

## Capítulo 8:

### CONCLUSIONES

---

La tesis que se ha presentado a lo largo de los capítulos precedentes contiene una diversidad de temas. Algunos de ellos se han tratado con mayor profundidad, como por ejemplo, el análisis de sensibilidad, mientras que otros se han visto más superficialmente, como es el caso de la inteligencia artificial. Sin embargo, del conjunto de disciplinas, conceptos y ejemplos definidos hasta ahora pueden extraerse diferentes conclusiones alrededor de la investigación llevada a cabo. Algunas de ellas, se refieren a conceptos de carácter general, mientras que otras sólo conciernen a aspectos puntuales y particulares de las metodologías utilizadas en el marco de esta tesis.

#### **ACERCA DEL CÁLCULO GENERAL DE LA SENSIBILIDAD**

- Con respecto a los métodos de cálculo presentados en el capítulo 2, se ha optado claramente por el Método de la Diferenciación Directa (DDM) porque es el único que permite la evaluación inmediata de las respuestas estructurales en desplazamientos y tensiones. Por el contrario, el Método de la Variable Adjunta (AVM) se preocupa de obtener, únicamente, la sensibilidad de aquellas funciones de interés definidas en los problemas de optimización. En consecuencia, si se desea conocer la respuesta de sensibilidad de los campos principales del problema estructural, siempre se debe resolver un sistema equivalente al que se consigue con el DDM.
- En términos generales, un análisis lineal representa calcular la estructura a solicitación constante, es decir, exigir el equilibrio del sistema a carga dada y considerar como incógnita del problema el campo de desplazamientos. Por lo tanto, calcular la sensibilidad de la respuesta de la estructura representa hallar las derivadas del campo de desplazamientos con respecto a la variable de diseño. En el capítulo 2 y siguientes se ha visto que en aquellos casos donde no existe una mala definición del problema, la teoría lineal garantiza que siempre se alcanza el estado de equilibrio para cualquier nivel de solicitación dada y, en consecuencia, siempre se puede calcular satisfactoriamente la sensibilidad de los desplazamientos con respecto a cierta variable de diseño.

**ACERCA DEL CÁLCULO DE SENSIBILIDADES EN ELASTOPLASTICIDAD.**

- En este trabajo, se ha desarrollado una nueva formulación del análisis de sensibilidad de formas en problemas con comportamiento elastoplástico del material. Para definir dicha formulación se ha utilizado la notación usual en ingeniería, dentro del contexto del cálculo por elementos finitos. Dichas expresiones se traducen fácilmente a problemas de sensibilidad de parámetros, con sólo simplificar los términos que afectan a las derivadas de las integrales de volumen. Las expresiones deducidas se han implementado y probado en una gran variedad de ejemplos, de los cuales se concluye que:
  1. En general, y salvo las excepciones comentadas en el apéndice 4 de ejemplos, los algoritmos han mostrado su funcionamiento correcto.
  2. Se destaca que, al calcular de forma iterativa la derivada de la deformación plástica, existe una mejora en el resultado de la sensibilidad, frente a los planteamientos de linealización de otros autores.
  3. Se ha comprobado que la matriz consistente con el esquema de integración produce mejores resultados que la no consistente, tal y como proponen los autores de trabajos precedentes.
  
- En los ejemplos probados se observa que si en un análisis con comportamiento no lineal del material la variable de diseño interviene de forma claramente activa en la definición del comportamiento de la estructura, aunque dicha dependencia sea implícita, el cálculo de la sensibilidad a sollicitación constante produce resultados no extrapolables. Por ello, a pesar de que el endurecimiento en elastoplasticidad asegura que casi siempre se va a conseguir un estado de equilibrio para un cierto nivel razonable de sollicitación, la no linealidad implica que los resultados de sensibilidad podrán ser erróneos, porque el análisis no será capaz de considerar el posible cambio de régimen en el comportamiento de la estructura modificada. Como mucho, será posible obtener una estimación de la existencia del cambio de régimen, mediante la substitución de las tensiones extrapoladas en el criterio de fallo, dicha propiedad se puede generalizar a cualquier otro modelo constitutivo.

