

LAS HERRAMIENTAS NUMÉRICAS Y LA PRÁCTICA PROFESIONAL EN INGENIERÍA CIVIL

BENJAMÍN SUÁREZ ARROYO. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

EUGENIO OÑATE IBÁÑEZ DE NAVARRA. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. UPC

RAMÓN RIBÓ RODRÍGUEZ. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Compass Ingeniería y Sistemas S.A.

RESUMEN: Se presentan en este artículo unas reflexiones sobre los métodos numéricos, su evolución y la problemática que plantea su aplicación a problemas de ingeniería real, es decir en la práctica profesional del ingeniero. Se hacen unas precisiones sobre las herramientas numéricas que los generalizan y que posibilitan su uso en la práctica profesional con unas recomendaciones de buena práctica. Por último se analizan los límites y las perspectivas futuras de los métodos numéricos.

PALABRAS CLAVE: MÉTODOS NUMÉRICOS, INGENIERÍA, EJERCICIO PROFESIONAL

ABSTRACT: This paper presents some thoughts about the evolution of numerical methods and the difficulties posed by their applications to solve real problems of everyday's engineering. Some remarks on the mathematical and computational tools needed for the practical use of numerical methods are given, together with some best practice rules. Finally the limits and perspectives of numerical methods are discussed.

KEYWORDS: NUMERICAL METHODS, ENGINEERING, PRACTICE RULES

1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Civil juega un papel de primera magnitud en el desarrollo económico y social de los países y contribuye de manera fundamental al incremento de la calidad de vida de sus ciudadanos. Y esto es así porque la Ingeniería Civil posibilita la actividad humana en el sentido más amplio, permitiendo que se generen las relaciones más básicas de la vida colectiva: la ciudad con sus infraestructuras y servicios, las vías de comunicación como ejes de relación y de actividad económica, el control y aprovechamiento de los recursos naturales más básicos, etc..

La Ingeniería Civil se enfrenta con la naturaleza, la aprovecha, la utiliza y la modifica. Su entorno de trabajo es la tierra (montañas y valles) y el agua (ríos y mares) y actúa sobre él con unas herramientas y unos materiales que generalmente obtiene de forma casi natural del mismo entorno.

Para el desarrollo de su actividad el ingeniero civil siempre ha utilizado herramientas y modelos físicos y matemáticos que le permiten acotar con suficiente aproximación, una respuesta concreta necesaria para actuar sobre la realidad

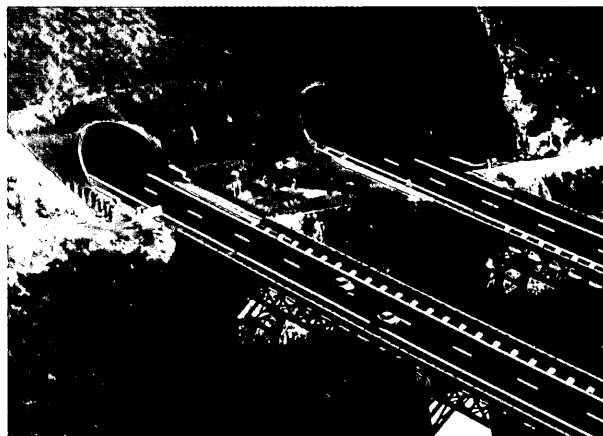


Figura 1. La ingeniería civil y la naturaleza.

con que se enfrenta con criterios ingenieriles. Cuantificar es una condición necesaria para conseguir los objetivos deseados con la seguridad requerida.

Por ello la construcción y la ciencia han estado siempre muy ligadas, de forma que tanto el ingeniero militar, como

su descendiente directo el ingeniero civil, han tenido históricamente una significativa *competencia* científica. Figuras clásicas de primera línea en muchas ramas de la ciencia como, Cauchy, matemático, Gay-Lussac, químico o Coriolis, físico, eran ingenieros civiles. Pero la metodología científica ha sufrido una transformación profunda con la aparición y desarrollo del ordenador. La modelización matemática de los problemas físicos es, en general, muy compleja y el ordenador es una herramienta idónea para dar respuesta a los planteamientos formales que surgen de la modelización. Por ese motivo, los progresos espectaculares de los últimos cuarenta años en todos los campos de la ciencia y la tecnología han ido de la mano de los avances de los métodos de cálculo o métodos numéricos, destinados a extraer respuestas en forma de números de las ecuaciones diferenciales que gobiernan los problemas de la naturaleza y que fueron decididas por los matemáticos a lo largo de los últimos cuatro siglos.

2. EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS

La concepción numerológica del universo iniciada por la escuela de Pitágoras quinientos años antes del nacimiento de Cristo, evolucionó durante dos mil trescientos años hasta el descubrimiento del cálculo infinitesimal por Newton y Leibnitz que permitió expresar las leyes de la naturaleza en forma de ecuaciones diferenciales. El optimismo que los primeros éxitos del cálculo infinitesimal infundió a la comunidad científica se vio matizado en posteriores aplicaciones por una desagradable evidencia: si bien todo problema podía plantearse en forma matemática por medio de ecuaciones diferenciales, su solución sólo era posible en algunos casos particulares que en la mayoría de ocasiones no eran más que groseras simplificaciones de la realidad.

Hoy en día, casi trescientos años después, se ha ido produciendo el retorno de los números que pasan a ser otra vez los protagonistas de la historia. Este regreso ha sido posible gracias a las soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales, es decir a poder determinar los valores concretos de las variables que gobiernan las ecuaciones matemáticas de un problema de física o de ingeniería. El bucle iniciado por Pitágoras en su escuela numerológica de la isla de Crotona hace 2.500 años, se ha cerrado en las últimas décadas con la evidencia de que sólo con ayuda de los métodos numéricos podemos obtener respuestas concretas a los enigmas de la naturaleza ⁽¹⁾⁽²⁾.

