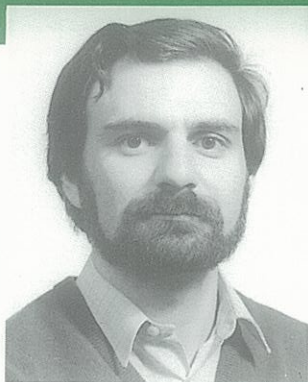
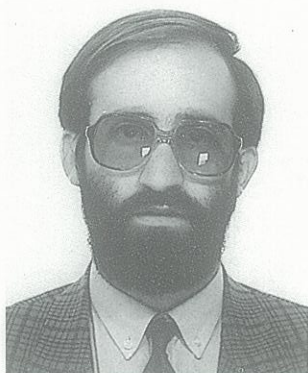




Joaquín MARTI RODRIGUEZ es ingeniero de Caminos por la ETSICCP de Madrid y doctor en Ingeniería Civil por la Universidad de Texas A & M en Estados Unidos. Desde 1976 hasta 1979 trabajó en el Grupo de Tecnología Avanzada de Dames & Moore en Londres. Cofundador de Principia Mechanics Ltd en Londres, trabajó allí de 1980 a 1984. Desde entonces es director de Principia, S. A., en Madrid y profesor titular en la ETS de Ingenieros de Minas. Su especialidad es la simulación numérica de problemas de grandes deformaciones. Es autor de medio centenar de artículos técnicos internacionales.



José María GOICOLEA RUIGOMEZ es ingeniero de Caminos por la ETSICCP de Madrid y doctor en Ingeniería Civil por la Universidad de Londres (King's College). Estuvo asociado desde 1981 con Principia Mechanics Ltd para pasar, en 1985, a Principia, S. A., de la que en la actualidad es director técnico. Es profesor titular de la ETS de Ingenieros de Caminos desde 1986. Su especialidad es la resolución numérica de problemas dinámicos y no lineales. Cuenta con más de veinte publicaciones en la literatura técnica internacional.

IMPACTOS Y GRANDES DEFORMACIONES

J. MARTI RODRIGUEZ - J. M. GOICOLEA RUIGOMEZ

INTRODUCCION

De toda la actividad industrial actual, puede decirse sin mucho riesgo que la industria nuclear es la que dedica un mayor esfuerzo a garantizar la seguridad de sus instalaciones. Dicho de otro modo, nuestra sociedad no está dispuesta a gastar tanto para prevenir un mismo nivel de riesgo si la industria que lo origina no es nuclear. No es el propósito de este artículo comentar las causas de esta situación; sin embargo, una de sus consecuencias es la necesidad de realizar estudios sofisticados para cargas severas e impactos en plantas y equipos nucleares, que es la problemática que aquí nos ocupa.

En el diseño y operación de una planta nuclear es generalmente necesario tener en cuenta todo aquello que pudiera afectar negativamente a la seguridad, incluso si su posibilidad de ocurrencia es sólo remota. Muchos de los sucesos así postulados están relacionados con el análisis de problemas de impacto, bien porque el accidente considerado sea un impacto, o porque resulte en la aceleración de masas eventualmente responsables de un impacto.

El estudio de estos problemas es matemáticamente complejo y muy poco asequible salvo con ordenadores científicos de notable potencia. Su tratamiento analítico requiere a menudo simplificaciones excesivas que desvirtúan la naturaleza del fenómeno.

En el resto de este artículo se presentan algunas fuentes importantes de impactos en la industria nuclear y las características de la metodología a utilizar en su estudio. Asimismo, se describen brevemente algunos ejemplos reales resueltos por Principia con los programas PR2D y PR3D (Principia, S. A.) y DYNA3D (Lawrence Livermore Laboratory, USA).

ALGUNOS IMPACTOS DE FRECUENTE CONSIDERACION

La contención es probablemente el elemento asociado con un mayor número de casos de impacto, tanto de origen externo como interno.

De origen externo, los impactos más comúnmente tenidos en cuenta en el diseño son:

- Misiles generados por el viento (postes de telégrafo, etc.).
- Misiles creados por fallo de otras instalaciones (turbinas, recipientes a presión, etc.).
- Aviones civiles y militares.
- proyectiles impulsados por explosiones accidentales externas (especialmente si hay líneas cercanas de transporte de mercancías).