**ACERCA DEL CÁLCULO DE SENSIBILIDADES EN EL MODELO DE DAÑO**

- Utilizando la notación usual en el contexto de la ingeniería para el análisis por elementos finitos, se han formulado expresiones del análisis de sensibilidad para modelos de daño.
  
- En el caso de un material que se comporta según un modelo constitutivo con ablandamiento sucede que la estructura no puede superar una cierta cota máxima de sollicitación. A partir de dicho estado límite, los sucesivos estados de equilibrio se situarán en la rama de descarga. En este caso, se produce una duplicidad de situaciones anómalas, por un lado va a existir más de

una posición de equilibrio en el sistema a carga dada y, asimismo, sólo van a existir posiciones de equilibrio del sistema para niveles de carga situados por debajo de la carga última. Por consiguiente, si en la estructura modificada la curva de comportamiento presenta un nivel de carga última distinta, será imposible obtener posiciones de equilibrio extrapolando desde la estructura original.

- A través de la utilización del método de longitud de arco se ha formulado, en el capítulo 4, una nueva metodología de carácter general que permite el análisis de sensibilidad tanto en fuerzas como en desplazamientos. Posteriormente se han probado los algoritmos en diversos ejemplos con notable éxito de resultados. En general, el control de desplazamientos asegura que será posible llegar a cualquier posición de equilibrio de la estructura original y, desde ese punto, obtener la sensibilidad de los campos de desplazamientos y de solicitaciones. No obstante, esta metodología no evita que en el punto singular, justo donde se produce un cambio de régimen de comportamiento estructural, siga existiendo una extrapolación imposible para ciertas modificaciones de la variable de diseño. A la vista de todo ello se concluye que de forma conceptual y también práctica, se ha definido una nueva estrategia alternativa basada en el uso de la longitud de arco para calcular las sensibilidades. Ya se demostró que el método basado en la derivación exclusiva del campo de desplazamientos era ineficiente para resolver los problemas con no linealidad del material. Por el contrario, la inclusión de la derivación de las fuerzas externas que solicitan la estructura, a través del parámetro arco, permite solventar las dificultades halladas y obtener valores útiles de la sensibilidad.

#### **ACERCA DE LAS ESTRATEGIAS DE CÁLCULO**

- En términos generales, se recomienda que el cálculo de las sensibilidades de una estructura con un régimen no lineal en el material, lleve asociado un análisis de sensibilidad en el campo de desplazamientos y otro, simultáneo, en el campo de solicitaciones.
- Se ha demostrado que la estrategia tangente no es la única forma de evaluar la sensibilidad en problemas no lineales con materiales cuyo comportamiento depende de la historia de cargas. A nivel general, la definición de las estrategias secante y tangente, para el cálculo de las sensibilidades de un problema con no linealidad del material, es adaptable a cualquier modelo constitutivo que sea capaz de definir una matriz secante o tangente, respectivamente. En particular, en este trabajo se ha utilizado con éxito la estrategia secante para los modelos de daño y la tangente para la plasticidad.
- Hay que destacar que el método secante presenta dos ventajas sobre la metodología tangente:

1. La sensibilidad se puede hallar, única y exclusivamente, en la posición final de equilibrio del sistema. Lógicamente, el ahorro de cálculo es muy grande, porque representa encontrar la sensibilidad con un coste aproximadamente equivalente a otro paso de carga.
2. El método secante no acumula errores, dado que las sensibilidades previas no afectan a las actuales. Por contra, en general, el método tangente necesita de pasos de carga relativamente cortos para asegurar la correcta evaluación de las derivadas.