La estrategia común de todos los métodos numéricos es la transformación de las ecuaciones diferenciales que gobiernan un problema físico, en un sistema de ecuaciones algebraicas con un número finito de variables que son las nuevas incógnitas del problema. Dicho sistema de ecuaciones puede resolverse por medio de técnicas algebraicas. No

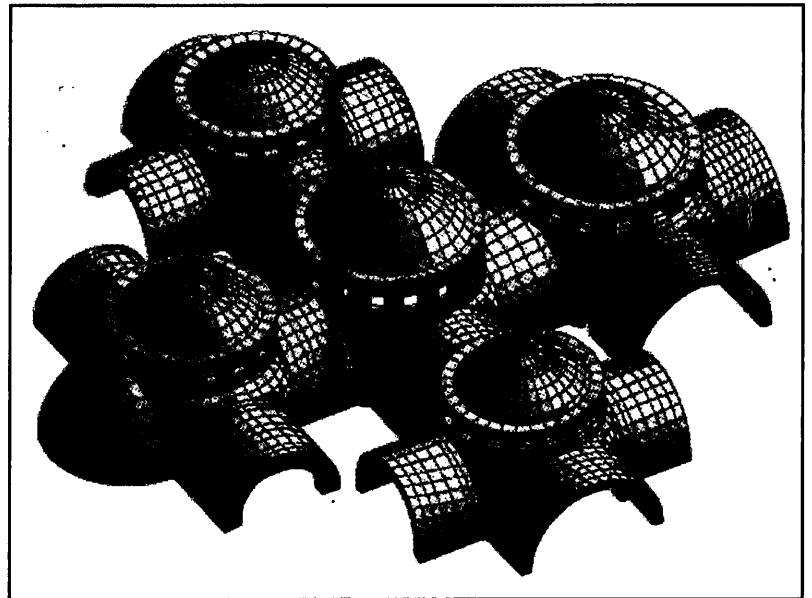


Figura 2. Discretización con elementos finitos de la Basílica de San Marcos en Venecia.⁽¹⁰⁾

obstante, puesto que el número de incógnitas resultantes del proceso es en la mayoría de los casos de muchos miles (e incluso millones), el sistema de ecuaciones final sólo puede resolverse con la ayuda del ordenador. Esto explica por qué, aunque muchas de las técnicas numéricas ya eran conocidas desde el siglo XIX, su gran desarrollo y popularidad ha tenido lugar en paralelo con el de los modernos ordenadores desde mediados del siglo XX.

La diferencia entre los distintos métodos numéricos estriba fundamentalmente en la técnica de discretización utilizada para transformar un problema matemático de naturaleza *continua*, en otro *discreto* (de ahí la palabra discretización) dependiente de un número finito de incógnitas.

En el *método de diferencias finitas* (MDF) probablemente el decano de los métodos numéricos, la técnica empleada es dividir el dominio de análisis en una retícula, preferiblemente regular. Las incógnitas del problema son los valores de cada variable (la temperatura, el desplazamiento, etc.) en cada nudo de la retícula. Estableciendo que las ecuaciones diferenciales de gobierno se cumplen en cada nudo y expresando cada derivada en el nudo por las diferencias entre las incógnitas en nudos adyacentes, se obtiene de forma metódica el sistema de ecuaciones algebraico buscado ⁽³⁾. La precisión del MDF depende fundamentalmente de la densidad de la retícula y de la fórmula de diferencias utilizada para calcular las derivadas en cada nudo. El MDF se popularizó en la década de 1950 y permitió resolver una gran variedad de problemas, p.e. el análisis de sólidos elásticos, la transmisión del calor y la dinámica de fluidos, siendo todavía hoy muy utilizado en este último campo.

Un método numérico que goza de gran popularidad hoy en día es el método de elementos finitos (MEF). La técnica de discretización del MEF es la división del dominio de aná-

lisis en una malla, regular o irregular, compuesta por formas geométricas sencillas, triángulos o cuadriláteros en dos dimensiones y tetraedros ó hexaedros en tres. Dentro de cada elemento se expresa la variación de las incógnitas en forma polinómica en función de sus valores en puntos (nodos) situados en los contornos y en el interior del elemento. El cumplimiento de las ecuaciones diferenciales de gobierno se impone de forma media (o integral) sobre cada elemento. El resultado del proceso de discretización del MEF es, de nuevo, un sistema de ecuaciones algebraicas cuyas incógnitas son los valores nodales. El MEF se utiliza hoy en día con profusión para resolver los problemas de ingeniería civil más complejos en los ámbitos de la ingeniería estructural, la geomecánica, la dinámica de fluidos, etc.^{[4] [6]}

En el método de elementos de contorno (MEC), las ecuaciones matemáticas del problema se simplifican de manera que sólo intervienen expresiones sobre los contornos del dominio de análisis. Ello permite realizar una discretización únicamente sobre dichos contornos. El MEC permite así un ahorro de cálculo substancial en problemas donde la simplificación anterior es posible o sencilla, p.e. problemas con propiedades lineales gobernados por la ecuación de Laplace (transmisión del calor, flujo en medio poroso, electromagnetismo, etc.), análisis de sólidos y estructuras^[7]. Pese a sus innegables ventajas en algunos casos, el MEC no es hoy día tan utilizado como el MEF en la solución de problemas industriales.

Para concluir esta breve reseña es necesario mencionar el reciente auge de métodos que utilizan únicamente un número finito de puntos. Estos métodos, adjetivados comúnmente como *sin malla*, de *partículas* o de *puntos finitos* (MPF), tienen la ventaja de no necesitar de la construcción de una malla sobre el dominio de análisis; basta con rellenar su interior con un gran número de puntos a los que se asocian los valores de las incógnitas del problema. El conjunto de puntos próximo a un punto concreto se denomina *nube*. La variación de cada incógnita en el interior de una nube se expresa utilizando técnicas de mínimos cuadrados. El cumplimiento de las ecuaciones diferenciales de gobierno se impone sobre cada nube (en forma integral), o bien directamente en cada uno de los puntos que discretizan el dominio. En ambos casos se llega al sistema de ecuaciones algebraico buscado, cuya solución conduce a los valores de las incógnitas en cada punto.^{[8] [9]}

Los avances más recientes de los métodos numéricos para resolver problemas progresivamente más complejos se centran en el desarrollo de nuevas técnicas numéricas basadas en combinaciones de los diferentes métodos descritos; en nuevas técnicas del álgebra

