

620.1125
RIEe

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y
Ciencias de la Producción



BIBLIOTECA
CENTRAL

"ESTUDIO DEL IMPACTO MECANICO PRODUCIDO POR LA
CAIDA ACCIDENTAL DE LA CAPSULA DE ALMACENAMIENTO
DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD SOBRE UN
PUNZON METALICO"



D-18700

TESIS DE GRADO

...via a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

PRESENTADA POR

FRANCISCO ALEJANDRO RIERA ROMERO

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO

1998

AGRADECIMIENTO

Ing. Eduardo Orcés, Director de
Tesis, por su ayuda y colaboración
para la realización de este
proyecto.

DEDICATORIA

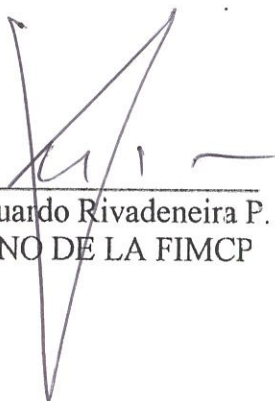
A LA MEMORIA DE MI PADRE

A MI MADRE

A YIMY, KATIUSHKA Y LENIN

A MIS AMIGOS

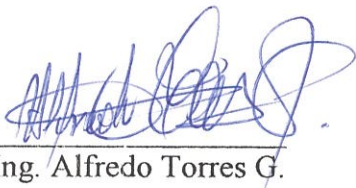
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



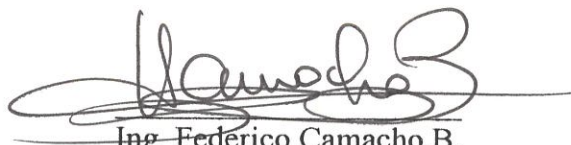
Ing. Eduardo Rivadeneira P.
DECANO DE LA FIMCP



Ing. Eduardo Orcés P.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Alfredo Torres G.
VOCAL



Ing. Federico Camacho B.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)


Francisco Riera R.

RESUMEN

La presente Tesis tiene como objetivo principal analizar las consecuencias de la caída de una cápsula genérica de almacenamiento de residuos radiactivos sobre un punzón de sección cuadrada.

De especial interés es la observación de las deformaciones permanentes producidas en la cápsula pro dicho impacto para evaluar la posible reutilización de la misma.

Dado que el diseño actual es solo conceptual, es importante determinar las deformaciones para distintos espesores de la pared y tapa de la cápsula, lo que permitirá tener una idea de la seriedad de las consecuencias del accidente en función de los parámetros de diseño que finalmente se adopten.

Para modelizar y caracterizar el accidente postulado, se utilizará un código de elementos finitos, utilizando la integración explícita para conocer la evolución en el tiempo del fenómeno, gracias al programa ABAQUS/Explicit (HKS, 1997).

La determinación del comportamiento de la cápsula en su conjunto y especialmente en la zona donde ocurre el impacto, requiere previamente la idealización de la estructura por medio de una discretización adecuada para su análisis por el método de los elementos finitos.

Una vez idealizada la cápsula con una discretización apropiada, se trata de determinar las consecuencias producto del impacto entre la cápsula vacía y un punzón al caer la primera desde un metro de altura.

Además se han realizado cálculos analíticos simplificados para comparar con los resultados que arroje el código de elementos finitos e interpretar mejor las predicciones numéricas

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	V
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES.....	3
1.1. Gestión de los Residuos Radiactivos.....	3
1.1.1. Residuos radiactivos de alta actividad	4
1.1.2. Gestión de los residuos radiactivos de alta actividad.....	5
1.1.3. Almacenamiento Geológico Profundo	6
1.1.3.1. Instalaciones de superficie.....	8
1.1.3.2. Instalaciones subterráneas	10
1.2. Comportamiento elasto-plástico de los materiales.....	11
1.2.1. Introducción	11
1.2.2. Elasticidad y plasticidad. Concepto	12
1.2.3. Diagrama de tracción	14

1.2.4. Teoría de la elasticidad.....	19
1.2.4.1. Modos y frecuencias naturales de vibración de un cuerpo....	20
1.2.5. Teoría de la plasticidad	22
1.2.5.1. Criterios de fluencia	23
1.2.5.2. Criterio de Von Mises	24
1.2.5.3. Flujo plástico	25
II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	32
2.1. Introducción.....	32
2.2. Geometría.....	33
2.3. Materiales	35
2.4. Criterios de Aceptabilidad.....	35
III: METODOLOGÍA.....	37
3.1. Método de los Elementos Finitos.....	37
3.1.1. Introducción	37
3.1.2. El proceso general.....	39
3.1.3. Sistema discreto general	46
3.1.4. Método de residuos ponderados	50
3.2. Integración Explícita.....	58
3.2.1. Introducción	58
3.2.2. Desarrollo.....	59
3.3. El código ABAQUS.....	62

3.3.1. Aspectos básicos	62
3.3.2. Planteamiento del problema real físico.....	66
3.3.3. Entrada de datos.....	68
3.3.3.1. Definición del modelo	69
3.3.3.2. Definición del comportamiento del modelo	73
3.3.4. Preproceso de datos	76
3.3.5. Proceso de generación de archivo de resultados.....	76
3.3.6. Postproceso de resultados	80
3.4. Advertencia sobre el Método de Elementos Finitos.....	81
IV: MODELIZACIÓN.....	83
4.1. Hipótesis.....	83
4.2. Modelización geométrica.....	84
4.3. Materiales.....	84
4.4. Condiciones Iniciales y de Contorno	87
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
5.1. Evolución del fenómeno	89
5.2. Cápsula de 10 cm de pared	91
5.3. Cápsula de 8 cm de pared	104
5.4. Cápsula de 12 cm de pared	113
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
6.1. Conclusiones.....	122

6.2. Recomendaciones	124
APÉNDICES.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	133

ABREVIATURAS

AGP	Almacenamiento Geológico Profundo
cm	Centímetro
E.T.S.I	Escuela Técnica Superior de Ingenieros
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A.
Fig.	Figura
GPa	Giga Pascal
HKS	Hibbit Karlsson & Sorensen
kg	Kilogramo
kJ	Kilo Joule
l	Longitud
m	Metro
m/s	Metro por segundo
m ³	Metro cúbico
MN	Mega Newton
MPa	Mega Pascal
ms	Milisegundos
N	Newton
Pa	Pascal
RAA	Residuos de Alta Actividad
RBM	Residuos de Baja y Media Actividad
s	Segundo
SI	Sistema Internacional

SIMBOLOGÍA

\ddot{a}_{n+1}	==	Aceleración en $n+1$
A	==	Área de impacto
q_i^a	==	Conjunto de cantidades de cada elemento
v	==	Conjunto de funciones arbitrarias
w_i	==	Conjunto de funciones independientes
C_{n+1}	==	Continuidad
E_p	==	Deformación permanente
E_c	==	Deformación Recuperada
Δt	==	Delta Tiempo
ρ	=	Densidad
a_{n+1}	=	Desplazamiento en $n+1$
δ	=	Diferencial
Ω	=	Dominio de la función
Γ	=	Dominio de las condiciones de contorno
e	=	Elemento
T_s	=	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_{m\acute{a}x}$	=	Esfuerzo máximo de compresión
e	=	Espesor del cuerpo percusor
F	==	Fuerza de impacto
u	==	Función desconocida
$P(a)$	==	Función incógnita no lineal
G_I	=	Funciones conocidas del dominio de la función
g_I	=	Funciones conocidas del dominio de las condiciones de contorno

N	==	Funciones de forma
\int	==	Integrales
T_e	==	Límite elástico
m	==	Masa del cuerpo que choca
M	==	Matriz de masa
k	==	Matriz de rigidez
ν	==	Módulo de Poisson
E	==	Módulo de Young
a_i	==	Parámetros discretos del sistema
$A(u)$	==	Sistema de ecuaciones de la función desconocida en el dominio de la función
$B(u)$	==	Sistema de ecuaciones de la función desconocida en el dominio de las condiciones de contorno.
Ψ	==	Sistema de ecuaciones no lineal
r	==	Suma de fuerzas de reacción
Σ	==	Sumatoria
t	==	Tiempo que dura el impacto
\hat{u}	==	Vector columna de la función
v	==	Velocidad de impacto
c	==	Velocidad de propagación de ondas
v_l	==	Velocidad de rebote
a_{n+1}	==	Velocidad en $n+1$

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Estrategia de la gestión de residuos radiactivos 7
Figura 1.2	Diagrama de tracción característico de un material metálico 15
Figura 1.3	Análisis de deformaciones en el ensayo de tracción 18
Figura 1.4	Cilindro de Von Mises 18
Figura 2.1	Cápsula de almacenamiento de Residuos Radiactivos 34
Figura 2.2	Dimensiones del punzón 35
Figura 3.1	Pasos a seguir para la resolución de un problema mediante Abaqus 67
Figura 4.1	Malla utilizada en la modelización del problema 86
Figura 4.2	Características del material utilizado 88
Figura 5.1	Primer modo de vibración de la cápsula 92
Figura 5.2	Segundo modo de vibración de la cápsula 93
Figura 5.3	Fuerza desarrollada entre la cápsula y el punzón ($e = 10$ cm) 95
Figura 5.4	Evolución de velocidades verticales ($e = 10$ cm) 96
Figura 5.5	Energías cinética, de deformación y total ($e = 10$ cm) 98
Figura 5.6	Evolución de la energía de deformación ($e = 10$ cm) 100
Figura 5.7	Deformaciones plásticas. Perspectiva ($e = 10$ cm) 101
Figura 5.8	Deformaciones plásticas. Sección longitudinal ($e = 10$ cm) 102
Figura 5.9	Deformaciones plásticas. Sección transversal ($e = 10$ cm) 103
Figura 5.10	Fuerza desarrollada entre la cápsula y el punzón ($e = 8$ cm) 106
Figura 5.11	Evolución de velocidades verticales ($e = 8$ cm) 107
Figura 5.12	Energías cinética, de deformación y total ($e = 8$ cm) 108

Figura 5.13	Evolución de la energía de deformación ($e = 8$ cm)	109
Figura 5.14	Deformaciones plásticas. Perspectiva ($e = 8$ cm)	110
Figura 5.15	Deformaciones plásticas. Sección longitudinal ($e = 8$ cm)	111
Figura 5.16	Deformaciones plásticas. Sección transversal ($e = 8$ cm)	112
Figura 5.17	Fuerza desarrollada entre la cápsula y el punzón ($e = 12$ cm)	115
Figura 5.18	Evolución de velocidades verticales ($e = 12$ cm)	116
Figura 5.19	Energías cinética, de deformación y total ($e = 12$ cm)	117
Figura 5.20	Evolución de la energía de deformación ($e = 12$ cm)	118
Figura 5.21	Deformaciones plásticas. Perspectiva ($e = 12$ cm)	119
Figura 5.22	Deformaciones plásticas. Sección longitudinal ($e = 12$ cm)	120
Figura 5.23	Deformaciones plásticas. Sección transversal ($e = 12$ cm)	121

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla # I	Dimensiones de la cápsula
Tabla # II	Propiedades del material
Tabla # III	Modos de vibración con 10 cm de pared
Tabla # IV	Modos de vibración con 8 cm de pared
Tabla # V	Modos de vibración con 12 cm de pared

INTRODUCCIÓN

Durante varias décadas algunos países han aprovechado, en la generación de energía, la capacidad de los núcleos de los átomos pesados de emitir una gran cantidad de energía en la reacción de fisión creando los respectivos desechos. Los residuos radiactivos desde un punto de vista técnico son cualquier material o producto con niveles de actividad superiores a los permitidos y para los cuales no está previsto ningún uso.

El almacenamiento definitivo de los residuos generados en las centrales nucleares es necesario para la protección de las personas y del medio ambiente y evitar exponerlos a su peligrosa acción. Por lo tanto la medida que se debe llevar a cabo es aislar el combustible gastado y no permitir que ningún efecto nocivo sea notado en la biosfera.

Actualmente se ha considerado como la mejor alternativa el almacenamiento profundo en una formación geológica estable. Dicho almacenamiento debe proporcionar suficiente aislamiento, basado en el concepto de barreras múltiples. Las barreras son: el propio residuo, la cápsula que lo contiene, los materiales de relleno y sellado, y por último la formación geológica.

La atención de la presente Tesis se centra en la cápsula de almacenamiento. Los materiales con que será fabricada se seleccionan mediante criterios que permitan garantizar la contención de los residuos durante miles de años dentro de un medio geológico.

En España la empresa encargada de gestionar los residuos radiactivos es ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A.). Con ella colaboran equipos de investigación dirigidos a analizar los problemas que pueden suscitarse en el desarrollo del almacenamiento. Dentro de este ámbito, el Departamento de Materiales de la E.T.S.I. de Minas de la UPM analiza algunos de los accidentes posibles que pudieran ocurrirle a la cápsula de almacenamiento.

Las características de la cápsula en cuanto a su diseño definitivo están aún por especificar, con lo que los análisis realizados se basan en un concepto genérico de la misma. La filosofía que gobierna el trabajo es la de ir acumulando información y centrando los posibles problemas planteados por la cápsula de forma que, cuando en su día se desee proceder a un diseño definitivo de la misma, exista ya la información necesaria para sustentar la toma de decisiones. La metodología de trabajo consiste en estudiar el comportamiento y problemática de la cápsula en base a distintas hipótesis de accidentes con el fin de: identificar los problemas a tener en cuenta, desarrollar y poner a punto técnicas para resolverlos, estudiar la sensibilidad de los resultados de interés frente a variaciones en los parámetros de la cápsula y generar el soporte necesario para que, en su día, existan criterios en los que basar un diseño racional de la cápsula.

La presente Tesis analiza uno de estos accidentes, el que se produce al caer la cápsula sobre un punzón metálico.

I. ANTECEDENTES

1.1. Gestión de los Residuos Radiactivos

En esta sección se presenta una visión general de la gestión de los residuos radiactivos. Primeramente se define qué es un residuo radiactivo, para luego describir el proceso que se sigue hasta su almacenamiento definitivo, y se identifica bajo qué circunstancias es posible se presente el problema desarrollado en esta Tesis.

La política de gestión del combustible gastado prevé, sobre la base de una estrategia global de ciclo abierto, su almacenamiento final en formaciones geológicas profundas después de un periodo adecuado de almacenamiento

intermedio, que son necesarias para disminuir la emisión de radiación y calor por parte de los residuos (Ver apéndice A).

1.1.1. Residuos radiactivos de alta actividad

Los residuos de alta actividad se caracterizan por tener una elevada actividad específica, contener radionucleidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables y generar una gran cantidad de calor (1).

Debido a la existencia de radionucleidos de vida muy larga, han de pasar decenas de miles de años hasta que la actividad de este tipo de residuos quede a nivel del fondo natural. Por este motivo, el almacenamiento de los residuos de alta actividad debe garantizar el aislamiento de éstos durante periodos de tiempo de este orden de magnitud.

Este proceso supera, en principio, los límites del tiempo en que se puede asegurar la eficacia de las barreras de ingeniería. No obstante, muchas formaciones geológicas se han mantenido estables durante millones de años.

Así pues, existen formaciones geológicas que pueden garantizar su integridad durante el tiempo necesario para que la actividad de los elementos se reduzca a niveles inocuos, y no representen un riesgo para los seres humanos y su entorno.

1.1.2. Visión general de la gestión de residuos de alta actividad

En el momento que se descarga del reactor nuclear, el combustible tiene una actividad muy elevada y emite calor con intensidad. Una tonelada de un combustible gastado de un reactor tiene alrededor de 2000 kw de potencia térmica residual.

Así, en una primera etapa, los elementos combustibles se almacenan en las piscinas de enfriamiento situadas en las centrales para permitir la disipación del calor residual que generan. A partir de este punto, la estrategia varía según se opte por el ciclo abierto o cerrado (2).

La opción de ciclo cerrado, llamado de reelaboración o reproceso, tiene por objeto recuperar los materiales fisionables presentes en el combustible gastado (uranio y plutonio) purificándolos de forma que cumplan con especificaciones admitidas internacionalmente. En este proceso, sin embargo, vuelven a producirse otros residuos de alta actividad.

A diferencia del ciclo cerrado, el abierto almacena directamente los residuos producidos, cuyo destino final es su evacuación definitiva. En la actualidad, el almacenamiento definitivo en formaciones geológicas a gran profundidad aún no se está practicando pero constituye la práctica generalmente aceptada en todo el mundo de cara al cumplimiento de los

objetivos de seguridad radiológica. La estrategia de la gestión de los residuos de alta actividad, se ha esquematizado en la fig. 1.1.

1.1.3. Almacenamiento geológico profundo

El objetivo principal del almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de alta actividad es proteger al hombre y su entorno de los riesgos inducidos por los mismos y limitar las cargas impuestas sobre las generaciones futuras (3).

La filosofía básica del almacenamiento definitivo en formaciones geológicas profundas consiste en:

Aislar a largo plazo los residuos radiactivos de la biosfera, mediante su confinamiento en el subsuelo geológico profundo utilizando un sistema de barreras múltiple. Para un almacenamiento geológico, el sistema de barreras múltiple está constituido por:

- La forma físico-química del residuo.
- La cápsula.
- Los materiales de relleno y sellado.
- La formación geológica alojante.

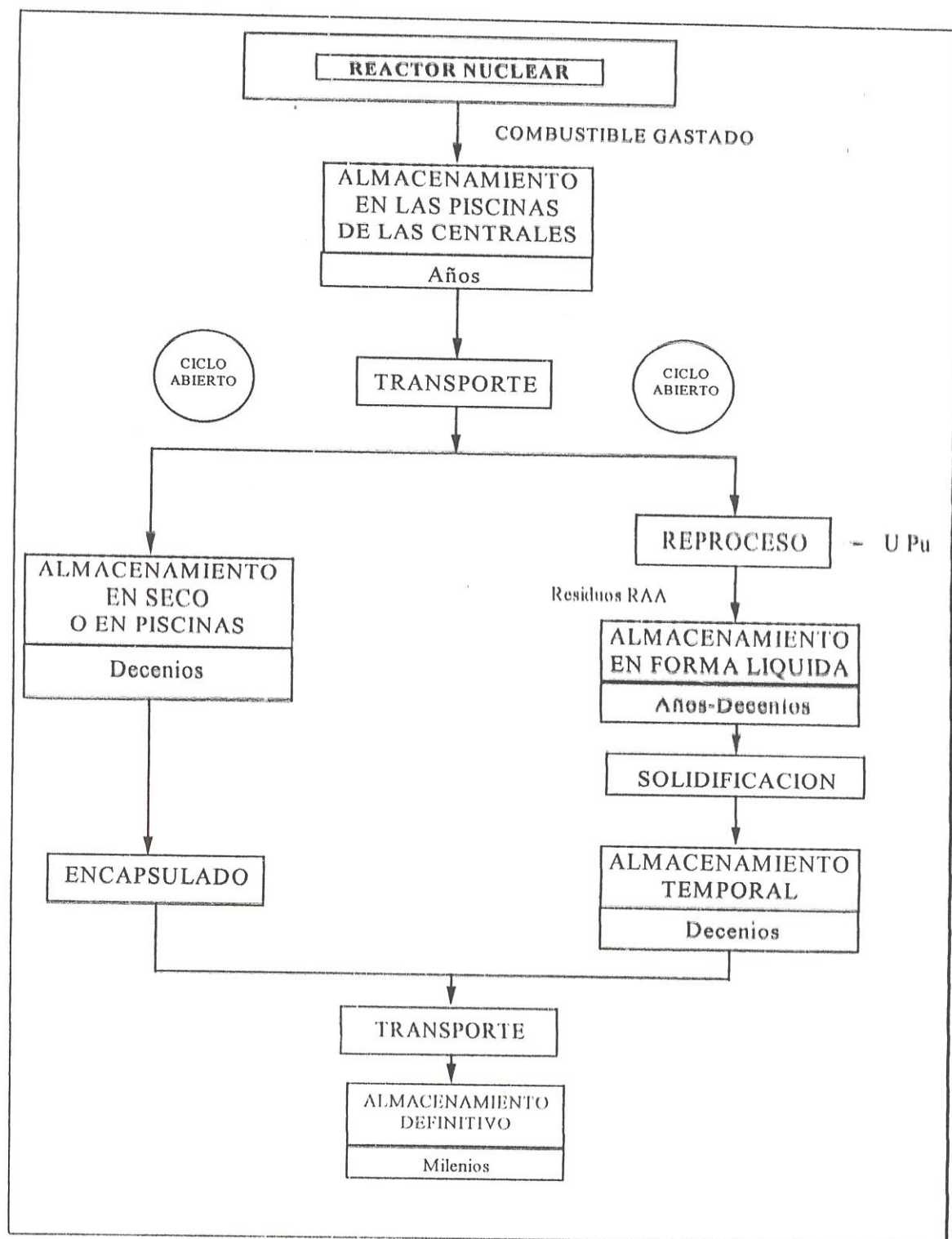


Fig. 1.1

Estrategia de la gestión de residuos radiactivos

- Las formaciones geológicas circundantes.

El repositorio final constará de una serie de unas instalaciones a construir en la superficie y otras ubicadas en profundidad. Las primeras se conocen como las instalaciones de superficie, e incluyen los centros de recepción, tratamiento y manejo de residuos, así como las instalaciones y equipo de izado necesarios para la operación interior. Las segundas, las instalaciones subterráneas, incluyen la infraestructura propia del repositorio, dos campos de galerías para el almacenamiento definitivo de residuo radiactivos de alta actividad y un silo para almacenar residuos de media actividad.

1.1.3.1. Instalaciones de superficie

Las instalaciones de superficie incluyen todas aquéllas que, localizadas en la superficie, son necesarias para la operación, mantenimiento y acceso a las instalaciones subterráneas. (Ver apéndice B). Una de las principales características es su clara separación en dos zonas, una con necesidades de protección convencional y otra sujeta a medidas de protección radiológica. La zona convencional está formada por edificios administrativos y de infraestructura propia de una excavación subterránea. La zona radiológica, por su parte, se compone de un área de

maniobras, el edificio de recepción, del almacén de relleno y la planta de encapsulado.

En el caso de almacenamiento directo, el combustible gastado llegará al emplazamiento en contenedores de transporte. En la planta de encapsulado (Ver apéndice C), que es la parte más importante de las instalaciones de superficie, los elementos de combustible gastados se descargarán de sus contenedores de transporte y se introducirán en una cápsula de acero al carbono, en la que posteriormente serán transportados a las instalaciones subterráneas para su almacenamiento definitivo. La planta de encapsulado incluye las siguientes áreas funcionales:

- * Recepción, almacenamiento y expedición de contenedores de transporte.
- * Preparación de contenedores de transporte.
- * Celdas calientes, de encapsulado y soldadura.
- * Recepción, almacenamiento y expedición de cápsulas.
- * Infraestructura en superficie de la rampa de acceso.

- * Control de accesos y salas de control.
- * Laboratorios.
- * Tratamiento de residuos.

La cápsula de almacenamiento será sometida en las instalaciones de superficie a distintas operaciones de manejo (Ver apéndice D) que comenzarán en el área de almacenamiento de cápsulas vacías y terminarán cuando la cápsula está colocada sobre el vehículo de transporte que la conducirá a las instalaciones subterráneas.

1.1.3.2. Instalaciones subterráneas

Las instalaciones subterráneas están divididas en distintas áreas, según sean para residuos de alta actividad, para residuos de media actividad y de infraestructura (Ver apéndice E).

La profundidad del almacenamiento depende en gran medida de las condiciones geológicas. Todo aumento de la profundidad supondría, en principio, una mayor protección contra los impactos naturales o de origen humano. Por otro lado también supone dificultades debido a las más altas tensiones y temperaturas en la roca.

La profundidad que se determine finalmente dependerá de las condiciones específicas del emplazamiento.

1.2. Comportamiento Elastoplástico de los materiales

1.2.1. Introducción

En el presente apartado se expondrán los fundamentos teóricos esenciales en los que se basa en estudio de impacto como el que nos ocupa. En primer lugar, se explican los conceptos de elasticidad y plasticidad, puesto que será crítico saber en qué dominio debemos encuadrar el fenómeno en estudio.

Posteriormente, se pasa a analizar el ensayo de tracción de los materiales metálicos, ya que supone la piedra angular en el conocimiento de la reacción de un metal cuando es sometido a esfuerzos uniaxiales. También se presenta una visión sobre modos y frecuencia de vibración de los cuerpos elásticos. Finalmente, se revisa la teoría de la plasticidad, donde se incluye un criterio de fluencia y el endurecimiento por deformación.

1.2.2. Elasticidad y plasticidad. Concepto

Suponemos que un cuerpo está formado por moléculas entre las cuales actúan fuerzas. Estas fuerzas moleculares se oponen a cambios de forma del cuerpo cuando sobre él actúan fuerzas exteriores.

Si un sistema exterior de fuerzas se aplica al cuerpo, sus partículas se desplazan y estos desplazamientos mutuos continúan hasta que se establece equilibrio entre el sistema exterior de fuerzas y las fuerzas interiores. Se dice en este caso que el cuerpo está en equilibrio en estado de deformación.

Durante la deformación, las fuerzas exteriores que actúan sobre el cuerpo realizan trabajo, y este trabajo se transforma completa o parcialmente en energía potencial de deformación (4).

Si las fuerzas causa de la deformación del cuerpo disminuyen gradualmente, el cuerpo vuelve total o parcialmente a su forma primitiva y, durante esa deformación inversa, la energía potencial acumulada en el cuerpo se recupera en forma de trabajo exterior.

La propiedad que tienen los cuerpos de recuperar su forma primitiva al descargarlos se denomina elasticidad.

Se dice que un cuerpo es perfectamente elástico si recobra su forma original de un modo completo al descargarlo.

Los materiales elásticos se caracterizan porque cumplen la ley de Hooke, la cual expresa la relación lineal entre tensiones y deformaciones según la siguiente fórmula:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

en la que:

σ : tensión uniaxial aplicada al material, expresada en pascales

E: módulo de Young, expresado en pascales.

ϵ : alargamiento unitario (cociente entre el alargamiento experimentado por el cuerpo y su longitud inicial), adimensional.

En general, muchos materiales se comportan más o menos elásticamente sobre un cierto rango de deformaciones. Cuando un material elastoplástico se deforma más allá de su límite elástico, se entra en la zona de comportamiento plástico; si se retiran las cargas aplicadas al cuerpo, éste ya no recupera su forma original.

En el caso de un cuerpo perfectamente elástico, el trabajo realizado por las fuerzas exteriores durante la deformación se transforma completamente en energía potencial de deformación.

En el caso de un cuerpo elastoplástico, parte de aquel trabajo se transforma en calor desarrollado en el cuerpo durante la deformación no elástica.

1.2.3. Diagrama de tracción

La respuesta de un metal sometido a tensión uniaxial a temperatura constante se estudia por medio del ensayo de tracción. Se realiza éste ensayo sometiendo una pieza recta de dimensiones normalizadas llamada probeta, a un esfuerzo de tracción que se aumenta gradualmente hasta la rotura.

En la probeta se realizan previamente dos marcas, que determinan una longitud denominada distancia entre puntos, sobre los que se efectúa, por medio de un extensómetro, la medida de los alargamientos. Este ensayo se representa mediante un diagrama tensión-deformación como el de la Fig. 1.2, denominado diagrama de tracción (5).

Si aumentamos gradualmente la carga, el material se comporta elásticamente hasta alcanzar el punto A; en este tramo OA la relación entre tensión y deformación es lineal, según la Ley de Hooke, y la retirada de la fuerza de tracción aplicada hace volver al cuerpo a su estado inicial.

Entre los puntos A y B se producen deformaciones elásticas y plásticas simultáneamente, por lo que en esta zona se dice que el material tiene un comportamiento elastoplástico. A partir del punto B, entramos en el dominio plástico del cuerpo, donde se consiguen grandes deformaciones

con incrementos muy pequeños de esfuerzos, existiendo finalmente una zona donde el cuerpo sigue deformándose con disminución de la carga.

