

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA ONDA DE PRESIÓN GENERADA EN ACCIDENTES CON PÉRDIDA DE REFRIGERANTE EN CALDERAS NUCLEARES.

Quaderns
d'enginyeria

Marcial Valero Martínez *

3(1981) 1 p. 1-18

RESUMEN

La creciente exigencia en materia de "Seguridad Nuclear", obliga al perfecto conocimiento de las causas y efectos de cada uno de los posibles accidentes en una caldera nuclear. En este trabajo se analizan los efectos de la onda de presión generada en accidentes con pérdida de refrigerante. La onda de presión puede dañar o deformar estructuras como: Pared, tapa y rejilla del barrilete, tubos guía de las barras de control y conducciones de la refrigeración de emergencia. Cualquier cambio en la geometría de estas estructuras puede provocar una incorrecta reacción de la caldera frente al accidente.

Se enumeran las hipótesis de cálculo y se exponen las bases del tratamiento teórico en el que se han considerado las estructuras como rígidas.

Se analiza un caso típico de caldera de agua en ebullición y se muestran comparaciones de los métodos de cálculo creados con otros y con experimentos, quedando así verificada la validez de los planteamientos.

Por su sencillez y por el corto tiempo de cálculo que necesitan los programas creados, son muy apropiados para extensos análisis paramétricos, con los que tanto se pueden estudiar calderas de agua en ebullición como calderas de agua a presión.

SUMMARY

The increasing demands in the field of "Nuclear Safety", obliges to a perfect knowledge of the causes and effects of every possible accident in a Nuclear Power Plant. In this paper will be analysed the effects of the pressure wave appearing in a LOCA (Loss of coolant accident). The pressure wave could deform the following structures: core barrel wall, cover and bottom, control rods and safety isolant system. Any change of the geometry of these structures could provoke an incorrect system reaction after the accident has happened.

The basis and hypothesis for the theoretical analysis will be exposed. The structures are considered to be rigid.

A typical boiling water reactor will be analysed and the developed theory will be verified in comparisons with experimental results and the results obtained with some others models.

Due to the easy application and short calculation time of the created programmes, they are recommended for parametrical calculations in the pressurized water reactors and boiling water reactors.

INTRODUCCION

El tema de la Seguridad Nuclear dispone actualmente de una atención prioritaria. Esta atención esta respaldada por un interes creciente de los organismos oficiales y de los productores de calderas nucleares en garantizar el buen funcionamiento de las mismas, pa

*Doctor Ingeniero Industrial Institut für Kerntechnik.

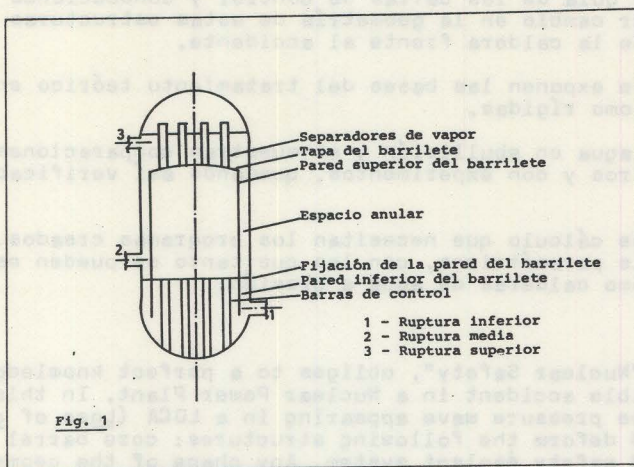
Universidad de Hannover, República Federal Alemana

Dedicado al Profesor FREIXA con motivo de su jubilación.

ra así aminorar las consecuencias económicas y sobre todo de impacto en el medio ambiente que accidentes o un defectuoso funcionamiento pudieran tener.

