

ANALISIS DE LA CAPACIDAD ULTIMA DE LA CONTENCIÓN
MARK-I DE LA C.N. DE SANTA MARIA DE GAROÑA
EN ACCIDENTE SEVERO FASE-A DRYWELL

J.M. Vázquez Sierra, F. Creis
NUCLENOR, S.A.
Hernán Cortés,
39003 Santander

J. Martí, F. Beltrán, F. Martínez
PRINCIPIA, S.A.
Velázquez, 94
28006 Madrid

1.- INTRODUCCION

Siguiendo las recomendaciones de Chicago Bridge and Iron Na-Con, referencias 1 y 2, Nuclenor ha evaluado la capacidad última del Sistema de Contención de la Central Nuclear de Santa María de Garoña, para unas condiciones de presión y temperatura, correspondientes a una situación de accidente severo y especificadas como curvas diacrónicamente crecientes, hasta los valores límites de 515 psig y 465°F respectivamente.

Esta evaluación del Sistema de Contención Mark-I de Garoña, ha sido realizada, de acuerdo con la propuesta de plan de actuación del GPE-BWR, relativa al venteo de la contención y requerida por el CSN.

La primera estimación de la capacidad en presión de la estructura, ha sido evaluada mediante el análisis de la respuesta del modelo global de la misma, bajo la acción de las cargas de accidente especificadas. En consecuencia, suponiendo que las respuestas de las láminas del Drywell y del Wetwell están desacopladas, como se indica en la referencia 1, este primer trabajo ha consistido en la elaboración y análisis de un modelo global de la lámina del Drywell.

2.- OBJETIVOS

La posibilidad de la ocurrencia de un accidente severo, que vaya más allá de las condiciones de diseño, plantea el problema de conocer cual es la reserva de capacidad resistente, de que dispone el sistema de contención primaria de la central.

Siendo la contención primaria la última barrera que impide el paso de los productos de fisión a la atmósfera, el interés se centra fundamentalmente en aquellos accidentes que incrementen la presión en su interior, de modo que pueda llegar a producirse una pérdida de estanqueidad en la misma.

El alcance del presente trabajo es evaluar, de la forma más realista posible, la capacidad última del sistema de contención primaria de la central, para resistir la elevación de la presión interna producida por un accidente severo.

Los objetivos a cubrir son dos, por un lado, determinar el valor límite de la presión interna que puede soportar la contención, sin que se produzca el fallo, y por otro lado, identificar el modo y la localización más probable de este fallo.

La metodología seguida se describe en los apartados siguientes y está basada en las recomendaciones recogidas en la referencia 1 de Chicago Bridge and Iron, para los sistemas de contención Mark-I similares al de Santa María de Garoña, así como en el estudio concreto realizado por esa compañía para nuestra central y citado como referencia 2. Dicha metodología se ha aplicado ya, entre otras, a las centrales de Peach Bottom II en USA (1) y de Chin-Shan en Taiwan (2).

Básicamente, se estudian dos niveles de respuesta del sistema de contención primaria, ante las acciones que genera el accidente severo postulado. Hay un primer nivel, que es el descrito en esta ponencia,

en el que se trata de obtener la respuesta global de la contención y un segundo nivel, desarrollado posteriormente en base al primero, en el que se determinan las respuestas locales de los distintos elementos singulares. Para ambas respuestas, global y local, se debe evaluar su influencia en cuanto a la capacidad última de la contención.

3.- DATOS DE PARTIDA

Disponemos fundamentalmente de tres tipos de datos de partida. En primer lugar, están los datos relativos a la geometría de los elementos que configuran el sistema de contención. En segundo lugar, se encuentran las propiedades de los materiales, fundamentalmente aceros, que constituyen las diversas partes de la estructura de contención. Por último, es necesario postular un escenario de accidente, para obtener las acciones sobre el sistema de contención, constituidas por las leyes de incremento de la presión y la temperatura en situación de accidente severo. La geometría de los diferentes componentes ha sido obtenida de los planos de la central, tomados de los archivos de Nuclenor, S.A.

Las propiedades mecánicas de los materiales se han tomado de la Sección III del Código ASME, aunque los valores que caracterizan el comportamiento plástico han sido ligeramente corregidos, para ajustarse mejor a la conducta real de los materiales, según se determina en los ensayos que se describen en la referencia 1. Estas correcciones tienden a aumentar la tensión de fluencia en una proporción próxima al 20%.

En cuanto al accidente severo postulado, este corresponde al escenario de un ATWS, el cual da lugar a una sobrepresión interior, combinada con un incremento de temperatura. Las leyes de variación temporal de la presión y la temperatura han sido obtenidas para una central similar a Santa María de Garoña en la referencia 1 y están representadas en las figuras 1, 2 y 3.

4.- PREPARACION DEL MODELO DEL DRYWELL

La metodología utilizada en el presente trabajo, para determinar el valor más realista posible de la capacidad última del sistema de contención, así como la localización más probable de su fallo en presión, se basa en la simulación numérica del efecto del accidente postulado, sobre las estructuras laminares de la contención. Esta simulación tiene en cuenta la geometría real del sistema, así como las propiedades y el comportamiento real de los materiales que lo constituyen. En el fondo, la idea es simular un ensayo a escala real de toda la estructura.

Sin embargo, el modelo completo de la contención, con todos sus detalles, es demasiado grande para poder ser analizado en un solo cálculo. Por ello, se ha optado por delimitar dos niveles de respuesta de la estructura ante las acciones que genera el accidente. Un primer nivel es el de la respuesta global del sistema, a la que contribuyen solamente los elementos macroscópicos más importantes de la contención (lámina del Drywell, tuberías de venteo y muro de hormigón de respaldo). La capacidad última a este nivel es un límite superior de la capacidad real y a este objetivo se limita el alcance de esta ponencia.

El segundo nivel es el de la respuesta local del entorno de las discontinuidades, constituidas por los elementos singulares de la estructura (distintas penetraciones, bridas de cierre, juntas de expansión, etc.), que se estudiará posteriormente con modelos de detalle y condiciones de contorno deducidas de la respuesta global.

Con esta metodología, que va de lo macro a lo microscópico, se obtiene una aproximación bastante buena a las condiciones reales de fallo del sistema (1).