Esto es debido al fenómeno de estricción, que se manifiesta por una disminución progresiva de la sección de la barra. El comportamiento plástico se conserva hasta llegar al punto C, correspondiente a la carga de rotura del material.

El esfuerzo σ_A correspondiente al punto A, se llama límite elástico; el esfuerzo σ_B , que corresponde al punto B, se llama esfuerzo de fluencia. La determinación rigurosa de estos límites es prácticamente imposible.

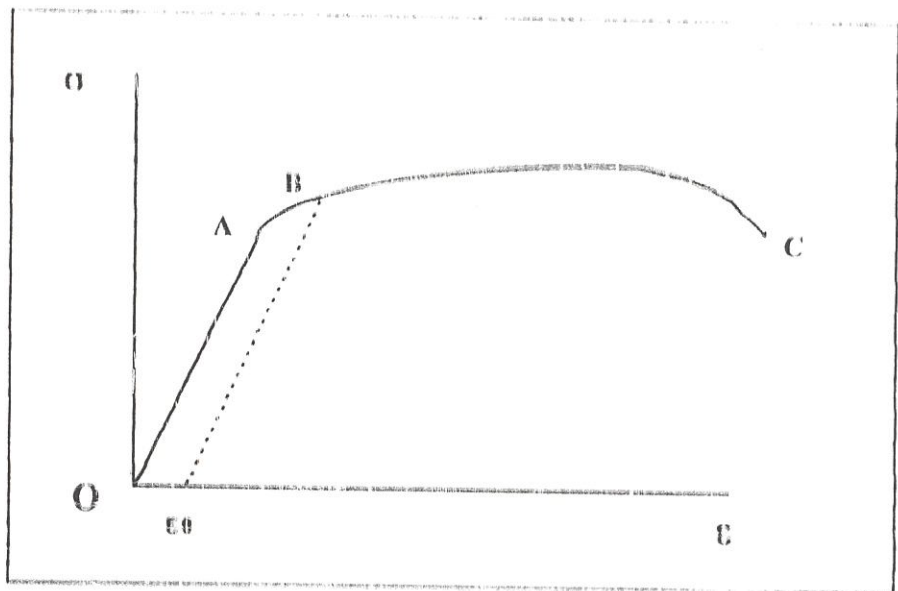


Fig. 1.2

Diagrama de Tracción característico de un material metálico.

Realmente esto no ocurre como se ha indicado, pues cuando se indica que se ha alcanzado un determinado valor de tensión, se ha calculado dividiendo la fuerza F ejercida por la sección inicial que tenía la probeta, pero esta sección ha ido disminuyendo lo que hace que el valor indicado en la gráfica sea un valor erróneo por defecto que irá aumentando con las deformaciones.

Esto hace que la gráfica obtenida sea falsa, sin embargo se la utiliza en la práctica debido a lo laborioso que sería tener en cuenta continuamente en el valor de la tensión variaciones de la sección.

La gran diferencia entre la condición elástica y la plástica es que en la segunda aparecen efectos de histéresis, por los cuales el esfuerzo es una función hereditaria de la deformación, mientras que no lo es en la primera.

Para explicar esto, según se ve en la Fig. 1.3, si aumentando paulatinamente las cargas llegamos de O a D dentro del tramo elástico, y después reducimos las cargas hasta cero.

Las deformaciones producidas primero crecen y después se reducen hasta desaparecer, siguiendo la misma ley lineal; es decir, que el mismo camino se sigue durante el ascenso que durante el descenso. Pero si, llegado a E en el tramo plástico, descargamos rápidamente, la línea de descarga será

EF, con una buena aproximación paralela a OA. Así, cuando ya no hay carga (punto F), queda una deformación plástica permanente ϵ_p y una deformación elástica recuperable ϵ_e . Si a partir de F volvemos a cargar, llegamos elásticamente a E, donde alcanzas la curva original.

Esto se debe a que la deformación plástica produce un trabajo en frío que cambia las propiedades del material mismo. Si una nueva carga encuentra una respuesta diferente, es porque, de hecho, ya no es el mismo material el que responde, sino un material cuyas características han sido modificadas por la cantidad y la naturaleza del trabajo en frío realizado.

Esto permite adecuar las propiedades de un material a las necesidades; por ejemplo, con el proceso carga - descarga descrito anteriormente se aumenta el límite elástico del material a cambio de reducir su ductilidad, lo cual puede resultar interesante si lo que se busca es retrasar lo más posible la entrada en el dominio plástico del cuerpo.

La energía transmitida al material en un proceso de deformación, vendrá representada en el diagrama por el área encerrada entre la curva de tensión, el eje de abscisas y la vertical trazada desde el punto final de carga.

Esta energía se reparte, entre trabajo realizado por el material para recuperar su forma primitiva y calor transmitido al ambiente.

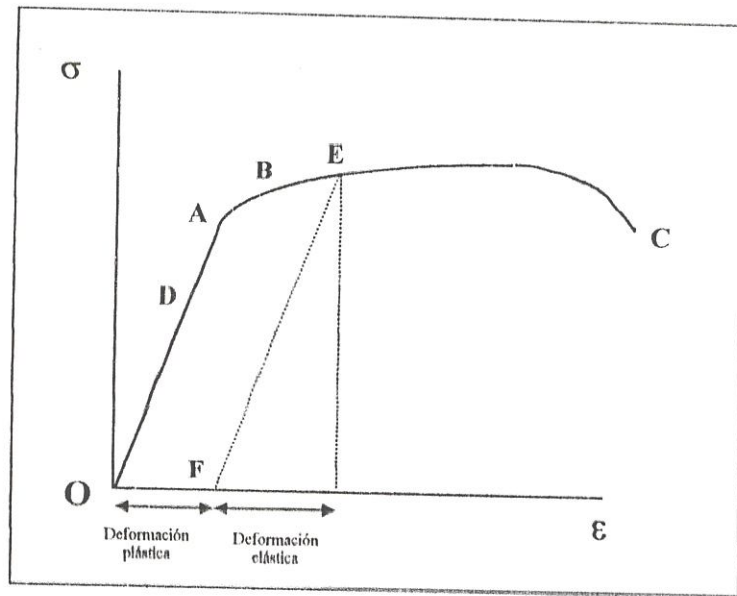


Fig. 2.3

Análisis de las deformaciones en el ensayo de tracción

Conociendo el diagrama de tracción de un material metálico, podemos conocer su comportamiento cuando se le somete a una tensión de valor constante.

Para tensiones menores que la tensión de fluencia, el material se comporta elásticamente, siendo la relación entre tensión y deformación asimilable a una recta de pendiente el módulo de Young (E):

$$\varepsilon = \sigma_1 / E$$

Para tensiones mayores que la tensión de fluencia, el cuerpo, tras comportarse elásticamente durante un intervalo de deformaciones, pasa al

dominio de las deformaciones plásticas. El valor de la deformación en este caso será la suma de dos términos, uno elástico y otro plástico:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{elástica}} + \epsilon_{\text{plástica}}$$

1.2.4. Teoría de la elasticidad

La teoría de la elasticidad se basa en los métodos para calcular tensiones y deformaciones en deformaciones de sólidos perfectamente elásticos. Se considera que el sólido es homogéneo e isótropo, que existe una relación lineal entre las tensiones y deformaciones, y que las deformaciones son infinitesimalmente pequeñas.

Estas condiciones impuestas implican que el método de superposición puede ser aplicado a las deformaciones y tensiones (excepto en aquellos casos que las deformaciones producidas influyan en las fuerzas exteriores aplicadas), y que sus cálculos se pueden referir a las condiciones y dimensiones iniciales.

Para obtener una solución completa sobre el estado tensional es necesario establecer:

- Las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas exteriores e interiores. Esto implica que las condiciones en las fronteras deben de ser conocidas.

- Una ecuación de continuidad o compatibilidad que describa la geometría de la deformación.
- Una relación general entre tensiones y deformaciones.

La primera condición implica un problema estático, la segunda la geometría de la deformación y la tercera establece o se basa en una solución específica, obtenida de observaciones experimentales de deformaciones elásticas del material.

Las constantes elásticas se obtienen de ensayos simples y generalmente se calculan el módulo de Young (E), el módulo de rigidez cortante (G), el coeficiente de Poisson (ν) y el módulo volumétrico (K).

Sólo dos de estas constantes son independientes; todas las demás pueden determinarse en función de las dos conocidas. En general, cualquier deformación consiste en un cambio de forma (distorsión) y un cambio de volumen.

1.2.4.1. Modos y frecuencias naturales de vibración de un cuerpo

Todo cuerpo posee un espectro intrínseco de vibración, con modos de vibración y frecuencias de vibración naturales. Estos modos y frecuencias, que son independientes de la carga a la que sea sometido el material, dan una idea de cómo la energía

aplicada al cuerpo se descompone en una serie de movimientos vibratorios propios de éste. Intuitivamente, se podría decir que los modos de vibración son la base de vectores linealmente independientes en los que se descompone la función movimiento vibratorio del material (6).

Para obtener los modos y frecuencias de vibración de un cuerpo es necesario resolver un problema de valores y vectores propios, que físicamente significa que las cargas elásticas están en equilibrio con las cargas de inercia.

Los modos de vibración correspondientes a las frecuencias más bajas son los que absorben la mayoría de la energía, por lo que no se suelen tener en cuenta los modos de frecuencias más altas. La frecuencia menor de vibración se denomina fundamental.

Un cuerpo se mueve cuando se le aplica una carga. Si la carga es cíclica, pero la frecuencia es aproximadamente menor que un tercio de la frecuencia natural de vibración menor, el problema puede ser clasificado como estático.

Sin embargo, si la carga tiene una frecuencia mayor, o varía aleatoriamente, o se aplica en un corto intervalo de tiempo, se requiere realizar un análisis dinámico.

1.2.5. Teoría de la plasticidad

La teoría de la plasticidad recae en los métodos para calcular tensiones y deformaciones en un cuerpo deformado, después de que parte o todo de él ha plastificado.

Es necesario para la teoría de la plasticidad establecer las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad así como determinar experimentalmente las relaciones entre las tensiones y el incremento de las deformaciones.

La mayor dificultad en resolver problemas de plasticidad está en conocer las restricciones del flujo plástico, dado que hay casos en que parte del cuerpo ha plastificado y parte se mantiene todavía elástico, siendo las deformaciones plásticas del orden de las elásticas.

Las ecuaciones de compatibilidad y las relaciones tensión deformación son difíciles de alcanzar y han sido obtenidas muy pocas soluciones para estos problemas.

La relación general entre tensiones y deformaciones deben contener:

- Las relaciones elásticas tensión-deformación.
- Las condiciones de tensión la cual indica cuando comienza el flujo plástico (criterio de fluencia).

- Las relaciones plásticas tensión-deformación o incremento de tensión.

1.2.5.1. Criterios de fluencia

Un criterio de fluencia es una relación matemática entre las componentes del estado de tensión en un punto que se ha de satisfacer para que comience el comportamiento plástico.

Así, en los modelos uniaxiales el comportamiento plástico se inicia cuando la magnitud de la tensión uniaxial σ alcanza el valor σ_y (tensión de fluencia).

Matemáticamente para:

$$\sigma < \sigma_y$$

el comportamiento es elástico y para que exista deformación plástica es preciso que se cumpla:

$$\sigma = \sigma_y \quad (2-1)$$

Una generalización de la expresión (2-1) para el comportamiento tridimensional es asumir una función escalar, definida positiva, de tensiones, la cual se denomina “f”, tal que $f < \sigma_y$ el

comportamiento sea elástico y para $f = \sigma_y$ aparezcan deformaciones plásticas. La función escalar f se conoce normalmente como función de fluencia y en general:

$$f(\sigma_{ij}) = \text{cte.}$$

Simplificando, para materiales isotrópos, f será función de las tensiones principales $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$.

Los criterios de fluencia más utilizados son los de Von Mises, Tresca, Mohr-Coulomb y Drucker-Prager. De los nombrados el criterio de Von Mises se describe a continuación, pues es éste el que utiliza el código de elementos finitos con que se ha desarrollado la presente Tesis.

1.2.5.2. Criterio de Von Mises

Von Mises sugirió en 1913 que un material plastifica cuando el segundo invariante del tensor desviador de tensiones alcanza un cierto valor crítico.

Aplicando la definición del segundo invariante del tensor de tensiones en el espacio de tensiones principales, el criterio de Von Mises es (7):

$$f[(\sigma_1 - \sigma_2)' + (\sigma_2 - \sigma_3)' + (\sigma_3 - \sigma_1)'] = \text{cte.} \quad (2-2)$$

La constante de la ecuación (2-2) se puede determinar con ensayos que producen diversos estados simples de tensión. Es útil relacionar la constante anterior con la tensión a la que comienza la fluencia en ensayo de tracción (σ_y), o de cortante (K).

En tracción simple, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$; mientras que en un ensayo de cortante puro se cumple $\sigma_1 = -\sigma_3 = K$, y $\sigma_2 = 0$, sustituyendo estos valores en (2.2):

$$f[(\sigma_1 - \sigma_2)' + (\sigma_2 - \sigma_3)' + (\sigma_3 - \sigma_1)'] = 2\sigma_y' = 6K' \quad (2-3)$$

Observando (2-3), según el criterio de Von Mises la fluencia se establece cuando $\Sigma(\sigma_i - \sigma_j)^2 = 2\sigma_y^2$, el lugar geométrico de los puntos de inicio de fluencia pueden representarse por un cilindro de radio $R = \sigma_y \sqrt{\frac{2}{3}}$ y de eje OH.

Si el punto que representa el estado tensional se encuentra dentro del cilindro, el comportamiento del material es elástico. La fig. 2.4 presenta la representación geométrica este criterio y permite visualizar de una manera clara la filosofía del método.

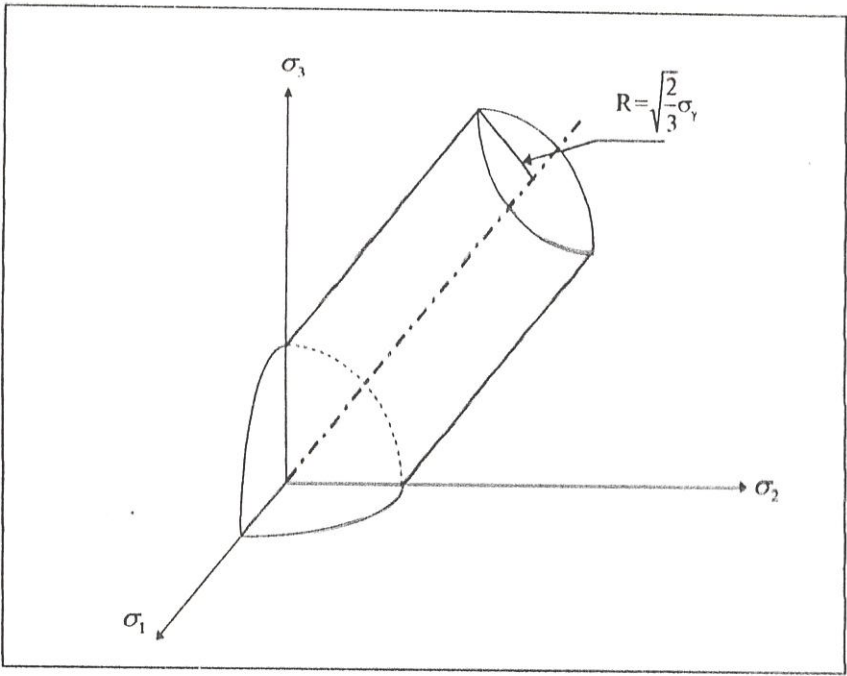


Figura 2.4
Cilindro de Von Mises

1.2.5.3. Flujo plástico. Endurecimiento

En la presente sección se hablará del potencial plástico y el endurecimiento por deformación, para tener una idea de lo que ocurre cuando el material se encuentra dentro de los límites de las deformaciones plásticas.

Drucker consideró el trabajo hecho por una agente externo que aplica lentamente un conjunto de fuerzas sobre un cuerpo y luego las retira lentamente.

El cuerpo tenía previamente un estado de tensiones y deformaciones original. La configuración original puede ser o no ser recuperada después del nuevo ciclo de carga. Drucker propuso la hipótesis de que para todos los conjuntos de tensiones añadidas se realiza un trabajo positivo.

Por tanto se considera un volumen de material en el cual hay un estado homogéneo de tensiones σ_{ij} y deformaciones ϵ_{ij} . Un agente externo aplica entonces pequeñas tracciones que alteran las tensiones en cada punto por $d\sigma_{ij}$ y producen incrementos de deformación $d\epsilon_{ij}$. Se cumplirá el postulado de Drucker si se cumplen las siguientes condiciones:

$$d\sigma_{ij}d\epsilon_{ij} > 0 \text{ durante la carga}$$

$$d\sigma_{ij} (d\epsilon_{ij} - d\epsilon_{ij}^c) \geq 0 \text{ en el ciclo}$$

El postulado de Drucker se conoce también como principio de normalidad: los incrementos de deformación plástica son normales a la superficie de fluencia.

Además, su verificación conlleva ventajas matemáticas importantes, ya que puede demostrarse que los problemas que

genera están bien planteados. Desgraciadamente no todos los materiales (por ejemplo los suelos) lo cumplen.

Se puede definir la plasticidad ideal como aquella en la que la deformación plástica ocurre sin endurecimiento, lo que matemáticamente se expresa por:

$$d\sigma_{ij}d\epsilon_{ij}^p = 0 \quad (2-4)$$

En éste caso, la función de fluencia no depende de ϵ_{ij}^p .

Hay que recordar que la función de fluencia dice simplemente si el material plastifica o no. Una vez que el material plastifica, se requiere información sobre su comportamiento. En otras palabras, se necesita una regla de flujo durante la deformación plástica.

Para un material plástico ideal, la función de fluencia $f(\sigma_{ij})$ es función sólo de las tensiones σ_{ij} y no de las deformaciones plásticas ϵ_{ij}^p . Debido a esto, cualquier cambio en las tensiones durante el flujo plástico debe satisfacer la relación:

$$df = \frac{\delta f}{\delta \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = 0 \quad (2-5)$$

Por lo tanto, una comparación de (2-4) y (2-5), lleva a:

$$d\epsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\delta f}{\delta \sigma_{ij}} \quad (2-6)$$

donde λ es un parámetro de endurecimiento que en general depende de la historia de deformación del material. La ecuación (2-6) se puede escribir en términos de la velocidad de deformación:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{1}{\mu} \frac{\delta f}{\delta \sigma_{ij}} \quad (2-7)$$

En (2-7) μ tiene el significado de coeficiente de viscosidad. El signo de μ está condicionado por el hecho de que, en general, el flujo plástico implica disipación de energía mecánica. Esta condición puede ser escrita como:

$$\dot{W} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p > 0 \quad (2-8)$$

La expresión (2-6) da la regla de flujo plástico. Una interpretación geométrica interesante del potencial plástico es la dada por Preger. El criterio de fluencia $f(\sigma_{ij})$ define una superficie en el espacio de tensiones. El vector normal a esta superficie tiene las componentes $\delta f / \delta \sigma_{ij}$. La ecuación (2-7) implica que el vector velocidad de deformación plástica $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ es normal a la superficie f en el espacio tensional. Esto es lo que

anteriormente se describió como principio de normalidad o postulado de Drucker. También se expresa diciendo que el potencial plástico es el adecuado. En efecto, si llamamos potencial plástico g a la superficie normal a los incrementos de la deformación plástica, el postulado de Drucker se cumple si y sólo si $f \equiv g$.

El tratamiento del endurecimiento puede hacerse de diversas formas. Lo más sencillo es considerar que existe una relación entre el parámetro λ y la deformación plástica acumulada. Dicha relación se obtiene a partir de la curva tensión-deformación.

Tomando como ejemplo un material que cumple el criterio de fluencia de Von Mises, se observará durante el endurecimiento un aumento del radio de la superficie de fluencia con la deformación plástica. Mientras el estado tensional permanezca en la superficie de fluencia, serán aplicables las ecuaciones de plasticidad; en el camino de descarga, el medio se comportará elásticamente.

El endurecimiento así descrito se llama endurecimiento isótropo. Otro tipo de endurecimiento importante, es el cinemático. Este corresponde a la hipótesis

de que, en lugar de aumentar su radio, el eje de la superficie de fluencia se desplaza con la deformación.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

2.1. Introducción

La cápsula se verá sometida a distintas operaciones de manejo y transporte dentro de las instalaciones de superficie del almacenamiento. Estas operaciones consisten básicamente en la recepción y almacenamiento de las cápsulas vacías, el encapsulado del combustible gastado y finalmente su ubicación en las galerías de almacenamiento. Dentro de los accidentes posibles que han sido previstos, se encuentra el de la caída de la cápsula sobre un punzón.

El problema planteado en la presente Tesis es la caída libre, desde un metro de altura, de una cápsula genérica de almacenamiento de residuos radiactivos sobre

un punzón metálico. Se supone que la cápsula cae con un movimiento de traslación pura y con su eje longitudinal situado horizontalmente. El impacto se produce en el centro de la cápsula.

Se pretende conocer las consecuencias del impacto de la cápsula con el punzón en estas condiciones, es decir, saber cuál es la magnitud de las deformaciones permanentes en el lugar donde se produce el impacto.

Con los resultados obtenidos, se tendrán más elementos de juicio para tomar decisiones acerca de los materiales y dimensiones definitivas de la cápsula, así como determinar si es posible o no su reutilización después de un accidente como el aquí estudiado.

2.2. Geometría

Se trata de una cápsula cilíndrica, con fondo y tapa planos. Las uniones se realizan por soldadura, por lo tanto la cápsula queda sin ninguna discontinuidad en su estructura.

El esquema de la cápsula se muestra en la Fig. 2.1 y las dimensiones que la caracterizan aparecen en la Tabla I.

El punzón es una barra vertical de sección cuadrada y 15 cm de lado, tal como puede verse en la Fig. 2-2.

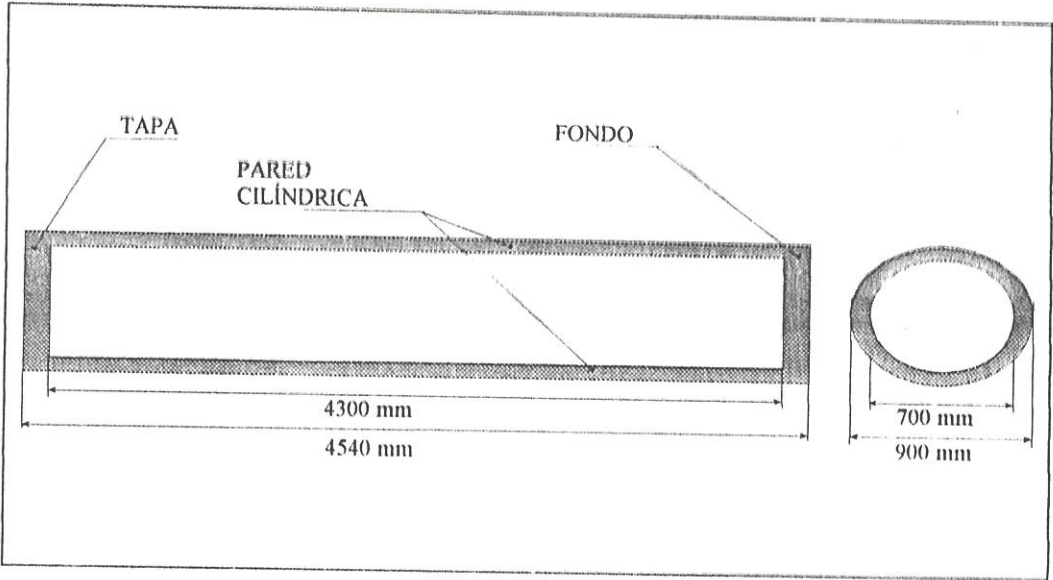


Fig. 2.1

Cápsula de almacenamiento de Residuos Radiactivos.

MEDIDA	DIMENSIÓN
Diámetro exterior	900 mm.
Diámetro interior	700 mm
Longitud exterior	4540 mm
Espesor del fondo	120 mm
Masa de la cápsula vacía	9690 kg

Tabla I

Dimensiones de la Cápsula

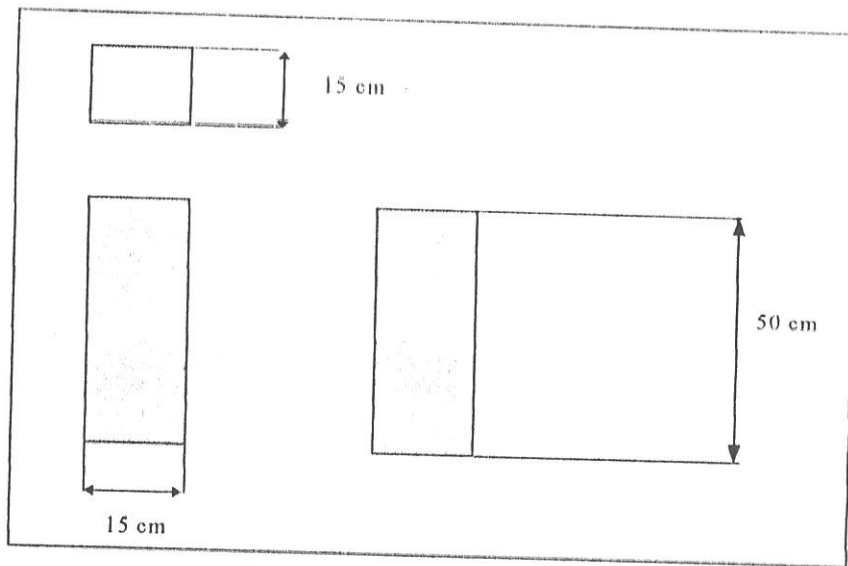


Fig. 2.2

Dimensiones del punzón.

2.3. Materiales

Para el material que conforma la cápsula, incluida la tapa, se ha tomado uno genérico: se trata de un acero al carbono sin alear, laminado en caliente.

Las características con que se ha modelizado el material se encuentran especificadas en la sección 4.3.

2.4. Criterios de Aceptabilidad

El análisis mostrará hasta qué punto puede ser reutilizada la cápsula después de un accidente de este tipo, para ello resulta necesario conocer cuanto se ha deformado permanentemente en el impacto. Se aceptará, puramente a efectos de

la presente Tesis, que la cápsula puede volver a ser utilizada si cumple con las siguientes condiciones:

- a) Las deformaciones plásticas superiores al 2% no llegan a extenderse sobre el espesor completo de la pared de la cápsula, lo que permite mantener la estanqueidad.
- b) Las deformaciones plásticas máximas no exceden el 20%, a fin de garantizar la integridad estructural.
- c) Para permitir realizar las operaciones dentro del AGP sin complicaciones, conviene que las distorsiones de las dimensiones sean menores a 0,5 cm en la cara externa y a 0,1 cm en la interna.

Es preciso aclarar que estos criterios ingenieriles han sido preparados para la presente Tesis académica y no necesariamente son los criterios industriales definitivos que adopte ENRESA.

III. METODOLOGÍA

3.1. Método de los Elementos Finitos

3.1.1. Introducción

El método de elementos finitos es una manera de obtener una solución numérica a un problema físico.

El método fue desarrollado más por ingenieros utilizando intuiciones físicas que por matemáticos utilizando métodos abstractos.

Inicialmente fue aplicado a análisis de problemas de análisis de tensiones y posteriormente ha sido dirigido a muchos otros tipos de problemas.

La comprensión del método se mejora administrando una definición poco sofisticada del mismo.

El método consiste en dividir una estructura en elementos y describir el comportamiento mecánico de cada elemento de una manera simple; los elementos se conectan entre sí mediante puntos comunes denominados nodos.

En el análisis de tensiones se plantean las ecuaciones de equilibrio de los nodos; cada elemento que rodea a un nodo contribuirá una fuerza a estas ecuaciones.

Este proceso da un sistema de ecuaciones algebraicas compuesto de cientos o miles de tales ecuaciones, dependiendo del número de elementos en que se divide la estructura. Para la resolución de tales sistemas de ecuaciones, el uso de una computadora es claramente obligatorio.

