

Capítulo 1:

INTRODUCCIÓN

En este capítulo, como su nombre indica, se realiza la introducción de los conceptos generales sobre los que se fundamenta el trabajo desarrollado. A continuación, se definen los objetivos de la tesis, así como una breve descripción del contenido de cada capítulo.

GENERALIDADES

El mundo del diseño en la ingeniería está evolucionando a un ritmo vertiginoso. En menos de una generación, se ha pasado de buscar soluciones aproximadas mediante groseras simplificaciones, a intentar encontrar la mejor de todas las posibles en problemas de naturaleza extraordinariamente compleja. Múltiples, y de distinta índole, son los factores que han contribuido a este desarrollo. Cítese por ejemplo el esfuerzo económico de empresas e instituciones en investigación; el aumento de la comunicación entre la dispersa comunidad científica; tal vez una inherente capacidad del hombre para intentar buscar el progreso... Pero de entre todas las razones económicas, antropológicas, sociológicas o filosóficas que se desee encontrar, y que a buen seguro podrían ser motivo de alguna tesis doctoral, dos hechos reales fundamentan el nivel conseguido: por un lado el desarrollo del ordenador y sus periféricos y por otro lado el desarrollo teórico de nuevos conceptos computacionales.

De todos es sobradamente conocido el potencial de los ordenadores actuales, cuyas capacidades se extienden a un triple nivel: en primer lugar el hardware y sus periféricos; es evidente que las posibilidades de rapidez, interacción y facilidades gráficas de cualquier PC actual, por no hablar de grandes máquinas, supera con creces los modelos de hace tan sólo diez años. En segundo lugar el software; los nuevos sistemas operativos y los entornos gráficos facilitan el desarrollo de nuevas y mejores aplicaciones, es más fácil programar y los programas son más interactivos y manejables. Finalmente, en tercer lugar, se destaca la programación como concepto; constantemente están apareciendo nuevos lenguajes que solventan las deficiencias de los viejos y crean nuevas inquietudes. Estos avances, tanto en hardware, como en software, como en programación abren un universo con muchas posibilidades para la revolución de la concepción del diseño en la ingeniería.

En el mundo de la ingeniería, la dificultad de los problemas planteados ha ido aumentando día a día. El cálculo elástico lineal ha sido superado por diferentes modelos constitutivos no lineales o por

modelos de no linealidad geométrica, todo en aras de simular un comportamiento más acorde con la realidad observada. La posibilidad de resolver dichos planteamientos se debe, en gran medida, a la aplicación de algoritmos numéricos complejos y al desarrollo de potentes preprocesadores y postprocesadores para el MEF (Método de los Elementos Finitos), el más popular de los métodos numéricos existentes en la literatura para el cálculo de estructuras.

En los últimos tiempos un par de cuestiones han estimulado a la investigación sobre las posibilidades del diseño en la ingeniería. Una es el problema de la optimización, el hecho de buscar la mejor solución posible. Otra es el problema de la patología y control de calidad, ser capaces de predecir los defectos de proyecto, evaluar el daño y las posibilidades de mantener en servicio una estructura que supera algún estado límite. En el campo de la optimización se han hecho muchos progresos y, en particular, ha nacido todo un conjunto de algoritmos que hacen uso de la información de las derivadas de variables significativas, son los llamados métodos de orden uno. Asimismo, en el problema de la reparación y el análisis de patologías en estructuras, algunos algoritmos existentes también necesitan conocer dichas derivadas. Por lo tanto, en estos últimos años se ha promovido el interés por la evaluación de las derivadas, es decir, el cálculo de la relación entre diferentes variables de un problema. Esto ha dado lugar al llamado *análisis de sensibilidad*, materia fundamental de la tesis que se presenta.

En otro orden de cosas, cabe destacar la creciente investigación sobre las teorías del conocimiento y la IA, Inteligencia Artificial. La aplicación práctica de los conceptos de IA se ha plasmado en numerosas experiencias, en campos tan dispares como la diagnosis médica o la educación, pero no ha sido hasta época muy reciente que han empezado a usarse en la ingeniería. Entre las herramientas del conocimiento aplicadas al campo computacional, destacan los llamados sistemas expertos. En general, los sistemas expertos manipulan el conocimiento almacenado en forma de reglas nacidas de la experiencia previa, y por lo tanto, son capaces de realizar labores de apoyo en la toma de decisiones, en la evaluación de situaciones, previsión de futuro, etc. Estas facultades los hacen particularmente atractivos en el diseño y en el diagnóstico de patologías estructurales, esto es especialmente cierto si se considera que el ingeniero deberá tomar un seguido de decisiones sobre dimensiones, o bien, deberá evaluar el estado de una estructura dañada.

Por desgracia, la dificultad de capturar el conocimiento de carácter heurístico que necesitan los sistemas expertos limita enormemente su potencialidad. Cabe preguntarse, no obstante, si el hecho de conocer las relaciones cuantitativas entre variables, calculadas mediante un *análisis de sensibilidad*, no podría ayudar a la toma de decisiones en el proceso de diseño. En consecuencia, también en la tesis, se intentará dar alguna respuesta a la posible relación entre el análisis de sensibilidad y los sistemas expertos en el mundo de la ingeniería.

OBJETIVOS

A continuación se establecen los objetivos de la tesis doctoral que se presenta. En primer lugar se destacan unos objetivos de carácter general que definen el marco de trabajo de la tesis. Tras ello, se describen los desarrollos que se han llevado a cabo para conseguir dichos objetivos.