A continuación se enumeran las hipótesis más importantes tenidas en cuenta para llevar a cabo la simulación numérica:

- a) De acuerdo con la referencia 1 de CBI Na-Con, las láminas del Drywell y el Wetwell se consideran estructuralmente desacopladas, para las cargas postuladas del accidente. Realmente, la única conexión entre ellas son las juntas de expansión, de fuelle, existentes en cada una de las ocho líneas de venteo que conectan a ambas estructuras. Esta hipótesis permite el estudio independiente de ambas.
- b) Debido a la simetría cíclica es posible utilizar solamente 1/16 de la lámina del Drywell, junto con 1/2 de la tubería de venteo, como modelo global del mismo, de una manera conservadora.
- c) El peso de la propia estructura y sus anejos se ha considerado despreciable, en cuanto a los esfuerzos del peso propio, en comparación con los producidos por las fuerzas de presión del accidente postulado.
- d) La lenta aplicación de la carga nos ha permitido considerarla como cuasiestática, despreciando los efectos dinámicos.
- e) La carga térmica se ha considerado uniforme a través del espesor y en toda la geometría de la lámina, por lo que no se han incluido ningún tipo de gradientes térmicos.
- f) El material de relleno entre el Drywell y las formas estructurales de hormigón, del edificio del reactor que lo envuelve, es muy blando y, en consecuencia, ha sido modelizado como aire. Es decir, que el espacio hueco entre la lámina y el muro envolvente, está modelizado como una holgura uniforme de 50 m/m de separación entre ambos.
- g) La forma estructural de hormigón envolvente, ha sido considerada como una superficie absolutamente rígida.
- h) La lámina de acero al carbono, en cuanto a sus ecuaciones constitutivas, ha sido modelizada como un material elasto-plástico, con una curva de tensión-deformación bilineal, con endurecimiento isotrópico, superficie de fluencia de Von Mises y propiedades mecánicas dependientes de la temperatura.
- i) La contribución del muro de sacrificio como arriostamiento interior del Drywell, ha sido tomada en cuenta mediante una rigidez equivalente, calculada por análisis lineal.

- j) La tapa del Drywell se ha supuesto como un cierre continuo a nivel de las correspondientes bridas, no permitiendo ningún movimiento relativo entre los labios de esta unión.
- k) Se ha postulado la actuación simultánea de una carga de presión y otra térmica, definidas mediante curvas diacrónicamente crecientes, hasta los valores límites de 515 psig y 465°F respectivamente, en un período de 100 minutos de duración, asociadas a un teórico accidente severo producido por un ATWS, según referencia 1.

5.- CARACTERISTICAS DEL MODELO ABAQUS

La modelización y el análisis de la estructura global del Drywell, han sido realizados con la versión 4.7 del programa ABAQUS, cuyo manual de usuario se indica en la referencia 3.

A continuación se describen las características más importantes del modelo elaborado:

5.1 ELEMENTOS

El modelo tiene un total de 964 elementos y 5899 grados de libertad.

Los siguientes tipos de elementos han sido utilizados en la confección del modelo:

- Elementos lámina para el Drywell y la Línea de Venteo.
- Elementos viga para el Colector de Venteos y los rigidizadores de la lámina del Drywell.
- Elementos barra de celosía para las Columnas de Soporte del Colector de Venteo y la representación equivalente del Muro de Sacrificio.
- Elementos muelle para la zona de transición de arena entre la lámina y el muro de hormigón.

- Elementos interfaz para modelizar la interacción entre la lámina y el muro de hormigón.
- Elementos huelgo para introducir los huelgos entre la lámina y el hormigón de respaldo, así como en el caso de los estabilizadores sísmicos.

5.2 MATERIALES

El modelo de material empleado para representar el comportamiento elasto-plástico del acero de la estructura, es una curva bilineal de tensión-deformación, dependiente de la temperatura, con superficie de fluencia de Von Mises y endurecimiento isotrópico, cuyas propiedades específicas son las del acero ASME-SA 212 GR B.

Se ha considerado que la lámina falla, cuando la deformación plástica efectiva alcanza el 1% en la superficie media, o el 2% en las superficies interna o externa. Sin embargo, se han admitido picos de deformación plástica efectiva de hasta el 5%, si estos tienen lugar en zonas muy localizadas, alrededor de puntos singulares de la lámina, de forma que, a juicio del analista, la integridad estructural no esté comprometida, existiendo margen para la relajación plástica de las tensiones, manteniendo siempre la deformación contenida de manera estable por el entorno.

Los valores anteriores son conservadores, pero proporcionan una estimación razonable de la capacidad última, ya que, una vez alcanzados, lo probable es que se produzca una localización, que lleve rápidamente a deformaciones mucho más altas para incrementos pequeños de presión.

5.3 ECUACIONES DE CONSTRICCIÓN

Las condiciones de simetría, a lo largo de cada uno de los planos meridionales extremos del modelo 1/16, han sido impuestas

como ecuaciones lineales de constricción, mediante la opción EQUATION del programa de cálculo.

Los refinamientos de la malla de la lámina se han incorporado mediante la opción de restricción multipuntual, MPC tipo 2, de ABAQUS y la conexión entre la parte de la Línea de Venteo modelizada como lámina y la parte modelizada como viga, se ha hecho utilizando una opción multipuntual, USER MPC, especial para este propósito.

5.4 PROCEDIMIENTO

El análisis ha sido llevado a cabo en dos pasos, usando el procedimiento STATIC de ABAQUS, con control automático del incremento de carga.

En el primer paso, la estructura es llevada desde las condiciones de construcción, hasta las condiciones de operación y, en el segundo paso, desde esta última situación, se ha llevado a efecto la aplicación de las cargas de accidente.

6- ANALISIS DE LA RESPUESTA GLOBAL DEL DRYWELL

La geometría de la lámina del Drywell se caracteriza por su simetría cíclica: Se pueden trazar planos verticales de simetría, por los ejes de las líneas de venteo y por los puntos medios de los espacios que unen cada dos líneas de venteo consecutivas. Dada la simetría axial de las acciones que genera el accidente postulado, basta con analizar un modelo de elementos finitos que incluye un sector de $22,5^\circ$ de la estructura, es decir un dieciseisavo de la misma (figuras 4.1 y 4.2).

El modelo se extiende pues entre dos planos verticales, el que contiene al eje de una línea de venteo y aquel otro cuyo azimut le sitúa a mitad de camino entre esa línea de venteo y la adyacente.