El método de elementos finitos es un procedimiento general de discretización de problemas continuos planteados por expresiones definidas matemáticamente.

El presente método ha sido desarrollado en el siglo XX a partir de postulados matemáticos conocidos desde mucho antes. Por ejemplo, en la

mecánica de sólidos se demostró a comienzos de la década de los 40 que pueden obtenerse soluciones razonablemente buenas de un problema continuo, sustituyendo pequeñas porciones del continuo por una distribución de barras elásticas simples.

Más tarde fue demostrado que se pueden sustituir las propiedades del continuo de un modo más discreto, y no menos intuitivo, suponiendo que las pequeñas porciones del mismo, o elementos, se comporta de una forma simplificada.

La teoría del método de elementos finitos en la resolución de ecuaciones incluye manipulaciones de matrices, integraciones numéricas, y otros procedimientos llevados a cabo por programas comerciales.

A continuación se aporta una revisión superficial de los pasos matemáticos de que consta el método, cuyo desarrollo completo se puede ver en la bibliografía referenciada (8).

3.1.2. El proceso general

Una vez discretizado un sistema, su resolución sigue un patrón general que puede adaptarse universalmente a muchos tipos de problemas. Se mostrarán ahora los procedimientos aplicables para resolver dichos sistemas discretos.

La existencia de una única manera de abordar los problemas discretos lleva a precisar una definición del método de elementos finitos como un procedimiento de aproximación de problemas continuos:

- a) el continuo se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros y;
- b) la solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos sigue precisamente las mismas reglas de un problema discreto tipo.

A modo de ejemplo, consideremos un elemento "1" de tres nodos, sometido a un sistema de fuerzas.

En forma matricial, las fuerzas que actúan en los nodos serían:

$$q^1 = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ q_3^1 \end{Bmatrix}; \quad q_i^1 = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \end{Bmatrix}; \text{ etc.} \quad (3-1)$$

y para los correspondientes desplazamientos nodales:

$$a^1 = \begin{Bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ a_3^1 \end{Bmatrix}; \quad a_i^1 = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}; \text{ etc.} \quad (3-2)$$

Las fuerzas y los correspondientes desplazamientos se definen mediante las componentes apropiadas (U, V, u, v) en un sistema corriente de coordenadas; si suponemos que el elemento tiene un comportamiento elástico lineal, la relación característica será de la forma:

$$q^I = K^I a^I + f_p^I + f_{v_0}^I \quad (3-3)$$

en donde f_p^I representa las fuerzas necesarias para equilibrar cargas distribuidas externas que actúan sobre el elemento, y $f_{v_0}^I$ las fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier deformación inicial. El primer término representa las fuerzas inducidas por los desplazamientos nodales y la matriz K^I se conoce como matriz de rigidez del elemento "I", definiendo tensiones en cualquier punto del elemento:

$$\sigma^I = S^I a^I + \sigma_p^I + \sigma_{v_0}^I \quad (3-4)$$

donde la matriz S^I como matriz de tensiones del elemento, el segundo y tercer término son las tensiones originadas por las cargas distribuidas que actúan sobre el elemento y las tensiones iniciales respectivamente. Para una estructura tridimensional rígidamente articulada, el número de componentes por nodo sería de seis, porque al considerarse rígidos los puntos de enlace tendrán tres componentes de fuerza, y tres de desplazamiento; por lo tanto tendríamos para un elemento e :

$$q^e = \begin{Bmatrix} q_1^e \\ q_2^e \\ \vdots \\ q_m^e \end{Bmatrix} \quad y \quad a^e = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{Bmatrix} \quad (3-5)$$

La matriz de rigidez global para un elemento e será:

$$K^e = \begin{bmatrix} K_{ii}^e & K_{ij}^e & \cdot & \cdot & K_{im}^e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{mi}^e & \cdot & \cdot & \cdot & K_{mm}^e \end{bmatrix}$$

donde K_{ij}^e , son submatrices cuadradas de dimensiones $l \times l$, donde l es el número de componentes de fuerza a considerar en los nodos.

Para obtener la solución completa se han de satisfacer:

- a) compatibilidad en los desplazamientos, y
- b) equilibrio.

Todos los sistemas de desplazamientos nodales:

$$a = \begin{Bmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{Bmatrix} \quad (3-6)$$

representan ahora a toda la estructura y donde participan todos los elementos, que satisfacen automáticamente la primera condición.

Para satisfacer las condiciones de equilibrio en cada elemento, queda establecer las condiciones de equilibrio en cada nodo; consideremos una estructura sometida a un sistema de fuerzas externas "r" aplicada en los nodos:

$$r = \begin{Bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix} \quad (3-7)$$

El equilibrio en un nodo "i" estaría dado por:

$$r_i = \sum_{e=1}^m q_i^e = q_i^1 + q_i^2 + \dots \quad (3-8)$$

donde

$$q_i^e = K^e a_i^e + f_p^d + f_{e_0}^e \quad (3-9)$$

El término q_i^e es la fuerza que el elemento "e" aporta al nodo "i". Es claro que las fuerzas no nulas serán las causadas por los elementos que contengan al nodo "i".

Haciendo las operaciones algebraicas necesarias se obtiene:

$$r_i = \left(\sum_{e=1}^m K^e \right) a_1 + \left(\sum_{e=1}^m K^e \right) a_2 + \dots + f^e \quad (3-10)$$

donde: $f^e = f_p^e + f_{c_0}^e$

La sumatoria solo afecta a los elementos que contengan al nodo i.

Reuniendo todas esas ecuaciones tenemos:

$$Ka = r - f \quad (3-11)$$

donde las matrices son:

$$K_{im} = \sum_{e=1}^m K_{im}^e, \quad f_i = \sum_{e=1}^m f_i^e, \quad r = \sum_{e=1}^m q_i^e \quad (3-12)$$

donde los sumatorios se extienden a todos los elementos. La expresión (3-12) proporciona el método de obtención de las matrices globales, que al sustituirlas en (3-11), proporcionan el sistema final acoplado.

Es obvio que existirían infinitas soluciones para un sistema de fuerzas dado, en el caso de que la estructura tenga movimientos de sólido rígido, puesto que los desplazamientos no pueden quedar unívocamente determinados por estas fuerzas.

Por lo tanto, es necesario fijar un número mínimo de componentes de desplazamientos para impedir que la estructura se mueva como un sólido

rígido; es aquí donde interviene las condiciones de contorno. Una vez establecidos estos desplazamientos, tras la fase de ensamblaje, se podrá obtener la solución prescindiendo de las filas y las columnas correspondientes a dichos desplazamientos dentro de las distintas matrices.

La forma del sistema global de ecuaciones una vez ensambladas quedaría:

$$\begin{aligned} K_{11}a_1 + K_{12}a_2 + \dots &= r_1 - f_1 \\ K_{21}a_1 + K_{22}a_2 + \dots &= r_2 - f_2 \\ \dots & \\ \dots & \end{aligned}$$

El proceso general, por lo tanto, se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1) Determinar propiedades de cada elemento a partir de la geometría del problema, de los datos de carga y de la naturaleza del material. Montar la matriz de rigidez de cada elemento.
- 2) Con las ecuaciones se ensambla por simple adición de todos los números en el lugar correspondiente en la matriz global.
- 3) Introducir las condiciones de contorno.
- 4) Resolución del sistema de ecuaciones, para obtener los desplazamientos.

- 5) La sustitución para obtener tensiones o las cantidades de salida cuyo conocimiento se desee.

3.1.3. Sistema discreto general

En un sistema discreto general, ya sea estructural o de cualquier otra clase, se sigue el mismo procedimiento.

Se define un conjunto de parámetros discretos a_i de manera que describan el comportamiento de cada elemento e y el sistema en su conjunto. Les llamamos parámetros del sistema.

Se expresa para cada elemento, un conjunto de cantidades q_i^e en función de los parámetros del sistema a_i . Esta relación puede lineal o no lineal:

$$q_i^e = q_i^e(a) \quad (3-13)$$

En el caso que la relación sea lineal:

$$q_i^e = K_{i1}^e a_1 + K_{i2}^e a_2 + \dots + f_i^e \quad (3-14)$$

Las ecuaciones del sistema se obtienen mediante simple adición

$$r_i = \sum_{e=1}^m q_i^e \quad (3-15)$$

donde r_i son cantidades del sistema (a menudo se les asigna el valor de cero).

Hemos visto un procedimiento para obtener soluciones aproximadas a problemas lineales. En ingeniería y en física surgen otros muchos problemas de medios continuos que generalmente vienen expresados por las adecuadas ecuaciones diferenciales y las condiciones de contorno que se imponen a la función o funciones incógnita. Vamos a mostrar que todos los problemas de este tipo pueden estudiarse por el método de elementos finitos.

El problema a resolver, expresado en la forma más general, es determinar una función desconocida u tal que satisfaga un determinado sistemas de ecuaciones diferenciales presentado por:

$$A(u) = \begin{Bmatrix} A_1(u) \\ A_2(u) \\ \vdots \end{Bmatrix} = 0 \quad (3-16)$$

en un dominio Ω , ya sea volumen, superficie, etc., junto con ciertas condiciones de contorno:

$$B(u) = \begin{Bmatrix} B_1(u) \\ B_2(u) \\ \vdots \end{Bmatrix} = 0 \quad (3-17)$$

en los contornos Γ del dominio.

La función buscada puede ser un escalar o un vector de varias componentes. Del mismo modo, la ecuación diferencial puede ser una sola o un sistema de ecuaciones.

Todo cálculo por elementos finitos, busca una expresión aproximada de la solución de la forma:

$$u \cong \hat{u} = \sum_i^r N_i a_i = N a \quad (3-18)$$

En donde N_i son funciones de forma expresadas en función de variables independientes (tales como las coordenadas x, y , etc.) y donde todos o algunos de los parámetros a_i son incógnitas.

Las funciones de forma se definen localmente para cada subdominio o elemento, y se recuperan las propiedades de los sistemas discretos si las ecuaciones se expresan en forma integral.

Teniendo esto presente trataremos de expresar la ecuación de la cual hayan de obtenerse los parámetros desconocidos a_i , en una forma integral como:

$$\int_{\Omega} G_j(\hat{u}) d\Omega + \int_{\Gamma} g_j(\hat{u}) d\Gamma = 0, \quad (j = 1 - n) \quad (3-19)$$

donde G_j y g_j representan funciones y operadores conocidos.

Estas formas integrales nos permitirán obtener la aproximación, elemento por elemento para luego proceder al ensamblaje mediante los procedimientos para los sistemas discretos tipo ya que, si las funciones G_j y g_j son integrables tendremos:

$$\int_{\Omega} G_j d\Omega + \int_{\Gamma} g_j d\Gamma = \sum_{e=1}^m \left[\int_{\Omega^e} G_j d\Omega + \int_{\Gamma^e} g_j d\Gamma \right] \quad (3-20)$$

donde Ω^e es el dominio ocupado por cada elemento, y cada Γ^e la parte correspondiente de contorno del mismo.

Si las ecuaciones diferenciales son lineales, o sea, si podemos escribir 3-16 y 3-17 como:

$$\begin{aligned} A(u) &= Lu + p = 0 \quad \text{en } \Omega \\ B(u) &= Mu + t = 0 \quad \text{en } \Gamma \end{aligned} \quad (3-21)$$

el sistema de ecuaciones de la aproximación 3.19 resultará en un sistema de ecuaciones lineales de la forma:

$$Ka + f = 0$$

siendo:

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^m K_{ij}^e, \quad f_i = \sum_{e=1}^m f_i^e$$

Mas adelante se estudiará el caso de ecuaciones no lineales, pero antes se considerará aquí la discretización de casos generales.

Se dispone de dos procedimientos distintos para obtener la aproximación de las formas integrales. El primero es el método de los residuos ponderados y el segundo consiste en determinar funciones variacionales y buscar sus valores estacionarios. Se procederá a dar una visión del primero de los nombrados.

3.1.4. Método de residuos ponderados

Como el sistema de ecuaciones diferenciales 3.18 tiene que ser cero en todos los puntos del dominio Ω , se deduce que:

$$\int v^T \Lambda(u) d\Omega \equiv \int (v_1 \Lambda_1(u) + v_2 \Lambda_2(u) + \dots) d\Omega \equiv 0$$

donde $v = [v_1 v_2 \dots]^T$ es un conjunto de funciones arbitrarias de número igual al de ecuaciones (o componentes de u) del problema. Puede afirmarse que si 3-21 se cumple para cualquier v , las ecuaciones diferenciales 3-18 deberán satisfacerse en todos los puntos del dominio.

Si han de satisfacerse simultáneamente las condiciones de contorno 3-17 ello puede asegurarse eligiendo adecuadamente la función \hat{u} o bien imponer que:

$$\int v^T B(u) d\Gamma \equiv \int (v_1 B_1(u) + v_2 B_2(u) + \dots) d\Gamma \equiv 0 \quad (3-22)$$

para cualquier conjunto de funciones de v .

Que la expresión integral:

$$\int_{\Omega} v^T A(u) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{v}^T B(u) d\Gamma = 0 \quad (3-23)$$

se satisfaga para todos los v y \bar{v} , equivale a que se satisfagan las ecuaciones diferenciales 3-17 y sus condiciones de contorno 3-18.

Claro está que hemos supuesto implícitamente que es posible calcular las integrales que aparecen en la ecuaciones 3-23. Esto nos restringe las posibles familias a las que deben pertenecer las funciones de v y u . En general se tratará de evitar funciones que hagan infinito algún término del integrando. Se limita así, en la ecuación 3-23, la elección de v y \bar{v} a funciones finitas unívocas, sin restringir la validez de las expresiones anteriores.

Las restricciones que han de imponerse a las funciones u_1 , u_2 , etc. dependen del orden de las derivadas que aparecen en las ecuaciones $A(u)$ y $B(u)$. Podemos entonces concluir que si en algún término de A o B aparecen derivadas de orden n , la función tendrá que ser tal que sus derivadas sean continuas hasta la de orden $(n-1)$.

En ocasiones se puede efectuar una integración por partes en la ecuación 3-23 y sustituirla por una expresión alternativa de la forma:

$$\int_{\Omega} C(v)^T D(u) d\Omega + \int_{\Gamma} E(\bar{v})^T F(u) d\Gamma = 0 \quad (3-24)$$

Ahora las derivadas que aparecen en los operadores C, D, E y F son de menor orden que las que aparecen en A y B. En este caso se necesita una continuidad de menor orden al elegir las funciones u al precio de mayor orden de continuidad para v y \bar{v} .

La expresión 3-24 es ahora mas permisiva que las 3-17, 3-18 o 3-23 que originalmente expresaban el problema y por ello se llama *forma débil* de dichas ecuaciones. Es algo sorprendente sin embargo el hecho que a menudo dicha forma sea físicamente más realista que la ecuación diferencial original.

Si para expresar la función incógnita u tomamos una expresión aproximada como la 3-18, o sea, hacemos:

$$u \approx \hat{u} = \sum N_i a_i = N a$$

será evidentemente imposible que en el caso más general se satisfagan a la vez la ecuación diferencial y las condiciones de contorno. Las expresiones integrales 3-23 y 3-24 permiten efectuar una aproximación si,

en lugar de cualquier función v ponemos un conjunto finito de funciones preestablecidas,

$$v = w_j, \quad \bar{v} = \bar{w}_j \quad j = (1, \dots, n)$$

donde n es el número de parámetros incógnita a_i que entran en el problema. Ahora entonces tendremos el sistema:

$$\int_{\Omega} w_j A(Na) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{w}_j B(Na) d\Gamma = 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3-25)$$

o bien

$$\int_{\Omega} C(w_j)^T D(Na) d\Omega + \int_{\Gamma} E(\bar{w}_j)^T F(Na) d\Gamma = 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3-26)$$

Evidentemente a efectos de ponderación se puede utilizar casi cualquier conjunto de funciones independientes w_j , dando un nombre diferente a cada proceso de acuerdo con la función escogida.

Así, las funciones usadas mas corrientemente son:

a) Colocación por puntos

$$w_j = \delta_j \text{ donde } \delta_j \text{ es tal que para } x \neq x_j, y \neq y_j, w_j = 0 \text{ pero } \int_{\Omega} w_j d\Omega = 1$$

b) Colocación por subdominios

$$w_j = 1 \text{ en } \Omega_j \text{ y cero en cualquier otro punto.}$$

c) Método de Galerkin

$w_j = N_j$. Consiste simplemente en utilizar para la ponderación las funciones de forma originales. Como está demostrado, este método permite con frecuencia obtener matrices simétricas, por lo que es el que mas comúnmente se utiliza en la discretización de problemas continuos.

Hasta ahora hemos visto la manera de discretizar problemas continuos sin preocuparnos que las funciones inmersas en el análisis sean lineales o no.

Al realizar análisis con problemas lineales por lo general se tiene un sistema de la forma:

$$Ka + f = 0$$

Pero existen muchos problemas de importancia en los que no se preserva tal linealidad, y es de interés ampliar los procedimientos numéricos de manera que abarquen también dichos problemas.

Tal es el caso de todos los problemas de mecánica de sólidos, en los que fenómenos tales como plasticidad, fluencia o cualquier otra relación de comportamiento complicada, sustituyen a las hipótesis sencillas de la elasticidad lineal. Por regla general, este tipo de problemas se puede tratar simplemente sin necesidad de volverlos a formular desde el

principio (o sea, sin que tengan que volver a escribirse los postulados de discretización). Cuando pueda llegarse a una solución del problema lineal, siguiendo un proceso iterativo cualquiera y de tal forma que al final del mismo se ajusten las constantes del material de manera que se satisfaga la nueva ley de comportamiento, se habrá obtenido la solución del problema no lineal. Una expresión que describa un fenómeno no lineal puede ser de la forma:

$$\Psi(a) \equiv P(a) + f \equiv K(a).a + f = 0 \quad (3-27)$$

La expresión explícita más adecuada depende generalmente del tipo de problemas en cuestión y del método de discretización. Mediante manipulaciones matemáticas se la llevará a la forma lineal:

$$Ka + f = r$$

Para llevar a cabo esto se hace uso de cualquiera de los siguientes procedimientos:

- Iteración directa
- Newton - Raphson
- Newton - Raphson Modificado

Estos tres métodos resultan económicos en muchos de los casos, pero no garantizan convergencia para cualquier problema no lineal.

- **Métodos Incrementales.**- Hace uso de que se puede conocer la matriz incógnita \mathbf{a} cuando el término \mathbf{f} que afecte a las cargas en 4-27 sea cero. Si \mathbf{f} son fuerzas reales y \mathbf{a} representa el desplazamiento de la estructura, ambos son generalmente nulos al comienzo del problema. Por lo tanto es conveniente estudiar el comportamiento de \mathbf{a} al incrementar \mathbf{f} . Procediendo así, si los incrementos de \mathbf{f} que se escogen son suficientemente pequeños, puede garantizarse que el método converge. Adicionalmente los resultados intermedios proporcionarán información útil del comportamiento de la estructura para ese ciclo de cargas. Vale la pena indicar que este método puede complementarse con diversas técnicas que aceleren su convergencia.

La solución numérica de un sistema de ecuaciones no lineales presenta tantas alternativas que cuando ha de elegirse una la cuestión que surge de inmediato es saber cual es la mejor.

Se recomienda hacer uso de los métodos incrementales, pues como ya se ha escrito, puede alcanzar la convergencia mediante incrementos que sean suficientemente pequeños. Además en muchos casos encontramos que en ciertos problemas no se pueden escribir las ecuaciones 3-27 en forma explícita (como en la plasticidad). En tales casos, este procedimiento permite llevar a cabo la integración.

En resumen se ha revisado cómo trabaja el método de elementos finitos; cómo se discretizan las funciones por medio de los residuos ponderados y se llega a una forma integral débil; además se ha visto la forma en que se acoplan las ecuaciones, se utilizan las condiciones de contorno y encuentro las soluciones deseadas.

Ahora se procede a estudiar también el caso de problemas que evolucionan con el tiempo, el caso de problemas dinámicos.

El método de los elementos finitos presenta dos alternativas para recorrer el eje tiempo, las integraciones implícita y explícita.

En la integración implícita, es necesario tratar el problema globalmente, o sea que se resuelve para cada intervalo de tiempo todo el sistema de ecuaciones acoplado; a cambio los intervalos pueden ser largos.

En la integración explícita, se resuelven independientemente las ecuaciones de cada nodo para cada intervalo de tiempo, con lo que desaparece la necesidad de resolver las ecuaciones acopladas; a cambio, los intervalos de integración son muy cortos.

A continuación se presentan de forma más detallada estos procedimientos y se discuten las razones para utilizar la integración explícita en la presente Tesis en preferencia a la implícita.

3.2. Integración Explícita

3.2.1. Introducción

El método de elementos finitos nos presenta dos alternativas para integrar en el tiempo las ecuaciones del problema: integrando implícita o explícitamente. La elección del método depende de las características del problema.

La diferencia fundamental entre ambas es que la integración explícita es sólo condicionalmente estable; esto no es así con la forma implícita, que puede ser incondicionalmente estable, es decir, estable independientemente de lo largo que sea el intervalo de integración.

La desventaja de la integración implícita es que deben resolverse de manera acoplada todas las ecuaciones del modelo. La ventaja es que se puede lograr una integración estable independientemente del tamaño del paso de integración. La ventaja resulta menos interesante cuando, en cualquier caso, el problema requiere una definición detallada en el tiempo, ya que esa definición de por sí requiere la adopción de un paso de integración pequeño. El interés también disminuye cuando el problema es corto ya que en estos casos resulta poco oneroso el tener intervalos de integración cortos. Para estos casos, como el del presente impacto, lo apropiado sería usar el método explícito.

En éste, el desacoplamiento de las ecuaciones permite tratar sin dificultad fuertes no-linealidades, tanto constitutivas como geométricas. La desventaja derivada de un intervalo de integración corto es, como se decía, sólo de índole menor al ser el problema de corta duración.

Hay problemas dinámicos de muchos tipos: en unos, las fuerzas aplicadas varían con el tiempo; en otros, los materiales tienen un comportamiento reológico, sensible al tiempo; finalmente hay casos en que las fuerzas de inercia no son despreciables frente a las demás. Este último es el caso de la presente Tesis, en que el carácter dinámico del problema viene impuesto por el hecho de que son las fuerzas de inercia las que determinan el problema.

La idea básica del método explícito, que es el que aquí se usará, radica en que se resuelven las ecuaciones en cada nodo independiente de los demás; eso es posible porque el intervalo de integración es tan corto que lo que le sucede a un nodo no tiene tiempo de afectar a nodos contiguos.

3.2.2 Desarrollo

Una vez analizado el problema físicamente, se discretiza espacialmente y se incorporan las condiciones iniciales y de contorno. La restricción ya mencionada en el método explícito es que el paso de integración debe ser tan corto que lo que ocurre en un nodo no pueda ser comunicado en un

intervalo de tiempo a otro, esto es, un tiempo en el que una onda no llegue de un nodo a otro de manera que las ecuaciones de cada nodo se mantengan desacopladas.

La principal ventaja es que se tienen expresiones explícitas para cada nodo, lo que permite un manejo matemático muy sencillo comparado con el método implícito.

Para un programador del método esto permite concentrar el esfuerzo en resolver el problema físico, más bien que el matemático.

La desventaja del método se presenta cuando el fenómeno es de duración mucho mayor que el intervalo de integración crítico, ya que esto requeriría un número muy elevado de pasos de integración.

Como se ha dicho, el método explícito es solo condicionalmente estable. Matemáticamente, el requisito consiste en satisfacer la condición de Courant.

Esta condición exige que el intervalo de integración sea menor que el periodo propio más pequeño del sistema, periodo que depende de las propiedades mecánicas del material y de las dimensiones del elemento.

En primera aproximación, el intervalo de integración debe estar limitado por:

$$\Delta t_{cr} < \min_{\text{elem}} \left\{ \frac{l}{c} \right\}$$

siendo: l la mínima semidiagonal del elemento, c la velocidad de propagación de las ondas de compresión.

En cada ciclo de integración, el cálculo comienza obteniendo las fuerzas que actúan en cada nodo. Para esto se integran los esfuerzos en los elementos que lo rodean y se añaden las fuerzas de masa y otras fuerzas aplicadas en los nodos; con este valor dividido por la masa del nodo se puede calcular su aceleración.

Al conocer el valor de la aceleración, integrándola es posible encontrar la velocidad y los desplazamientos nodales, lo que se hace por medio de la integración explícita ya comentada.

Los desplazamientos relativos de los nodos en cada elemento dan lugar a deformaciones del elemento.

Estas deformaciones, a través de las ecuaciones constitutivas, generan esfuerzos en cada elemento del modelo, lo que permite comenzar el ciclo de integración.

A continuación se describen los pasos que sigue el método:

- Para encontrar aceleraciones:

$$\ddot{a}_{n+1} = \frac{F}{M} = \frac{\int \sigma dA}{M}$$

- Luego, para encontrar velocidades y desplazamientos:

$$\dot{a}_{n+1/2} = \dot{a}_{n-1/2} + \Delta \bar{t}_n \ddot{a}_n$$

$$a_{n+1} = a_n + \Delta t_n \dot{a}_{n+1/2}$$

con

$$\Delta \bar{t}_n = \frac{1}{2}(\Delta t_n + \Delta t_{n-1})$$

Todos estos cálculos se repiten, avanzando cada vez el tiempo en un intervalo de integración, hasta que se cumpla un tiempo acumulado preestablecido para que culmine el fenómeno estudiado. Los casos de impacto, como el de la presente Tesis, se estudian mejor por medio de los métodos explícitos, ya que requieren un número de intervalos de integración moderado debido a la poca duración del fenómeno a estudiar.

3.3. El código ABAQUS

3.3.1. Aspectos básicos

El código Abaqus es un programa de elementos finitos de propósito general, desarrollado por Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. (9). Junto con

el programa se incluyen un manual de verificación en el cual se adjuntan más de 3000 test básicos que proporcionan la validación de los análisis que el programa puede realizar.

El soporte informático bajo el cual se ha ejecutado el código ha sido una estación de trabajo Silicon Graphics Computer Systems modelo O2. La descripción técnica de la estación se puede consultar en la bibliografía referenciada (10).

El código Abaqus en su conjunto es un programa de simulación numérica de problemas físicos por el método de los elementos finitos, el cual incluye varios módulos. Cada módulo está diseñado para resolver una serie específica de problemas y entre ellos:

- Abaqus/Standard; es el módulo básico de Abaqus, en esencia, es un programa de elementos finitos de propósito general, capaz de resolver todo tipo de análisis (estático, pandeo, vibración, dinámico implícito, etc), excepto los análisis dinámicos no lineales que requieran una de integración explícita.
- Abaqus/Explicit; es el módulo cuya resolución por elementos finitos se realiza mediante integración explícita. Dentro de los análisis que puede realizar están los análisis dinámicos, transitorios, no lineales de sólidos y estructuras.

- Abaqus/Aqua; es una extensión de Abaqus/Standard, que añade la capacidad de admitir cargas ondulatorias, cálculos de flotabilidad, etc., lo que facilita la modelización de problemas de sistemas de cableado o entubado en medios acuáticos.
- Abaqus//USA; es también una extensión de Abaqus/Standard que permite análisis de choques de estructuras bajo el agua dentro del programa USA-Lockheed.
- Abaqus/Post; que permite el tratamiento, obtención y visualización de los resultados producidos por el código.
- Abaqus/Pre; es la herramienta de Abaqus para la generación del mallado y geometría de los modelos.

Los análisis realizados en la presente Tesis han utilizado los módulos Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit y Abaqus/Post.

En general, el manejo de un código de elementos finitos como Abaqus, sigue una secuencia prácticamente igual para cualquier tipo de problema que se desee resolver. Los pasos básicos ha seguir hasta llegar a la obtención de los resultados son los que se enuncian a continuación:

- a) Planteamiento del problema real físico: implica la identificación y estudio del comportamiento físico del problema que se trata de

simular, posibles simetrías, ecuaciones constitutivas que rigen el fenómeno, estudio y posible acotación de las variables que actúan, etc.

