

Si el movimiento de todas las cosas que están en movimiento es o natural o no natural y violento, y todas las cosas cuyo movimiento es violento y no natural son movidas por algo, y algo distinto de ellas mismas, y si todas las cosas cuyo movimiento es natural son movidas por algo, ambas, las movidas por sí mismas (los seres vivos) y las que no son movidas por sí mismas (p. ej. las cosas ligeras y las cosas pesadas, que son movidas o por la que las produjo como tales y las hizo ligeras y pesadas, o por la que suprimió lo que estaba impidiéndolo o deteniéndolo), entonces todas las cosas que se mueven deben ser movidas por algo.

ARISTOTELES

VIII

CONCLUSIONES

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

VIII.1 CONCLUSIONES

Podemos resumir la situación actual del diseño óptimo en general, y del diseño óptimo estructural en particular, en los siguientes puntos:

- La viabilidad económica de la aplicación masiva de técnicas de diseño óptimo no será una realidad en tanto no se encuentren disponibles sistemas susceptibles de ser aplicados con éxito a una gran variedad de problemas distintos -cuanto menos dentro de una misma tipología- con costes operativos competitivos con los sistemas tradicionales.
- La existencia de tales sistemas no se ha manifestado hasta el momento, debido fundamentalmente a la carencia de una metodología de trabajo firmemente establecida y a la gran dispersión de las técnicas existentes.
- Entre tanto, la aplicación de tales técnicas no ha sido rentable excepto en la realización de proyectos de coste muy elevado o de productos destinados a la fabricación en serie de numerosas unidades, casos en que la reducción neta esperada del coste de fabricación del producto final es

suficiente como para justificar la fuerte inversión necesaria para desarrollar un sistema de diseño óptimo específico para el producto en cuestión.

- Una gran proporción de los problemas de optimización del diseño se reducen a problemas generales de minimización con restricciones expresadas mediante desigualdades. El desarrollo de sistemas capaces de solucionar con éxito y generalidad tales problemas requiere el uso de diversas estrategias y técnicas de programación matemática de elevada complejidad. Las técnicas conocidas hasta el momento proporcionan, en principio, únicamente óptimos locales, persistiendo la imposibilidad de obtener mediante un único cálculo el mínimo global del problema general. La aplicación de técnicas eficientes de programación matemática exige, además, el cálculo de las derivadas hasta un cierto orden de la función a minimizar y de las restricciones.
- El desarrollo de sistemas de diseño óptimo de tipo general requiere la integración en los mismos de métodos de cálculo capaces de abordar numerosos tipos de problemas de alta complejidad, tales como el Método de Elementos Finitos. La integración de estos métodos debe realizarse hasta un nivel que permita disponer de la información necesaria para realizar una toma de decisiones satisfactoria mediante las técnicas de programación matemática. Las operaciones de cálculo y derivación involucradas no son en absoluto sencillas, y el coste que conllevan ha limitado fuertemente, hasta el momento, la aplicación de técnicas de programación matemática que exijan evaluar las funciones en numerosos

puntos, o requieran el conocimiento de sus derivadas hasta un orden superior al primero.

- La aplicación de la optimización al diseño estructural es un problema que envuelve una gran complejidad, derivada fundamentalmente de la dificultad intrínseca de los métodos de análisis estructural.

- Es importante destacar que la optimización de la forma de estructuras de tipo continuo se ha considerado tradicionalmente como un problema un orden de magnitud superior en dificultad a la optimización de las dimensiones de componentes de estructuras de tipo discreto. Ello se ha debido esencialmente al desconocimiento de técnicas eficientes de análisis de sensibilidad en optimización de formas. Hasta muy recientemente, se ha realizado el análisis de sensibilidad en estos problemas de optimización mediante aproximaciones en diferencias, obteniendo resultados desvirtuados en muchas ocasiones por fuertes errores que repercuten desfavorablemente en la toma de decisiones llevada a cabo por algoritmos de programación matemática. En los procesos de optimización así planteados se dan fuertes oscilaciones, lentitud en la convergencia y diversas malfunciones que los hacen poco operativos.

En este estudio se ha desarrollado, en primer lugar, una metodología de carácter general aplicable a un amplio rango de problemas de optimización de diseño. La formalización metodológica presentada da pie a la construcción de un cuerpo de doctrina coherente para las técnicas de diseño óptimo, y además

- permite la estructuración en forma modular y unificada, de sistemas de diseño óptimo de propósito general, donde coexistan diferentes módulos que realicen una misma función según concepciones distintas. De esta forma se incrementa la eficiencia, la potencia y la versatilidad de un sistema, ya que pueden emplearse los módulos que mejor se adapten a las peculiaridades de cada problema en particular, y se logra un mayor aprovechamiento de los recursos, ya que el mismo módulo puede utilizarse en la solución de problemas de naturaleza muy diversa.