En el sentido vertical, se ha modelizado desde la clave de la cúpula esférica, hasta la parte inferior de la región de la transición de arena, en la que la lámina se empotra en la base de hormigón. La lámina se ha supuesto continua a través de la junta del cierre atornillado de la tapa.

La línea de venteo se ha modelizado incluyendo su prolongación dentro de la cámara de supresión y la línea rompedora de vacío se ha tenido en cuenta sólo hasta su junta de expansión. El análisis se ha llevado a cabo con el programa ABAQUS, discretizando el continuo estructural fundamentalmente con elementos lámina de ocho nudos, aunque también se han empleado algunos elementos viga, como se indica en el apartado 5.1. El posible contacto entre la lámina y el hormigón del edificio que la rodea se ha introducido mediante elementos tipo huelgo, o de interfase con superficie rígida, situados en toda la extensión de la lámina modelizada.

Tratándose de un modelo de tipo global, se busca primordialmente la respuesta también de carácter global de la estructura ante el accidente. No hay en el modelo juntas que pudieran dar lugar a fallos por escapes de carácter funcional, por lo que se espera un fallo de tipo estructural, es decir: la rotura de la lámina de contención.

El análisis se ha efectuado hasta alcanzar 1,37 MPa de presión interior y 181,5°C de temperatura en los elementos estructurales, aunque el fallo se produjo ligeramente antes, a 1,25 MPa (181,4 psi) y 177,8°C (352°F) respectivamente.

La figura 5 muestra una vista de la estructura deformada en el instante final del cálculo, lo que permite hacerse una idea sobre cual ha sido la respuesta obtenida de la misma.

Se distinguen dos zonas con comportamiento claramente diferenciado: la línea de venteo y la lámina del Drywell.

La componente principal del movimiento de la línea de venteo es un desplazamiento axial, con un valor máximo de 22 mm alcanzado en el instante final del cálculo, quedando sometida esta línea a esfuerzos relativamente bajos de compresión axial y flexión en el plano de simetría, que en ningún caso llegan a producir plastificaciones del material.

La lámina del Drywell tiene un comportamiento fundamentalmente de membrana, excepto en sus discontinuidades: transición entre la cúpula esférica y la lámina cilíndrica, entorno de los rigidizadores de la tapa, entorno de las placas de los estabilizadores sísmicos del muro de sacrificio, transición entre las láminas cilíndrica y esférica inferior, embocadura de la línea de venteo y transición de arena.

Este comportamiento de membrana es muy importante de cara a la seguridad de la lámina, ya que resulta imposible la rotura por esfuerzos derivados de este estado, en las zonas en que la estructura se encuentra envuelta por el muro de hormigón del edificio del reactor. Esto es así porque habiendo un huelgo entre el acero y el hormigón de 50 mm, la deformación total, necesaria para que se produzca el contacto entre ambos materiales, está contenida dentro de los límites de fallo establecidos en el apartado 5.2.

La parte de la lámina no respaldada por hormigón es de una rigidez y resistencia muy elevadas, como reflejan los resultados obtenidos.

Así pues, la rotura de la lámina del Drywell no se produce en las zonas en que esta trabaja en estado membrana.

La plastificación de la lámina se inicia en la parte esférica inferior, cuando la presión interior alcanza el valor de 1 MPa y, casi inmediatamente, 1,05 MPa, la parte cilíndrica también plastifica. La plastificación del cilindro es muy abrupta y han sido necesarios varios intentos, con distintos incrementos de carga, para conseguir la convergencia en esta etapa.

Cuando la presión interna alcanza 1,15 MPa el contacto de la lámina con el hormigón es casi completo y las deformaciones plásticas efectivas en la superficie media se estabilizan en torno al 0,8%, sin llegar al 1% de rotura.

A una presión de 1,18 MPa, se cierra el huelgo de los estabilizadores sísmicos que conectan la lámina con el muro de sacrificio, este hecho pone en marcha el mecanismo que, eventualmente, va a producir el fallo de la lámina, alrededor de las placas de anclaje a la misma de estos restrictores sísmicos.

El dispositivo de restricción del movimiento horizontal de estas placas limita el desplazamiento radial libre del extremo del estabilizador a 11,11 mm, muy por debajo del huelgo nominal de 50,80 mm entre lámina y hormigón de respaldo.

Por otro lado, el mayor espesor de la placa con respecto a la lámina cilíndrica (3,2 veces) y el propio estabilizador sísmico trabajando a tracción, contribuyen también a producir un fuerte gradiente de desplazamientos radiales, en esta zona, incluso antes de agotar los 11,11 mm de holgura.

Inmediatamente después del cierre de esa holgura, a una presión de 1,18 MPa, se produce una concentración de deformaciones plásticas sobre el borde vertical de la placa, las cuales superan el valor efectivo del 1,0% en la superficie media, cuando la presión se sitúa en 1,25 MPa (figura 6).

La lámina del Drywell se desgarró pues a lo largo de los bordes verticales de las placas de los estabilizadores sísmicos, cuando la presión inferior es del orden de 1,25 MPa y la temperatura de la lámina 177,8° (figura 7).

Para este nivel de acciones, en ninguna otra zona de la lámina se ha superado el 1,0% de deformación plástica efectiva, ni en la superficie media, ni en las superficies interna y externa.