- b) Entrada de datos: consiste en la implementación informática del problema físico ya planteado, de acuerdo con la sintaxis del programa. Engloba la definición del modelo de elementos finitos y de la evolución del comportamiento del mismo.
- c) Preproceso de datos: en el soporte informático se ejecuta el programa de manera que realiza los cálculos necesarios para verificar si los datos de entrada y tipo de análisis a realizar son consistentes con el algoritmo del programa. En caso negativo se retornaría al punto a) si el error es de planteamiento, o al b) si simplemente se trata de un error de sintaxis.
- d) Proceso y generación de archivos de resultados: es el proceso principal, en el que se ejecuta el algoritmo que resuelve los sistemas de ecuaciones según el tipo de análisis, restricciones impuestas, etc. mediante el método de los elementos finitos. Como consecuencia de estas operaciones se generan los archivos de resultados.
- e) Postproceso de resultados: en el que a partir de los archivos de resultados se obtienen las tablas, gráficos y figuras necesarias para la

visualización y evaluación de los resultados aportados por el análisis. En consecuencia, se llega a unas conclusiones que, en el caso de ser aceptables, se pueden considerar como definitivos; en caso contrario se debe volver al apartado a), con las modificaciones necesarias para una mayor precisión en unos casos o un planteamiento distinto en otros.

En la Fig. 3.1 se representa en forma de diagrama estos pasos.

3.3.2. Planteamiento del problema real físico

Es la fase previa a utilización del código Abaqus, en la que no es necesario ni el código ni el soporte informático. En ella se evalúa el comportamiento del sistema que se trata de analizar y se desarrolla un modelo de comportamiento desde un punto de vista analítico, que más tarde será implementado en el código. Esto hace que esta parte sea fundamental para conseguir los resultados deseados, ya que un mal planteamiento conduciría a resultados válidos según el método pero desprovistos de significado físico real.

Se trata de plantear el comportamiento mecánico del sistema, para lo cual se hace necesario adoptar una serie de hipótesis e idealizaciones aplicables al comportamiento de los materiales involucrados, de tal manera que los errores que se puedan introducir no lleguen a desvirtuar los resultados.

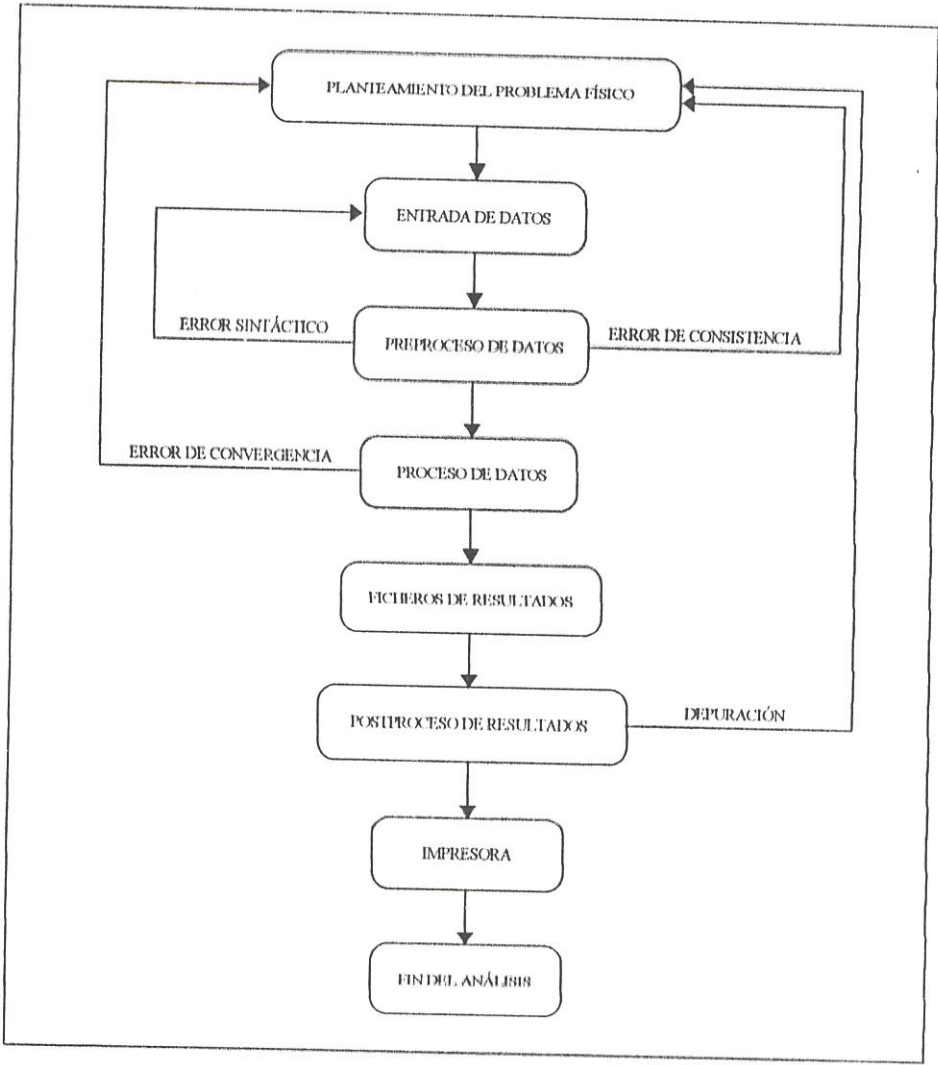


Fig. 3.1

Pasos a seguir para la resolución de un problema mediante Abaqus

Una vez que se conoce el comportamiento del sistema, hay que investigar y documentar los datos de partida del problema.

Esto implica la obtención de las propiedades y parámetros necesarios para la caracterización mecánica del material. Además, es necesario

conocer otro tipo de datos, como pueden ser el estado tensional inicial, deformaciones iniciales, etc.

Conocido el comportamiento y los parámetros que rigen dicho comportamiento, falta por determinar los efectos y alcance que estos tendrán en el espacio y en el tiempo, puesto que el análisis tiene una duración finita, al igual que el modelo geométrico.

La naturaleza del problema nos conduce a elegir e imponer unas determinadas condiciones mecánicas de contorno. En problemas de impacto, a menudo no se conoce a priori la duración del análisis, pero se puede determinar posteriormente examinando la evolución de las variables del problema.

3.3.3. Entrada de datos

Una vez planteado el problema hay que implementarlo, es decir, generar un archivo de entrada de datos o "input" del código. Dicho archivo, básicamente, consta de una serie de tarjetas o comandos de ejecución de instrucciones.

Con estas instrucciones el código identifica la geometría, las propiedades de los materiales, las restricciones impuestas al modelo, las condiciones iniciales, el tipo de análisis que debe realizar, su duración, etc. El archivo

“input” se prepara mediante cualquier editor de textos en código ASCII (UNIX) y se escribe de acuerdo a unas reglas de sintaxis ya establecidas por el propio código.

3.3.3.1. Definición del modelo

En general, para generar la malla de elementos finitos que represente un modelo físico preconcebido, en primer lugar, se realizará una representación en papel del modelo geométrico que se va a introducir en el código. En este boceto se establecerán partiendo de los datos iniciales las dimensiones, planos de simetría, la ubicación de los diferentes materiales, sus propiedades, etc.

También se marcarán unas zonas en las que, según el planteamiento físico del problema se entenderá que son las zonas de mayor interés, cuya evolución debe seguirse con más precisión. Esto servirá para dotarlas de un mallado más fino y por lo tanto poder examinar con más detalle y rigor lo que sucede en las mismas.

En la definición del modelo de elementos finitos para introducirlo en el código, hay que determinar: la geometría, los materiales y las condiciones iniciales.

- i) La geometría. Para definir la geometría es necesario la generación de una malla que sea representativa del objeto a estudiar, y que se realiza primeramente definiendo las coordenadas de los nodos y luego asociando dichos nodos a los elementos. Abaqus tiene una extensa biblioteca de elementos que permiten una capacidad de modelización muy completa.

En la realización de un modelo se puede utilizar cualquier combinación de elementos, utilizando todos ellos integración numérica de modo que permiten una completa generalidad en cuanto al comportamiento de los materiales.

Los elementos pueden estar definidos en una, dos o tres dimensiones según el análisis sea unidimensional, bidimensional y tridimensional respectivamente.

Geométricamente los elementos constan en una dimensión de dos o tres nodos, en el caso bidimensional pueden ser triangulares con tres o seis nodos, rectangulares con cuatro u ocho nodos, y en el caso de tres dimensiones son piramidales de 4 o 10 nodos, prismas triangulares de 6, 15, ó de 15 a 18 nodos o paralelepípedos de 8, 20 nodos o de 21 a 27 nodos.

Una vez seleccionado el tipo de elemento se discretiza espacialmente el modelo que se va a utilizar en el análisis, lo que significa adecuar el tamaño de los elementos a la precisión con la que se quiere llevar a cabo.

ii) En todos los análisis de la presente tesis y en todos los análisis, se han seleccionado elementos sólidos de 8 nodos tipo paralelepípedo. Los nodos se sitúan en los vértices y tienen como variable activa el desplazamiento en las tres direcciones del espacio. En Abaqus estos elementos se representan por la tarjeta C3D8R

iii) Los materiales. El código tiene la posibilidad de asignar propiedades a cada elemento o conjunto de elementos mediante las tarjetas adecuadas según los casos. Para introducir las características de los materiales existen una serie de tarjetas específicas con las que se definen las propiedades intrínsecas de los materiales (densidad, conductividad térmica, etc.), el comportamiento constitutivo del material (térmico, mecánico, etc.).

Todas estas propiedades son susceptibles de variaciones en el tiempo y/o de otras variables (posición, temperatura, etc.).

Así mismo se encuentran disponibles las ecuaciones constitutivas que corresponden a los distintos materiales (metales, hormigón, etc.), así como modelos hiperelásticos de gomas, etc. También se pueden incluir comportamientos anisótropos, dependientes de los datos de los esfuerzos principales, etc. En el caso de que ninguna de las anteriores se ajuste a las necesidades del modelo, el usuario puede diseñar su propio material.

En consecuencia se pueden realizar análisis con hipótesis de comportamiento del material elástico lineal y no lineal, elastoplástico o visco-elastoplástico, incluye además una teoría de fractura para el hormigón y materiales frágiles, etc. Para estos análisis ABAQUS dispone de multitud de opciones para las propiedades de los materiales.

iii) Las condiciones iniciales. Son las que corresponden al modelo en el instante previo a la realización del análisis y que luego varían con el tiempo, esto es, las que corresponden a el tiempo cero. Estas puede que se deriven directamente de las propiedades físico-químicas, mecánicas, térmicas, acústicas, etc. del material como son la tensión de fluencia, saturación, temperatura, etc. o derivadas de su situación en el espacio o

de alguna variable externa que afecte al modelo como son el presión interna, velocidad, etc.

Una vez que se tiene la malla realizada, se agrupan los nodos y/o elementos con las mismas propiedades iniciales y se les asignan dichas propiedades de acuerdo con las tarjetas de Abaqus correspondientes.

Si las condiciones no tiene una tarjeta apropiada para definirla, Abaqus tiene una biblioteca de subrutinas con las cuales se pueden definir las condiciones que se necesiten según el caso.

3.3.3.2. Definición del comportamiento del modelo

Definido el modelo, ahora se trata de establecer que es lo que le va ha suceder. El código es capaz de concatenar diferentes tipos de análisis, esto es, un análisis parte de los resultados obtenidos del anterior dentro de un mismo "input".

Cada análisis, dentro del archivo de entrada de datos, se reconoce con la tarjeta "step", y en cada uno se considera como un análisis independiente, pero que parte de los campos de variables definidos por el inmediatamente anterior. En cada uno de ellos habrá que definir: las condiciones de contorno, las

cargas aplicadas, superficies de contacto, el tipo de análisis y el número de incrementos y duración del análisis.

- 1) Las condiciones de contorno. Son aquéllas que se establecen en las fronteras del modelo bien sean constantes o variables en el tiempo.

Las fronteras del modelo determinan un conjunto de límites geométricos por un lado y en algunos casos funcionales, en el sentido que la función liga variables que afectan el comportamiento del modelo (una fuente puntual, un sumidero, etc.), y que de algún modo restringen al modelo.

- 2) Las cargas aplicadas. Son las fuerzas externas que actúan sobre el modelo y provocan un efecto sobre éste.

En el presente trabajo no existen estas cargas; incluso la fuerza provocada por la gravedad resulta despreciable frente a las fuerzas de inercia generadas en el impacto

- 3) Superficies de Contacto. Están especificadas en esta instrucción las superficies a través de las cuales se desarrollarán interacciones entre diversos cuerpos en el análisis.

4) Tipo de análisis. Los análisis que el código es capaz de realizar incluyen tanto estáticos como dinámicos, lineales y no lineales, combinando problemas de tensiones, térmicos, de flujo, acústicos, consolidación de suelos y otros. Los procedimientos de análisis se pueden mezclar arbitrariamente.

5) Número de incrementos y duración del análisis. El programa tiene la opción de seleccionar automáticamente los incrementos de tiempo según las cargas y sollicitaciones, las propiedades y comportamiento de los materiales, etc. También es posible fijar el incremento según las necesidades del usuario y del tipo de análisis.

Del mismo modo la duración total del análisis se puede fijar por el usuario o se puede indicar que dure hasta que se alcance el estado estacionario. Cuando se utiliza esta última opción hay que dar el error o la distancia a dicho estado.

Dentro del archivo de entrada de datos, hay que incluir una serie de tarjetas con las cuales el programa interpreta que tipo de archivos y que variables de salida debe generar. También dentro de este apartado existe la posibilidad de monitorizar una

variable, de tal manera que según avanza el análisis se conoce su valor en un nodo.

3.3.4. Preproceso de datos

Una vez realizado el archivo de datos y posteriormente introducido en el programa, el código ejecuta un chequeo de los datos. En el chequeo el programa genera un archivo cuya extensión es “.dat” en el que se reflejan los errores y la posible causa de los mismos, además en dicho archivo se encuentran una serie de advertencias en los que el código avisa al usuario de posibles condiciones o propiedades que se encuentran fuera de rango, que no considera como errores para la ejecución del análisis pero que reconoce que pueden ser anómalos.

Este archivo también incluye datos referentes a la malla y al tipo de análisis que se realiza. Entre otros se incluyen: la posición de todos los nodos, las propiedades de los materiales, el centro de masas del modelo, los momentos de inercia del modelo, etc.

3.3.5. Proceso y generación de archivos de resultados

Una vez corregidos los posibles errores y asumir las advertencias generadas en la fase de chequeo de datos, comienza realmente el proceso de los datos o simulación del problema, lo que da paso a la obtención de

una serie de archivos, unos son de control de la evolución y ejecución del análisis y otros son de resultados propiamente dichos. Estos se generan automáticamente dentro del directorio de trabajo del usuario (a no ser que este indique explícitamente que no se generen).

Los archivos se reconocen por su extensión (todos tienen en común el nombre del archivo de entrada de datos) y en lo sucesivo se referirán mediante esta. Se pueden distinguir:

- a) archivo de ejecución, reconocible por la extensión “.com”
- b) archivo de instrucciones de “software”, de extensión “.log”
- c) archivo que refleja el trabajo realizado del análisis, su extensión es “.sta”
- d) archivo de mensajes y evolución del análisis, cuya extensión es “.msg”
- e) archivo de resultados, con una extensión “.res”
- f) archivo de resultados de variables, de extensión “.fil”
- a) Los archivos “.log” y “.com”, son generados por el sistema y no aportan ninguna información al usuario respecto al análisis. El “.com” no es visible en ASCII, con lo cual, sólo indica que se está ejecutando algún análisis. El “.log” visible en ASCII contiene la información de

ejecución del programa, en el que se indica si el chequeo se ha realizado o no, el módulo de Abaqus que se está ejecutando, etc.

- b) El archivo “.sta.”, indica el “status” o lo que se ha realizado del proceso, generando una tabla en la que se puede leer el número del “step”, el número de incrementos realizados, el número de intentos requeridos para hacer el incremento, el tiempo de duración del incremento, el tiempo total de duración del análisis, y si el usuario a monitorizado alguna variable, escribe su valor para cada incremento.
- c) El archivo “.msg” es el más útil para el usuario en cuanto a la información que puede obtener de como va la marcha del análisis, ya que en el se indican todas las variables que afectan al control del análisis. Entre ellas se pueden destacar las tolerancias del código en el análisis, los valores máximos en los nodos o elementos (según el caso) de las variables que interesan en el análisis en cada iteración, advertencias sobre la convergencia del análisis, indicación de la reducción o aumento del tiempo en cada iteración, avisos sobre variaciones de las condiciones iniciales o de contorno, etc.
- d) El archivo “.res” es en el que el programa escribe los resultados del análisis. El lenguaje en que está escrito este archivo solo es interpretable mediante el módulo de postproceso Abaqus-Post. En este

archivo se encuentran los valores de todas las variables involucradas en el análisis, pero solo las correspondientes a los incrementos fijados en el archivo de entrada de datos. Con este archivo, para cada incremento se pueden realizar tanto historias de variables como contornos de isolíneas del modelo para una variable concreta.

- e) El archivo “.fil” es del mismo tipo que el “.res”, pero con la diferencia que el usuario elegir las variables que necesite. Las variables se registran para todos los incrementos que se realicen en el análisis. Con este archivo una vez interpretado con el módulo Abaqus-Post, solo se pueden representar historias y no contornos de variables como con el “.res”

El código permite realizar una ejecución del análisis partiendo de los resultados generados de un incremento cualquiera, con lo que para obtener resultados para un tiempo total del análisis, tan sólo tiene que ejecutar el mismo archivo de entrada de datos, indicando el último incremento de resultados anterior válido y fijar el final del tiempo total deseado por el usuario.

Este procedimiento también se puede utilizar en el caso de que la ejecución se haya parado antes del tiempo deseado, o por algún otro motivo se haya quedado el análisis a medias.

3.3.6. Postproceso de resultados

Partiendo de los archivos de resultados generados por Abaqus obtenidos de cada análisis realizado con el programa, los resultados se tratan mediante un módulo del programa al que ya se ha hecho referencia, llamado Abaqus/Post. El postproceso de resultados comienza invocando dicho módulo desde la terminal; en realidad, se trata de un editor de gráficos el cual, mediante instrucciones dadas desde de la consola, incluye un conjunto extenso de opciones de dibujo, control de impresión, etc.

La salida de resultados incluye todas las variables involucradas en el análisis, y entre otras pueden ser tensiones, presiones, desplazamientos, temperaturas, etc. La salida se puede realizar mediante tablas, así como contornos de isolíneas, deformadas, historias de variables en el tiempo y otros.

En la ejecución del programa, cada incremento se va almacenando en los archivos antes mencionados, de manera que con cada incremento realizado se puede visualizar en la pantalla o en otro medio gráfico mediante este módulo. Y dado que Abaqus/Post es interactivo, se ofrece la posibilidad del tratamiento de los datos en pantalla hasta conseguir la imagen, gráfico, etc. deseada bien, para el propio control y observación

de la evolución del análisis que se esta realizando, o para plasmarlo en papel a través de la impresora de modo que se puedan obtener las conclusiones a la vista de los resultados.

Al ser un editor de gráficos, su manejo requiere el conocimiento de comandos específicos de dicho módulo, los cuales se introducen a través del teclado dentro de un entorno propio. Los archivos con los gráfico o contornos los genera en un lenguaje neutro, lo que implica que a la hora de plasmarlos en el papel resulta necesario utilizar un programa especial incorporado dentro del módulo llamado Abaqus/Plot.

Mediante la ejecución de Abaqus/Plot se decide si los gráficos almacenados en un lenguaje neutro (de extensión ".mpl"), serán visualizados en pantalla o convertidos en otro lenguaje apto para una impresora o programa de edición deseado. En este caso se ha traducido al lenguaje HP-GL/2, dado que el ploter utilizado para generar los gráficos es compatible con dicho lenguaje.

3.4. Advertencia sobre el Método de Elementos Finitos

El usuario típico de un código de elementos finitos se pregunta: ¿Qué clase de elementos deberá usar, y cuántos de ellos? ¿Dónde debería ser la malla más fina y dónde puede ser más gruesa? ¿Puede simplificarse el modelo? ¿Cuántos detalles físicos deben ser representados? ¿Qué comportamiento es importante,

estático, dinámico, etc.? No se necesita conocer matemáticamente el Método de Elementos Finitos (MEF) para responder estas preguntas y manejar el código. Sin embargo, un usuario competente debe entender el comportamiento de los elementos con el fin de escoger la clase, dimensiones y forma de elementos y evitar así resultados erróneos. Un usuario debe también saber que el MEF es una forma de aproximar una teoría matemática sobre un comportamiento físico. De acuerdo con esto, hay que asumir las limitaciones de la teoría y éstas no deben violarse. Por lo tanto, es esencial que el usuario tenga un buen conocimiento físico del problema para que los resultados producidos por el computador puedan ser interpretados correctamente y se pueda hacer un juicio para saber si son verdaderos o no.

Por otro lado, el usuario debe asegurarse de que los datos de entrada se corresponden con el planteamiento físico, puesto que el código resolverá las ecuaciones independientemente de que los parámetros sean los reales o no, y los resultados lógicamente alejarán esta variación (11).

IV. MODELIZACIÓN

4.1. Hipótesis

El problema analizado ha sido modelizado utilizando el programa Abaqus/Explicit (HKS, 1997), que es un código de elementos finitos que se utiliza en la resolución de problemas por integración explícita. Los modos de vibración han sido estudiados utilizando el programa Abaqus/Standard, el cual se utiliza para problemas que utilizan el método de elementos finitos de propósito general.

Se ha considerado suficiente en la modelización matemática representar la cápsula por la cuarta parte de ella. Esto basta para, teniendo en cuenta los planos

de simetría longitudinal y transversal, representar los resultados de lo que sucede en la totalidad de la cápsula. El código comienza el análisis en el momento en que la cápsula entra en contacto con el punzón. Las correspondientes condiciones iniciales y de contorno se especifican de forma que pueda iniciarse el cálculo del problema planteado.

4.2. Modelización Geométrica

En la modelización de la cápsula se han utilizado 1764 elementos tipo paralelepípedo de 8 nodos, lo que representa un total de 2450 grados de libertad. Para realizar la transición desde los elementos más gruesos hasta los más finos, se utilizaron elementos del mismo tipo pero dispuestos de otra manera

La malla generada, como se puede ver en la Fig. 4.1 representa la cuarta parte de una cápsula vacía. Esta discretización es la que se ha utilizado para determinar las consecuencias del impacto entre la cápsula y el punzón metálico.

4.3. Materiales

Como ya se mencionó en el apartado referido al programa Abaqus, éste dispone de una serie de tarjetas para definir las propiedades del material en el archivo de entrada de datos.

Así al agrupar los elementos, se les asigna el nombre del material, para luego agrupar las propiedades al material especificado. Dentro de la parte elasto-

plástica es preciso indicar los módulos de Young y de Poisson. Luego también se especifica la densidad que el código se encarga de utilizar para asociar a cada elemento su respectiva masa.

Para una caracterización dinámica lineal de la cápsula, los únicos parámetros necesarios son las características y la densidad del material, estos datos se encuentran especificados en la tabla II.

PARÁMETRO	VALOR
Módulo de Young	$E = 200 \text{ GPa}$
Módulo de Poisson	$\nu = 0,29$
Densidad	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Tabla II

Propiedades del Material

Sin embargo, el estudio del impacto requiere también la descripción del comportamiento mecánico del acero de la cápsula a mayores niveles de deformación. En este contexto, el comportamiento mecánico del acero de la cápsula se ha considerado elasto-plástico. La parte elástica está regida por los módulos de Young y de Poisson ya mencionados.

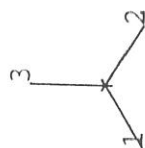
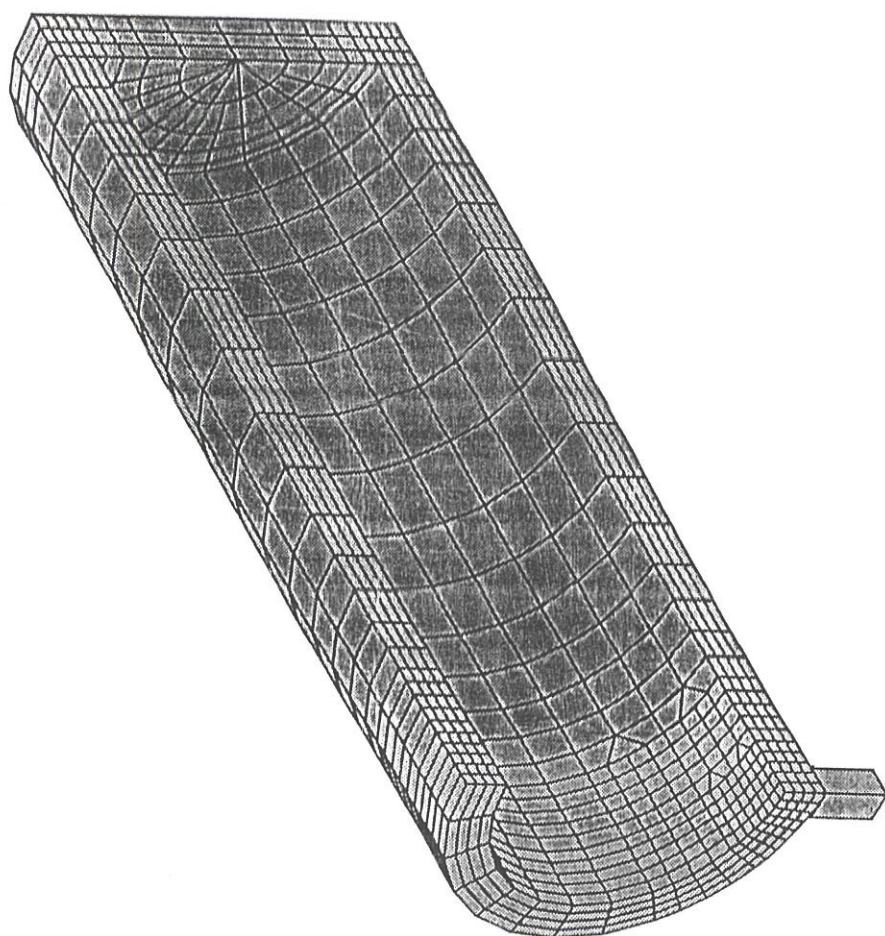


Fig. 4.1

Malla utilizada en la modelización del problema

El comportamiento plástico comienza cuando se satisface un criterio del tipo de Von Misses y presenta una fluencia con endurecimiento isotrópico. La Fig. 4.2 representa gráficamente el comportamiento elasto-plástico asignado al material.

Se observa que, para una tensión de 320 MPa, el material comienza a plastificar; a partir de ese momento las tensiones crecen linealmente con las deformaciones, crecimiento que se interrumpe cuando las tensiones alcanzan los 620 MPa y las deformaciones son del 20%.

Para mayores deformaciones se supone que no hay más endurecimiento, es decir, se entra en una plasticidad ideal. El punzón, de forma rectangular, se ha tomado como un sólido rígido. Por tanto, no tendrá ninguna deformación durante el impacto.

4.4. Condiciones Iniciales y de Contorno

La única condición inicial impuesta es la de velocidad de la cápsula al empezar el análisis. Esta se ha calculado tomando como caída libre de un sólido rígido desde un metro de altura, y su valor es de 4.4 m/s. Por lo demás, la cápsula está libre de tensiones y deformaciones en el momento inicial.

Entre las condiciones de contorno se encuentran las simetrías existentes en los bordes de la cápsula. Estas simetrías se expresan agrupando los nodos que forman parte de cada uno de los planos de simetría.