Debe mencionarse que los impactos anteriores pueden afectar también a otras estructuras y no son absolutamente específicos de la contención, como se verá en un ejemplo posterior. Las fuentes de impacto en el interior de la contención son principalmente:

- Impactos de tuberías, que resultan por efecto látigo asociados a roturas postuladas; los posibles blancos se extienden en general a todos los elementos dentro de la contención, incluidas sus posibles defensas o barreras, así como a la misma estructura de contención.
- Impactos relacionados con la caída accidental de diversos elementos, tales como combustible, barras de control, bombas, intercambiadores de calor y cualquier equipo que deba izarse en un momento dado.
- Impactos asociados a movimientos sísmicos, ya que éstos pueden causar el contacto entre componentes adyacentes, fallo de anclajes, caídas de equipos, etc.

- Rotura de cualquier elemento que contenga fluido a presión, especialmente gas o vapor.
- Explosiones relacionadas con la problemática de los llamados accidentes severos.

Además de los anteriores, hay muchos otros problemas de impacto que la actividad nuclear requiere estudiar. Entre éstos pueden mencionarse:

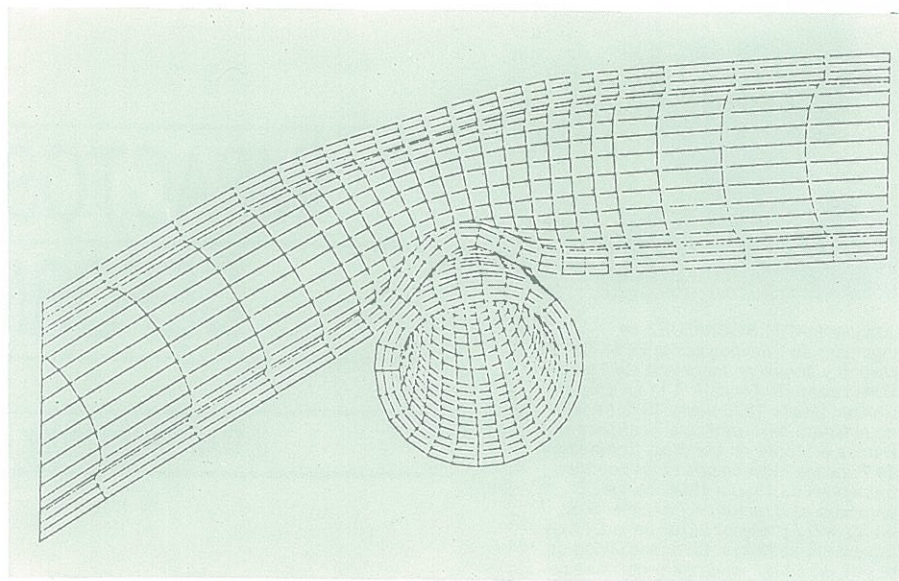
- Accidentes asociados al transporte de combustible irradiado y de residuos radiactivos, especialmente los de alta actividad.
- Accidentes relacionados con las operaciones de almacenamiento y manejo de residuos radiactivos de todas las categorías.
- Fallos de grúas y otra maquinaria de izado, tanto aleatorios como de origen sísmico, en relación con piscinas de almacenamiento.

Aquí habría que incluir un largo etcétera. Entiéndase pues que los problemas anteriores se mencionan más bien como muestra y sin ningún espíritu de ser exhaustivos.

CARACTERÍSTICAS Y METODOLOGÍA

Ya se mencionó anteriormente que los problemas de impacto presentan una complejidad que hace su tratamiento matemático especialmente difícil. En esta sección pasaremos revista brevemente a las causas de dicha complejidad:

- El carácter dinámico del problema es inevitable, incluidos los detalles de los fenómenos de propagación de ondas en los cuerpos involucrados.
- La tridimensionalidad del problema es también difícil de soslayar en una proporción importante de los impactos, siendo insuficientes a menudo las idealizaciones bidimensionales y axisimétricas.
- El comportamiento de los materiales, ante las cargas extremas producidas por un impacto, es casi siempre no lineal. Frecuentemente se requiere asimismo la modelización de fenómenos no fractura o, como mínimo, la acotación de sus condiciones de ocurrencia. En cualquier caso, debe resaltarse que la simulación del comportamiento del material tiene que ser representativa sobre el rango completo de velocidades de deformación que se desarrollan en el impacto.
- Existen varias fuentes de no linealidad geométrica en este tipo de problemas. Las principales son las condiciones de contorno (contactos) y las grandes deformaciones y giros