GENERALES

En el diseño de una estructura existen una serie de variables que definen de forma fundamental el proyecto estructural, a modo de ejemplos ilustrativos se pueden citar como tales la naturaleza del material de construcción: acero, hormigón o un material compuesto, o bien, las dimensiones de las secciones estructurales. El ingeniero que proyecta también se enfrenta a una serie de restricciones o condicionantes, entre los que cabe citar la tensión máxima de trabajo en el material, o la máxima flecha admisible. En definitiva, el diseñador tomará decisiones sobre una serie de variables deseando cumplir una serie de objetivos y limitaciones. Es evidente que algunas variables *influyen* de forma determinante en el comportamiento estructural, por ejemplo el tipo de material, mientras otras no influyen en absoluto, aunque no por ello se deben considerar menos importantes, por ejemplo la textura.

La tesis doctoral que se presenta persigue un doble objetivo. Por un lado, el desarrollo de formulaciones que permitan calcular sensibilidades en la estructura, en un supuesto régimen no lineal del material. Con ello se pretende ser capaz de evaluar la influencia que puede tener sobre el comportamiento estructural un determinado cambio en la forma del diseño. Es lógico pensar que, con este tipo de información, se estaría en condiciones de predecir patologías estructurales o de evolución de estado, y por consiguiente tomar decisiones al respecto.

Por otro lado, se pretende reflexionar sobre los conceptos de diseño asistido, y ofrecer una nueva generación de herramientas de soporte al diseño, basadas en el uso inteligente de la información que se consigue con el análisis de sensibilidad.

ESPECÍFICOS

Para conseguir los objetivos de carácter general se han establecido unos objetivos determinados de carácter específico.

- En primer lugar realizar un estudio del estado del arte del análisis de sensibilidad en el campo estructural, haciendo hincapié en el tratamiento que la literatura da al régimen no lineal del material.
- Es evidente, que los materiales más comunes en el mundo de la construcción son el acero y el hormigón. Cada uno de estos materiales, tiene asociado un modelo constitutivo propio; en

general, y salvando excepciones, puede afirmarse que el régimen no lineal del acero puede simularse con un modelo de elastoplasticidad. Por su parte, el hormigón puede simularse con un modelo basado en la teoría de daño. Se pretende pues:

- a) Desarrollar una formulación para obtener la sensibilidad de una estructura en régimen elastoplástico.
 - b) Desarrollar una formulación para obtener la sensibilidad de una estructura cuyo material se comporte según un modelo constitutivo de daño.
- Finalmente, se define en la tesis un módulo de diseño asistido basado en conceptos de inteligencia artificial y sistemas expertos, capaz de evaluar y tomar decisiones sobre la calidad del diseño.

Todo ello se ha integrado en un código orientado a objeto para cálculo de estructuras con elementos finitos. A tal fin, se han desarrollado módulos para el análisis de sensibilidad lineal, los modelos elastoplástico y de daño, con sus respectivas sensibilidades, y posibilidad de enlace de información con los módulos del sistema experto.

CONTENIDO

El contenido de la tesis que se presenta se ha organizado de la manera siguiente:

A lo largo del capítulo 2 se describen los aspectos generales del estado del arte del análisis de sensibilidad, centrándose en las principales metodologías existentes y en el cálculo elástico. Asimismo, se exponen un conjunto de reflexiones acerca de la bondad del análisis de sensibilidad.

En el capítulo 3 se explican los distintos acercamientos, en términos generales, que existen en la bibliografía sobre el cálculo de sensibilidades para modelos no lineales del material.

El capítulo 4 contiene las aportaciones de otros autores al desarrollo de formulaciones para estudiar la sensibilidad de la respuesta elastoplástica. Después de unas reflexiones críticas, se aborda una nueva formulación de sensibilidad de formas en cálculo elastoplástico con la notación usual en el contexto del análisis por elementos finitos en la ingeniería. A continuación, se prueba dicha formulación en un conjunto de ejemplos y se descubren algunas problemáticas que conlleva el análisis no lineal a solicitación constante.

En el capítulo 5 se desarrolla la formulación para el análisis de sensibilidad de formas en un modelo de daño incorporando la herramienta de cálculo de la longitud de arco, basada en el control de desplazamientos. Se realizan una serie de reflexiones sobre las posibilidades de extrapolación de

cargas últimas y se prueban los algoritmos propuestos en un conjunto de ejemplos de diversa índole.

Después de un breve estado del arte sobre el diseño en ingeniería, se aborda en el capítulo 6 el problema del concepto de diseño asistido. Se realiza una propuesta conceptual para enlazar las posibilidades cuantitativas de un análisis de sensibilidad con la inteligencia artificial de los sistemas expertos. La intención es producir una nueva serie tecnológica de instrumentos de apoyo al diseño que mejoren las prestaciones de los existentes a tres niveles: análisis crítico de resultados, potenciación de la creatividad y aprendizaje heurístico.

Finalmente, en el capítulo 7 se describe la evolución de la programación y su relación con los elementos finitos. Se hace hincapié en los códigos orientados a objeto y se describen las aplicaciones prácticas de desarrollo que se han llevado a cabo en esta tesis.

El capítulo 8 y último contiene las conclusiones del trabajo desarrollado y las nuevas líneas de investigación que se proponen.