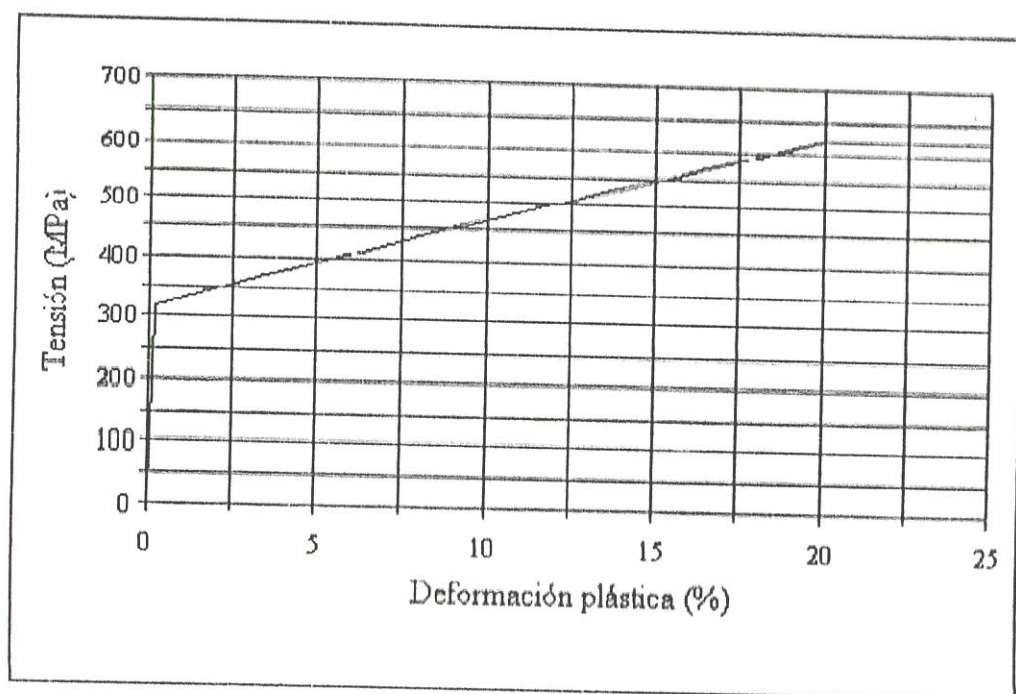


Fig. 4.2

Características del material utilizado.

El punzón también incluye las mismas condiciones de simetría de la cápsula. Es preciso anotar que los nodos que se encuentran dentro de un plano de simetría se fijan en dirección perpendicular a este plano.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Evolución del fenómeno

El impacto que ocupa a la presente Tesis, se desarrolla de la siguiente forma:

- a) Dada la curvatura de la superficie externa de la cápsula, el contacto inicial ocurre a través de un área infinitesimal. En consecuencia, la fuerza de interacción desarrollada entre la cápsula y el punzón es inicialmente nula. Esta fuerza, sin embargo, irá aumentando progresivamente. Este aumento se debe en parte a que, durante el impacto, mejora el contacto entre la parte curva de la cápsula y la sección recta del punzón; pero también se debe a que el mecanismo

resistente de la pared de la cápsula evoluciona desde uno en que la flexión es protagonista a otro en que las tracciones de membrana cobran más importancia a medida que aumentan las distorsiones. Finalmente, el endurecimiento por deformación del material de la cápsula también contribuye al crecimiento de la fuerza de impacto.

- b) Al comenzar el impacto entre la cápsula y el punzón, la zona en contacto entre ambos se detiene, mientras que el resto sigue avanzando. Como consecuencia, la cápsula tenderá a oscilar con los periodos correspondientes a ciertos modos naturales de vibración, en particular, el primer modo de flexión y el primer modo de ovalización. Estos tipos de vibraciones deben de ser especialmente obvias cuando termina el proceso de deformaciones plásticas y la cápsula rebota vibrando libremente en el espacio.
- c) Si se presentan deformaciones plásticas, es difícil predecir con exactitud el tiempo que durará el impacto, que vendrá determinado por la tasa a la que las fuerzas de impacto agotan la cantidad de movimiento de la cápsula. Contrario al caso de deformación puramente elástica en que el tiempo de contacto estaría relacionado con el periodo fundamental de vibración del cuerpo involucrado, aquí la pérdida de cantidad de movimiento en la unidad de tiempo está limitada por la plasticidad del material.

Basado en esta conservación de la cantidad de movimiento, es posible realizar una aproximación de la magnitud de la fuerza que se producirá:

$$F = m \frac{(v - v_0)}{t} \quad (5-1)$$

donde m es la masa de la cápsula, v la velocidad de rebote y v_0 la velocidad de impacto. Es claro que para distintos espesores de la cápsula la secuencia de eventos será similar; sin embargo, las magnitudes de los valores de fuerza, velocidad, etc. variarán en función del cambio de dimensiones de la cápsula.

5.2. Cápsula de 10 cm de pared

Se han analizado en primer lugar los modos propios de vibración de la cápsula vacía con 10 cm de espesor de pared. La Tabla III muestra las frecuencias correspondientes a los 10 primeros modos de vibración y describe el tipo de deformaciones asociadas a cada modo.

Lógicamente los modos de frecuencia más baja serán los principalmente activados en el impacto. Además, dado que tanto el primero como el segundo modo son consistentes con la aparición de desplazamientos máximos en el punto de impacto, es de esperar que su participación en la evolución del problema sea bastante significativa, al menos en la parte elástica de la respuesta.

En las fig. 5.1 y 5.2 se presentan los dos primeros modos de vibración para el caso de la cápsula de 10 cm de espesor.

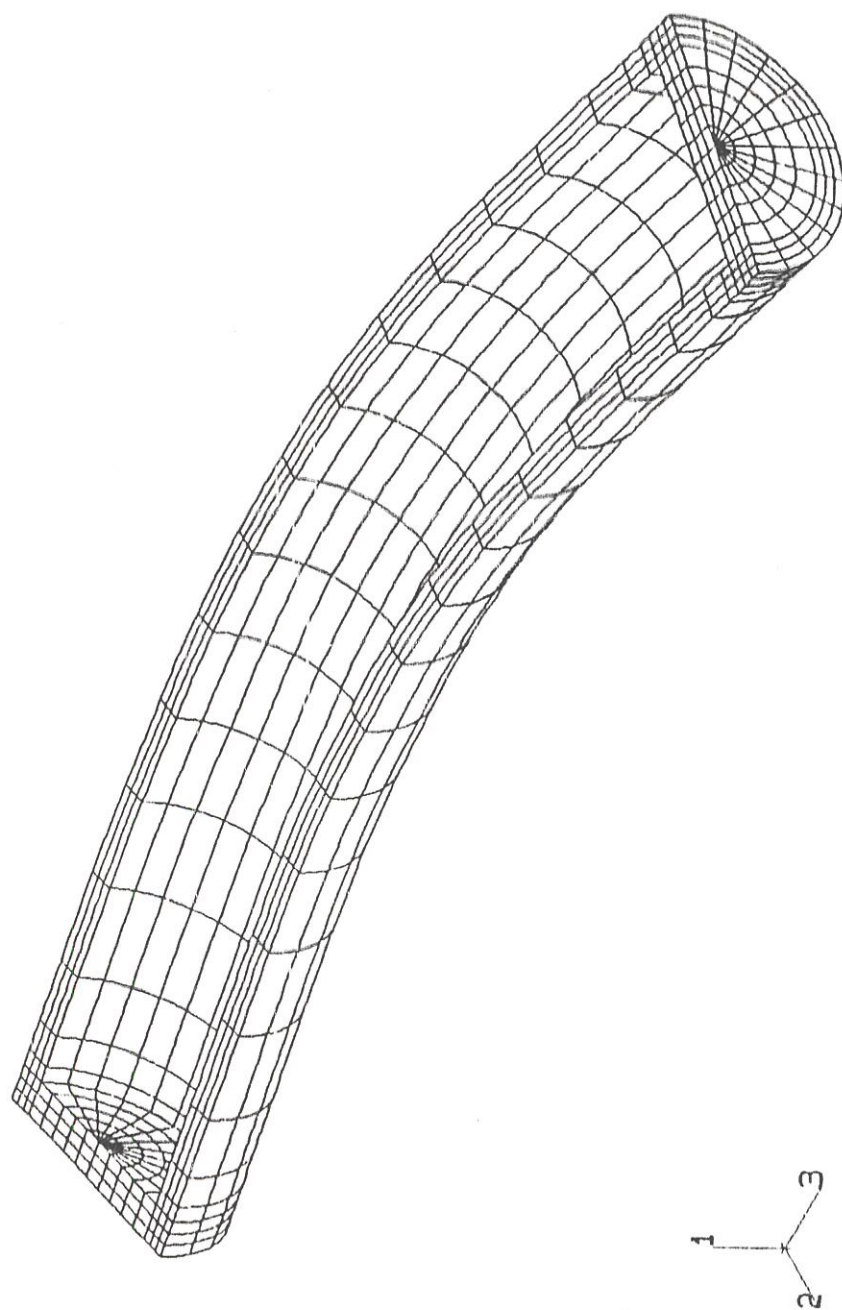


Fig. 5.1

Primer modo de vibración de la cápsula

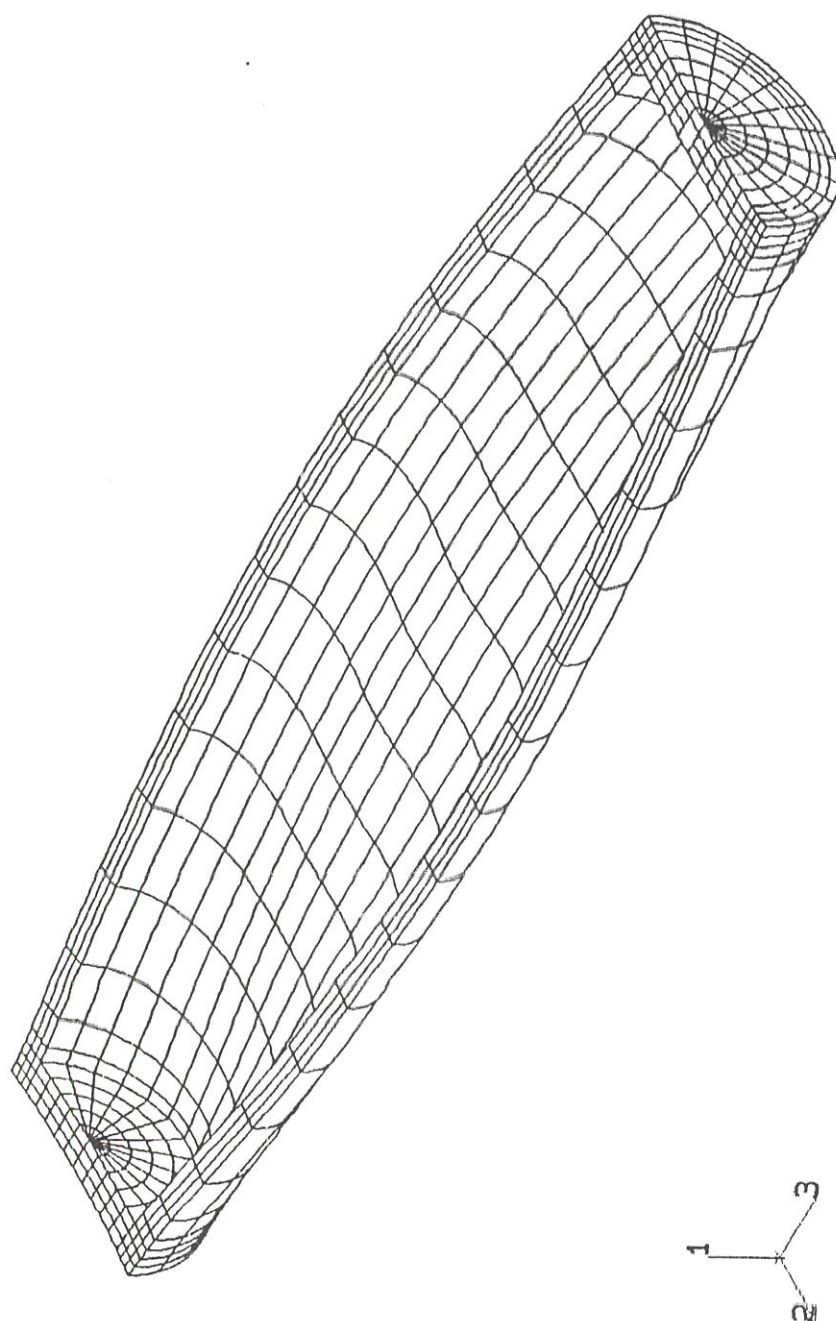


Fig. 5.2

Segundo modo de vibración de la cápsula

Modo n°	Frecuencia (Hz)	Descripción del modo
1	210	1° de flexión
2	404	1° de ovalización
3	420	2° de ovalización
4	468	2° de flexión
5	480	3° de ovalización
6	537	1° longitudinal
7	609	4° de ovalización
8	746	3° de flexión
9	792	5° de ovalización
10	999	4° de flexión

Tabla III

Modos de vibración con 10 cm de pared.

La historia de las fuerzas desarrolladas en el impacto de la cápsula contra el punzón se presenta en la figura 5.3. El impacto termina en aproximadamente 7,1 ms. La fuerza evoluciona desde cero en el comienzo del impacto hasta un valor máximo de 2,8 MN, que corresponde al instante cuando la tapa culmina el descenso y empieza a rebotar.

La figura 5.4 permite ver las historias de velocidades de tres puntos significativos de la cápsula: los dos extremos del diámetro vertical y el punto medio, todos

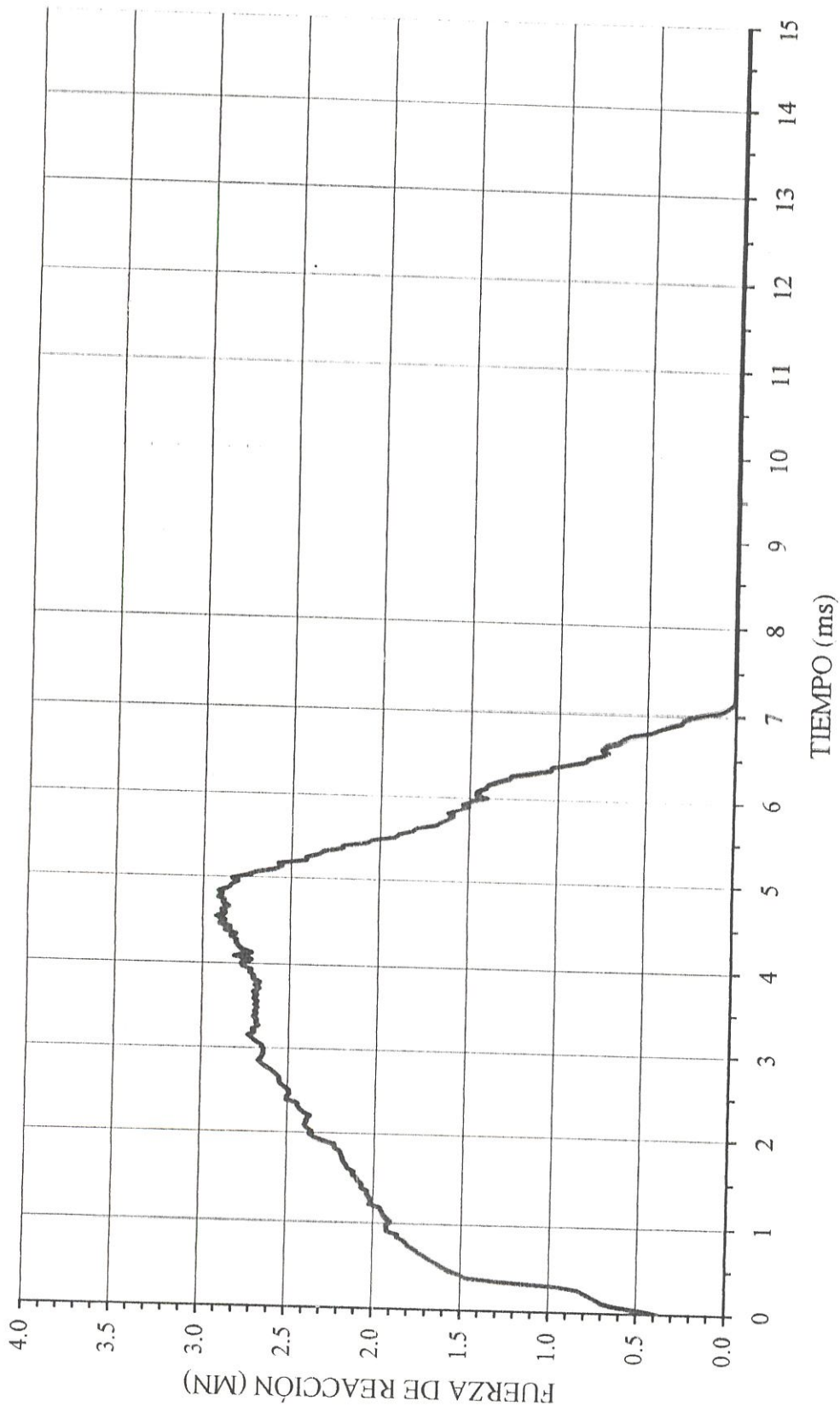


Fig. 5.3

Fuerza desarrollada entre la cápsula y el punzón ($e = 10$ cm).

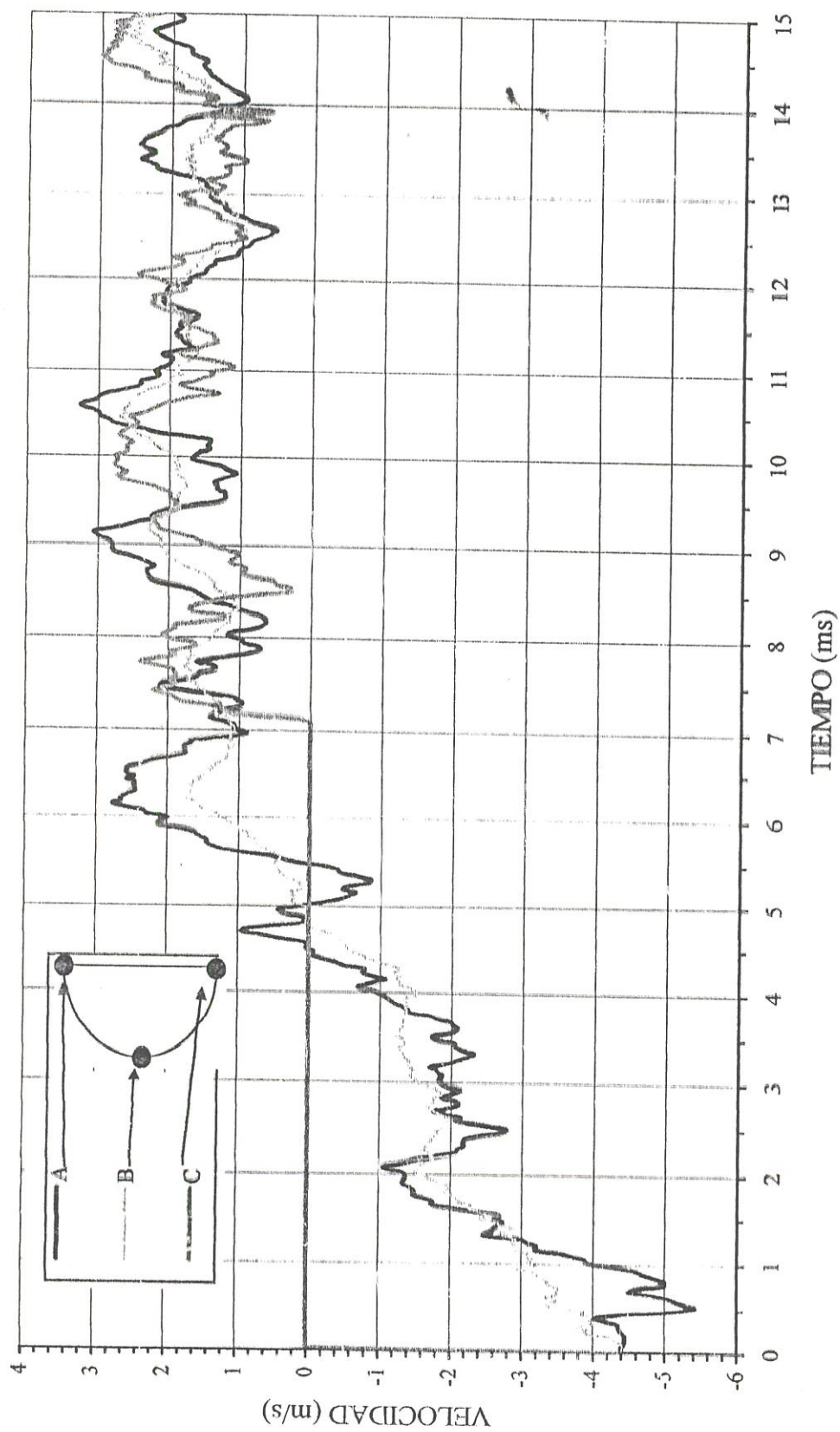


Fig. 5.4

Velocidades de puntos de la cápsula ubicados en la zona del impacto ($e = 10$ cm)

ellos dentro del plano donde se produce el impacto. Estas historias ilustran con más detalle la secuencia comentada en relación con las fuerzas de impacto.

Como se ve en la figura, la parte en contacto se queda detenida durante el tiempo que dura el impacto, mientras que el resto sigue hasta los 5,5 ms, para luego rebotar con una velocidad media de rebote de 1,89 m/s.

Utilizando la ecuación 5-1, se obtiene un valor de 2 MN como fuerza desarrollada durante el impacto; este cálculo se estima para un tiempo de 7,1 ms. Como se aprecia, el valor estimado manualmente tiene consistencia con los resultados de la simulación.

La integración explícita impone estrictamente la conservación de la cantidad de movimiento, pero no la de la energía. Es por tanto útil comprobar que se respeta esta conservación, aunque no figure explícitamente entre las ecuaciones que gobiernan el movimiento. En la figura 5.5 la curva roja proporciona esta deseable comprobación. Las otras dos curvas representan respectivamente la energía cinética y la de deformación, que son complementarias. Puede verse que, al comienzo del impacto, toda la energía era cinética; el impacto hace que ésta disminuya, con su mínimo valor hacia 4,8 - 5,1 ms. Después, parte de la energía de deformación, que se ha almacenado elásticamente, revierte a la cinética y se produce el rebote de la cápsula con una velocidad residual de traslación y unas ciertas vibraciones internas. La energía cinética correspondiente a estos

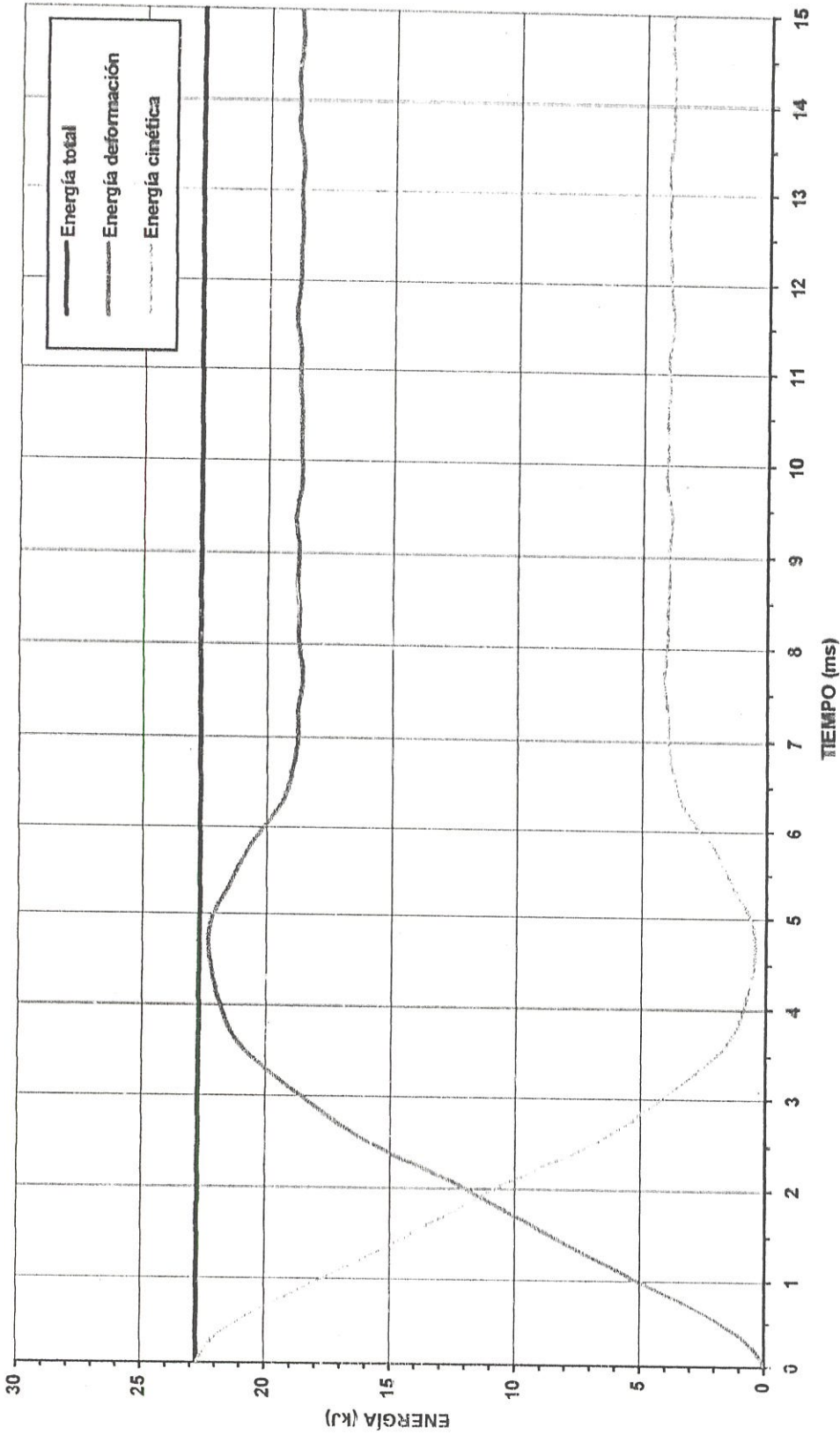


Fig. 5.5
Energías cinética, de deformación y total ($e = 10\text{ cm}$)

movimientos es la que se manifiesta en los aproximadamente 3 kJ que restan a partir de los 7,2 ms.

Sólo parte de la deformación es recuperable; el resto se disipa plásticamente. La figura 5.6 muestra la distribución de la energía total de deformación en las dos componentes (recuperables y no recuperables).

Puede verse las deformaciones plásticas han concluido prácticamente a los 5,2 ms.

Las deformaciones plásticas son de especial interés, ya que éstas son las que limitarían su reutilización. Estas deformaciones se presentan de la figura 5.7 a 5.9. La primera es una perspectiva, mientras que las otras dos son vistas longitudinales y transversales de la cápsula.

En estas gráficas se han dibujado los contornos de igual deformación plástica efectiva. El mayor valor de la deformación plástica es 4,8% y la indentación producida por el punzón alcanza un valor máximo de 7,7 mm.

Como era de esperar, la zona más dañada es la zona local del contacto cápsula-punzón. Las máximas deformaciones plásticas se concentran a lo largo del contorno exterior del punzón. En consecuencia, la configuración de dichas deformaciones variará en caso de variar la sección del punzón.