Uno de los accidentes que en una caldera nuclear mayores consecuencias pueden arrastrar es la ruptura del circuito primario de refrigeración, ya que esto supone la pérdida del medio refrigerante y con ello la posible fusión del núcleo. Por supuesto el proyectista procura ya desde un principio que este accidente no puede ocurrir. No obstante, los análisis de "Seguridad" deben garantizar que si ocurriera un accidente con pérdida de refrigerante, los mecanismos de seguridad intrínsecos y no intrínsecos al funcionamiento de la caldera todavía debieran de conducir a un correcto "apagado" de la misma.

En este tipo de accidente de cuyo análisis se va a ocupar el presente trabajo se pueden distinguir tres fases:



- (1) Una rotura del circuito primario, (Fig. 1) tiene como consecuencia un cambio brusco de presión en la zona de rotura, pues la presión pasará de tener el valor interno correspondientes de la caldera a tener el valor externo. Rapidamente se alcanzan en la zona de rotura las condiciones de saturación. La diferencia (presión inicial de la caldera - presión de saturación a la temperatura del sistema), se propagará a partir de la rotura en forma de una onda de depresión a la velocidad del sonido en el medio refrigerante a las condiciones termodinámicas correspondientes.

Este efecto de succión puede afectar a las estructuras internas de la vasija de presión de tal manera que por ejemplo:

Sea capaz de modificar la geometría del barrilete.

Por movimiento del barrilete se modifique la geometría interna del núcleo.

Se modifique o inutilice alguna barra de control.

Se modifiquen o inutilicen las conducciones de la refrigeración de emergencia.

Se afecte a la rejilla del barrilete modificando la disposición de las barras de control (en reactores de agua en ebullición).

La duración de esta fase es aproximadamente en las calderas convencionales de unos 100ms pues la onda se extinguirá por amortiguaciones sucesivas o al alcanzarse las condiciones de saturación en el sistema. No obstante, los mayores efectos aparecen dentro de los primeros 15 ms.

(2) Una segunda fase sería el vaciado del sistema. La corriente de refrigerante que fluye a gran velocidad hacia la ruptura, también podría afectar a algunas estructuras. Los efectos aparecidos con la corriente de refrigerante son de menor cuantía que los aparecidos con la onda de presión.

(3) La tercera fase sería en la que entran en consideración las variaciones de reactividad por pérdida del moderador, variación de la temperatura por pérdida de refrigerante y entrada en funcionamiento de la refrigeración de emergencia y demás mecanismos de seguridad.

Estas tres fases no se pueden separar temporalmente, sino que están superpuestas. Con ellas solo se separan una serie de aspectos del accidente que reúnen características plenamente diferenciadas.

La tercera fase ha sido ya objeto de numerosos análisis con los que se puede ver en amplios periodos de tiempo la evolución de temperaturas, presiones, reactividades, etc.

La segunda fase solo admite un tratamiento particularizado para cada estructura.

La primera fase caracterizada por la onda de presión y que es en la que en concreto se ha centrado la atención de este trabajo, no ha sido hasta el momento objeto del interés que debiera. Teniendo en cuenta que los efectos de la onda de presión pueden afectar a estructuras de la caldera que son decisivas en el comportamiento de la misma (barras de control, barrilete, refrigeración de emergencia), creo, y afortunadamente se está empezando a creer, que el conocimiento de la acción de la onda sobre dichas estructuras es decisivo en el conocimiento de la evolución del accidente y que la primera garantía de seguridad de una caldera debe ser que los mecanismos de seguridad sean capaces de soportar este primer impacto de la onda de presión. No se olvide, como indican los más recientes estudios de "Seguridad" /5/, que un accidente con pérdida de refrigerante, representa las 2/3 partes del riesgo que lleva asociado una caldera nuclear.

PLANTEAMIENTO TEORICO

Con este trabajo se pretende ayudar a encontrar una respuesta a las siguientes preguntas

¿ Se puede bloquear alguna barra de control por acción de la onda de presión?