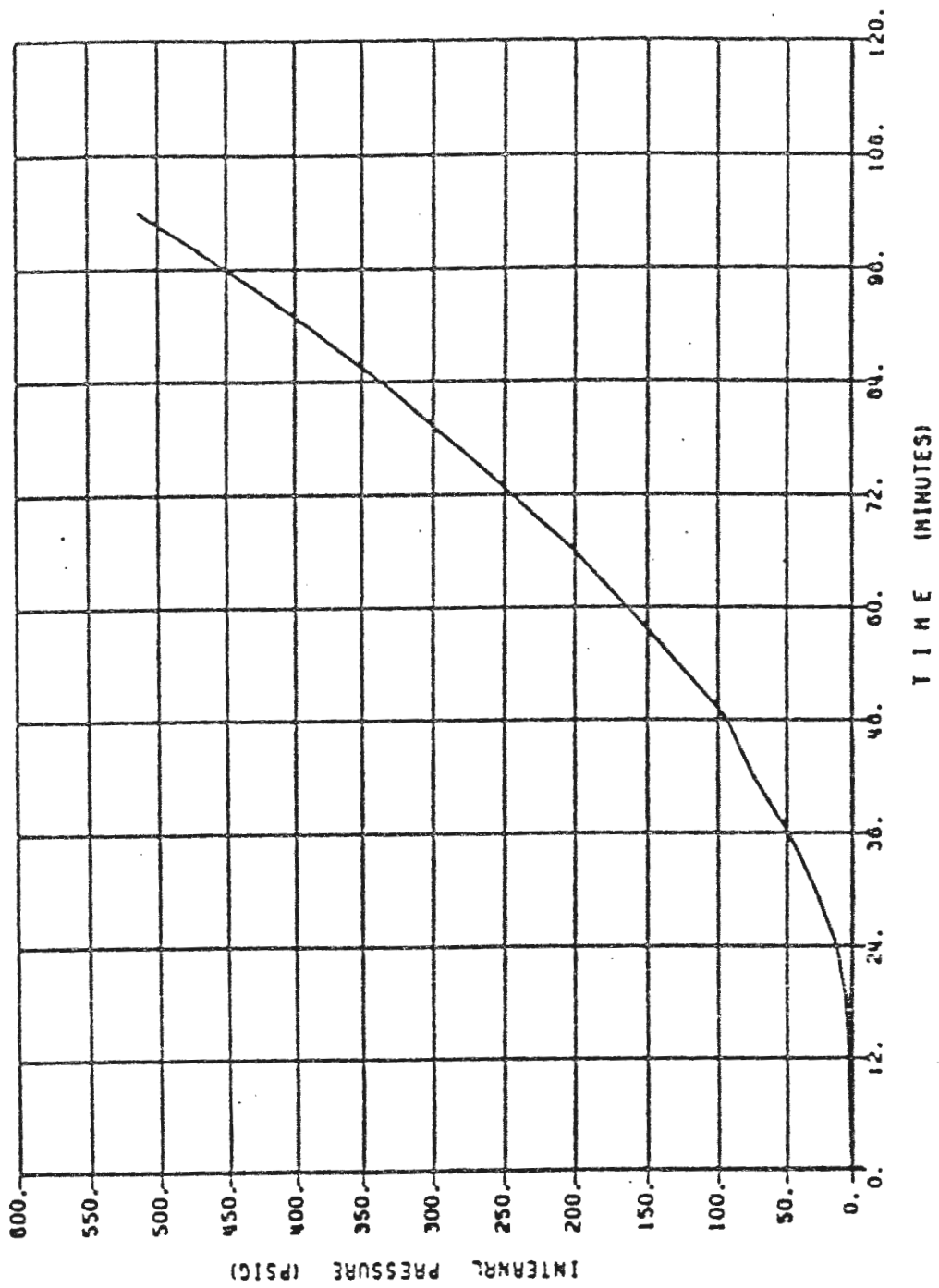
7.- CONCLUSIONES

- a) La lámina del Drywell del Sistema de Contención Mark-I, de la Central Nuclear de Santa María de Garoña, en situación de accidente severo, es capaz de llegar hasta un límite en presión de 1,25 MPa (181,4 psi), antes de que se produzca el fallo plástico, por concentración de deformaciones locales, a nivel de las placas de sus estabilizadores sísmicos. El fallo que se produce es de carácter local y no compromete la integridad del resto de la estructura.
- b) Las líneas de venteo en su conjunto están sometidas a esfuerzos relativamente bajos y no comprometen la integridad de la contención.
- c) La lámina del Drywell responde globalmente como una membrana, sin flexión, a las acciones que produce el accidente severo, salvo en unas pocas zonas singulares de discontinuidad.
- d) Las tensiones del estado membrana no pueden producir el fallo de la lámina en las zonas respaldadas por hormigón, para el nivel de presiones estudiado. Esto es así porque las deformaciones necesarias para producir el contacto lámina-hormigón son inferiores a las de rotura. La envoltura de hormigón, dentro del edificio del reactor, juega así un papel fundamental en la integridad de la contención bajo presión.
- e) La parte de la lámina del Drywell no respaldada por hormigón está muy reforzada y apenas se deforma.
- f) Por otra parte, ABAQUS se ha probado realmente como una herramienta eficiente para este tipo de análisis. Las condiciones de fallo se han alcanzado sin problemas serios de convergencia y el cálculo completo, con 30 incrementos de carga y tres iteraciones por incremento como media, ha consumido alrededor de 15 h de tiempo de CPU en un ordenador CONVEX C-120, lo que puede

considerarse como una cantidad razonable de recursos computacionales.