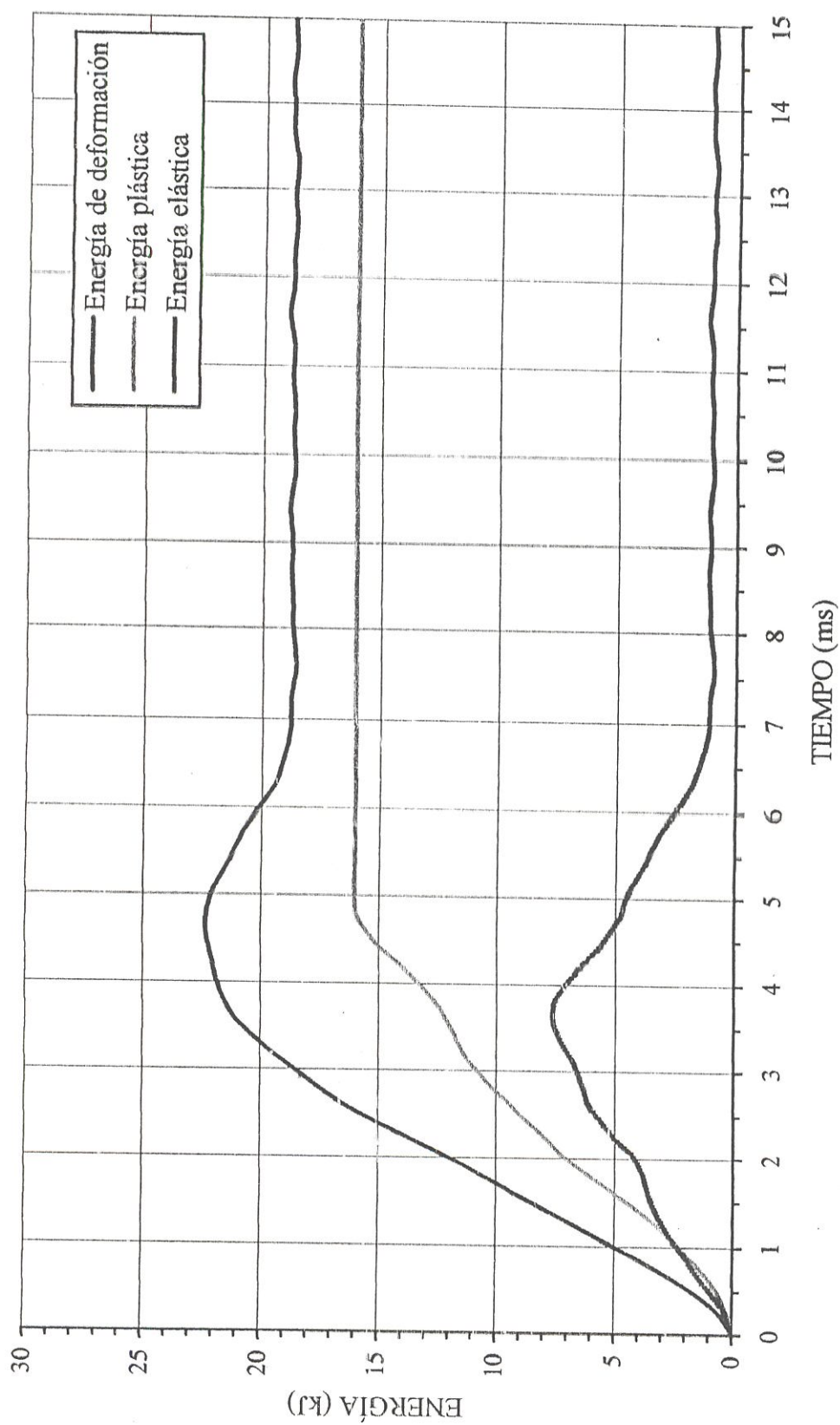


Fig. 5.6

Evolución de la energía de deformación ($e = 10$ cm)

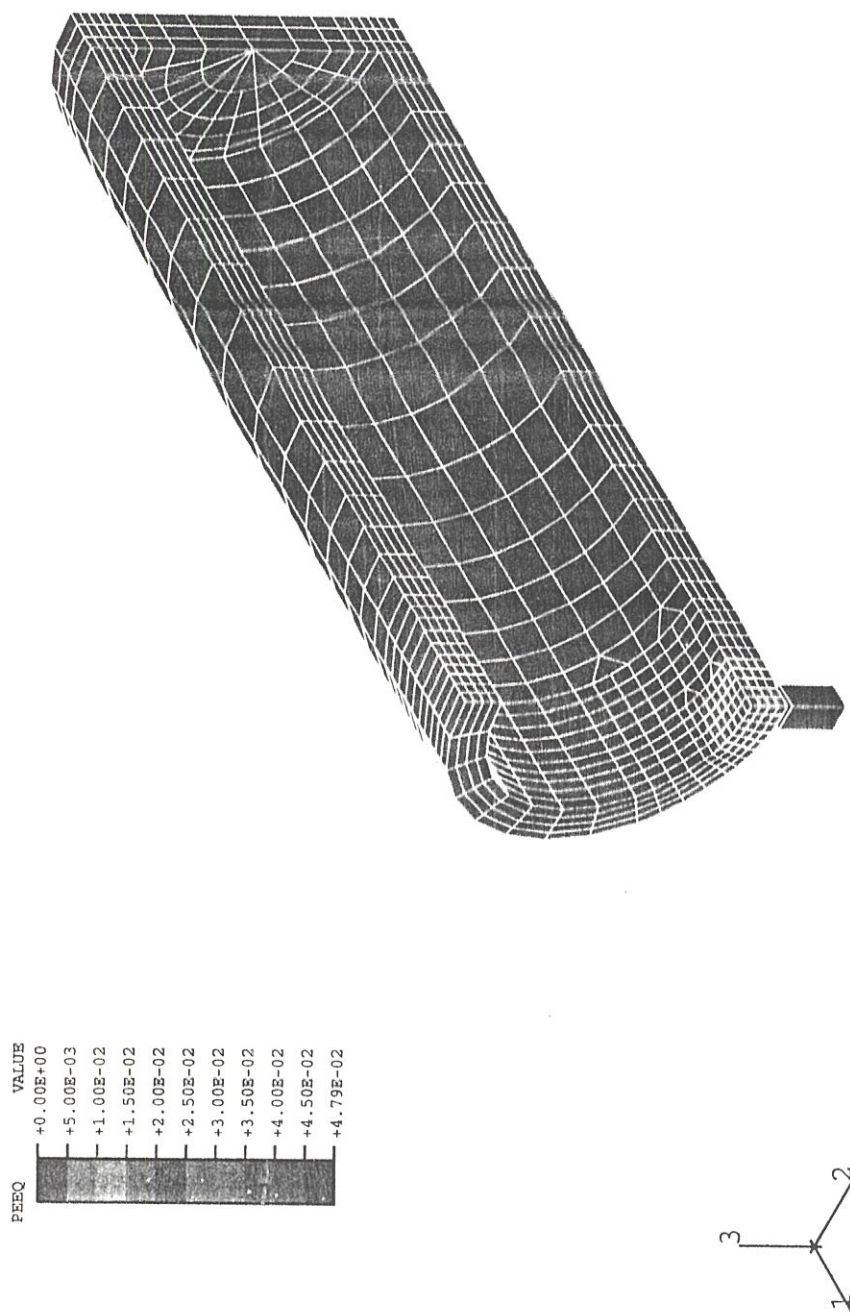


Fig. 5.7

Deformaciones plásticas. Perspectiva (e = 10 cm)

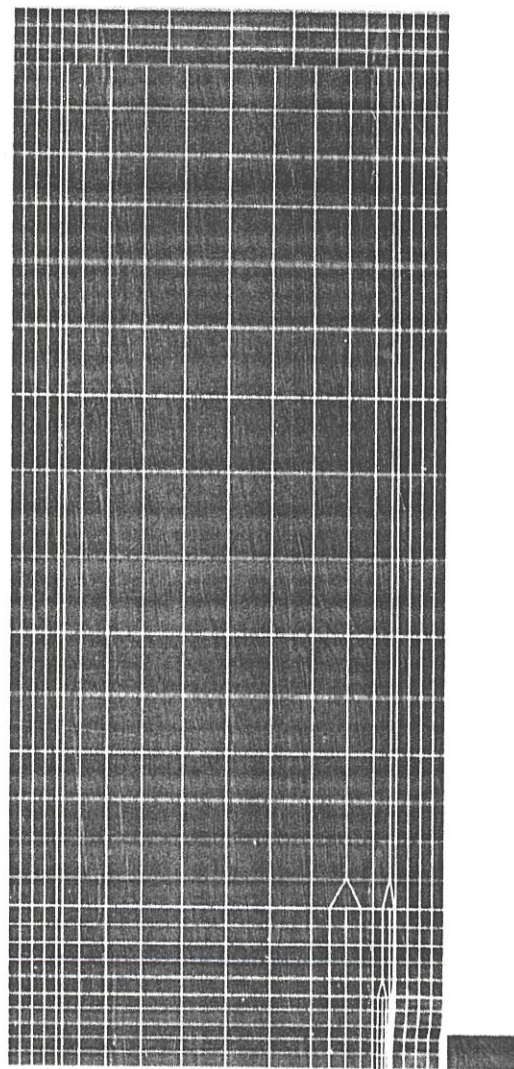
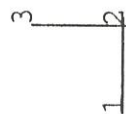
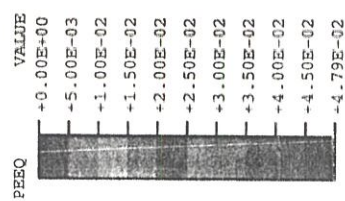


Fig. 5.8

Deformaciones plásticas. Sección longitudinal ($e = 10\text{ cm}$)

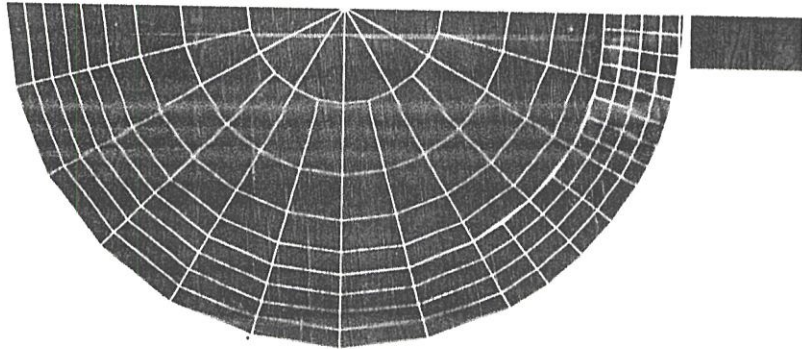
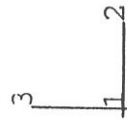
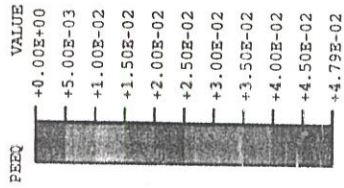


Fig. 5.9

Deformaciones plásticas. Sección transversal ($e = 10\text{ cm}$)

5.3. Cápsula de 8 cm de pared

Tras haber analizado la cápsula vacía con 10 cm de espesor de pared, se estudia ahora la cápsula con 8 cm de espesor. La Tabla IV muestra las frecuencias correspondientes a los 10 primeros modos de vibración y describe el tipo de deformaciones asociadas a cada modo.

Modo nº	Frecuencia (Hz)	Descripción del modo
1	206	1º de flexión
2	350	1º de ovalización
3	364	2º de ovalización
4	424	3º de ovalización
5	464	2º de flexión
6	537	1º longitudinal
7	553	4º de ovalización
8	737	5º de ovalización
9	742	3º de flexión
10	952	6º de ovalización

Tabla IV
Modos de vibración con 8 cm de pared.

Lógicamente los modos de frecuencia más baja serán los principalmente activados en el impacto. Además, como ya se mencionó para la cápsula con 10 cm de pared, dado que tanto el primero como el segundo son consistentes con la

aparición de desplazamientos máximos en el punto de impacto, es de esperar que su participación en la respuesta del problema sea significativa.

Se aprecia en la figura 5.10 la historia de fuerzas. El impacto dura 7,7 ms aproximadamente. Se puede observar que tanto la fuerza como el tiempo tienen magnitudes un 20 - 25% menores que las observadas en el análisis anterior.

Con la historia de velocidades (figura 5.11) se puede apreciar que se desarrolla un modo de ovalización en la cápsula cuyo periodo es aproximadamente 3 ms, que se evidencia en el desfase que existe entre las velocidades de los nodos diametralmente opuestos. Es interesante comprobar nuevamente la conservación de la energía, como se observa en la figura 5.12.

Así mismo, la figura 5.13 indica unas energías consistentes con la disminución del 20% esperada. Se observa que, tras los 5,1 ms, dejan de acumularse deformaciones plásticas; las deformaciones plásticas máximas tienen un valor de 5,1%. El tamaño de la indentación producida en la cápsula crece hasta 9,1 mm desde los 7,1 mm alcanzados con 10 cm de espesor de pared.

Para una mejor visualización de las deformaciones permanentes producidas durante el impacto, las figuras 5.14 a 5.16 presentan los contornos de deformaciones plásticas. Se observa nuevamente que los mayores efectos se producen lógicamente en la zona donde se produce el impacto con una variación esperable.

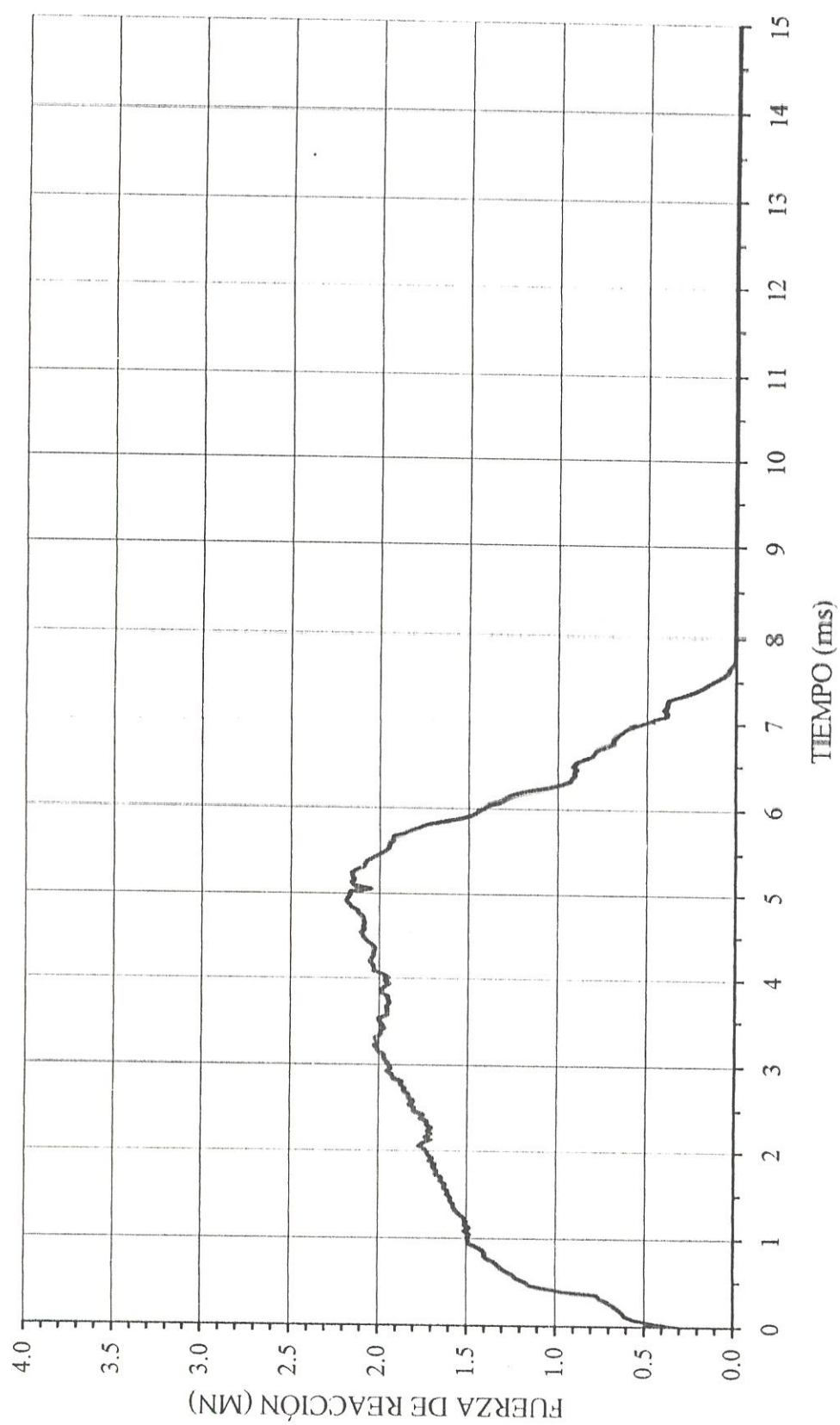


Fig. 5.10

Fuerzas desarrolladas entre la cápsula y el punzón ($e = 8$ cm).

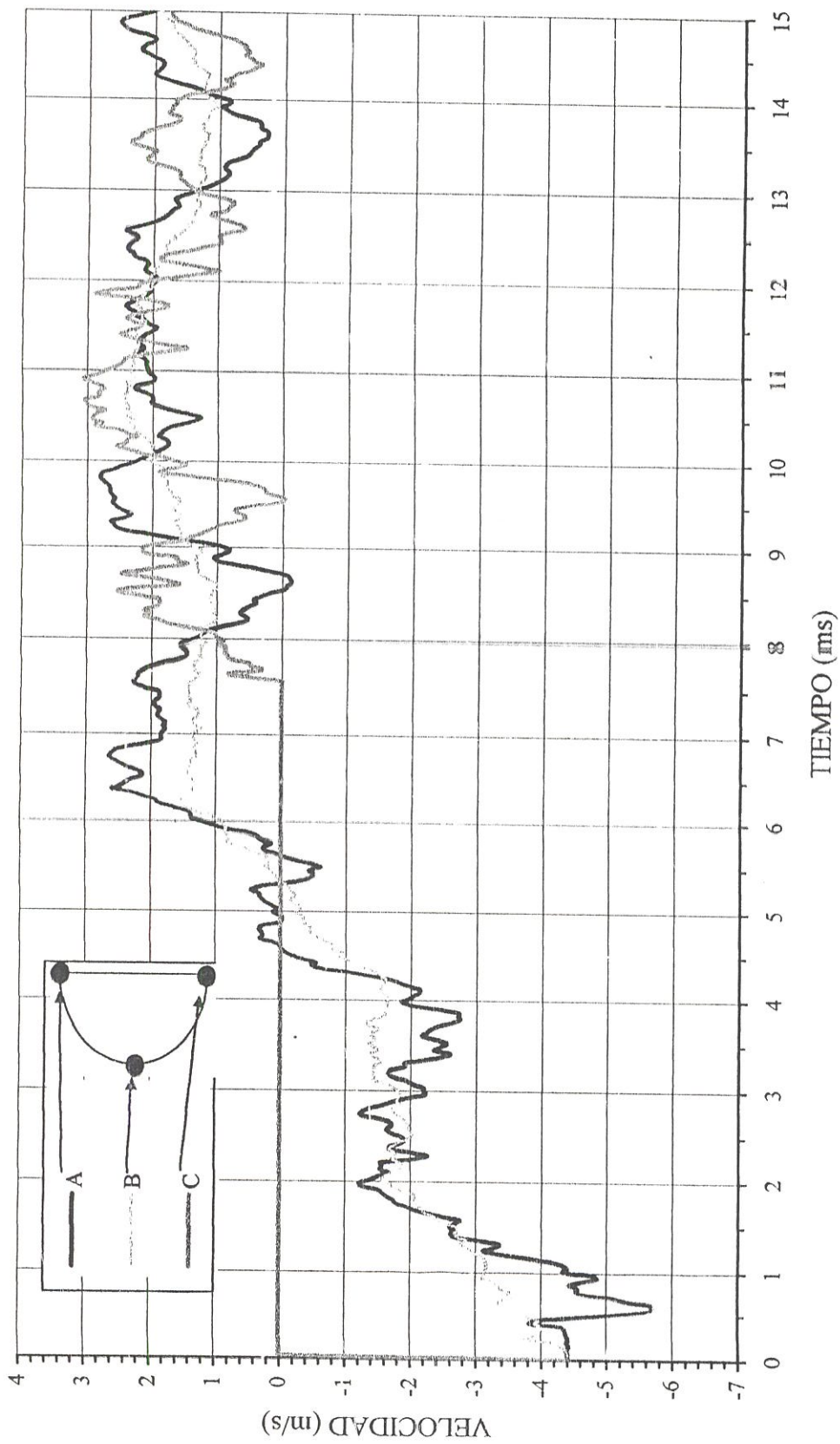


Fig. 5.11

Velocidades de puntos de la cápsula ubicados en la zona del impacto ($e = 8\text{ cm}$)

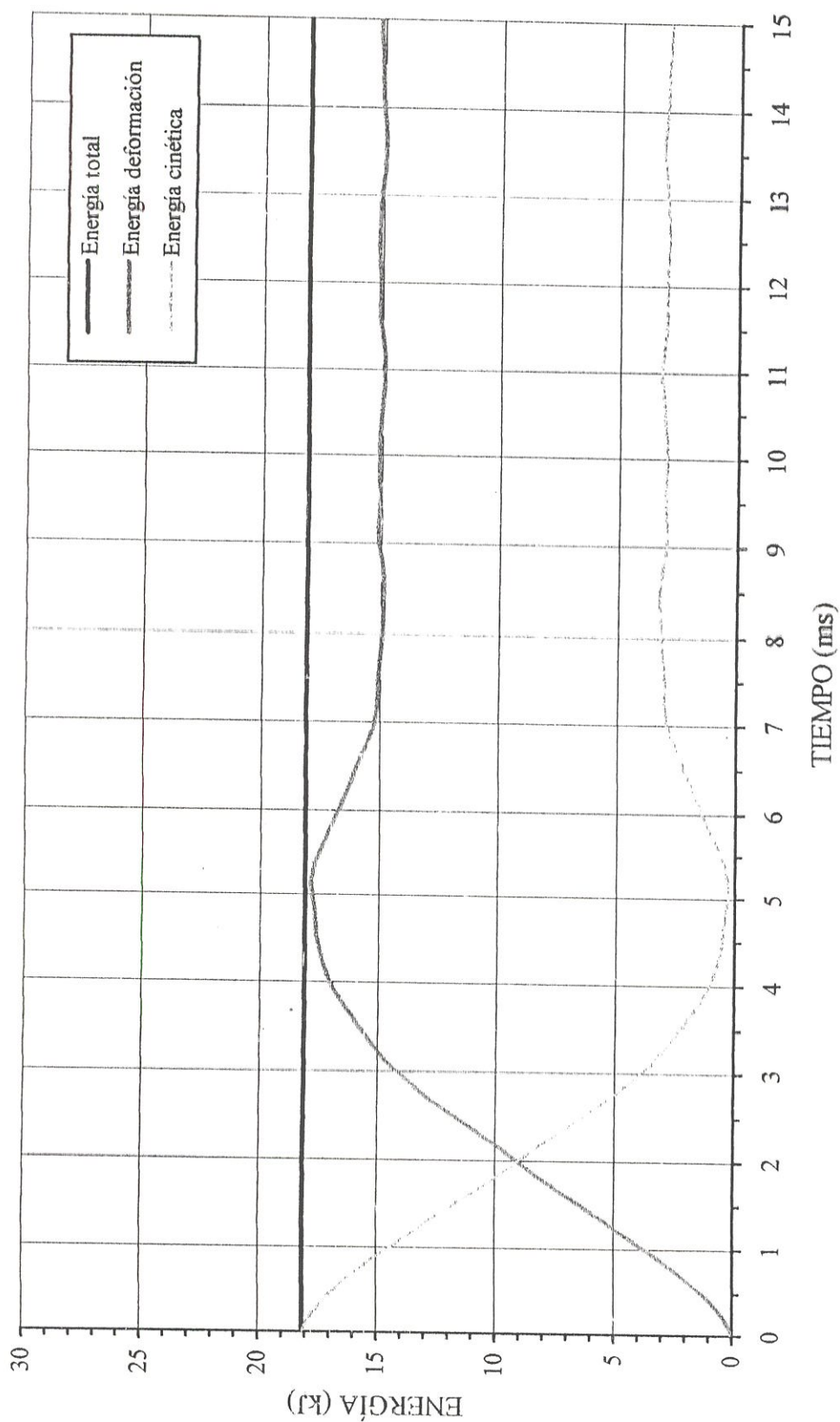


Fig. 5.12

Energías cinética, de deformación y total ($e = 8$ cm)

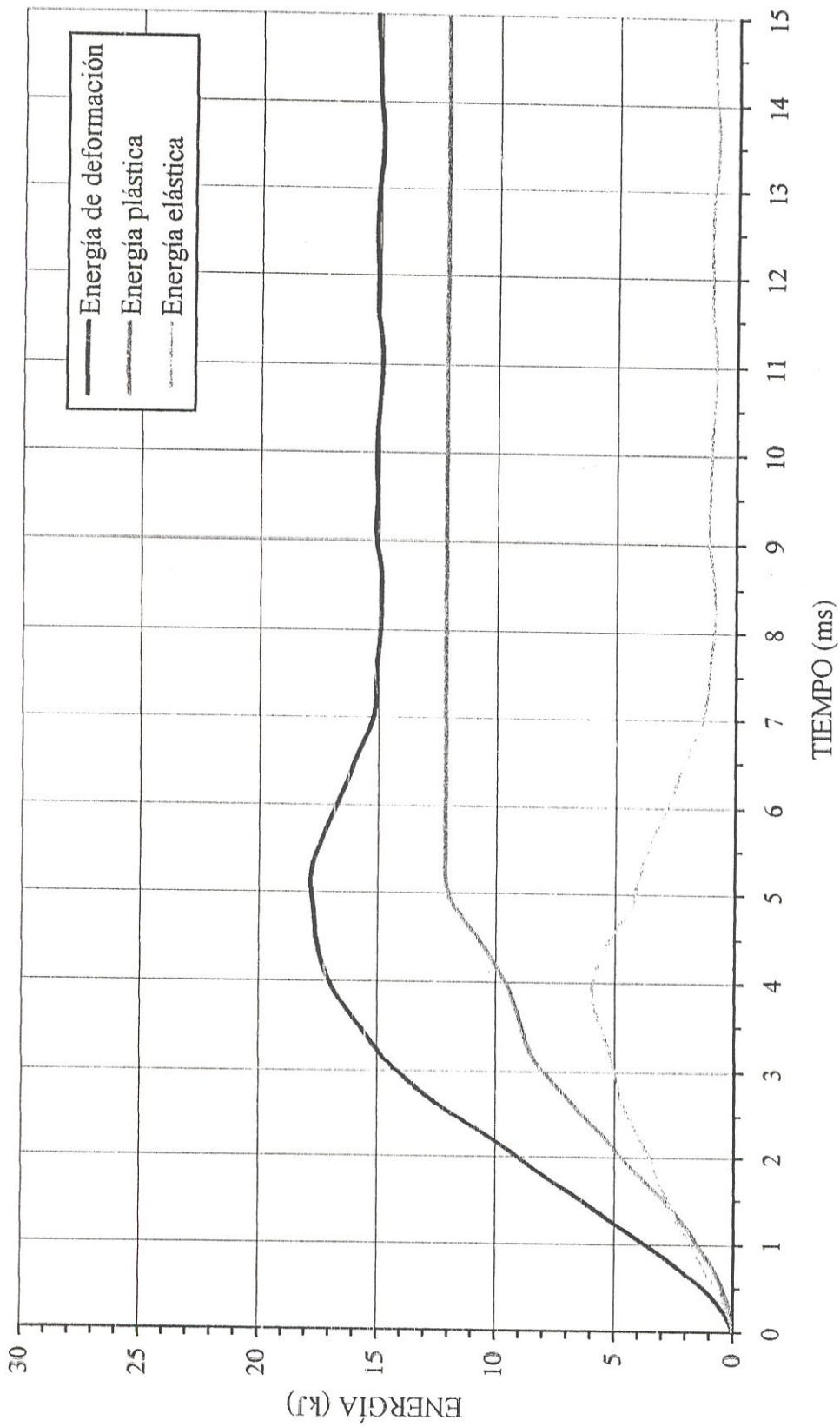


Fig. 5.13p

Evolución de la energía de deformación ($e = 8\text{ cm}$)