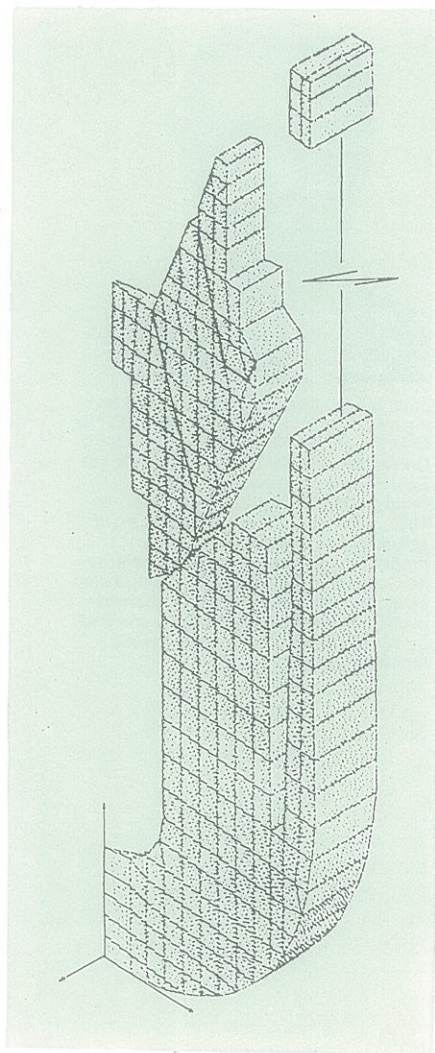
F I Detalle de las deformaciones durante un impacto entre tuberías (análisis con DYNA3D)

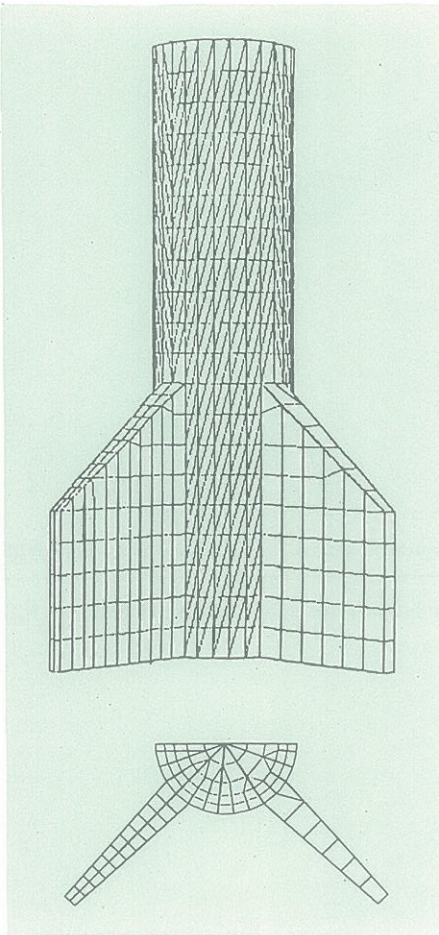
que invalidan las formulaciones infinitesimales.

Como contrapartida a las serias dificultades mencionadas, los problemas de impacto presentan la ventaja de una corta duración temporal, lo que permite analizar su evolución con herramientas que serían demasiado costosas si el tiempo a simular fuera más dilatado. El conjunto de características reseñadas anteriormente pone en gran ventaja a los métodos de elementos/diferencias finitos que proceden por subdivisión del tiempo en intervalos e integración explícita en el tiempo, que están referidos a mallas lagrangianas (que se desplazan con el material) y que utilizan formulaciones constitutivas incrementales. Estos métodos permiten gran generalidad para los modelos de comportamiento del material y una lógica eficiente y precisa para control y gobierno de los contactos. Además, la necesidad de memoria de los modelos explícitos crece sólo linealmente con el tamaño de la malla, condición prácticamente imprescindible para hacer posible el análisis de problemas tridimensionales de interés ingenieril.

