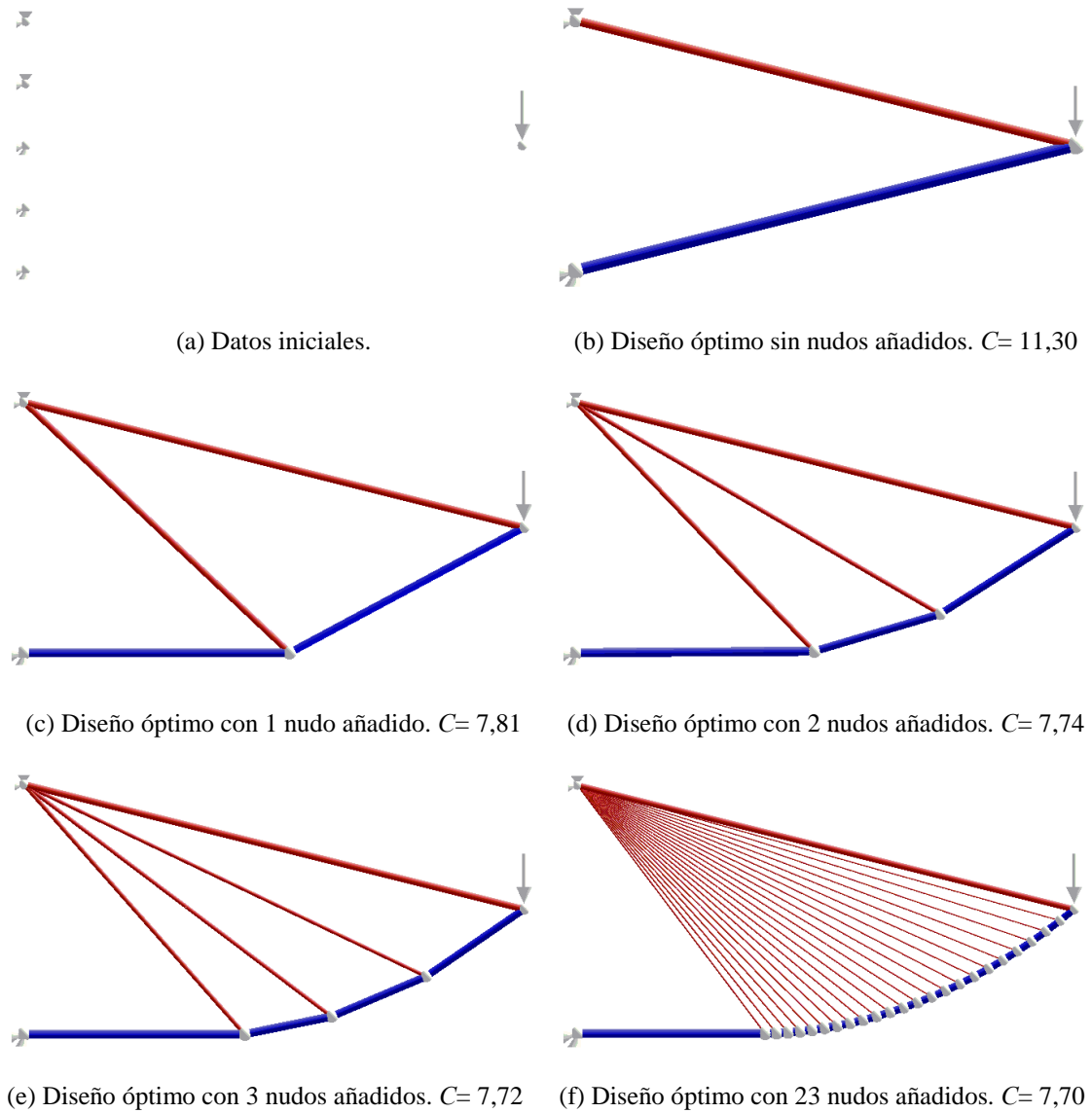


Fig. 9 - Diseños óptimos para una relación $L/h = 2$

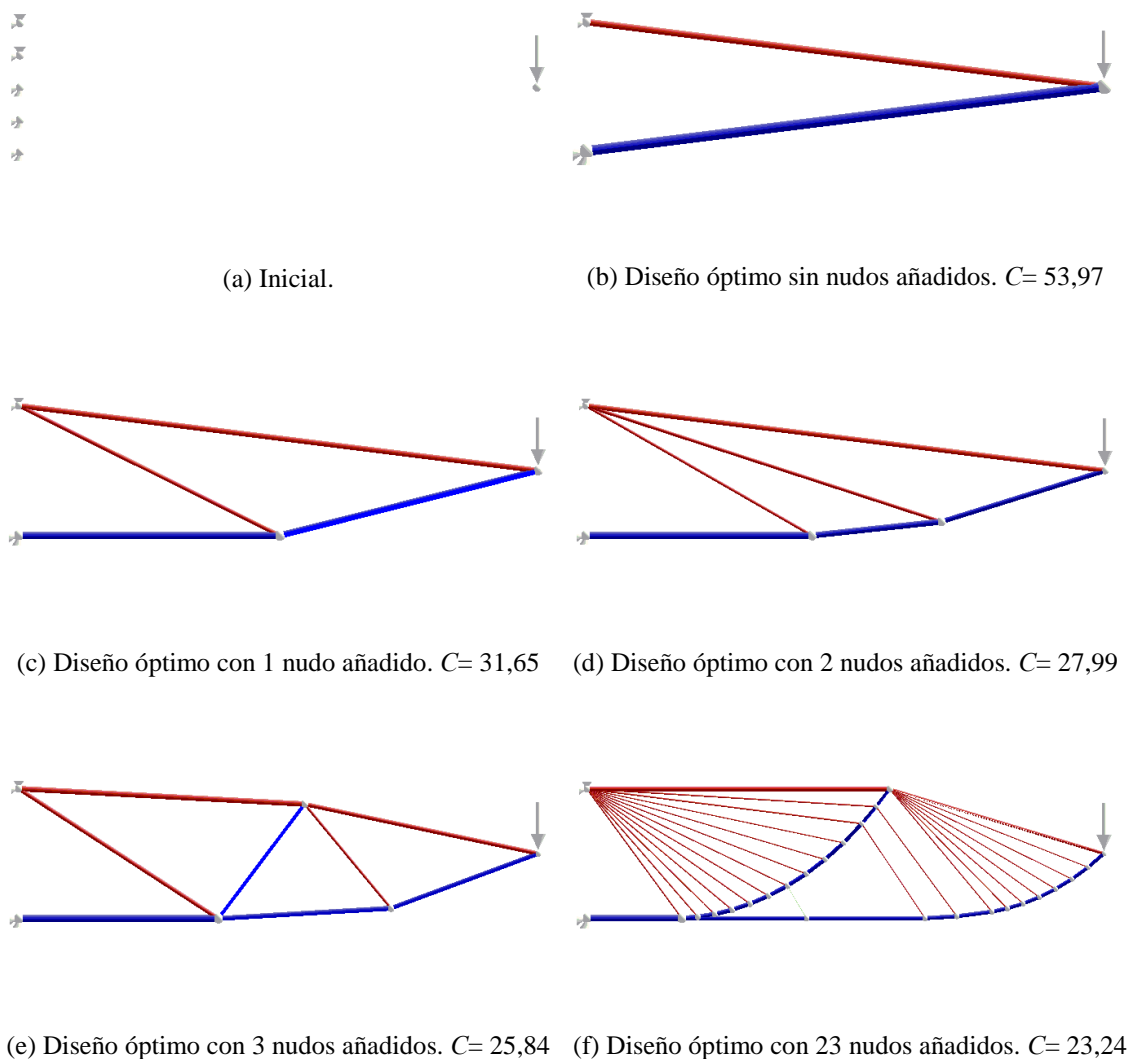


Fig. 10 - Diseños óptimos para una relación $L/h = 4$

Los tiempos de ordenador son bajos, del orden de un minuto en un ordenador con un microprocesador Pentium III-450, lo que permite al alumno, de forma sencilla y rápida, probar una gran cantidad de alternativas y adquirir experiencia en las topologías y geometrías óptimas para las condiciones de diseño que elija.

7. Conclusiones

La metodología habitual de la enseñanza de las estructuras, debido en gran parte a las limitaciones de tiempo que imponen los planes de estudio de las ingenierías, hacen que la formación que se le da al alumno sea parcial, y que se centre, fundamentalmente, en la comprobación del cumplimiento de la normativa para un diseño inicial dado. Para que la formación adquirida le sea útil para su carrera profesional, es necesario que adquiera conocimientos de diseño global de estructuras, y no sólo de comprobación de elementos.

Tradicionalmente, los ordenadores se han utilizado para analizar la respuesta de la estructura y comprobar su seguridad para unas cargas dadas. Este uso puede ser adecuado para diseñadores con experiencia, pero no lo es para los alumnos recién titulados.

La utilización de las técnicas de optimización en la enseñanza del diseño de estructuras permiten que el alumno obtenga los diseños óptimos para las condiciones de diseño que él fije. De esta manera,

interactuando con el ordenador, puede adquirir una experiencia en el diseño de estructuras que hasta ahora sólo era posible conseguir con muchos años de experiencia profesional.