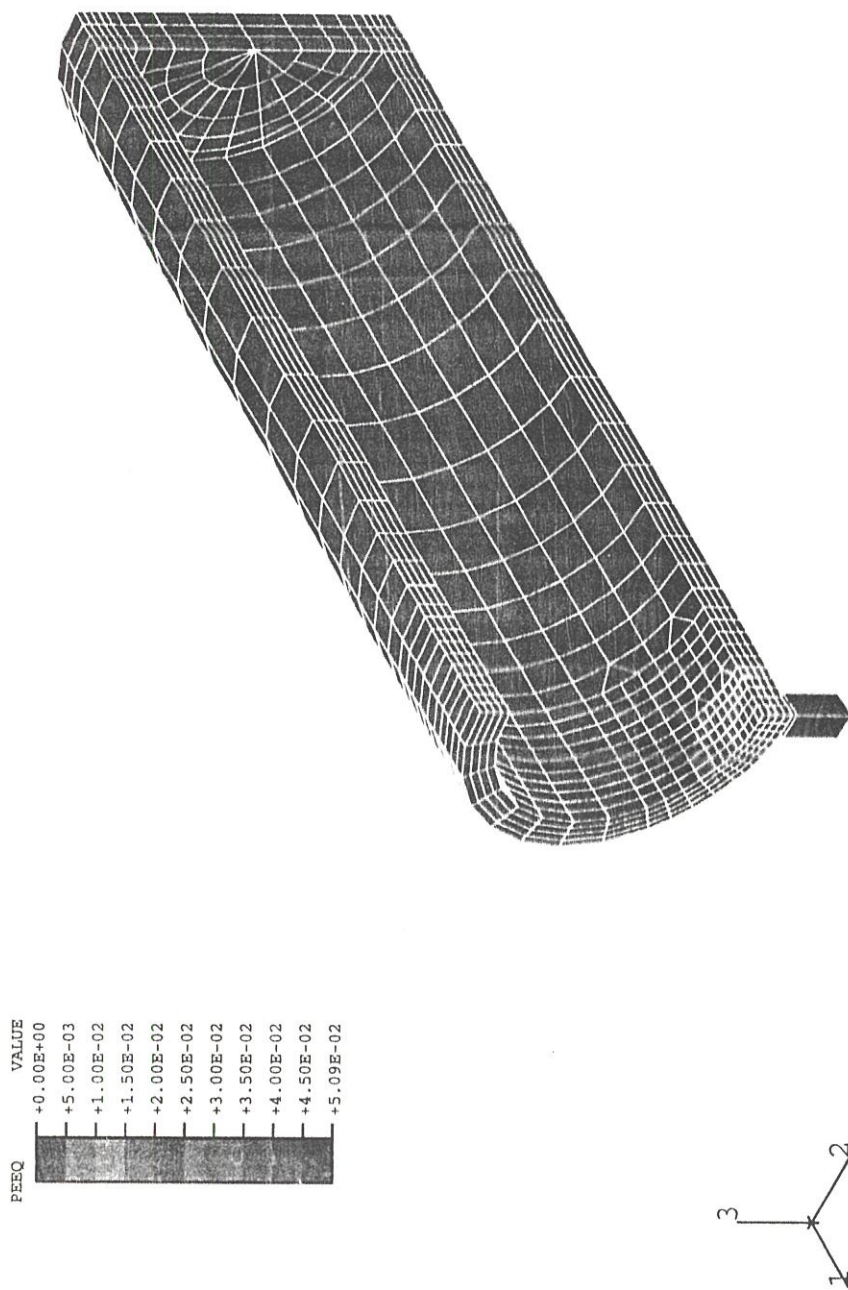


Fig. 5.14

Deformaciones plásticas. Perspectiva (e = 8 cm)

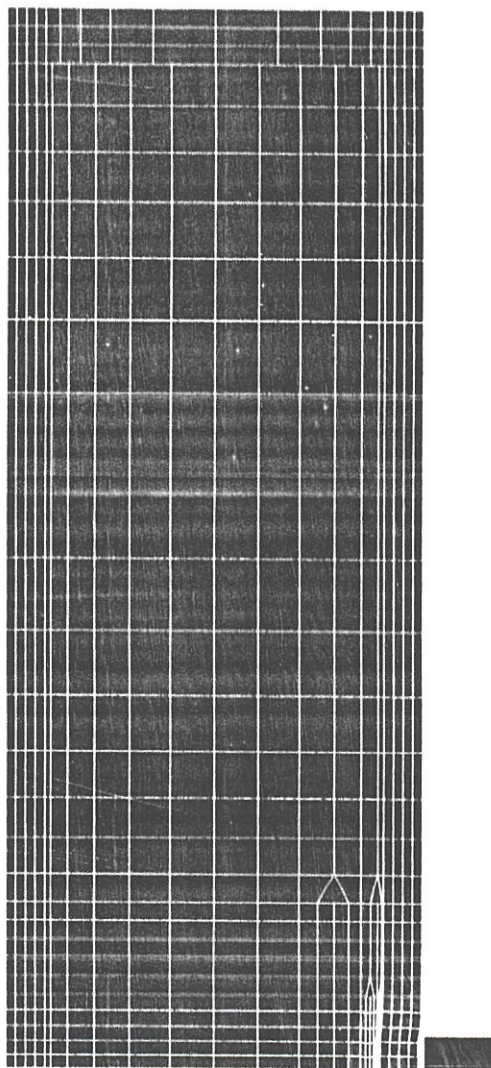
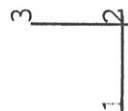
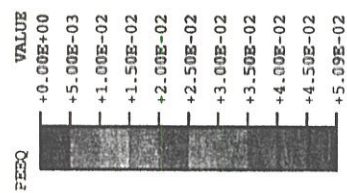


Fig 5.15

Deformaciones plásticas. Sección longitudinal ($e = 8$ cm)

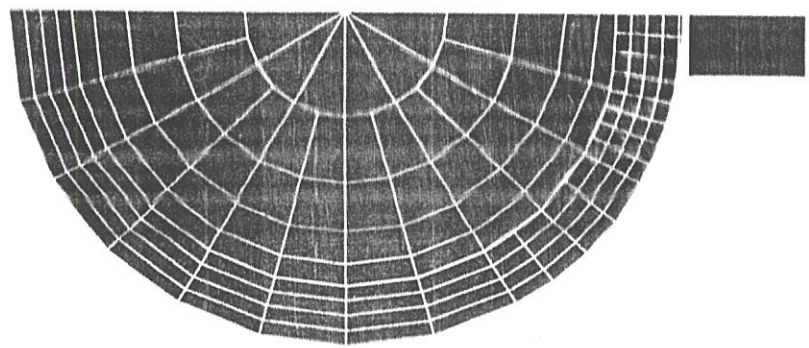
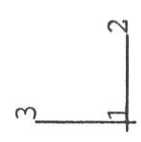
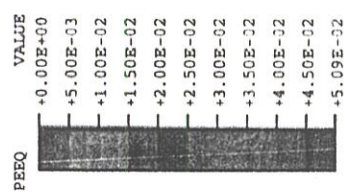


Fig. 5.16

Deformaciones plásticas. Sección transversal ($e = 8 \text{ cm}$)

5.4. Cápsula de 12 cm de pared

En el presente caso se han analizado los modos propios de vibración de la cápsula vacía con 12 cm de espesor de pared.

La Tabla V muestra las frecuencias correspondientes a los 10 primeros modos de vibración y describe el tipo de deformaciones asociadas a cada modo.

Modo nº	Frecuencia (Hz)	Descripción del modo
1	212	1º de flexión
2	451	1º de ovalización
3	468	2º de ovalización
4	472	2º de flexión
5	530	3º de ovalización
6	535	1º longitudinal
7	659	4º de ovalización
8	750	3º de flexión
9	844	5º de ovalización
10	1000	4º de flexión

Tabla V

Modos de vibración con 12 cm de pared.

Una vez más, puede esperarse que los modos de frecuencia más baja sean los principalmente activados en el impacto. Para finalizar, se presenta el análisis del mismo impacto, pero esta vez con un aumento del 20% en el espesor de pared. El

espesor es ahora por tanto 12 cm. Las dimensiones internas continúan manteniéndose inalteradas.

Se puede apreciar, una vez más, la compatibilidad que existe entre los resultados observados en las figuras 5.17 a 5.20 con las del caso central. El desarrollo de la historia de fuerzas nos muestra un aumento del orden del 20% en la magnitud de la fuerza, según se observa en la figura 5.17.

La figura 5.18 permite ver que el periodo de vibración a partir del rebote es de aproximadamente 1,1 ms. Como en los casos anteriores, la figura 5.19 muestra la conservación de energía existente. Por otro lado la figura 5.20 muestra que, transcurridos 4,5 ms, dejan de generarse deformaciones plásticas. La máxima deformación permanente desarrollada tiene un valor de 5,2%; en las figuras 5.21 a 5.23 se observan los contornos de deformaciones plásticas desde tres vistas diferentes.

La mayor competencia mecánica de la cápsula hace ahora que la indentación producida por el impacto del punzón disminuya hasta 7,1 mm desde los 7,7 mm alcanzados en el caso de la cápsula con 10 cm de espesor de pared.

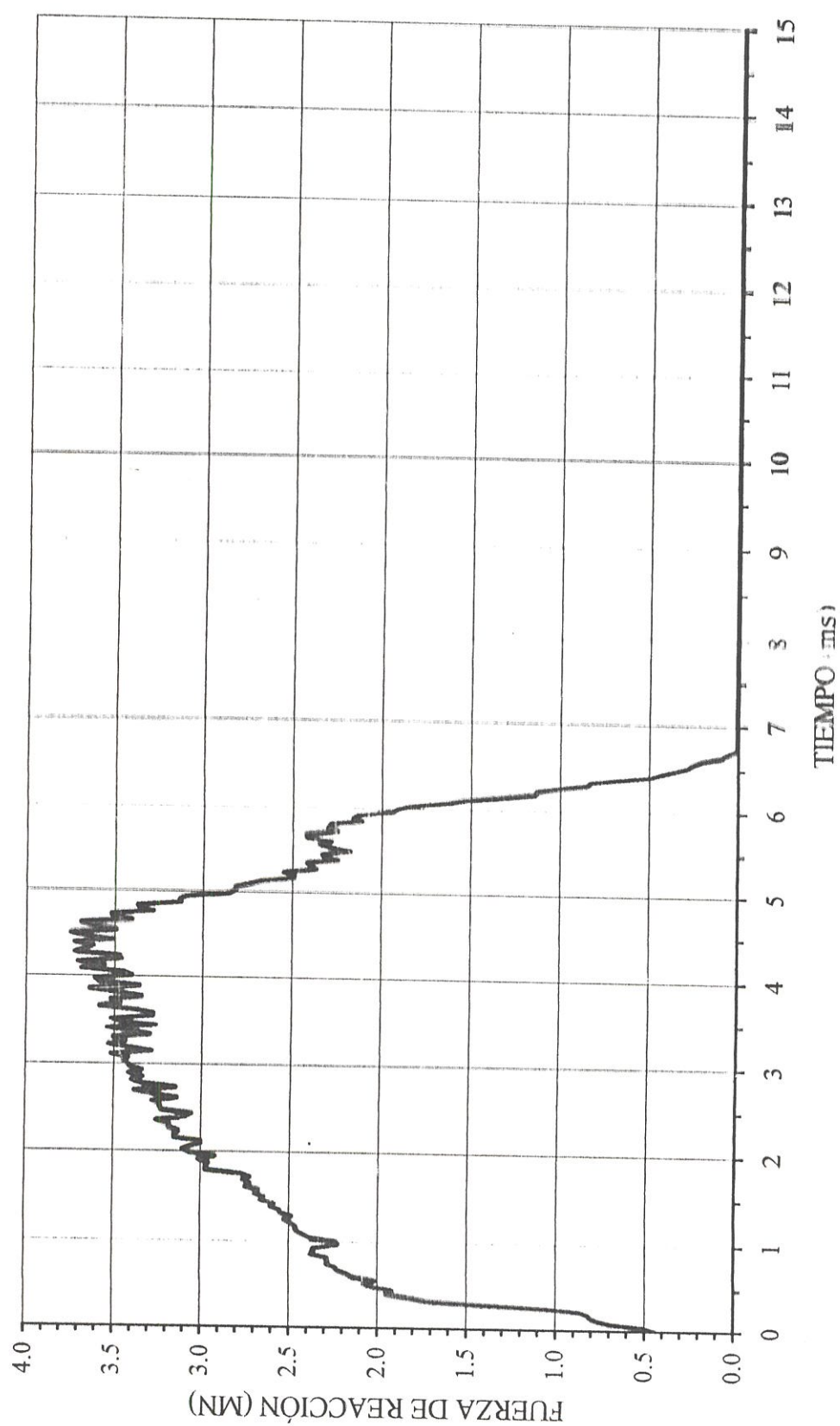


Figura 5.17

Fuerzas desarrolladas entre la cápsula y el punzón ($e = 12$ cm).

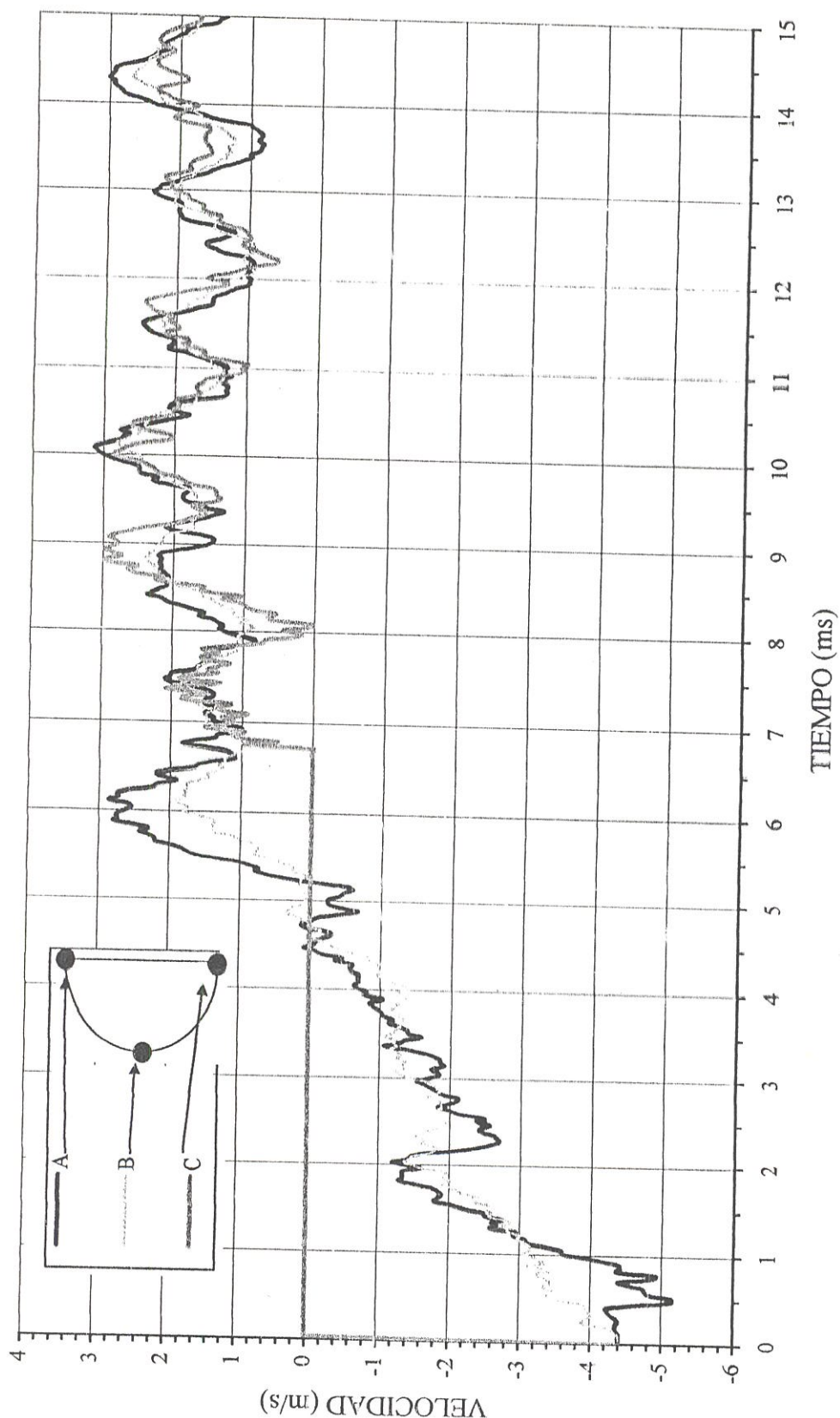


Fig. 5.18

Velocidades de puntos de la cápsula ubicados en la zona del impacto ($e = 12$ cm)

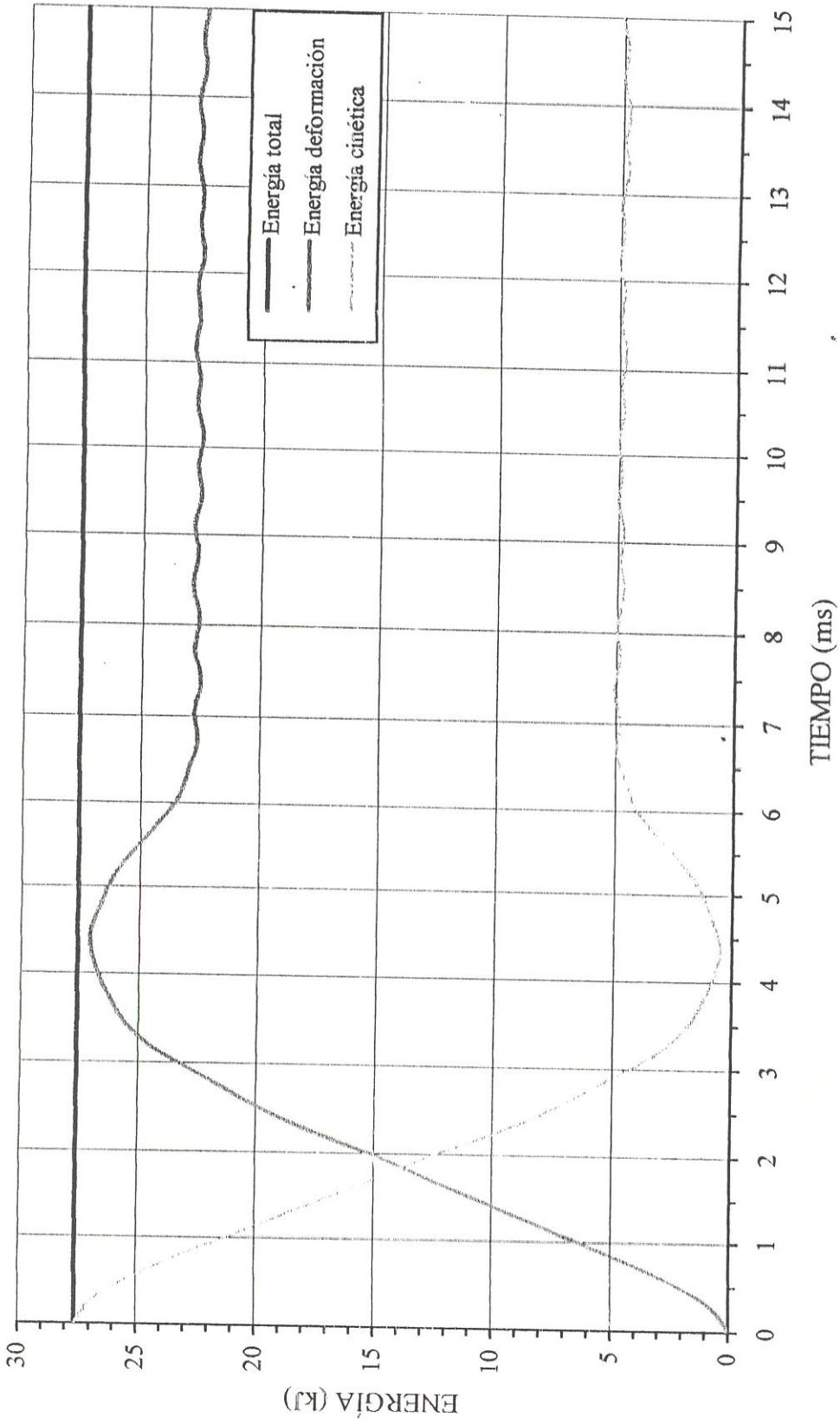


Fig. 5.19

Energías cinética, de deformación y total ($e = 12$ cm)

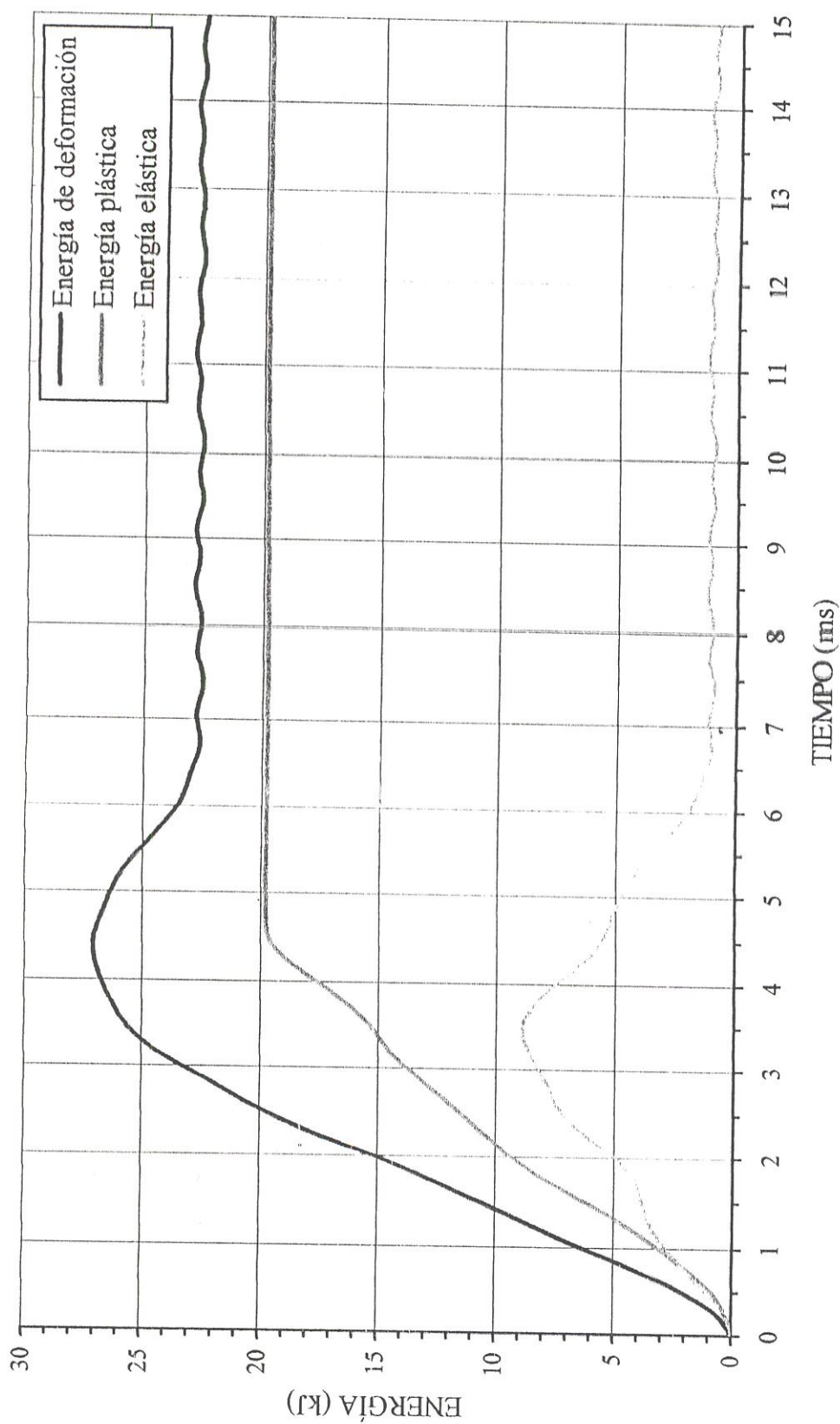


Fig. 5.20
Evolución de la energía de deformación ($e = 12$ cm)

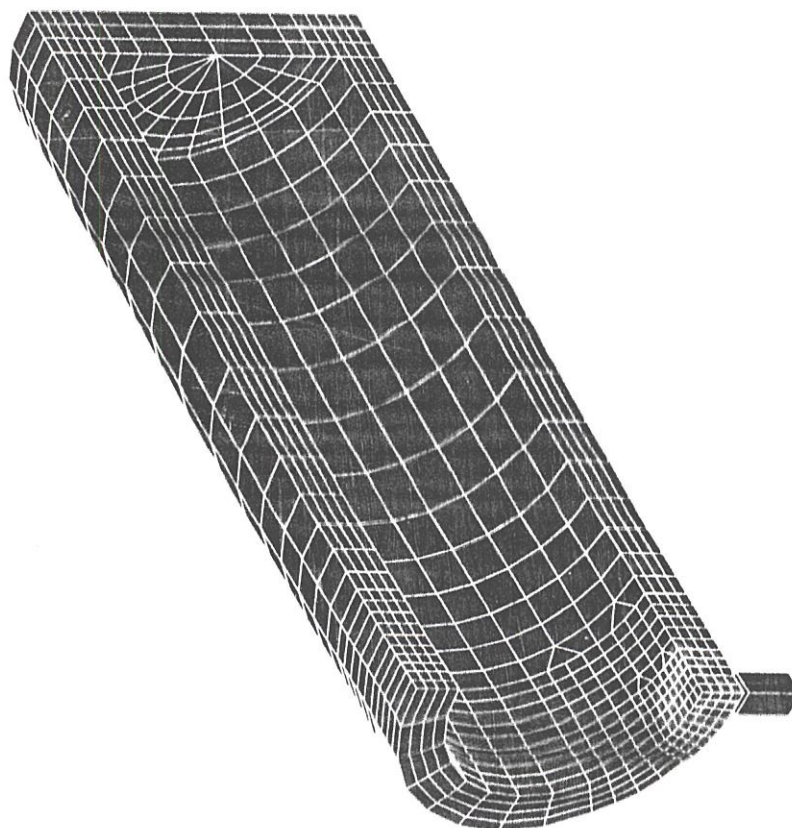
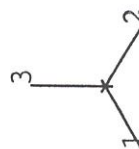
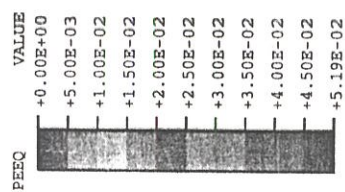


Fig. 5.21

Deformaciones plásticas. Perspectiva ($e = 12 \text{ cm}$)

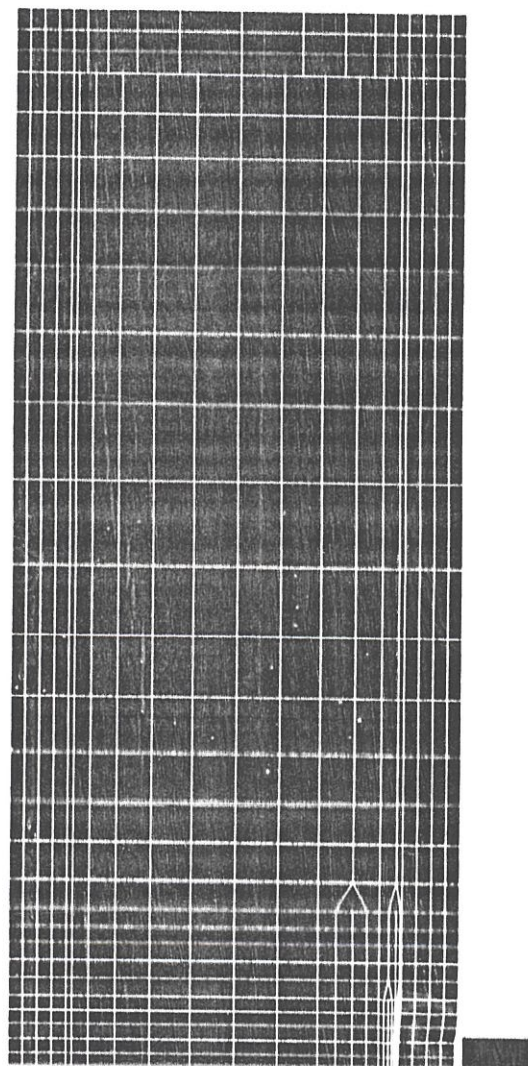
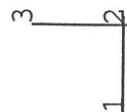
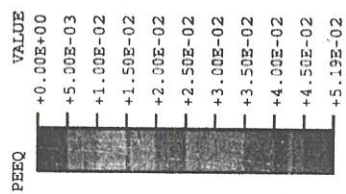


Fig. 5.22

Deformaciones plásticas. Sección longitudinal ($e = 12\text{ cm}$)

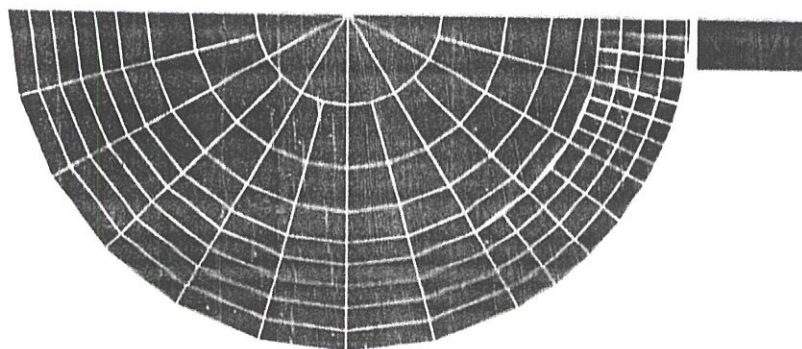
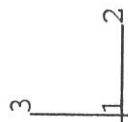
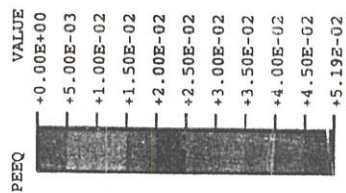


Fig. 5.23

Deformaciones plásticas. Sección transversal ($e = 12$ cm)

VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se han estudiado los efectos del impacto producido por la caída accidental de una cápsula de almacenamiento de residuos radiactivos, desde un metro de altura, sobre un punzón metálico de sección cuadrada. El análisis se ha realizado tanto para una cápsula de 10 cm de espesor de pared (que es el valor más probable para dicha dimensión), como para los casos de espesores un 20% superiores e inferiores.