La característica esencial de los métodos explícitos radica en que el intervalo de integración es tan corto que nodos contiguos de la malla no tienen tiempo de comunicarse entre sí durante un intervalo. Esto, que se formaliza como la condición de Courant, tiene la virtud de desacoplar las ecuaciones del movimiento de los nodos, con lo que éstas pueden resolverse individualmente en cada intervalo de integración. La condición de Courant garantiza la estabilidad de la integración y, en la práctica, asegura también la precisión del cálculo sin necesidad de utilizar subintervalos de integración. El precio a

F II Parte de la malla (elementos sólidos) utilizada en la simulación de la caída de un elemento de combustible AGR en un tubo de almacenamiento (análisis con PR2D)





F III Malla representando una parte de un elemento de combustible Magnox (análisis con PR3D)

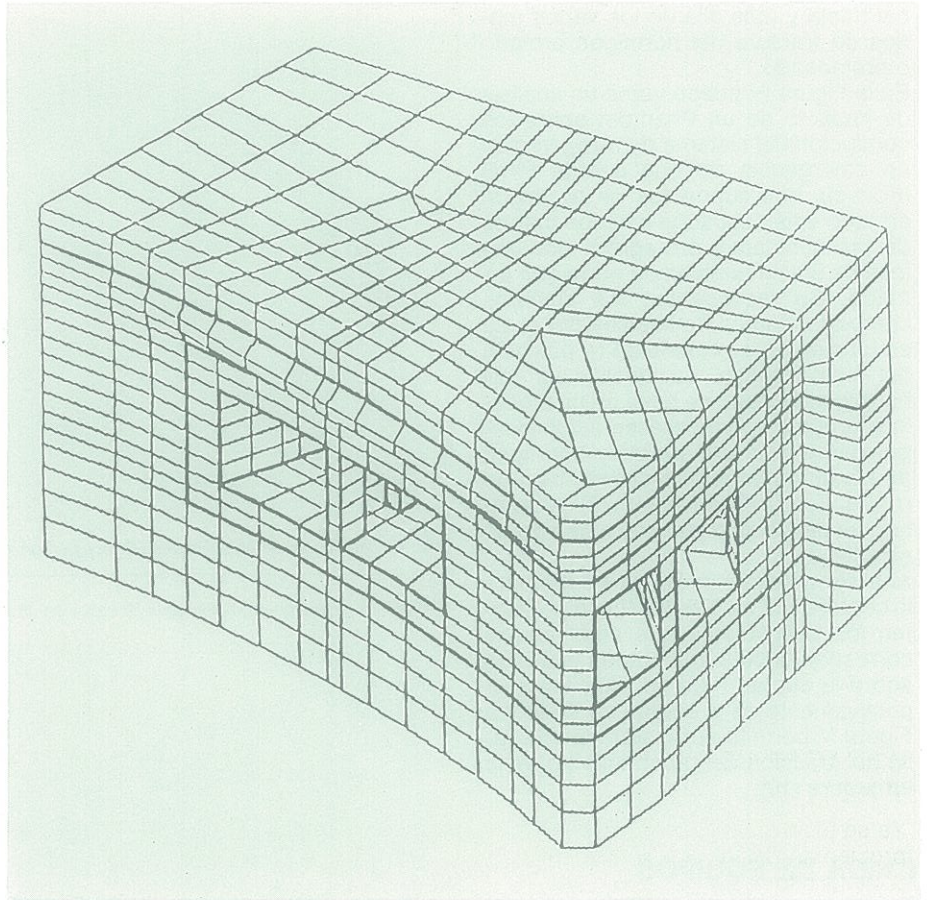
pagar, un intervalo de integración pequeño, es de importancia secundaria en problemas de impacto debido a su corta duración.

IMPACTOS DE TUBERIAS

Consecuencia inmediata de la postulación de roturas en líneas, especialmente las de alta energía, es el análisis de los impactos que resultan por efecto látigo. Estos impactos pueden afectar a equipos, estructuras y a otras tuberías.

Dada la geometría de una tubería y la configuración resultante de su giro alrededor de una rótula plástica, es claro que su interacción con el blanco tendrá características tridimensionales ineludibles, independientemente del blanco considerado.

La Figura I presenta un análisis de impacto de tubería en que el blanco es a su vez otra tubería. Los análisis requieren el conocimiento del comportamiento elastoplástico del material, así como un criterio de rotura que permita establecer la supervivencia de la tubería impactada.