#### **ACERCA DE LAS DISCRETIZACIONES**

- De la observación de los ejemplos, en problemas con modelos de plasticidad y de daño, se deduce que las mallas finas tienden a reducir las inestabilidades locales del cálculo, de manera que la distribución del error produce curvas más suaves.
- Se ha apreciado que los cuadriláteros de cuatro nodos generan menores errores en el cálculo discreto de la sensibilidad con respecto a los de ocho nodos. Sin embargo, estos últimos tienen la ventaja de simular mucho mejor los problemas físicos de flexión y, por lo tanto, sus resultados son mejores si se comparan con los analíticos supuestamente reales.
- Para ambos modelos de comportamiento, y en términos generales, la sensibilidad en un estado uniaxial de tensiones produce buenos resultados. En cambio, los estados mixtos o de corte son más difíciles de evaluar con precisión. Este efecto es debido a la mayor dificultad numérica que se aprecia en la resolución de la ecuación constitutiva para dichos estados de tensión.

#### **ACERCA DEL ERROR EN LA SENSIBILIDAD**

Uno de los problemas sobre los que se ha insistido a lo largo del trabajo es la estimación del error que se produce en el cálculo del análisis de sensibilidad de la estructura discretizada.

- Un tipo de error que se ha observado a través de los ejemplos es el siguiente: *no coincide el valor real analítico con el valor discreto del análisis por elementos finitos*, como sería en el caso de la paradoja del capítulo 2. A través de los ejemplos se ha observado que existen dos razones que generan el primer tipo de error:
  1. Si la perturbación en la variable de diseño implica un cambio en el régimen de comportamiento de la estructura o define un problema estructural distinto. Entonces, se produce una discrepancia entre el cálculo analítico supuestamente real y el discreto que generan los algoritmos. Este hecho es constatable incluso en el régimen lineal.

2. También se produce una discrepancia, en el mismo sentido, si la ecuación de equilibrio no simula de forma correcta el problema físico asociado, como sucede con los cuadriláteros de 4 nodos y la flexión.
- Los problemas asociados al error definido anteriormente no son importantes y, en general, se pueden solventar con la correcta definición del problema de equilibrio y mallas más finas. Sin embargo, debe notarse que aunque la solución analítica y la numérica no coincidan en la sensibilidad, no quiere decir que la solución numérica no sea correcta en ella misma. Por ejemplo, los valores de sensibilidad en el cuadrilátero de 4 nodos ofrecen una extrapolación casi perfecta en todos los casos. Esta es otra paradoja, el hecho de tener un problema físicamente mal representado y, en cambio, obtener respuestas discretas correctas. Afortunadamente, esto garantiza una cierta fiabilidad de los resultados, en el sentido de que la correcta discretización del problema siempre es responsabilidad del ingeniero, mientras que la responsabilidad del algoritmo es generar buenos resultados conforme a esas hipótesis de funcionamiento.
  - Otro tipo de error que se ha apreciado es el siguiente: *en algunos casos el valor discreto de la sensibilidad es tan malo que no permite extrapolar el comportamiento de otras soluciones discretas*, como sucede en los ejemplos tridimensionales del modelo de daño. La razón de su existencia se justifica en el mal funcionamiento de la ecuación constitutiva. Por lo tanto, sólo se puede solventar mediante la mejora del comportamiento numérico del modelo constitutivo.
  - En este trabajo se ha definido una estrategia alternativa para evaluar la veracidad de los resultados obtenidos en la sensibilidad. La propuesta se basa en una aproximación de primer orden de la respuesta estructural, esto marca una diferencia con los métodos clásicos de comprobación del análisis de sensibilidad existentes hasta ahora. El método presenta las siguientes ventajas:
    1. La bondad de los resultados del análisis se realiza por inspección simple, a través de curvas de tipo cualitativo y cuantitativo, gracias a las cuales se aprecia con facilidad la calidad del valor de las derivadas.
    2. Dicha estrategia se muestra muy correcta cuando la variación de las variables de diseño es pequeña.
  - No obstante el estimador de error propuesto en este trabajo presenta inconvenientes:
    1. No es económico ya que exige un reanálisis de la estructura modificada.
    2. Sólo sirve para confirmar un análisis correcto en el caso de que el error medido sea pequeño. Por el contrario, un error grande no permite afirmar que el cálculo de las

derivadas sea erróneo, porque los términos de orden superior del desarrollo en serie que se ha truncado podrían complementar adecuadamente la magnitud medida.