- indica que la concreción de los planteamientos descritos en un determinado sistema de diseño depende notablemente del tipo de problema a resolver, y por tanto de la naturaleza del módulo de cálculo de que se disponga. Ya que en una gran parte de los problemas de ingeniería se han de resolver sistemas lineales o no lineales de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, y las técnicas más difundidas en la actualidad para abordar con éxito este tipo de problemas son los denominados métodos integrales, y en particular el Método de Elementos Finitos, se evidencia la necesidad de utilizar módulos de cálculo basados en este tipo de métodos en sistemas de diseño óptimo de amplio rango de aplicación.

- marca claramente las respectivas interdependencias existentes entre los diversos módulos, y hasta que punto la calidad de la información suministrada por un módulo condiciona la eficacia de los restantes.

Se concluye, que para desarrollar sistemas eficientes de diseño estructural óptimo es necesario disponer de módulos de decisión, y por tanto algoritmos de programación matemática, especialmente condicionados por la naturaleza y las posibilidades de los módulos de cálculo basados en el Método de Elementos Finitos, y a su vez éstos métodos deben ser complementados de forma que suministren la información adicional requerida por los módulos de decisión, esto es el análisis de sensibilidad.

Por consiguiente, es preciso disponer de algoritmos de decisión capaces de solucionar problemas de minimización caracterizados por los siguientes aspectos:

- funciones objetivo sencillas y de comportamiento suave con las variables de diseño.
- un gran número de restricciones cuyo comportamiento es altamente no lineal con las variables de diseño, y el cálculo de cuyas derivadas puede revestir una gran dificultad, especialmente en el caso en que las variables de diseño afecten a la forma de la estructura.
- fuertes requerimientos en tiempo de cálculo para la evaluación de la función objetivo, las restricciones, y sus respectivas derivadas.

A partir de los planteamientos metodológicos generales se desarrolla un sistema de diseño óptimo estructural basado en la aplicación del Método de Elementos Finitos a problemas estáticos y lineales de cálculo estructural y se introducen técnicas generalizadas de derivación para análisis de sensibilidad que

suponen un notable avance en el ámbito de la optimización estructural, dado que:

- Permiten realizar una unificación de la optimización de dimensiones y la optimización de formas, tanto a nivel conceptual como operativo, a través de un enfoque global.
- El análisis de sensibilidad puede realizarse hasta el orden n-ésimo con gran eficacia y exactitud, dotando al módulo de decisión de información completa y veraz.
- La obtención de derivadas primeras puede realizarse a bajo coste una vez resuelto el problema mediante el Método de Elementos Finitos, reciclando gran parte de los cálculos efectuados con anterioridad. Igualmente, en la obtención de derivadas de orden superior pueden aprovecharse ventajosamente los cálculos previos. La obtención de todas las derivadas de orden superior supone en general unos requerimientos de tiempo de cálculo y almacenamiento en memoria inaceptables. Sin embargo, la obtención de derivadas direccionales de orden superior en una determinada dirección puede realizarse con un coste razonable. El esquema de cálculo es tal que permite construir procedimientos que complementen a programas de cálculo ya existentes, de forma que el conjunto pueda ser implementable directamente como módulo de cálculo de un sistema de diseño óptimo. En general, si el programa de cálculo está suficientemente bien estructurado, el número de modificaciones que es necesario realizar es mínimo.

- Permiten desarrollar algoritmos de programación matemática específicamente adaptados a los problemas de optimización estructural, en los que se utilicen las derivadas primeras en la obtención de la dirección de avance, y derivadas direccionales de orden superior en la obtención del factor de avance. En este estudio se propone un algoritmo que implica derivación direccional hasta segundo orden, conceptualmente sencillo y cuya implementación, a parte del análisis de sensibilidad, no envuelve grandes dificultades. La introducción de información de orden superior aumenta extraordinariamente la eficiencia del algoritmo, en comparación con procedimientos clásicos tales como el de programación lineal secuencial que tan sólo utilizan información de primer orden, al tiempo que se eliminan automáticamente sus más graves deficiencias (oscilaciones de gran amplitud cerca del óptimo).