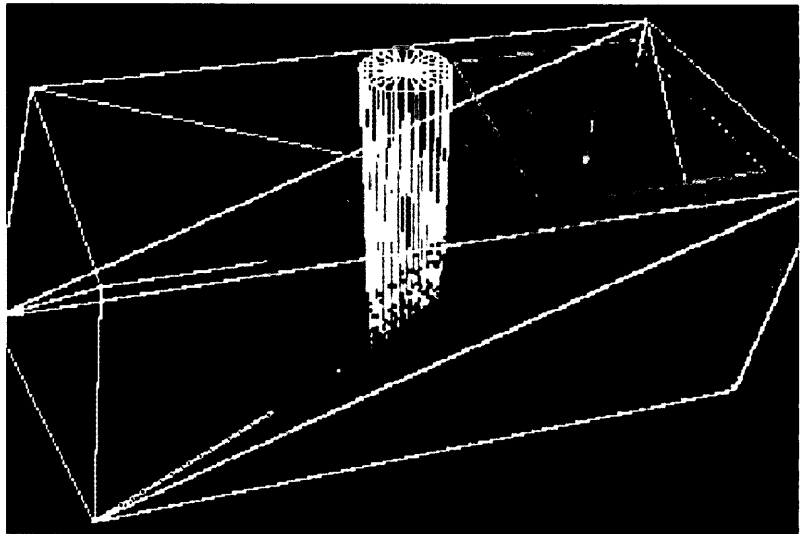


Figura 3. Métodos sin malla: impacto del oleaje en un poste vertical. (13)

matricial para resolver de forma más eficiente los grandes sistemas de ecuaciones algebraicas resultantes; en la caracterización de nuevos materiales con óptimas relaciones entre resistencia y peso y en la disponibilidad de ordenadores con crecientes recursos de memoria y capacidad de cálculo en paralelo.

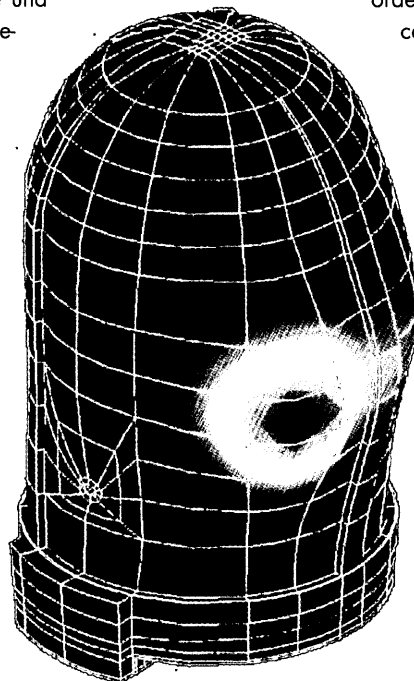
Los temas anteriores deben considerarse conjuntamente ya que es impensable desarrollar un método que resuelva un nuevo problema, sin tener en cuenta todos los ingredientes mencionados. Cualquier nuevo método numérico tiene que plantearse teniendo en cuenta la plataforma informática en la que se implementará pensando en problemas de gran tamaño. Asimismo, es impensable hoy en día un programa de ordenador que no pueda incorporar, los continuos avances que se están llevando a cabo en la modelización de los materiales.^[13]

Sólo desde la perspectiva de una estrecha cooperación entre el conocimiento profundo de las bases físicas y matemáticas de cada problema, los métodos numéricos y la informática, podrán encontrarse soluciones efectivas a los crecientes problemas que la ingeniería civil se plantea en los momentos actuales.

3. INCORPORACIÓN DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS A LA PRÁCTICA PROFESIONAL

El papel que juega la ingeniería civil en el desarrollo económico y social se manifiesta por medio de la práctica profesional de los ingenieros. Esta actividad profesional debe contemplar sin duda los procesos de la ingeniería de forma global, con sus facetas sociales, ambientales, técnicas y económicas. Por ello en la práctica profe-

Figura 4. Análisis por el MEF del agotamiento de una estructura de contención nuclear. (14)



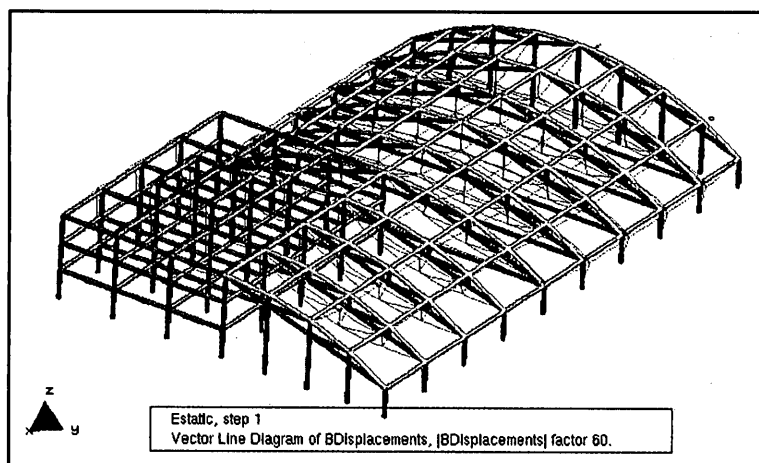


Figura 5. Análisis de una nave industrial por métodos matriciales. (17)

sional cuantificar no es más que un medio para alcanzar una verdad, fundamentada con rigor y con la suficiente precisión para tomar las decisiones correctas, pese a que el conocimiento exacto de la verdad sea generalmente imposible.

El ingeniero de estructuras y militar Luigi F. Menabrea decía en 1884: ¡Cuántas observaciones preciosas son inútiles para los progresos de las ciencias y las técnicas, porque no hay fuerzas suficientes para calcular los resultados de las mismas! ¡Cuántos desánimos no infunde la perspectiva de un largo y árido cálculo en el hombre de genio, que sólo pide tiempo para meditar y se ve privado de él por el volumen de las operaciones de un sistema inadaptado! Y, sin embargo, debe llegar a la verdad por la vía laboriosa del análisis, pero él no puede seguirla sin guiarse por los números, ya que, sin los números, no existe la posibilidad de levantar el velo que oculta los misterios de la naturaleza.

Los métodos numéricos nacen y se desarrollan precisamente para dar respuesta a reflexiones de este tipo. Proporcionan al ingeniero los medios para cuantificar la solución de un problema proporcionándole tiempo y libertad para meditar sobre la bondad de la solución en relación con la realidad que trata de analizar.

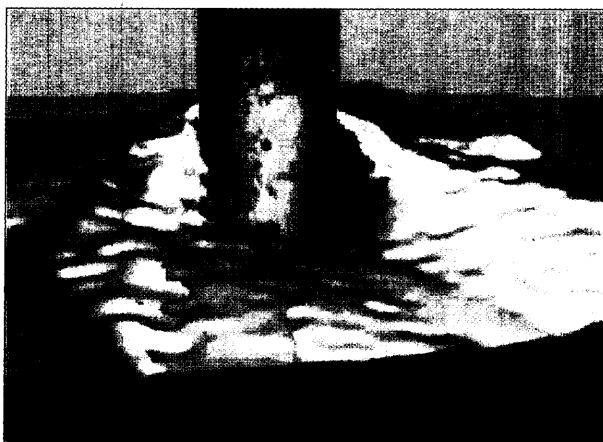


Figura 6. Hidrodinámica: flujo en la base de un pilar. (18)

Los métodos numéricos evolucionan y son cada día más sofisticados y complejos y proporcionan al ingeniero diferentes alternativas para aproximar la realidad con grados de precisión diferentes. La selección del método numérico a utilizar no es una cuestión baladí. Depende de muchos factores especialmente de la realidad que se trata de aproximar y del grado de precisión estimado como necesario pero también de los medios disponibles y de las experiencias y conocimientos del ingeniero.