F IV Ejemplo de análisis de impacto de avión sobre los conductos de refrigeración de emergencia del Konvoi (análisis con PR3D)

El fenómeno es complejo y su planteamiento numérico puede verse en las referencias (1) (2) (3), en las que se lleva a cabo un estudio genérico del problema. La necesidad de analizar grandes números de interacciones de este tipo para una sola planta ha llevado a procedimientos escalonados de evaluación con el fin de optimizar la asignación de recursos de ingeniería (4) (5) (6).

COMBUSTIBLE

La caída accidental de elementos de combustible, tanto dentro del reactor como en su manejo y almacenamiento, es otro de los problemas típicos de impacto. La Figura II muestra parte de la malla correspondiente a unos análisis de caída e impacto de una columna de combustible de un reactor de grafito-gas (tipo AGR) dentro del tubo presurizado de almacenamiento. Dichos análisis (7) permitieron diseñar el asiento dentro del tubo para optimizar su capacidad de disipación de la energía del impacto, e impedir así la perforación del tubo en caso de caída accidental del combustible.

Aunque no es patente en la figura, la

malla de elementos sólidos está acoplada a una malla de elementos estructurales que modelizan los 20 m restantes de la columna, en la que se representan las deformaciones (incluido el pandeo) de rejillas y varillas de combustible, la fracturación del grafito, etc. Otro accidente a analizar en relación con caídas de combustible durante su manejo es el de los elementos Magnox, cuyas deformaciones plásticas deben acotarse por motivos de seguridad. La Figura III muestra una sección de uno de estos elementos utilizada en el estudio de un impacto sobre las aletas. El rayado aparente en la malla corresponde a la representación estructural de sistemas helicoidales de pequeñas aletas.

IMPACTOS DE AVION

En ciertas normativas se requiere a las centrales nucleares que resistan el impacto de un avión, aunque se trate de un suceso de baja probabilidad. Cuando se estudia, el impacto suele idealizarse por medio de una historia de presiones uniformemente repartidas sobre un área circular. La dificultad estriba aquí en la modelización del mate-

rial hasta y más allá de los varios modos de fractura del hormigón armado o pretensado.

En la Figura IV puede verse un análisis de impacto de un Phantom sobre los conductos del sistema de refrigeración de emergencia de una central PWR (Konvoi). Los conductos de hormigón armado están situados a varios metros de profundidad y protegidos por una losa de 90 cm también de hormigón armado. Se representan los distintos comportamientos no lineales del suelo en función de la profundidad y posición del nivel freático. La idealización del hormigón armado se basa en un modelo segregado, con representación independiente para armaduras y hormigón de los fenómenos elastoplásticos y de rotura. Las referencias (8) (9) presentan detalles adicionales de este tipo de simulación.

Análisis similares se llevan a cabo para la contención. La Figuras V y VI presentan los desplazamientos amplificados correspondientes a impactos externos sobre la cúpula y pared cilíndrica respectivamente de la central de Trino. La Figura V permite ver claramente el fallo por tracción del recubrimiento de la armadura (10).

CAIDA DE EQUIPOS

En principio, todo lo que debe izarse puede accidentalmente desprenderse. Un ejemplo son las bombas e intercambiadores de calor cuya modelización axisimétrica (el eje está a la izquierda) aparece en la Figura VII y que corresponden a un reactor rápido.

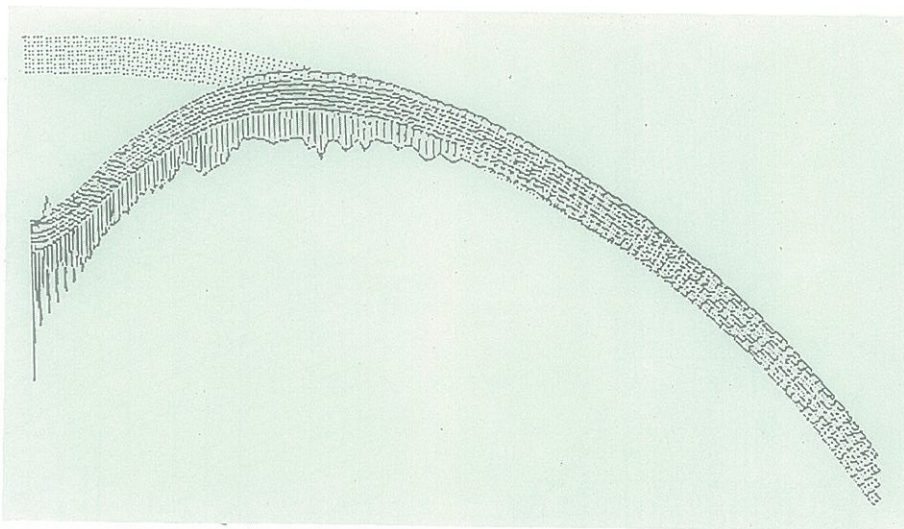
Los análisis se realizaron para asegurar que este accidente no resultaría en una perforación de la piscina de sodio e incluyeron la simulación del progreso del equipo a través del sodio líquido.