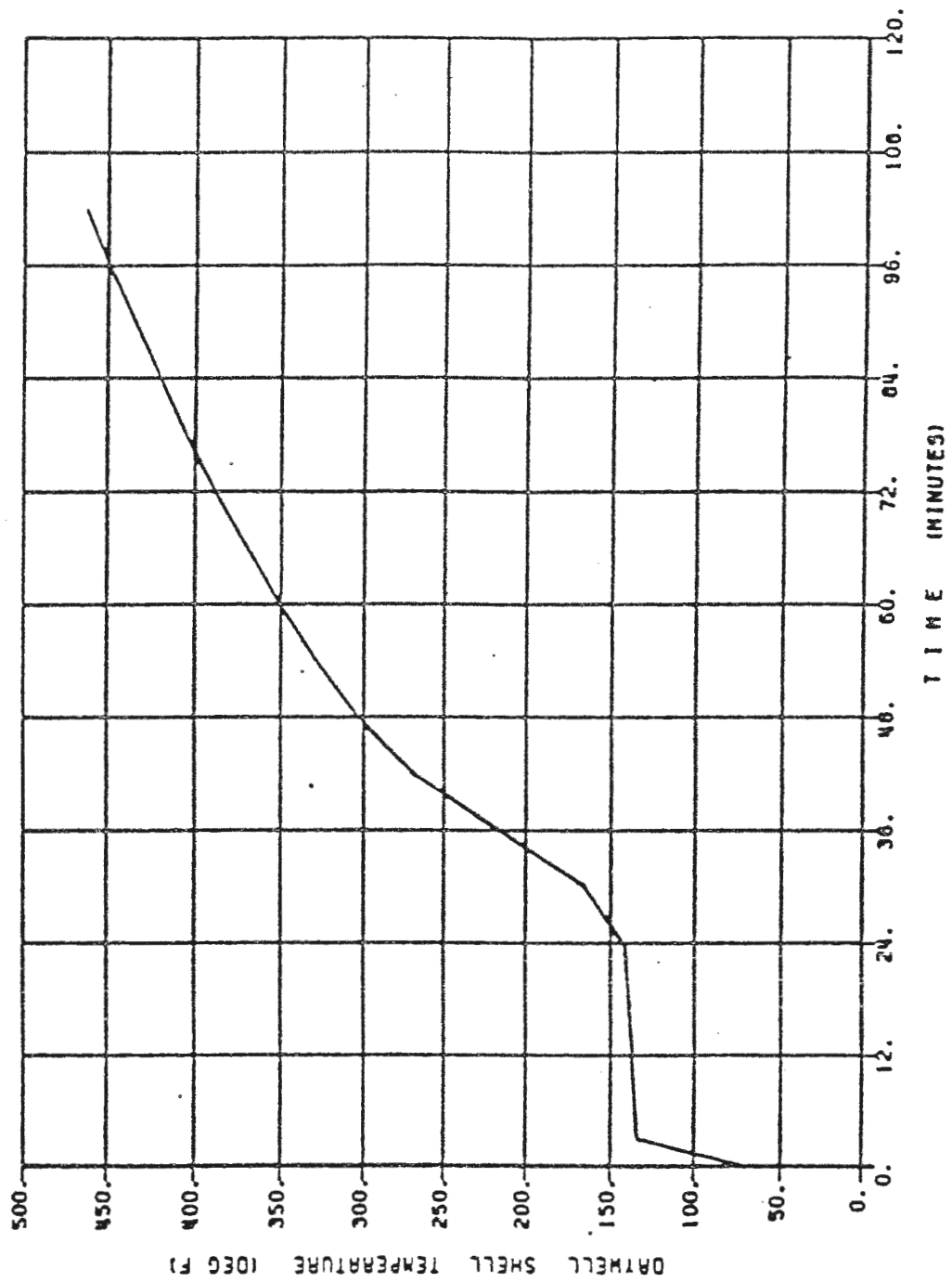
8.- REFERENCIAS

- 1.- "Mark-I Containment Severe Accident Analysis".
Report prepared for the Mark-I Owners Group. CBI Na-Con, Inc. (1987).
- 2.- "Scoping Study for the Phase 2 Analysis of Mark-I Containment Vessels".
Report prepared for Santa María de Garoña Nuclear Power Plant. CBI Na-Con, Inc. (1988).
- 3.- "ABAQUS User's Manual, Version 4.7".
Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc. (1988).
- 4.- "Failure Prediction of BWR Mark-I Containment due to Over-pressurization". J.S. Yu et al.
Second International Conference on Containment Design and Operation. Toronto, Octubre 1990.