Como demostración de la validez de los planteamientos descritos en este estudio, se ha desarrollado un sistema de Diseño Asistido Óptimo por Ordenador denominado DAO², del cual podemos afirmar que:

- es notablemente general, dado que para cada tipo de problemas en particular sólo es necesario definir ciertos aspectos específicos, pudiéndose aplicar a la solución de problemas de naturaleza muy diversa dentro de un mismo esquema patrón, con unas exigencias de adaptación mínimas y con costes operativos razonables.

- demuestra una notable eficiencia en problemas característicos de optimización estructural de formas, con un número muy elevado de restricciones altamente no lineales con las variables de diseño, siendo capaz de proporcionar diseños muy cercanos al óptimo partiendo de diseños iniciales muy distintos -incluso fuertemente no factibles- y en un número reducido de iteraciones.
- el análisis de sensibilidad de segundo orden proporciona información de gran exactitud, permitiendo al optimizador adoptar decisiones correctas sobre la magnitud de la modificación del diseño entre cada dos iteraciones. Además, al disponer de aproximaciones cuadráticas de gran calidad, no es necesario imponer límites móviles demasiado estrictos y es posible obtener una velocidad de convergencia notable, eliminándose las oscilaciones que se producen al utilizar únicamente aproximaciones lineales.

A la vista de lo anteriormente expuesto, podemos concluir que la inexistencia de módulos de parametrización de propósito general es hoy en día el factor que limita más fuertemente la posibilidad de crear sistemas de diseño óptimo de muy amplio rango de aplicación.

VIII.2 LINEAS DE INVESTIGACION ABIERTAS

A partir de los planteamientos presentados en este estudio, se han abierto diversas líneas de investigación, al tiempo que se ha confirmado la importancia de muchas otras ya clásicas e insuficientemente resueltas.

Entre todas ellas, consideramos como más significativas las siguientes:

- la extensión de la formulación presentada a otros problemas de optimización basados en el análisis mediante el Método de Elementos Finitos (cálculo estructural de láminas, análisis de otros fenómenos físicos regidos por ecuaciones diferenciales similares, etc.).
- la aplicación de la metodología de derivación propuesta, desarrollada en el Anejo 2, a problemas de optimización de dimensiones y formas basados en técnicas de análisis no lineal.
- la aplicación de la metodología propuesta a problemas de optimización de dimensiones y formas basados en el análisis mediante el Método de Elementos de Contorno. Si bien estos procedimientos son más restrictivos que los de Elementos Finitos, es razonable suponer que se utilizarán algo más extensivamente en diseño óptimo en un futuro próximo, ya que al definir la forma de un cuerpo por sus contornos parece lógico utilizar procedimientos de cálculo que requieran información únicamente sobre el contorno, y no del interior.
- el desarrollo de técnicas de generación automática de malla especialmente adaptadas a este tipo de problemas, y la aplicación de técnicas de refinamiento automático, de forma que en las primeras iteraciones se generen mallas sencillas que se densifiquen a medida que avanza el proceso, obteniendo resultados más precisos al tiempo que se mejora el diseño.

- el desarrollo de nuevos algoritmos de programación matemática más eficientes, especialmente concebidos para este tipo de problemas. Obsérvese que en la gran mayoría de los ámbitos de aplicación de las técnicas de programación matemática, la función objetivo suele ser altamente no lineal, mientras que las restricciones son sencillas o simplemente no existen. Sin embargo, en optimización estructural la función objetivo es sencilla (en ocasiones lineal, y normalmente cuasi-lineal), mientras que las restricciones son en general muy complejas. Cabe recordar que existen numerosos algoritmos específicos de gran eficiencia para resolver el problema de minimización de funciones cuadráticas con restricciones lineales, mientras que no existe ningún algoritmo específico para resolver el problema de minimización de funciones lineales con restricciones cuadráticas.
- el desarrollo de técnicas de parametrización de tipo general, que permitan definir todo tipo de diseños interactivamente, o cuanto menos de forma sencilla, en un sistema de diseño óptimo. Parecen prometedores los esfuerzos realizados en este sentido por otros investigadores a partir de procedimientos de modelado geométrico -característicos de los sistemas de CAD- para la definición de curvas, superficies y sólidos (B-splines, curvas y superficies de Bezier, etc.).
- el desarrollo de técnicas de descripción sintética, fundamentalmente en forma gráfica, de grandes volúmenes de información, de forma que el usuario de un sistema de diseño óptimo pueda visualizar de forma rápida y completa el estado

del diseño en cada iteración, e intervenir más activamente en la toma de decisiones.

- El desarrollo y aplicación de Sistemas Expertos e Inteligencia Artificial, permitiendo la introducción en la toma de decisiones de criterios de tipo heurístico y la capacidad de aprender a partir de las experiencias anteriores en problemas similares.