- En base a las disquisiciones anteriores se concluye que es un estimador que sirve para los propósitos de esta tesis, pero no como metodología general de cálculo a gran escala.
- Se deduce que la aproximación extrapolada depende en gran manera de dos factores:
  1. La naturaleza de la variable de diseño. Es decir, según aquella parte de la estructura que se modifique la aproximación de primer orden será mejor o peor.
  2. El régimen de comportamiento de la estructura. En general, las extrapolaciones durante el régimen no lineal son peores, y en parte es lógico, dado que la aproximación de primer orden es una aproximación lineal para una estructura que se comporta como no lineal. Por lo tanto, en este caso sería necesario efectuar un análisis de orden superior para mejorar la respuesta.

#### **ACERCA DE LA COMBINACIÓN DE LOS SISTEMAS EXPERTOS Y EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

- Una aportación de la tesis, de carácter general, es el conjunto de reflexiones sobre los conceptos y técnicas del diseño asistido en la ingeniería de hoy en día. Partiendo de un análisis crítico de la tecnología utilizada en el diseño actual, se observa que:
  1. El concepto de asistencia se reduce a la mejora de los procedimientos mecánicos de generación de diseños estructurales: rapidez, interactividad, técnicas de visualización, etc.
  2. El buen diseño se asocia principalmente al concepto de óptimo. Esta simplificación conlleva una serie de inconvenientes entre los que cabe citar: la obtención de soluciones ineficientes, una mejora relativa a ciertos conceptos en detrimento de otros y la limitación del desarrollo creativo de soluciones alternativas.
- En consecuencia, se ha realizado una propuesta de mejora de dichos entornos a través de la combinación de los resultados que ofrece el análisis de sensibilidad y las técnicas de la inteligencia artificial. Esto representa incorporar un conjunto de ventajas que eliminan algunos de los puntos críticos citados:
  1. Multiplicidad de prediseños basados en experiencias heurísticas previas.
  2. Análisis crítico de las soluciones como prevención de patologías.
  3. Toma de decisiones basadas en razonamientos cualitativos y cuantitativos.
  4. Aprendizaje inductivo a partir de experiencias simuladas.

- Por consiguiente, se concluye que el sistema de diseño descrito en esta tesis permite el desarrollo creativo de los profesionales, el aprendizaje de conceptos y la mejora en la calidad de los diseños finales.
- Todo este conjunto de elementos marca una gran diferencia con respecto de los sistemas inteligentes desarrollados con anterioridad, los cuales están basados, exclusivamente, en reglas prácticas heurísticas o en conceptos cualitativos puros. Del mismo modo, esta nueva perspectiva del diseño que se ofrece en la tesis dota de madurez al análisis de sensibilidad, confiriéndole una personalidad propia y convirtiéndolo en una entidad independiente que permite la toma de decisiones, el análisis crítico y el aprendizaje. Por lo tanto, el análisis de sensibilidad deja de ser un mero instrumento de los algoritmos de optimización basados en la información de gradientes.

#### **ACERCA DEL ESPACIO ABSTRACTO DE DISEÑO**

- La división de cualquier problema de diseño de estructuras en dos subespacios: común y particular, permite organizar la información heurística y conceptual de forma eficiente.
- El espacio abstracto que se ha definido en este trabajo, así como las reglas de estado, evolución y comparación, proporcionan una estrategia general para combinar, de forma ventajosa, el mecanismo de inferencia de encadenamiento progresivo de los sistemas expertos con la información cuantitativa de un análisis de sensibilidad.

#### **ACERCA DE LA PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETO**

- Se ha partido del entorno FemLab, un código orientado a objeto, para desarrollar las aplicaciones prácticas de la tesis. A tal efecto, se han definido conceptualmente y programado de forma práctica, una estructura lógica y coherente de nuevas clases y variables. Dicha organización permite realizar el cálculo de estructuras por elementos finitos con: longitud de arco, modelos constitutivos no lineales de plasticidad y daño y, finalmente, análisis de sensibilidad.