¿ Se puede romper la fijación del barrilete o modificar la geometría del mismo?

¿ Se puede deformar la rejilla en el fondo del barrilete afectando a la disposición interna del núcleo?

¿ Como se ve afectada la refrigeración de emergencia?

¿ Que parámetros son decisivos en los efectos de la onda de presión?

Junto a estas preguntas se ha impuesto la condición de que los métodos de cálculo a crear han de ser suficientemente flexibles que permitan:

- Amplios estudios paramétricos.
- Simulación de diferentes tipos de geometrías dentro de la caldera.
- Simulación de los tipos de calderas mayoritariamente representados en los planes energéticos actuales, como son las calderas de agua en ebullición y las de agua a presión.

La primera condición, es decir, la posibilidad de realizar amplios estudios paramétricos con costos de cálculo razonables, ha decidido la línea fundamental de trabajo. Ha habido que renunciar a tipos de análisis en los que las estructuras son deformables, ya que el grado de complejidad introducido conduce a largos cálculos iterativos con tiempos grandes de computador, que suponen muy elevados costos. Las estructuras son pues consideradas como rígidas.

El conocimiento de los efectos de la onda de presión, implica la consecución de una función matemática temporal y local con la que se pueda calcular la distribución de presiones sobre las estructuras internas de la caldera. Con la distribución de presiones se puede calcular la distribución de esfuerzos y esfuerzos totales sobre determinadas estructuras y con ellos se pueden realizar los cálculos mecánicos que permitan predecir si las estructuras van a soportar o no la acción de la onda.

Se considera la propagación de la onda en tres casos diferentes a analizar (Fig. 1):

- Propagación en tubos. Superficie de propagación constante.
- Propagación en el anillo de agua entre vasija y barrilete. Superficie de propagación con crecimiento lineal (Ruptura 2).
- Propagación en la parte superior e inferior de la vasija. Superficie de propagación con crecimiento cuadrático (Ruptura 1 y 3).

El estudio de la propagación de ondas de presión en tuberías es conocido y existen programas de cálculo como el llamado WHAM que lo posibilitan.

Para el estudio de la onda en su propagación en el anillo de agua entre la vasija y el barrilete, y en la parte superior e inferior de la vasija, han sido creados los programas ONDA y TUCHA que responden respectivamente a un crecimiento lineal y cuadrático de la superficie de propagación de la onda. La teoría de estos programas está basada en las ecuaciones de (Fig. 2) :

- Conservación de la masa.
- Conservación del impulso.
- Conservación de la energía.

MASA $\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \, dv = 0$

IMPULSO $\frac{di}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \vec{u} \, dv = \sum_V R_V = R_M + R_S$

ENERGIA $\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V (\rho e) \, dv = L_M + L_S + L_W$

Donde:

M - Masa del fluido |kg|
V - Volumen |m³|
ρ - Densidad |kg/m³|
t - tiempo |s|
i - Impulso
 $\sum_V R_V$ - Suma de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema
 R_M - Fuerzas de volumen (Peso)
 R_S - Fuerzas de superficie (Fuerzas de rozamiento y debidas a la presión estática)
 L_M - Potencia debida a las fuerzas de gravedad
 L_S - Potencia debida a las fuerzas de superficie
 L_W - Pérdida o ganancia de energía en forma de calor a través de la superficie exterior.

Fig. 2

A partir de estas ecuaciones se llegan a calcular las expresiones de la Fig. 3. que dan la caída de presión como función temporal y local.

En el cálculo de la caída de presión para el caso de un crecimiento lineal de la superficie de propagación, ha sido posible incluir la influencia del tiempo de apertura de la rotura y simulación de distintos tipos de rotura por medio de la función tangente hiperbólica (Fig. 4) .