La sensatez y la prudencia son necesarias siempre que se trata de obtener una respuesta de tipo cuantitativo en un problema de ingeniería. Pese a ello, no se debe renunciar a plantear una solución haciendo uso de los métodos numéricos necesarios.

4. REQUERIMIENTOS Y FUNCIONALIDADES: LAS HERRAMIENTAS NUMÉRICAS

El primer paso en la solución numérica de un problema es establecer un *modelo matemático* de la realidad considerada. El método numérico resuelve el modelo matemático a través de los siguientes pasos:

- La primera etapa es la representación geométrica de la realidad y la discretización de la geometría resultante de acuerdo con el método numérico escogido (MEF, MDF, etc.). Esta etapa se denomina preproceso y suele ser muy costosa en recursos humanos. (16)
- En la etapa de proceso o de cálculo se resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas resultantes de la discretización realizada.
- Los números que resultan del cálculo, expresados por medio de gráficos por ordenador, representan la visión que de la realidad proporciona el modelo matemático a través del método numérico elegido (postproceso). (16)

En la figura 7 se muestra en primer plano el modelo geométrico, líneas, superficies y volúmenes, de una presa bóveda con el terreno que la circunda. La discretización del modelo geométrico mediante el MEF permite obtener una solución en forma de números que expresan el comportamiento estructural de la presa.

Obviamente, la solución numérica solo coincidirá con la realidad si: a) el modelo matemático incorpora todos los aspectos físicos del problema real; b) el modelo numérico incorpora todos los aspectos geométricos del problema real y c) el método numérico puede resolver exactamente las ecuaciones del modelo matemático. En la práctica, ninguna de estas tres condiciones se cumple y por lo tanto hay que admitir que los métodos numéricos sólo proporcionan una predicción del comportamiento real del problema. Se dice entonces que la solución numérica *aproxima* la realidad.

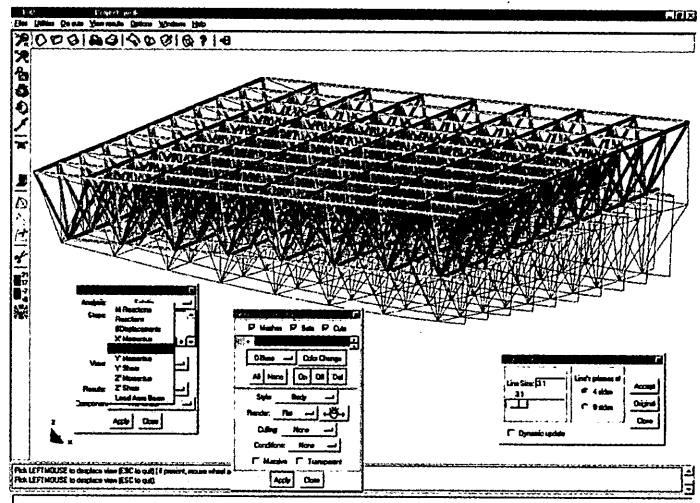
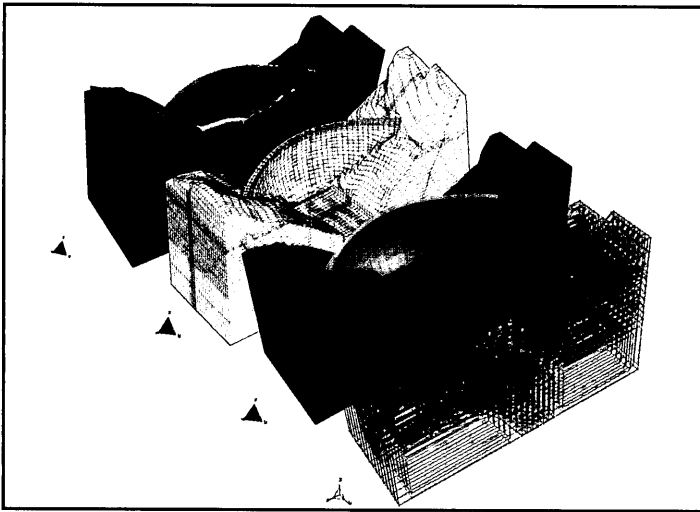


Figura 7. Fases en el análisis de una presa por el MEF. A la derecha, figura 8. La herramienta numérica: Gestión integrada de datos y de resultados (GID).⁽¹⁴⁾

La integración de los tres pasos anteriores, pre, proceso y postproceso en una aplicación informática constituye lo que normalmente se denomina herramienta numérica.

Una herramienta numérica debe proporcionar al ingeniero facilidades para la construcción del modelo numérico. La cuestión no es trivial y existen muchos programas comerciales que posibilitan esta tarea. El entorno de trabajo debe plantearse bajo la perspectiva del usuario y no sobre los desafíos técnico-matemáticos que acompañan a la modelización. Es inevitable un aprendizaje, una cierta experiencia y criterio para ejecutar esta fase con éxito. Por ello la propia herramienta debe llevar incorporados elementos que posibiliten y faciliten su uso y una interacción eficiente entre el usuario y el ordenador por medio de ven-

tanas y cuadros de diálogo que permitan definir los datos de forma sencilla y lógica.

El modelo numérico debe ser lo suficientemente flexible para que pueda implementarse con facilidad en un programa de cálculo. La alternativa usual es hacer uso de programas de cálculo comerciales sobre los que el usuario tiene escasas posibilidades de modificar sus prestaciones. No obstante si se dispone de un sistema de pre y post proceso suficientemente versátil y adaptable, el ingeniero puede personalizar nuevos entornos de cálculo, mediante el ensamblaje de programas propios cuyas prestaciones conoce y le merecen mayor confianza.

El proceso de cálculo debe resolver con eficacia las ecuaciones resultantes del método numérico.