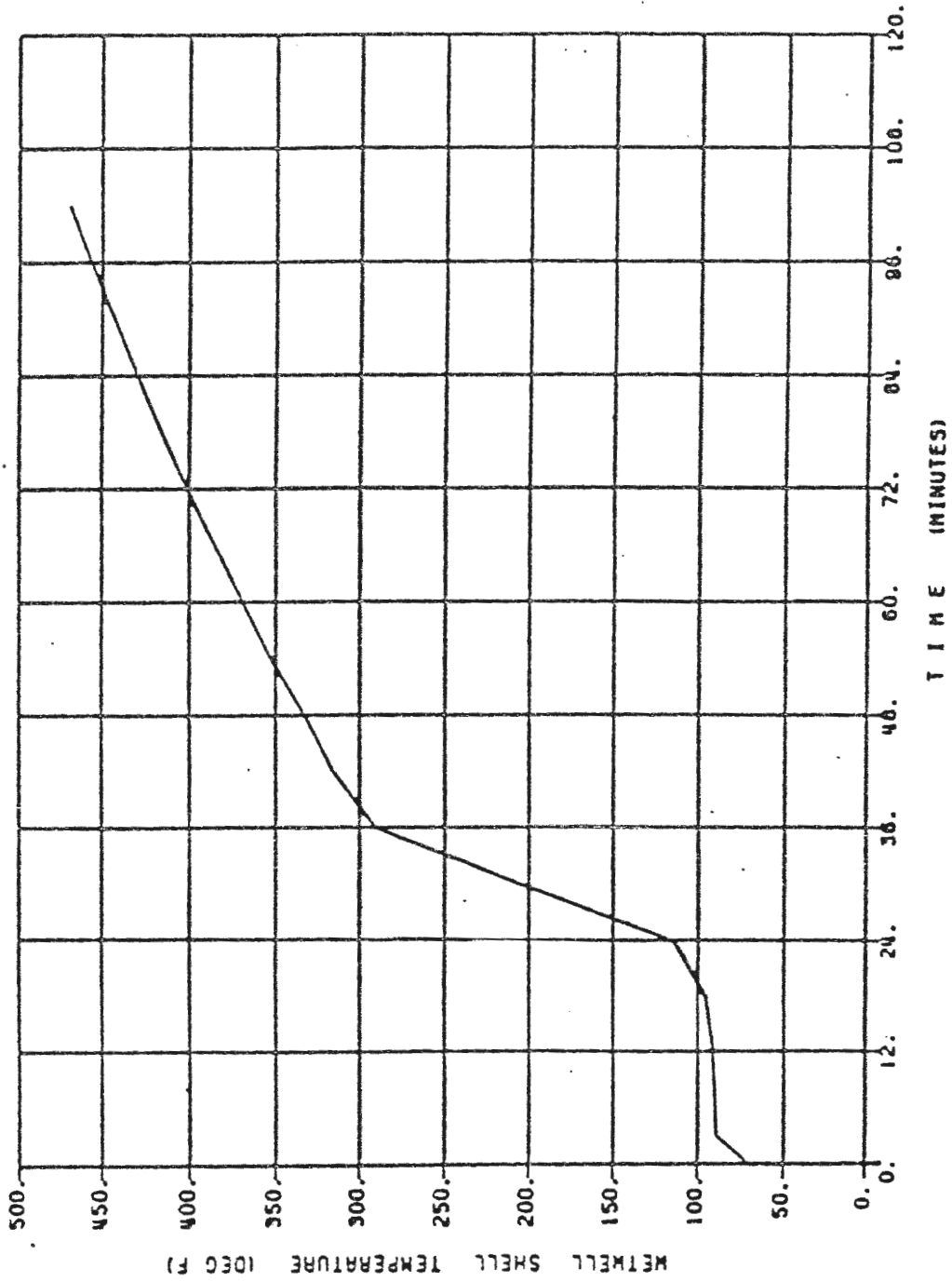
ATMS SCENARIO SEVERE ACCIDENT LOADING

FIGURA 1
CARGA DE PRESION



ATWS SCENARIO SEVERE ACCIDENT LOADING

FIGURA 2
 TEMPERATURA DE LA LAMINA DEL DRYWELL



ATMS SCENARIO SEVERE ACCIDENT LOADING

FIGURA 3
 TEMPERATURA DE LA LAMINA DEL WETWELL

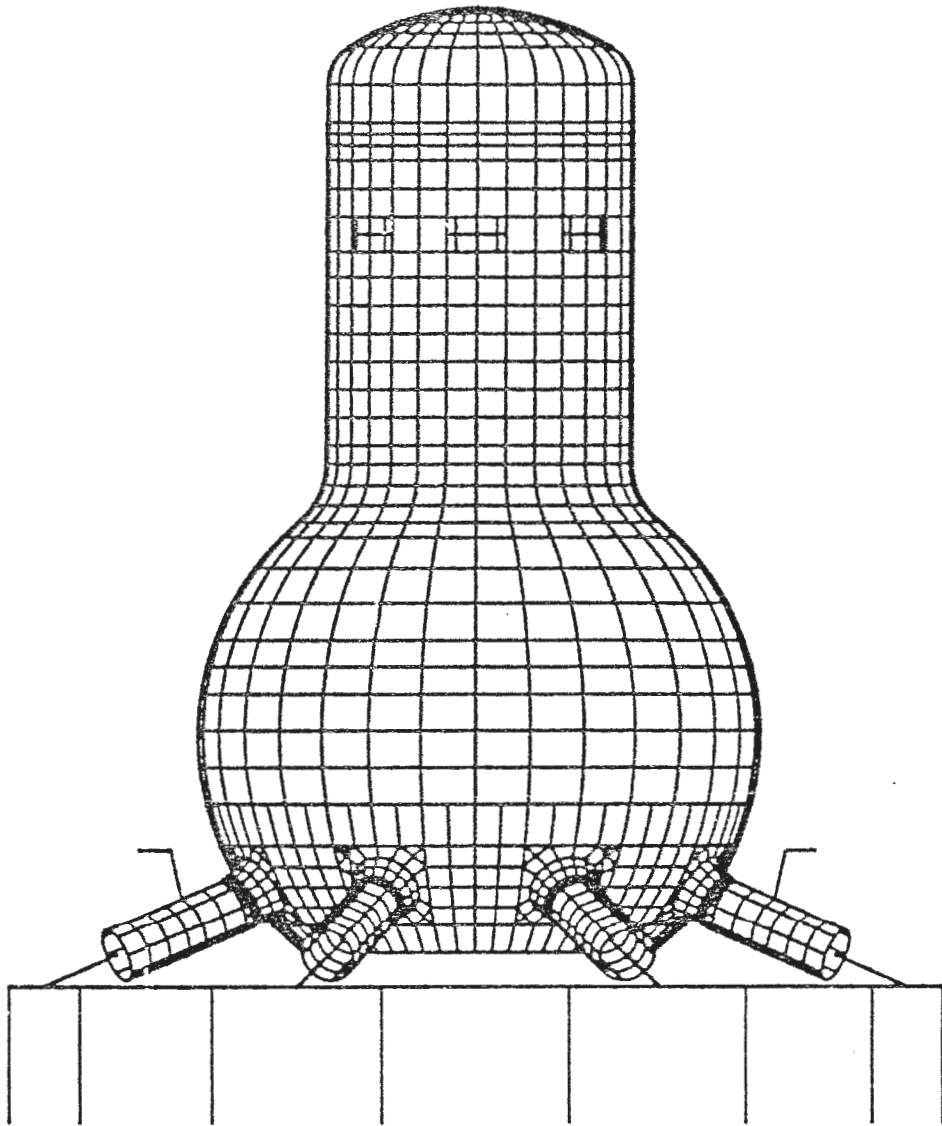


FIGURA 4.1

MODELO GLOBAL DEL DRYWELL