CONTENEDORES DE TRANSPORTE

Los impactos postulados en los contenedores de transporte de combustible irradiado son generalmente los recomendados por el OIEA (11). Uno de ellos, la caída de nueve metros sobre un plano rígido, puede verse modelizado en la Figura VIII para el caso de un contenedor genérico (12). La Figura IX muestra un cálculo similar en el que se incluye parte del blanco con el fin de reproducir mejor el experimento físico llevado a cabo con el contenedor de combustible Magnox. Pueden verse más detalles en (13) (14).

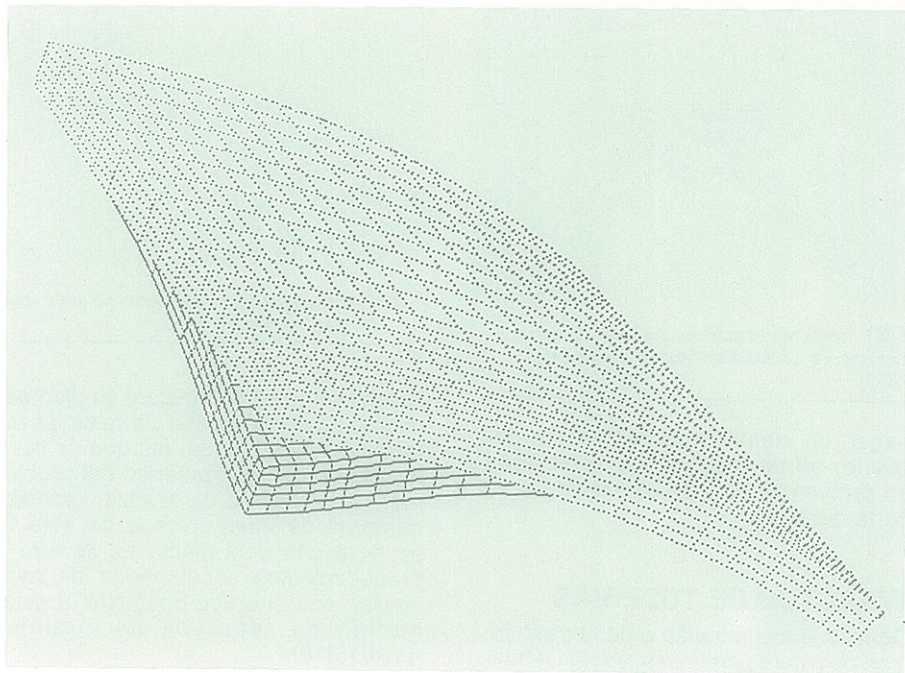
CONSUMO DE ORDENADOR

Aunque por lo general el tipo de problemas descrito requiere elevados gas-



F V Deformaciones amplificadas 50 veces en un impacto externo sobre la cúpula de Trino (análisis con PR2D)

F VI Deformaciones amplificadas 20 veces en un impacto externo sobre la pared cilíndrica (análisis con PR3D)



tos computacionales, la evolución reciente de los ordenadores hace posible realizar estos cálculos con recursos considerados razonables en el diseño de plantas y estructuras nucleares.

La utilización de métodos explícitos para el análisis requiere tiempos de proceso (CPU) que dependen linealmente de la duración de la simulación y del tamaño de la malla. Esta característica es fundamental para el análisis de problemas tridimensionales, que por lo general resultan inabordables mediante los esquemas implícitos tradicionales cuyos costes computacionales crecen de manera cuadrática con el tamaño de malla.