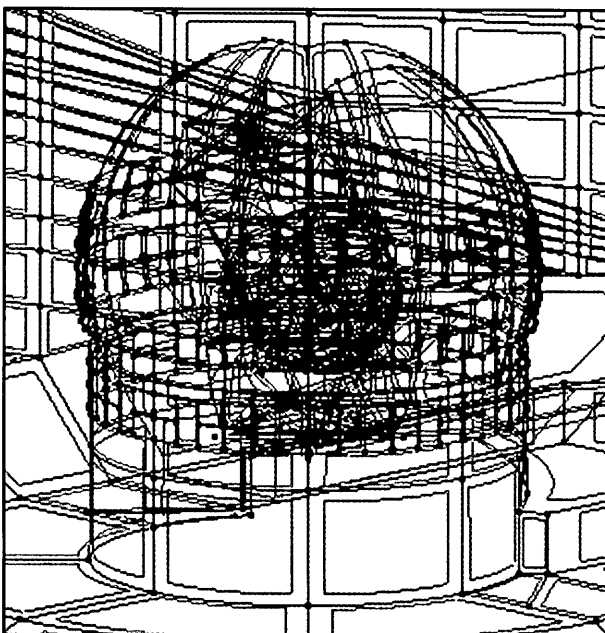


Figura 9. Modelado geométrico del edificio y del entorno del Gran Telescopio de Canarias.⁽¹¹⁾

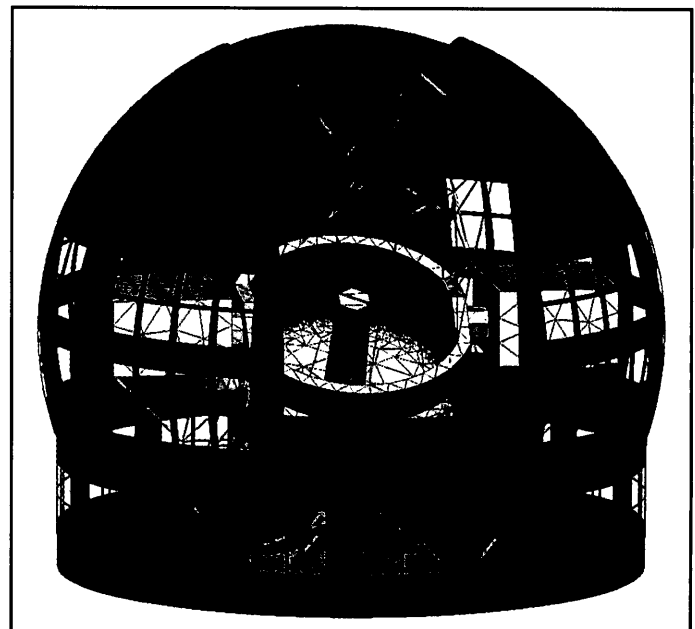


Figura 10. Discretización por el MEF del edificio del Gran Telescopio de Canarias.⁽¹¹⁾

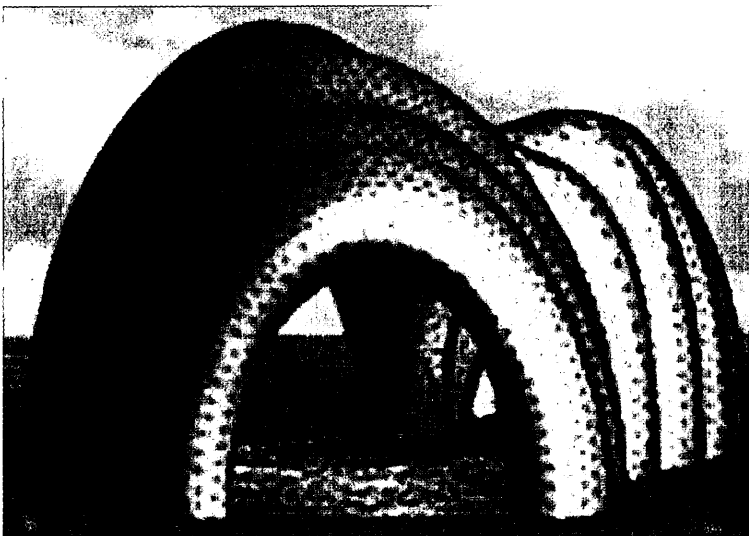


Figura 11. Análisis aerodinámico del edificio del Gran Telescopio de Canarias.⁽¹¹⁾

Desde el punto de vista del usuario, el proceso de cálculo constituye una caja negra que sólo puede valorar en función de la calidad de los resultados que le proporciona, de los requerimientos informáticos que le demanda y del tiempo de ejecución necesario. Por ello el método numérico óptimo será el que proporcione una respuesta de calidad aceptable con los mínimos recursos computacionales posibles. El desarrollo actual de los ordenadores personales permite al ingeniero enfrentarse con problemas de una envergadura considerable con costes razonables.

Figura 12. Modelo numérico de una estructura hinchable.⁽¹²⁾

Por último la herramienta numérica debe permitir representar los resultados obtenidos en el análisis, de una forma compacta pero que permita una fácil interpretación de los



mismos configurando una transición eficaz con el trabajo de diseño del ingeniero. La herramienta numérica debe facilitar la toma de decisiones evitando manipulaciones complejas de los resultados que exijan al usuario un nivel de especialización considerable (un mínimo es inevitable).

En este contexto debe ser capaz de representar global y parcialmente los valores de las variables más significativas del problema analizado: desplazamientos, tensiones, esfuerzos, velocidades, temperaturas, daño, etc.. Debe disponer de facilidades para ampliaciones, traslaciones y giros, de visualización numérica de valores específicos, de cortes, facilidades para archivar imágenes, etc.; todo ello de una manera amigable y por tanto de fácil uso pero no exenta del rigor matemático necesario.

Los desarrollos asociados a una herramienta numérica que satisfaga los condicionantes expuestos anteriormente sólo son posibles cuando existe una estrecha colaboración entre la Universidad, centros de investigación especializados y empresas del sector de forma que se contemplen no sólo el rigor matemático y numérico necesario sino también se satisfagan los requerimientos más profesionales del potencial usuario.

5. REGLAS DE BUENA PRÁCTICA EN EL USO DE LAS HERRAMIENTAS NUMÉRICAS

¿Qué hace veraz una solución numérica? ¿Por qué nos hemos de creer los valores numéricos obtenidos a través del ordenador? ¿Qué hace que sea buena o mala? ¿Qué confiere a una solución numérica su utilidad?

Los pocos problemas físicos para los que los modelos matemáticos tienen soluciones exactas sirven para, por comparación, calibrar un método numérico. En el resto de situaciones, la visión numérica de la realidad es siempre aproximada, siendo la única referencia posible las validaciones empíricas de los resultados numéricos, utilizando valores experimentales obtenidos en pruebas de laboratorio o de campo muy concretas. Si los modelos numéricos reproducen con suficiente aproximación una realidad contrastada, deberemos de suponer que son capaces de predecir el comportamiento de un problema más complejo cuya solución real es desconocida.