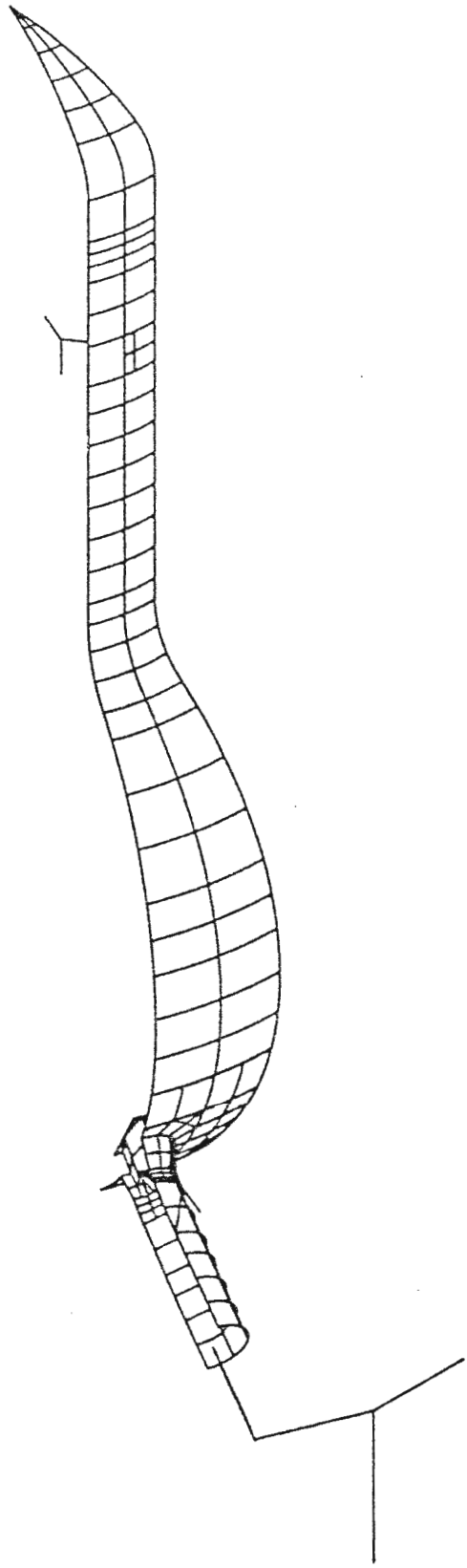


FIGURA 4.2
MODELO GLOBAL DEL DRYWELL

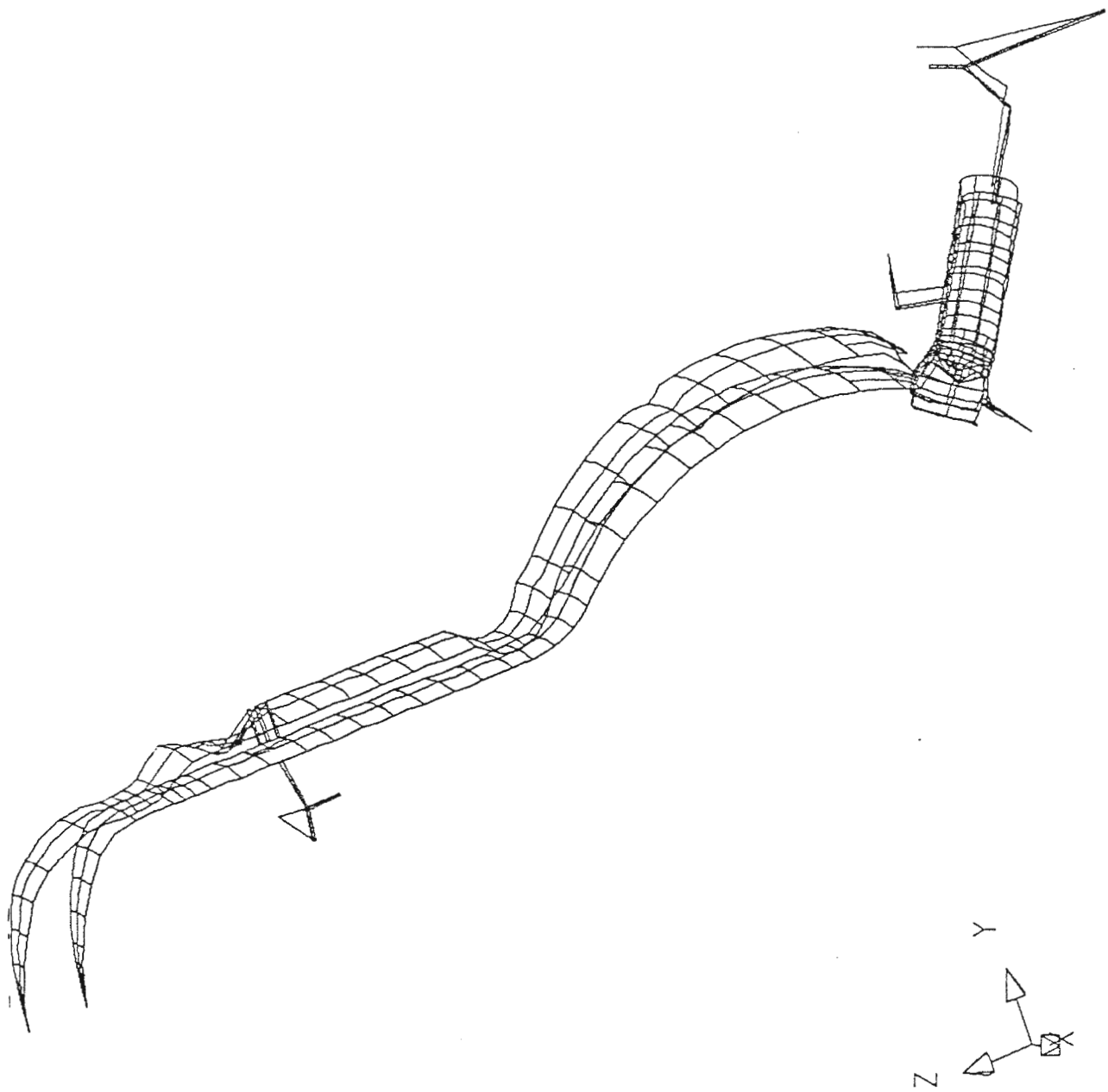


FIGURA 5
DEFORMADA BAJO 1,37 MPa DE PRESION INTERIOR

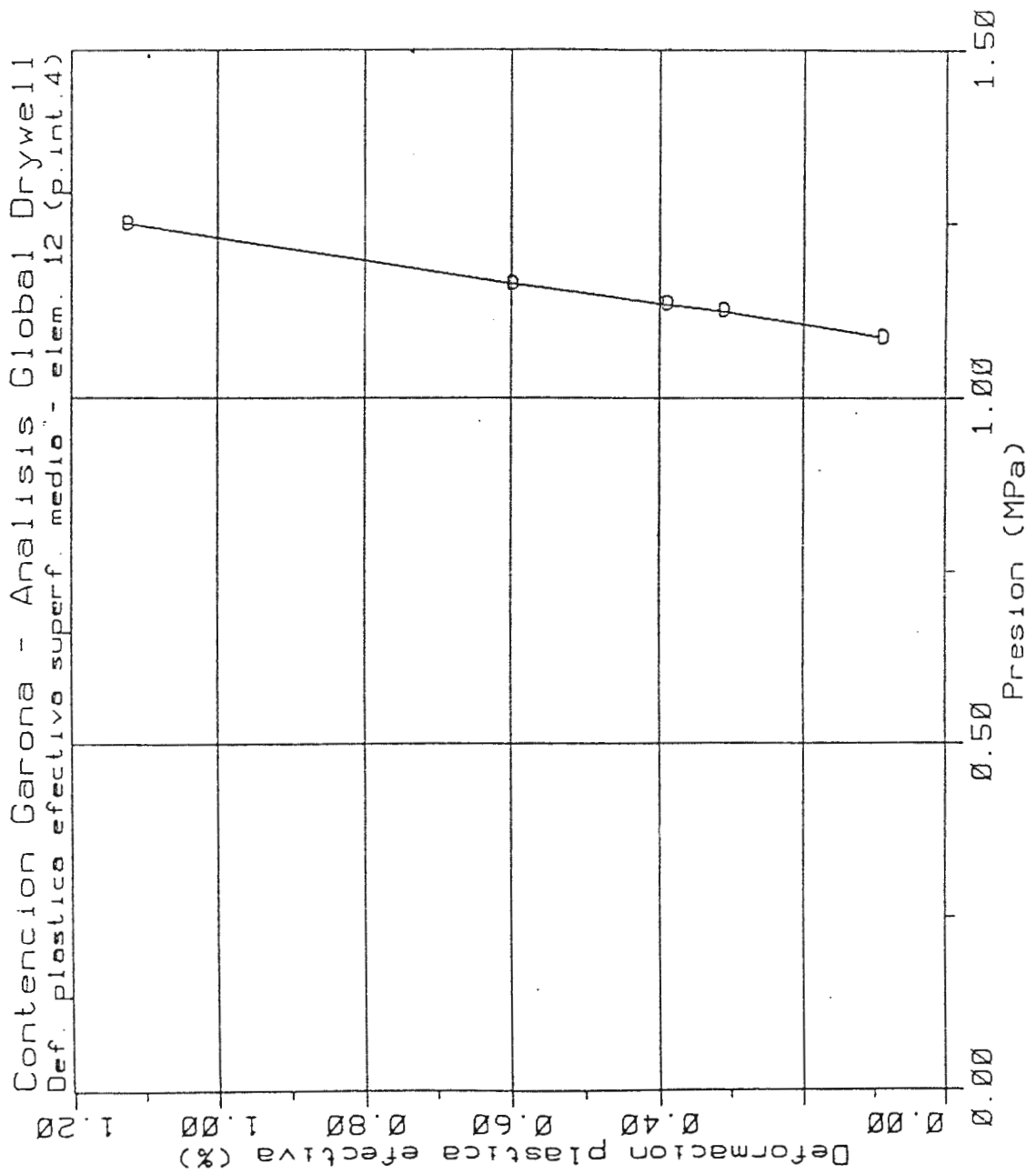
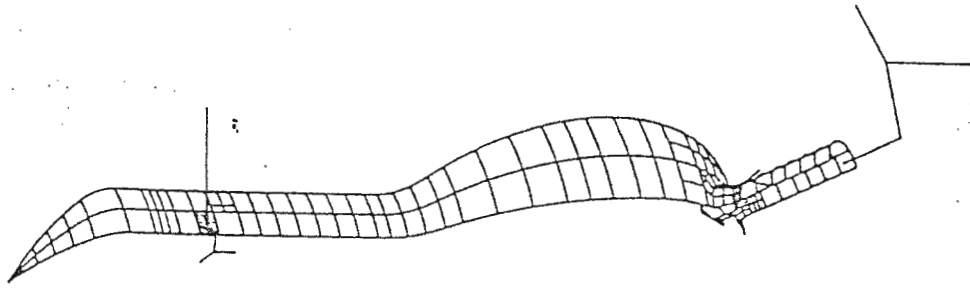
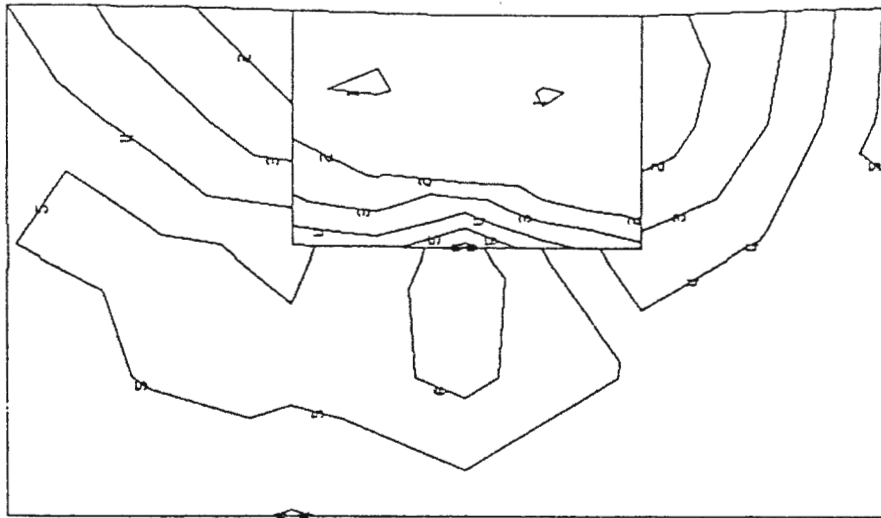
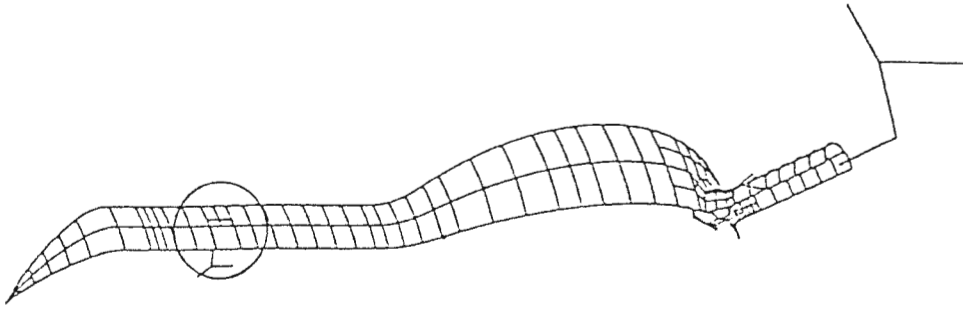


FIGURA 6

EVOLUCION DE LA DEFORMACION PLASTICA EFECTIVA EN LA ZONA DE DESGARRO





| PEEQ | |
|-----------------|-----------|
| SECTION POINT 5 | |
| | VALUE |
| 1 | +2.5#E-00 |
| 2 | +2.5#E-03 |
| 3 | +5.0#E-03 |
| 4 | +7.5#E-03 |
| 5 | +1.0#E-02 |
| 6 | +1.25E-02 |
| 7 | +1.5#E-02 |

FIGURA 7

ISOLINEAS DE DEFORMACION PLASTICA EFECTIVA
EN LA ZONA DE DESGARRO (1,37 MPa)