A través de la generación del código se han constatado algunas cuestiones de tipo cualitativo relacionadas con la programación orientada a objeto y los elementos finitos:

- En general, y es opinión compartida por otros autores, el funcionamiento de los elementos finitos se adapta correctamente a un código orientado a objeto. Sin embargo, en este trabajo, se desea destacar que sólo se obtendrá el máximo rendimiento de los sistemas orientados a objetos si se combinan adecuadamente con partes de código secuencial, debido a la filosofía implícita

que conllevan los elementos finitos. En este contexto, C++ representa, hoy por hoy, el mejor lenguaje de desarrollo.

- En el desarrollo de programas de código orientado a objeto, el tiempo que utiliza el programador en organizar la información y su tratamiento es mucho mayor que en los programas escritos en lenguajes de tipo secuencial. Esto se debe a que la orientación a objeto exige más rigor al programador. No obstante, no se debe considerar esta cuestión como un inconveniente porque los programas escritos bajo esta filosofía no necesitan tanto tiempo de verificación, de manera que el tiempo total de desarrollo puede considerarse equivalente.
- Un inconveniente de la orientación a objeto es la inflexibilidad que presenta para modificar la estructura lógica de código existente. Sin embargo, facilita en general, y en particular a través de la herencia, la generación de nuevas entidades lógicas y coherentes.
- Finalmente, se concluye que las posibilidades de expansión de los sistemas de código orientado a objeto son mucho mayores que en los programas escritos en lenguaje secuencial.

### **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA**

El trabajo desarrollado abre nuevas perspectivas de investigación en disciplinas distintas. Algunos de los temas no están todavía cerrados, como el análisis de sensibilidad, pero otros están por explorar, como el uso de inteligencia artificial en la ingeniería. En consecuencia, se plantean trabajos de desarrollo a dos niveles: medio y largo plazo.

A medio plazo se propone alcanzar nuevos objetivos en el contexto del análisis de sensibilidad:

- La inclusión de modelos de plasticidad con endurecimiento no lineal y el estudio de la importancia del paso de carga en la convergencia del análisis de sensibilidad.
- El aprovechamiento de la estrategia del cálculo de sensibilidad con longitud de arco para obtener el análisis de sensibilidad en un modelo constitutivo de plasticidad donde se incluya ablandamiento.

Con respecto al uso de la inteligencia artificial en la ingeniería de diseño, se plantea:

- La implementación de la estructura de objetos y la conceptualización abstracta presentadas en este trabajo para tratar el diseño de estructuras.
- El desarrollo del mecanismo de inferencia que trabaje con las reglas lógicas y los datos suministrados por el análisis de sensibilidad.

Asimismo, se propone a nivel constitutivo:

- La mejora de la formulación del modelo de daño para permitir un análisis de fisuración en tres dimensiones.

A más largo plazo se plantea:

- Mezclar las teoría de daño y plasticidad para simular de forma más adecuada el comportamiento real de los materiales y calcular la sensibilidad como una combinación de estrategias tangente y secante.
- Desarrollar un estimador del error que se comete en el cálculo de la sensibilidad, al mismo tiempo que se hace el análisis con elementos finitos. De esta manera se evitaría la comprobación a través de los costosos reanálisis con estructuras modificadas o perturbadas. En consecuencia, se podrían desacoplar los cálculos realizados con la malla de sensibilidad de los obtenidos del análisis y remallar adaptablemente, en cada caso, según los estimadores de error correspondientes.
- Desarrollar mecanismos de autotrendizaje automatizados en el sistema, de manera que las reglas nuevas se generen en el propio programa.
- Dado que se ha descrito la estrategia de obtener la sensibilidad mediante la longitud de arco, se plantea su extensión a los problemas de no linealidad geométrica. El objetivo en estos casos sería realizar estudios de sensibilidad de la carga límite en problemas con cambios de forma importantes.
- También sería deseable poder obtener la sensibilidad en problemas dinámicos.