Los resultados obtenidos del estudio en cuestión permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Para los diferentes casos analizados, los tiempos de duración del impacto de la cápsula contra el punzón van desde los 6,7 ms para el caso de 12 cm de pared hasta los 7,7 ms correspondientes al de 8 cm de pared. Las magnitudes de fuerzas son para los 8, 10 y 12 cm de espesor: 2,2 MN, 2,8 MN, y 3,75 MN respectivamente.
- Las gráficas de velocidades nos permiten observar el movimiento oscilatorio que adquiere la cápsula una vez que termina el impacto. La cápsula de 10 cm de pared oscila con un periodo de 1,2 ms; la de 8 cm con un periodo de 2 ms; mientras que la de 12 cm de pared con un periodo correspondiente de 1,1 ms.
- En las gráficas de energías se puede comprobar como la energía total se distribuye entre energía cinética y energía de deformación la cual a su vez tiene componentes elásticas y plásticas. Es posible observar que a partir de un cierto instante, la energía plástica permanece casi constante en el tiempo. Esto significa que a partir de entonces los cambios energéticos corresponden a la componente elástica, permaneciendo invariable la deformación plástica de la cápsula.
- Los efectos más pronunciados, en lo que tiene que ver con las deformaciones plásticas, se presentan como era de esperarse en la zona central de la cápsula próxima al contacto con el punzón. Las

deformaciones máximas son de 4,93%; 4,576% y 7 % para los 8, 10 y 12 cm de espesor respectivamente.

- Una vez estudiado el impacto y cuantificada la deformación sufrida por la cápsula, se decidirá si se puede continuar con ella la secuencia de operación en la planta de encapsulado o si, por el contrario, debe ser inutilizada.
- En resumen observamos que en ningún caso las deformaciones plásticas mayores al 2% no llegan a extenderse en todo el espesor. Además las deformaciones tampoco llegan al 20% por lo que se garantiza la integridad estructural de la cápsula. En cuanto a la disminución del diámetro podemos observar que superan los 5 mm por lo que se vería comprometida su reutilización en el AGP.

7.2. Recomendaciones

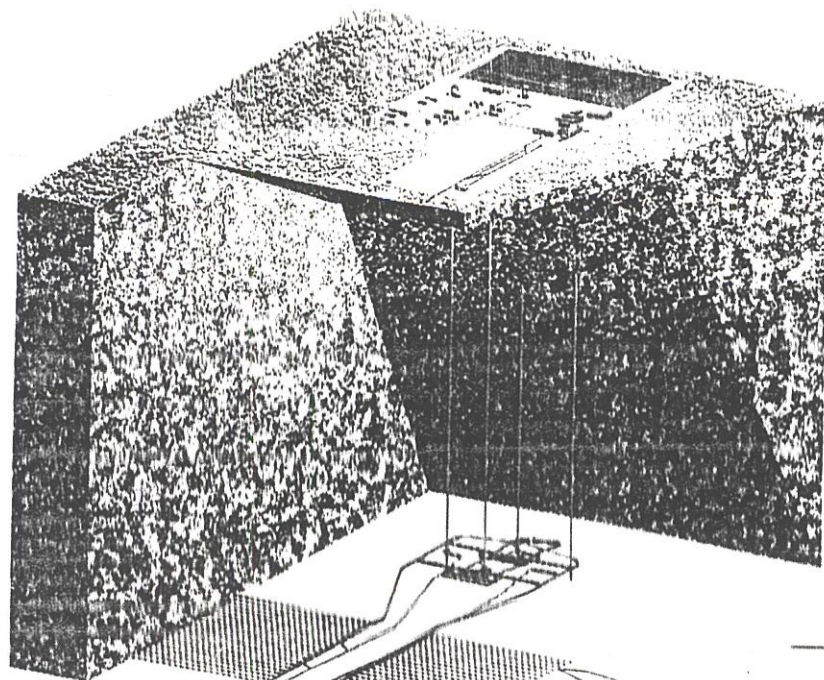
1. Conforme avanza el tiempo es necesario encontrar nuevas formas rentables y ecológicas de generar energía para de esta forma, en los países industrializados se deje de depender de las centrales nucleares y no se produzcan más residuos que tienen un peligro inminente para los seres humanos.

2. La solución definitiva para el almacenamiento seguro de los residuos radiactivos debe ser encontrada lo más pronto posible pues los alojamientos temporales van a saturar su capacidad y se creará un problema de incalculables consecuencias. Con el impulso que se le da ahora a los programas de investigación y desarrollo, aparte de encontrar la solución a este problema se impulsa a centros de investigación a seguir con su tarea de buscar soluciones a los problemas que se presentan en nuestro entorno y esto lleva a descubrir nuevas tecnologías y metodologías de trabajo.
3. Es muy importante también señalar que en nuestro país y en los centros de estudio se debería instalar softwares para la modelización por medio del método de los elementos finitos ya que es una herramienta poderosa para optimizar recursos a la hora de desarrollar proyectos.
4. Como se comentó en el apartado de modelización en la sección 3.4, es importante para la utilización de un código de elementos finitos el conocimiento de los problemas físicos a simular para así no tener interpretaciones erróneas de resultados que puedan conducir a fallos en la presentación de la solución del problema planteado.

5. A partir de los resultados obtenidos se puede recomendar el aumento del espesor de la cápsula para su diseño definitivo, pues las estudiadas para este tipo de accidente no podrían ser reutilizadas.

APÉNDICES

EL ALMACENAMIENTO GEOLOGICO PROFUNDO. DESCRIPCION DEL CONCEPT



El concepto de almacenamiento geológico profundo consiste en el aislamiento de los residuos mediante un conjunto de barreras múltiples dispuestas en serie que aseguran un elevado grado de redundancia del siste

BARRERAS NATURALES:

LA FORMACION ALOJANTE

LAS FORMACIONES ADYACENTES

BARRERAS DE INGENIERIA:

EL SELLO DE LOS BULTOS DE RESIDUOS

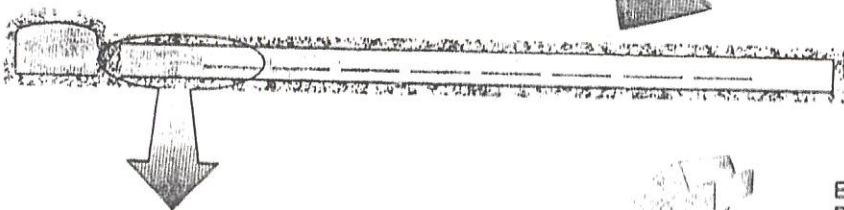
LA CAPSULA DE ALMACENAMIENT

LA FORMA DEL RESIDUO

Los residuos radiactivos se acondicionan en cápsulas de almacenamiento situadas horizontalmente en el interior de galerías de 2,4m de diámetro y 500m de longitud

Se consideran tres tipos diferentes de FORMACION ALOJANTE: Granito, Arcilla y Sal.

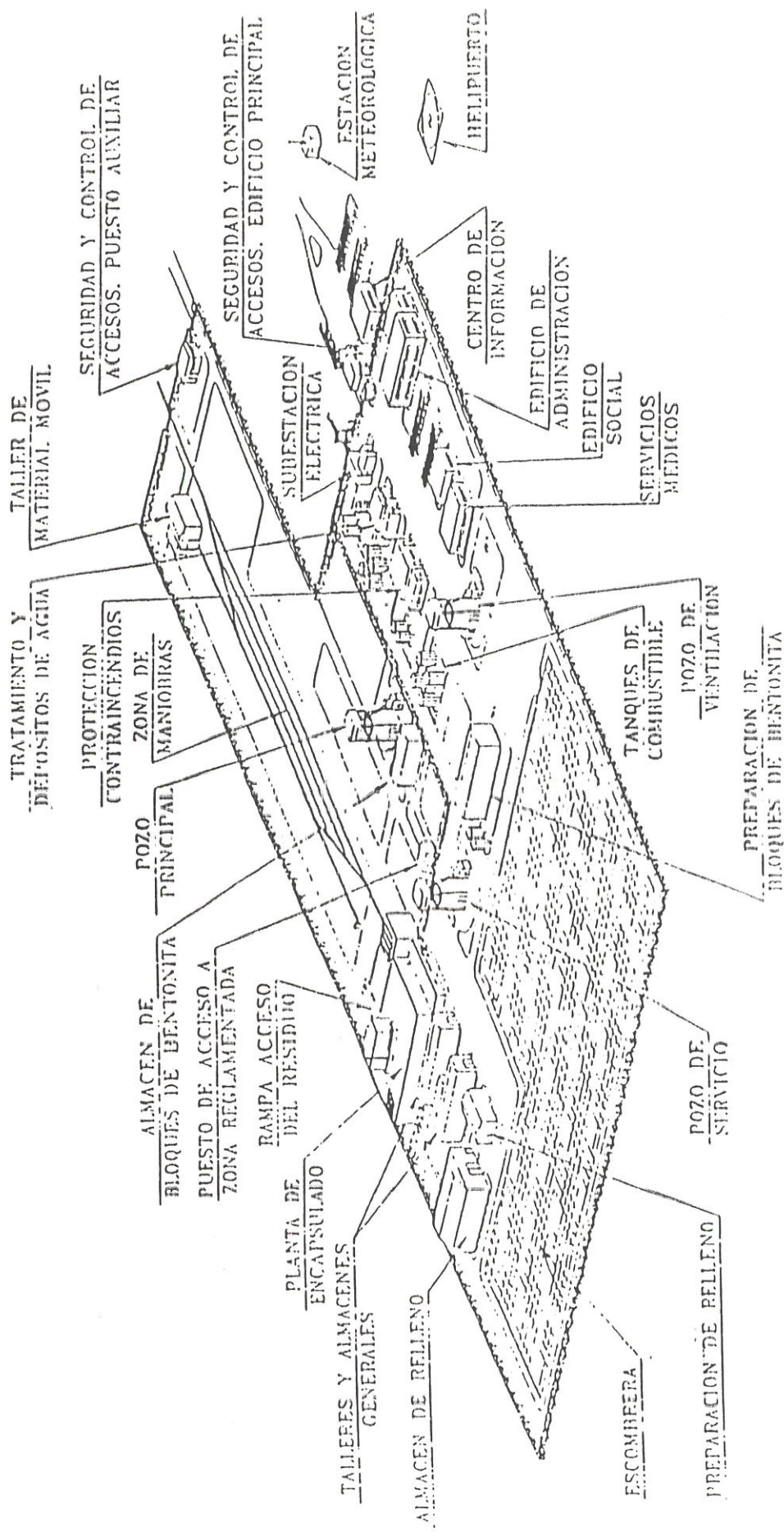
Los RESIDUOS los constituyen los elementos de combustible descargados del reactor o las matrices vitrificadas resultantes del reproceso de combustible



EL SELLO DEL BULTO DE RESIDUOS es un anillo de material impermeable que se interpone entre las cápsulas y la formación alojante

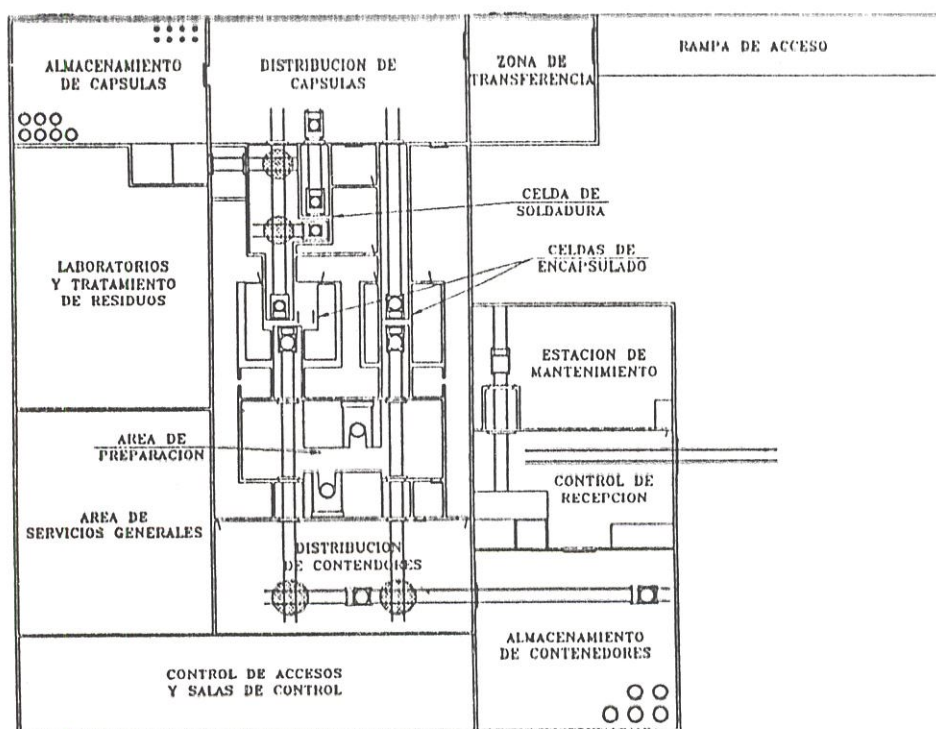
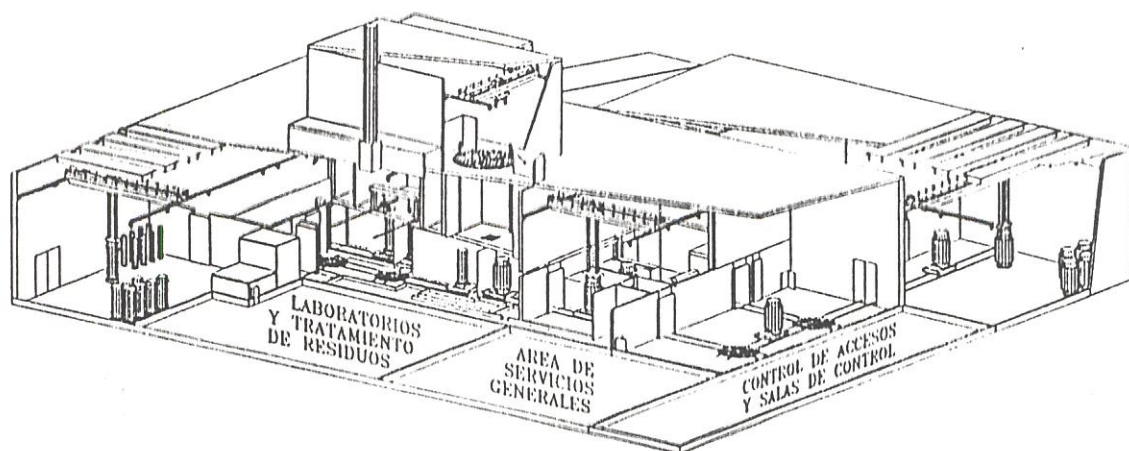
La CAPSULA DE ALMACENAMIENTO es un cilindro de acero al carbono de 10cm de espesor, 4,5m de largo y 90cm de diámetro, diseñada para más de 1.000 años

Las galerías se rellenan y sellan tras el almacenamiento de los residuos



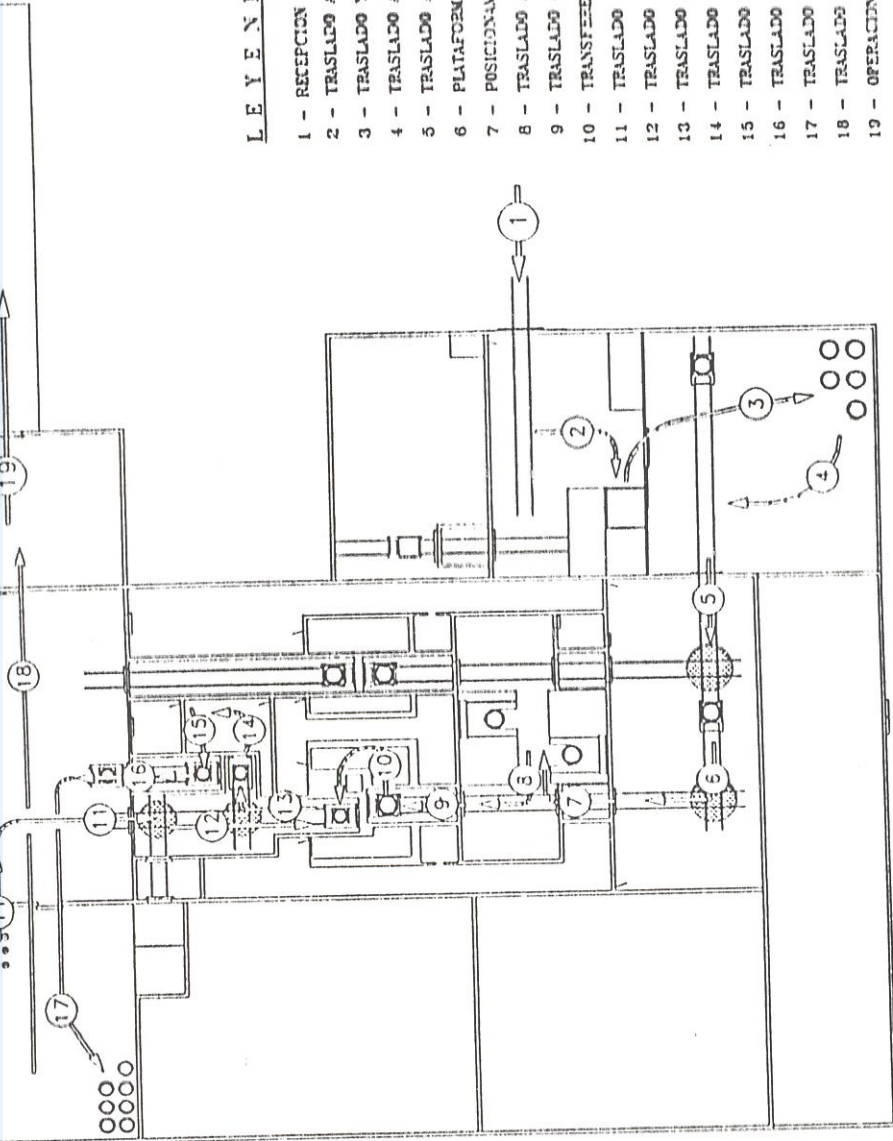
APÉNDICE B

INSTALACIONES DE SUPERFICIE DEL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO



APÉNDICE C

PLANTA DE ENCAPSULADO

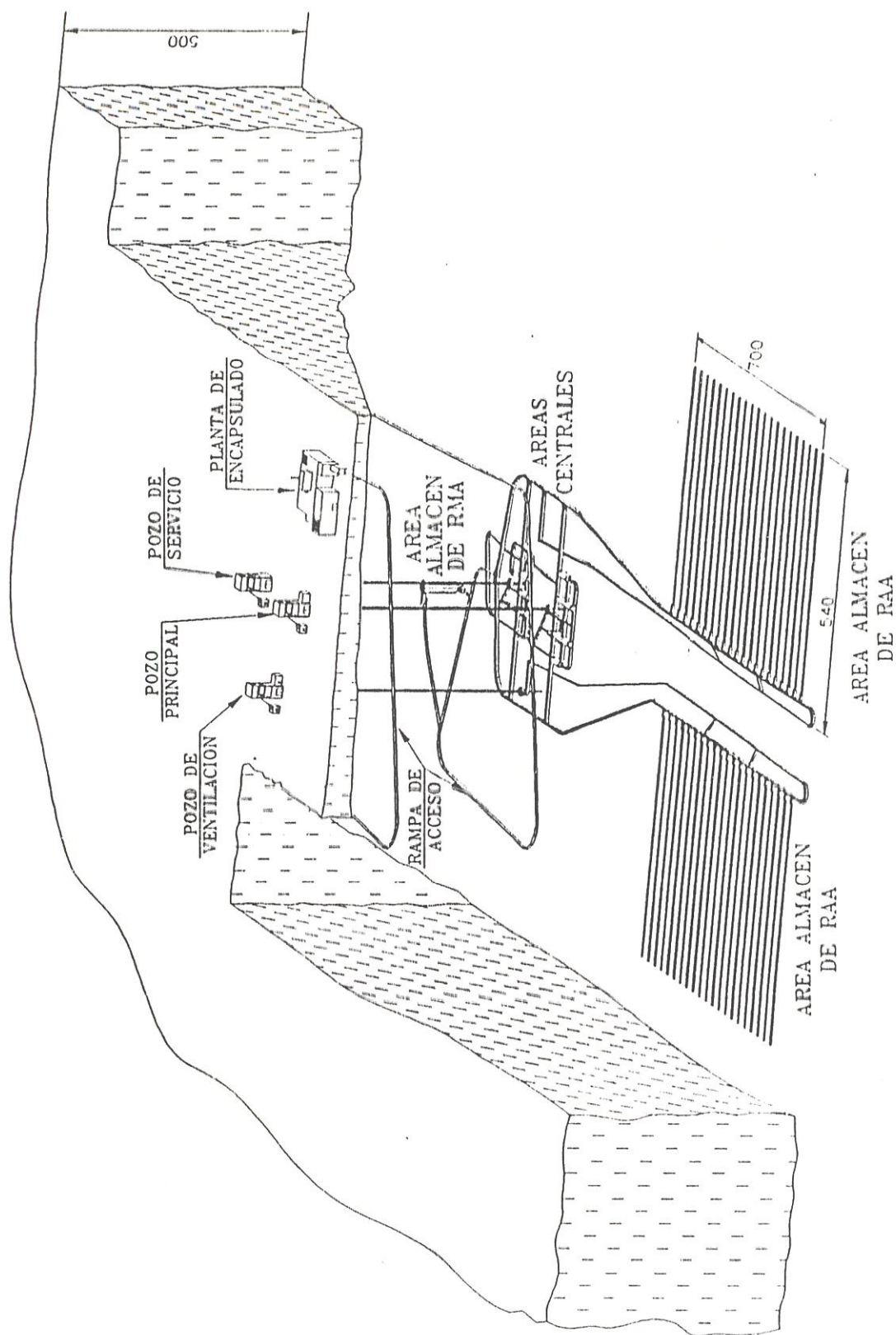


L E Y E N D A

- 1 - RECEPCION Y DESCARGA CONTENEDOR (GRUA)
- 2 - TRASLADO A PUESTO DE CONTROL Y DESCONTAMINACION (GRUA)
- 3 - TRASLADO Y POSICIONAMIENTO EN ALMACENAMIENTO (GRUA)
- 4 - TRASLADO A CARRO DE TRANSFERENCIA (GRUA)
- 5 - TRASLADO A DISTRIBUCION (CARRO DE TRANSFERENCIA)
- 6 - PLATAFORMA DE GIRO
- 7 - POSICIONAMIENTO EN AREA DE PREPARACION (GRUA)
- 8 - TRASLADO A PUESTO DE TRABAJO Y RETORNO A CARRO (GRUA)
- 9 - TRASLADO CONTENEDOR CELDA DE ENCAPSULADO (CARRO DE TRANSFERENCIA)
- 10 - TRANSFERENCIA DE COMBUSTIBLE (PERTIGA TELEMANIPULADORA)
- 11 - TRASLADO CAPSULA VACIA A TUNEL DE TRANSFERENCIA (GRUA)
- 12 - TRASLADO A CELDA DE ENCAPSULADO (CARRO DE TRANSFERENCIA)
- 13 - TRASLADO A CELDA DE SOLDADURA (CARRO DE TRANSFERENCIA)
- 14 - TRASLADO CAPSULA A INSPECCION (GRUA)
- 15 - TRASLADO CAPSULA A CARRO DE TRANSFERENCIA (GRUA)
- 16 - TRASLADO CAPSULA (CARRO DE TRANSFERENCIA)
- 17 - TRASLADO CAPSULA A ALMACENAMIENTO (GRUA)
- 18 - TRASLADO CAPSULA A AREA DE TRANSFERENCIA (GRUA)
- 19 - OPERACION DE TRANSFERENCIA (GRUA) Y TRASLADO A ALMACENAMIENTO

APÉNDICE D

SECUENCIA GLOBAL DE OPERACIONES EN LA PLANTA DE ENCAPSULADO



APÉNDICE E

Visión general de las instalaciones subterráneas

BIBLIOGRAFÍA

1. ENRESA, "Residuos Radiactivos: Un reto para el año 2000", Mariar S.A., España, 1986. Pág. 4.
2. ENRESA, "Tratamiento y Gestión de Residuos Radiactivos", Segunda edición, Transedit, España, 1995. Pág. 5.
3. ENRESA, "Almacenamiento Geológico Profundo de Residuos Radiactivos de Alta Actividad", Transedit, España, 1994. Pág. 6.
4. TIMOSHENKO, "Resistencia de Materiales", Tomo 1, Espasa-Calpe S.A., España, 1957. Pág. 12.
5. BYARS & SNYDER, "Mecánica de Cuerpos Deformables", Tercera Edición, Representación y Servicios de Ingeniería, S.A., 1978. Pág. 20.
6. TIMOSHENKO -YOUNG, "Problemas de Vibración en Ingeniería", Segunda edición, D-Van Nostrand-Company, Inc., 1960. Pág. 22.

7. MENDELSON, "Plasticity: Theory and Applications", Robert E. Krieger Publishing Company, 1968, Pág. 24.
8. ZIENKIEWICZ, "El Método de los Elementos Finitos", Reverté S.A., 1982, Pág. 39.
9. ABAQUS User's Manual, Version 5-7, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1997, Pág. 62.
10. SILICON GRAPHICS, "O2 Workstation Owners Guide", 1997, Pág. 63.
11. COOK ROBERT, "Finite Element-Modeling for Stress Analysis, John Wiley & Sons, Inc, Pág. 82.