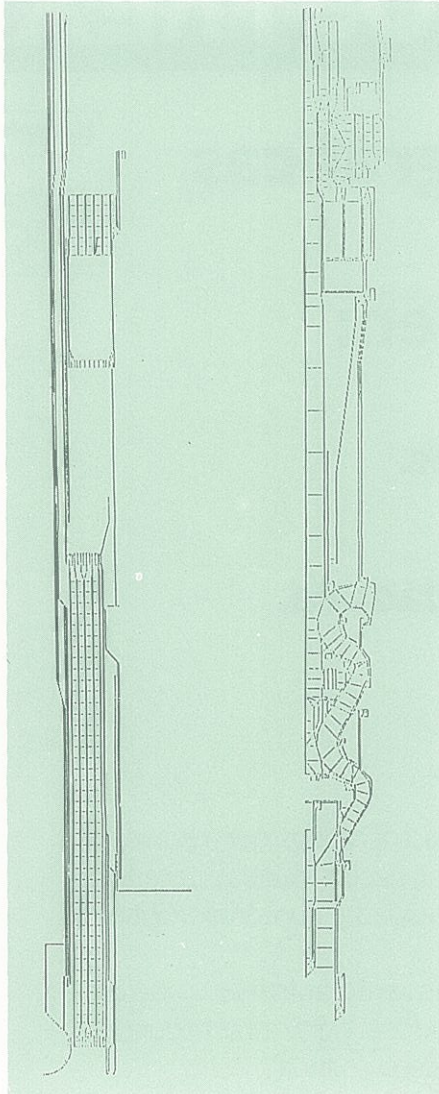
Como ejemplo tridimensional, el análisis del contenedor de la Figura IX, con

una malla de 10.701 tetraedros, requirió 10.000 intervalos de integración para cubrir los 10 mseg de interés. El tiempo de CPU consumido en un CONVEX C1-XP es de unas tres horas.

El ejemplo bidimensional de la Figura V tiene una malla formada por 1.968 triángulos y 369 elementos barra representando las armaduras. Los 120 mseg estudiados incluyeron 7.621 intervalos de integración. El tiempo de CPU en un CONVEX C1-XP es de unos 15 minutos.

CONCLUSIONES

La industria nuclear plantea problemas de cálculo considerables en relación

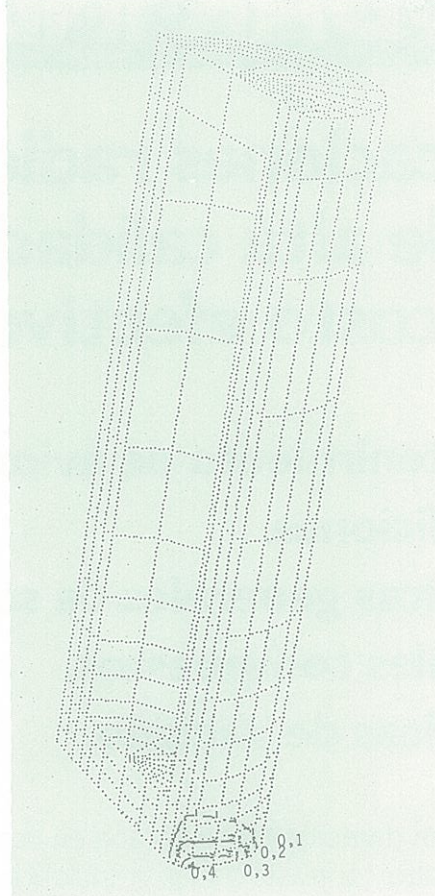


F VII Mallas utilizadas en la simulación de impactos de un intercambiador de calor y una bomba en un reactor rápido (análisis con PR2D)

con la postulación de accidentes de impacto. Por el momento estos problemas siguen considerándose difíciles y es claro que aún queda mucho desarrollo por realizar, especialmente en el área de la fractura. A pesar de esto, es lícito concluir que la combinación de códigos numéricos de cálculo como PR2D/3D con el potencial de los ordenadores modernos (especialmente vectoriales y paralelos) permite hacer frente con buenas posibilidades al análisis de la mayor parte de los accidentes de este tipo que la industria nuclear plantea.