No obstante en la mayoría de los casos el autor de un método numérico primero y el ingeniero que lo aplica después, están finalmente solos frente a los números resultantes del cálculo. Es en ese momento cuando toda la experiencia acumulada, no sólo en la calibración y validación del modelo matemático y del método numérico escogidos, sino también en la práctica ingenieril, deben utilizarse para aceptar o no los números que proporciona el cálculo.

Por ello es aconsejable una precaución inicial: *poner la solución numérica obtenida siempre bajo sospecha*. Esto no quiere decir que sea mala, sino que precisa de una interpretación crítica con criterios físicos y experiencias prácticas para

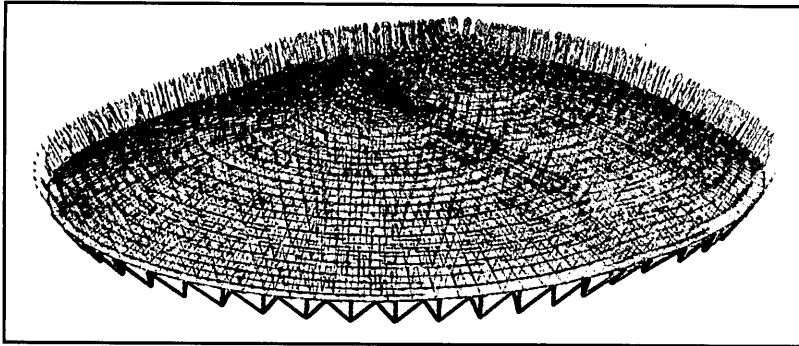


Figura 13. Visualización de los ejes locales en láminas.^[17]

sancionarla. Un método de cálculo no tiene sentimientos, la interpretación de los resultados del cálculo sí debe tenerlos.

En cualquier caso existen ciertas normas de buena práctica que es necesario tener en cuenta durante la aplicación de un método numérico.

a) En relación con el modelo matemático

La falta de adecuación o carencias de un modelo matemático con relación a un problema físico no se puede compensar con un método numérico, incluso aunque sea brillante y sofisticado. Los resultados obtenidos tendrán carencias más o menos significativas e incluso pueden llegar a ser inútiles. Por ello cualquier herramienta numérica debe tener perfectamente documentados los modelos matemáticos de partida y el ingeniero usuario debe conocerlos con la profundidad suficiente para valorar su relación con el problema físico que trata de analizar.

En este contexto podemos hacernos la pregunta ¿vale más usar una modelización matemática incompleta que nada? Dificil cuestión que depende sustancialmente de la relevancia de las carencias que presenta el modelo matemático. Cualquier solución numérica obtenida bajo ese prisma debe siempre analizarse con especial atención y meticulosidad.

b) En relación con el método numérico

Un método numérico resuelve un modelo matemático de forma aproximada. La calidad de un método numérico viene dada por la eficiencia de las técnicas numéricas utilizadas, las estrategias computacionales que las desarrollan y el sistema informático en el que se implementan.

En todo el proceso el ingeniero usuario sólo tiene protagonismo, intenso y decisivo, al definir los datos del análisis: geometría, caracterización de los materiales, condiciones de contorno, acciones exteriores y discretización. La herramienta numérica debe proporcionarle un entorno amigable para generar esos datos de la forma más automática posible.

La calidad del modelo discreto (rejilla, elementos, contornos o puntos) es decisiva y determinante para encontrar una solución lo más aproximada posible. El orden de la aproxima-

ción inherente a la técnica numérica usada, la intensidad de la discretización, el tratamiento de zonas singulares, los procesos iterativos con tolerancias e incrementos de carga, los parámetros que caracterizan los materiales, etc. son elementos de partida que afectan a la solución numérica de un problema.

La herramienta numérica debe disponer de facilidades que permitan detectar antes o durante el proceso, los errores asociados con la preparación de los datos de cálculo.

En las figuras 13 y 14 se muestran algunos ejemplos de comprobación automática que no se pueden generalizar ya que cada tipo de problema o cada método numérico, precisa de los suyos específicos. En cualquier caso estas facilidades deben estar debidamente documentadas en la herramienta numérica.

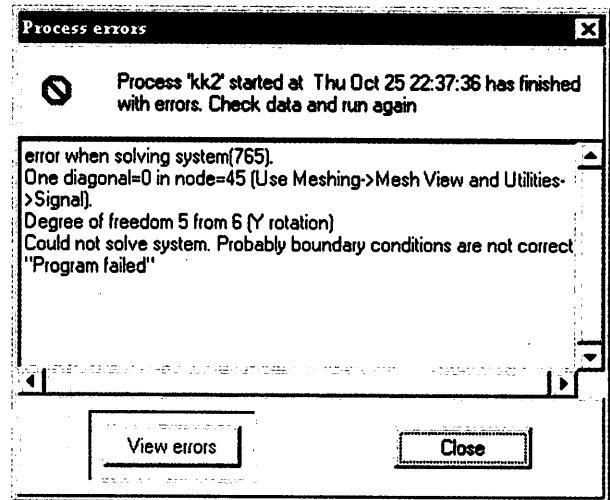


Figura 14. Información automática sobre errores en el cálculo.

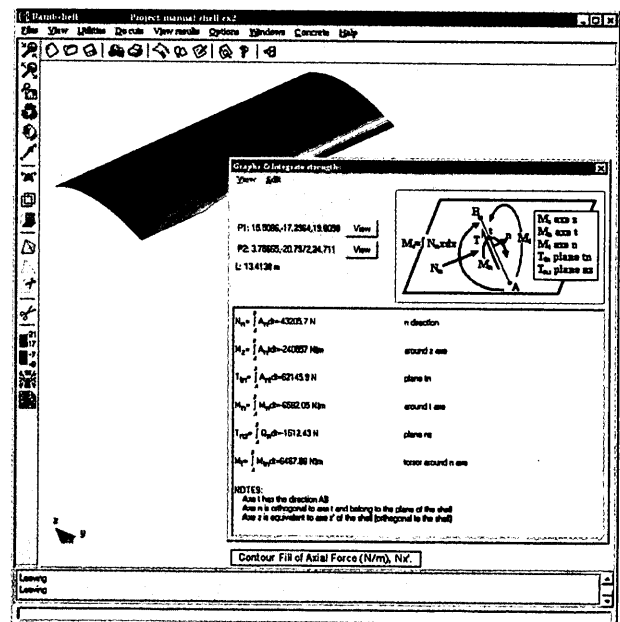


Figura 15. Facilidades para determinar esfuerzos de diseño en secciones de cálculo.