8. Referencias

- [1] Tietz, S.; Design Education. "The Structural Engineer", 1997, Vol. 75 No. 18, pp. 325-326.
- [2] Cairns, J.; Chrisp, T.A.; Strategy for Teaching Structural Engineering Design. "The Structural Engineer", 1996, Vol. 74, No. 22, pp. 375-379.
- [3] MacLeod, I.A.; Kumar, B.; McCullough, J.; Innovative Design in The Construction Industry. "Proceedings of The Institution of Civil Engineers", 1998, Vol. 126, Issue 1, pp. 31-38.
- [4] Martí-Montrull, P.; Company-Calleja, P.; DISSENY: An Integrated System for the Structures and Structural Elements Optimal Design. En "Advances in Optimisation for Structural Engineering". B.H.V. Topping (ed.). Civil-Comp Press, Edinburgh, pp. 23-29.
- [5] Martí, P.; Company, P.; Sanchis, M.; DISSENY. Un sistema interactivo para el diseño de estructuras basado en técnicas de optimización. "Anales de Ingeniería Mecánica", 1985, Año 3, No. I, pp. 285-290.
- [6] 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.
- [7] Torrano, S.; "DISHA: Diseño interactivo de secciones de hormigón armado". Cartagena (España): Documento de trabajo interno. Departamento de Estructuras y Construcción. UPCT. 2000.
- [8] Martí, P.; "Optimización de vigas armadas mediante programación matemática no lineal". Valencia (España): Memoria interna de trabajo. Universidad Politécnica de Valencia, 1988.
- [9] Martínez, P.; "TOPO: Optimización de propiedades, geometría y topología de estructuras articuladas". Cartagena (España): Documento de trabajo interno. Departamento de Estructuras y Construcción. UPCT. 2000.