REFERENCIAS

(1) MARTI, J., KALSI, G. S. y PRINJA, N. K. (1983), *Three-Dimensional Non-Linear Analysis of Pipe-to-Pipe Impact*, ASCE Engineering Mechanics Division Specialty Conf., Purdue University, USA.



F VIII Contornos de máxima deformación en un impacto de esquina de un contenedor genérico (análisis con PR3D)

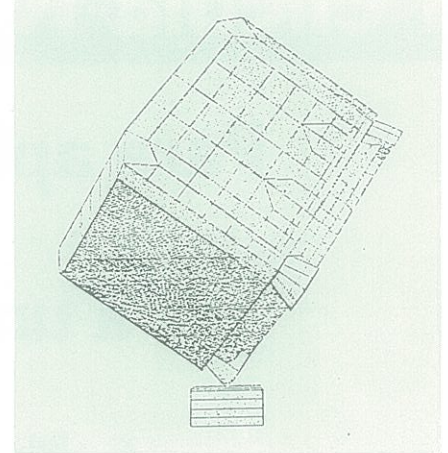
(2) MACKAY, D. M., MARTI, J. y PRINJA, N. K. (1984), *Three-Dimensional Analysis of Pipe-on-Pipe Impact and Fracture*, 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Fracture Mechanics, Swansea, Inglaterra.

(3) PRINJA, N. K., DAY, B. V. y PARKER, J. V. (1984), *Damage Criteria for Pipe on Pipe Impact*, Int. Conf. on Structural Impact and Crashworthiness, vol. 2, Elsevier Applied Science, Londres.

(4) DAINORA, J., JORDAN, K. E. y WILTA-DWORKIN, C. A. (1983), *The Effects of Current Pipe Break Criteria on Operating Plants*, 4th Nat. Cong. on Pressure Vessel and Piping Technology, Portland, USA.

(5) VAZQUEZ, J. M., MARTI, J. y MOLINA, R. (1986), *Efectos de Roturas de Tuberías en Estructuras, Sistemas y Componentes dentro de la Contención de la CN de Santa María de Garoña*, XII Reunión Anual de la SNE, Salamanca.

(6) VAZQUEZ, J. M., MARTI, J. y MOLINA, R. (1988), *A Multi-Step Approach for Evaluation of Pipe Impact Effects*, Int. J. for Pressure Vessels and Piping, vol. 31, págs. 15-28.



F IX Malla utilizada en el análisis del impacto de esquina del contenedor Magnox (análisis con PR3D)

(7) MARTI, J., KALSI, G. S., LAU, W. W. y KARK, S. K. (1983), *Simulation of an AGR Fuel Assembly Falling Freely within a Pressurised Storage Tube*, Computational Mechanics in Elastoplasticity and Creep, Londres.

(8) MARTI, J., KALSI, G., TRBOJEVIC, V. M. y ATTALLA, I. (1982), *Three-Dimensional Dynamic Non-Linear Modelling of Reinforced Concrete under Impact Loads*, Interass. Symp. on Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading, Berlín, págs. 548-564.

(9) MARTI, J., KALSI, G. S. y ATTALLA, I. (1983), *Three-Dimensional Non-Linear Aircraft Impact Analysis*, VII Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Chicago, Ponencia núm. J9/7.

(10) GOICOLEA, J. M., MARTI, J., ATTALLA, I. y GRATIEUX, C. (1987), *Modelling of Reinforced Concrete Containments during Impact Loading*, IMPACT87 Int. Conf. on Effects of Fast Transient Loadings in the Context of Structural Mechanics, Lausanne.

(11) OIEA (1979), *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials*, 1973, Revised Edition, Safety Series, núm. 6, Viena.

(12) MARTI, J., GOICOLEA, J., KUNAR, R. y ALDERSON, M. (1987), *Impact Analysis of Transport Flasks*, Int. Conf. on Nuclear Containment, Cambridge, Ponencia núm. C-3.

(13) KALSI, G. S. y DOWLING, A. R. (1987), *Three-Dimensional Finite Difference Analysis of a Corner Drop of Magnox Nuclear Fuel Transport Flask*, IX Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, vol. I, págs. 105-111.

(14) Institution of Mechanical Engineers (1985), *The Resistance to Impact of Spent Magnox Fuel Transport Flasks*, Proc. of the Seminar, Londres.