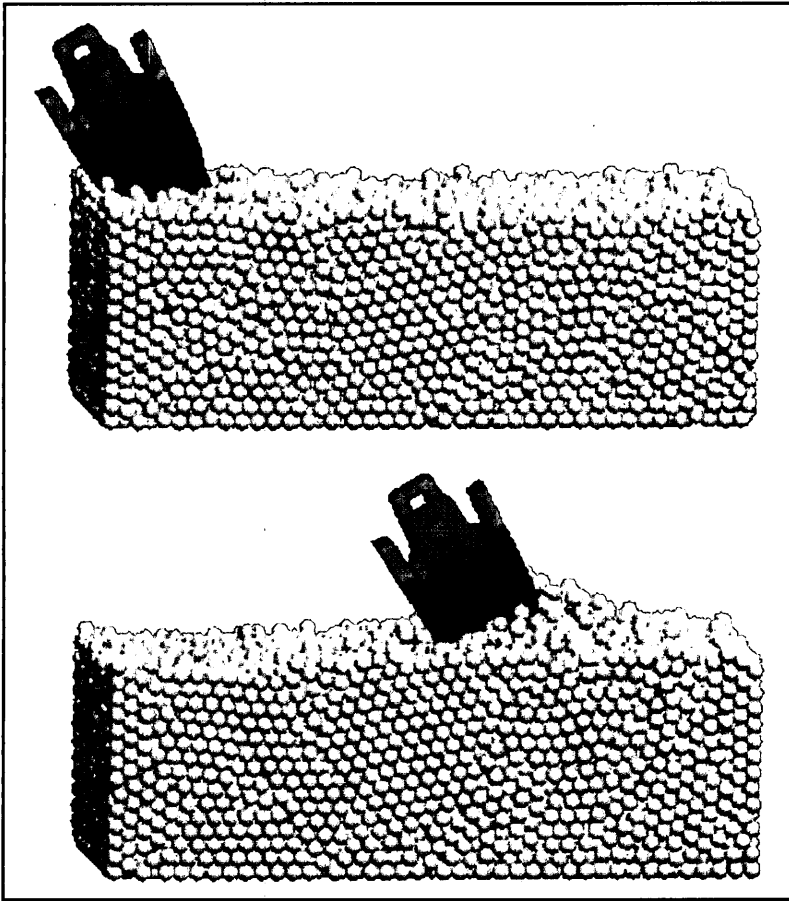


Figura 16. Avance de un diente de una excavadora en un medio granular.^[9]

c) En relación con la presentación de los resultados

En ingeniería la solución numérica no es más que un paso para tomar decisiones sobre el problema planteado. Por lo tanto el pos procesador debe adecuar los números que proporciona el cálculo a la respuesta que demanda la solución ingenieril del problema analizado.

En este contexto debe tenerse en cuenta que el proceso de presentación gráfica del cálculo al usuario no es neutro ya que muchas veces es necesario realizar manipulaciones de los números para posibilitar una representación gráfica consistente. Con un modelo discreto se obtiene una solución discreta que se transforma en continua para su visualización (p.e. mediante alisados). Dependiendo de las técnicas utilizadas se puede enmascarar la solución especialmente en las zonas más críticas.

6. LÍMITES Y PERSPECTIVAS DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS

¿Es posible describir con la ayuda de las matemáticas y los métodos numéricos todos los aspectos de la ingeniería civil? En realidad, los límites de los métodos numéricos, es decir, los límites de poder expresar en forma numérica cualquier

problema del universo, están íntimamente ligados a la posibilidad de plantear, de formalizar dicho problema en forma matemática. Ante esta situación, surge inmediatamente la pregunta: ¿Es posible matematizarlo todo? ¿Habría algo en el mundo que no pueda jamás llegar a ser descrito en lenguaje matemático? Como afirman P.J. Davies y R. Hersh, no parece que haya en el mundo físico nada no matematizable.^[11]

El límite de lo claramente matematizable parece que coincide con el límite del mundo físico. ¿Qué otro mundo hay? Si nuestras convicciones son las de un materialista mecanicista puro, probablemente contestaremos que ninguno.

No obstante, es evidente que existen cosas tales como emociones, creencias, actitudes, sueños, intenciones, celos, envidias, ansias, pesares, sentimientos como la ira y la compasión y muchos otros. Estas cosas, que componen el mundo interior de la mente humana, y, más aún todavía, todas aquellas que abarcan la vida interior de la sociedad, de la civilización misma, la literatura, la música, la política o las mareas y corrientes de la historia. ¿Podrán ser matematizadas?

La respuesta no es sencilla, ni banal. A lo largo de la historia encontramos defensores de la creencia de que todo es matematizable, y por tanto numeralizable, y de lo contrario.

Tomando partido, podríamos afirmar que pueden describirse con modelos matemáticos todas las facetas del mundo que puedan encuadrarse mediante enunciados concretos. Naturalmente, si dicho enunciado es esencialmente de tipo humanista, la dificultad de establecer el modelo será mucho mayor.

Tomemos, por ejemplo, el sentimiento de bienestar. En este caso, un experimentalista podría afirmar que el bienestar es una mera función de los niveles hormonales y de azúcar en la sangre, con lo que se entrevé de nuevo la posibilidad de encontrar un modelo matemático/numérico para representar el bienestar. Un viejo conflicto entre científicos y humanistas proviene de que estos últimos sienten que debería existir una porción del mundo inmune a la matematización, mientras que los científicos son del sentir contrario, es decir, todo aspecto del mundo admite una descripción matemática y por consiguiente numérica. De nuevo, reaparece la vieja aspiración de Pitágoras y Platón, que va ganando adeptos a medida que se producen nuevos éxitos en la matematización del mundo.^[12]

Las bases de la ingeniería civil son profundamente matemáticas. Los modelos matemáticos y numéricos son, en esa disciplina, herramientas de uso cotidiano. Más aún, para que una nueva teoría sea considerada como científica, y por tanto aceptada, es casi condición necesaria que sea expresable en lenguaje matemático, y es casi seguro que si las matemáticas disponibles son inadecuadas para describir ciertos fenómenos observados, será posible idear y desarrollar las adecuadas.

Con independencia del problema que se resuelva, es importante recordar que el fin último de los métodos numéricos es proporcionar comprensión, no números. En suma, los métodos numéricos deben estar íntimamente ligados tanto a la fuente del problema, como al uso que se pretenda hacer de

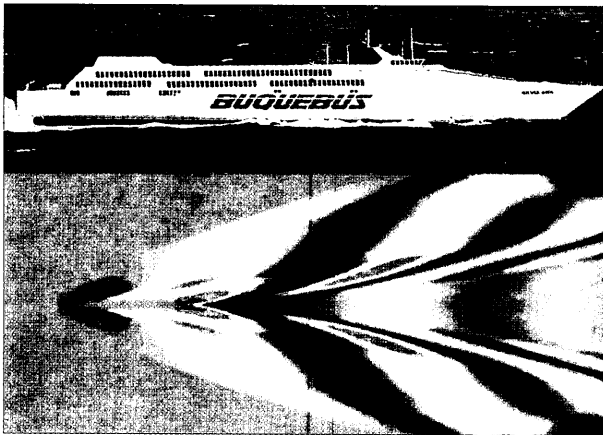


Figura 17. Análisis de la estela de un buque rápido.^[20]

los resultados numéricos; la aplicación de dichos métodos no es, por tanto, una etapa a considerar aisladamente de la realidad.

La palabra que quizás puede sintetizar el futuro más inmediato de las aplicaciones de los métodos numéricos en ingeniería civil es la *multifísica*. Los problemas no se abordarán más desde la perspectiva de un único medio físico, sino que incorporarán todos los acoplamientos que caracterizan la complejidad de la realidad.

Así, por ejemplo, el diseño de una infraestructura se realizará teniendo en cuenta el proceso de construcción y la fun-

ción que dicha infraestructura ejercerá a lo largo de su vida útil. Las estructuras en ingeniería civil se estudiarán teniendo en cuenta los efectos con el medio circundante (el terreno, el agua, el aire). Ejemplos similares pueden encontrarse en la ingeniería naval y aeronáutica así como en bioingeniería, en economía, en demografía, en la modelización del comportamiento de las personas y de los grupos y en prácticamente todas las áreas de la ciencia. La importancia de tener en cuenta el carácter no determinista de todos los datos, será esencial para estimar la probabilidad de que los nuevos modelos matemáticos concebidos por el hombre se comporten de la forma prevista.

Sólo desde la perspectiva de una estrecha cooperación entre todas las partes del triángulo formado por el conocimiento profundo de las bases físicas y matemáticas de cada problema, los métodos numéricos y la informática, podrán encontrarse soluciones efectivas a los mega problemas de la ingeniería civil del nuevo siglo. Esa cooperación deberá verse reflejada también en un mayor énfasis en la optimización de los recursos materiales y humanos necesarios para afrontar con garantías el cambio de escala de los problemas a resolver y, sobre todo, en la puesta en marcha de acciones de formación innovadoras para preparar a las nuevas generaciones, que, con la ayuda de las matemáticas y de los números, deberán abordar con éxito la solución de problemas multidisciplinares.^[12] ■

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P.J. Davis y R. Hersch, *El sueño de Descartes*, Editorial Labor, 1989.
- [2] E. Oñate, *El Aura de los Números*, Reial Acadèmia de Doctors, Barcelona, 1998.
- [3] L.F. Richardson, *The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problem*, Trans. Roy. Soc. (London), A210, pp. 305-357, 1910.
- [4] E. Oñate, A. Gaona, J. Oliver y B. Suárez. *Possibilidades de los ordenadores personales en el cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos*. Revista de Obras Públicas. Vol.156, No. 1 231-248.1983
- [5] O.C. Zienkiewicz y R.L. Taylor, *El método de los elementos finitos*, McGraw Hill-CIMNE, Barcelona, Vol. I-1993, Vol. II - 1994.
- [6] E. Oñate. *Análisis de Estructuras por el método de los elementos finitos*. CIMNE. Barcelona. 2ª Edición 1995.
- [7] C.A. Brebbia y J. Domínguez, *Boundary elements. An introductory course*, Computational Mechanics Publ., Mc.Graw Hill, 1989.
- [8] C.A.M. Duarte, *A review of some meshless methods to solve partial differential equations*, TI-CAM Report 95-06, The Univ. of Texas, Austin, May 1995.
- [9] E. Oñate y S. Idelsohn, O.C. Zienkiewicz y R.L. Taylor, *A finite point method in computational mechanics. Applications to convective transport and fluid flow*, Int. J. Num. Methods in Engrngn, Vol. 39, pp. 3839-3866, 1996.
- [10] P. Roca et al. (Eds.), *Structural Analysis of Historical Construction*, CIMNE, Barcelona, Vol.1 (1997), Vol. 2 (1998).
- [11] R. Codina, C. Morton, E. Oñate y O. Soto, *Numerical aerodynamic analysis of a large building using a finite element model with application to a telescope building*, Int. Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Vol. 10, No. 6, 616-633, 2000.
- [12] B. Suárez. *20 años de experiencias en la aplicación del MEF en Ingeniería Civil*. ENIEF 2000. 11º Congreso Internacional sobre Métodos Numéricos en Ingeniería y sus Aplicaciones. Bariloche. Argentina. Nov. 2000.
- [13] E. Oñate. *Desarrollo y aplicaciones de modelos de fractura*. E.T.S.I.C.C.P de Barcelona. Anales de la Mecánica de Fractura, 17, 127-154, 2000
- [14] Barbat A.H., Cervera M, Ciranqui C., Hanganu A. y E. Oñate. *Evaluación de la presión de fallo en el edificio de contención de una central nuclear*. Rev. Int. Met. Num. Cálculo y Diseño en Ingeniería, 11, 451-475, 1995
- [15] *Aplicaciones del programa Real Flow*. Next Limit S.A.. Madrid, 1999.
- [16] GiD. *El pre/postprocesador personal*. gid.cimne.upc.es. Barcelona, 2001
- [17] *Programa de cálculo estructural Ram Series*. Compass Ingeniería y Sistemas S.A.. <http://www.compassis.com>. 2001
- [18] *Diseño, análisis y construcción de estructuras hinchables*. Build Air Ingeniería y Arquitectura S.A.. <http://www.builder.com>. 2001
- [19] Rojek J., Oñate E., Zárata F. y Miquel J.. *Modelling of rock, soil and granular materials using spherical element*. Europ. Conf. On Computational Mechanics, Cracovia, Polonia, Junio 2001.
- [20] García J.. *Análisis de problemas de acoplamiento fluido estructura en ingeniería naval*. Tesis Doctoral. UPC, 1999