La simulación se consigue por medio de una traslación del origen de coordenadas a un punto determinado sobre la

CRECIMIENTO LINEAR DE LA SUPERFICIE DE PROPAGACION

$$\Delta P = P_0 - p = (P_0 - p_s) - \rho \left\{ - \frac{\partial u_1}{\partial \tau} \frac{\ln(K_B x^*)}{K_B} + \frac{u_1^2}{2} \left[1 - \frac{1}{(K_B x^*)^2} \right] + \frac{u_1 K_A [\ln(K_B x^*) - \frac{K_B x^*}{K_B x^*}] }{K_B^2} \right\}$$

$$K_A = \frac{\beta}{c^2} \frac{B(\tau) - (\alpha - \frac{\beta}{ct}) \frac{\partial B(\tau)}{\partial \tau}}{B^2(\tau)} - \frac{1}{c\tau^2}$$

$$K_B = \frac{\alpha - \frac{\beta}{ct}}{B(\tau)} + \frac{1}{c\tau}$$

$$B(\tau) = \frac{B_0}{1 - \gamma_0} [\text{th}(\tau^*) - \gamma_0]$$

$$\tau^* = x_0 + x_{N98} - \frac{x_{N98}^2 - x_0^2}{2\tau}$$

- | | |
|--|--|
| p_s - Presión inicial del sistema | β - Apertura inicial de rotura |
| P_0 - Presión de saturación | c - Velocidad del sonido |
| p - Presión local | α - Coeficiente de crecimiento de sup. de propagación |
| ρ - Densidad | B_0 - Superficie total de rotura |
| u_1 - Velocidad de salida por rotura | x_0 - Parámetro para función de rotura |
| τ - Tiempo | $y_0 = \text{th}(x_0)$ |
| x - Distancia a rotura | x_{N98} - Coordenadas internas de cálculo |
| t - Tiempo de apertura de la rotura | |

CRECIMIENTO CUADRATICO DE LA SUPERFICIE DE PROPAGACION

$$\Delta P_s \Delta P_0 \sqrt{\frac{A_R}{A}}$$

- Δp - Caída de presión en frente de onda
- ΔP_0 - Caída de presión inicial en la rotura
- A - Superficie de propagación de la onda
- A_R - Superficie de rotura

Fig. 3

función tangente hiperbólica (Parte superior de la Fig. 4). Con la oportuna corrección de escalas sobre los ejes, se consigue simular como función temporal, la superficie de la rotura. En la función del parámetro x para la traslación realizada, se consiguen las diferentes curvas representadas en la parte inferior de la Fig. 4.

Cuando la superficie de propagación de la onda crece en razón al cuadrado de la distancia, el intento de consideración de la influencia del tiempo de apertura de la rotura, complica tanto el tratamiento matemático, que lo hace irresoluble. Para este caso se consideran roturas instantaneas, es decir, tiempo de rotura nulo.

Para posibilitar o facilitar los cálculos, se han hecho algunas hipótesis de carácter siempre conservativo, como son:

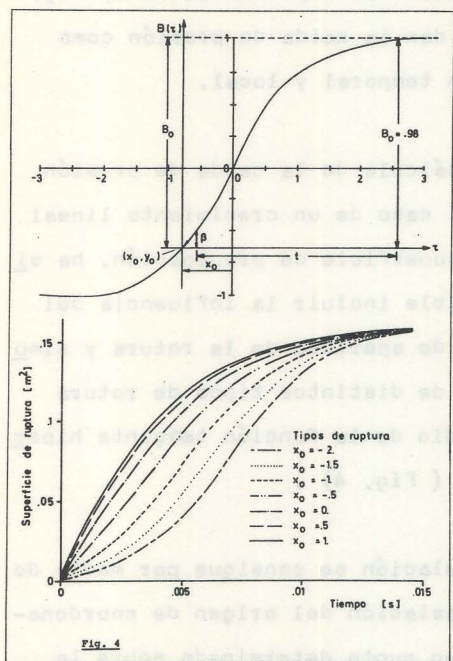


Fig. 4

- Se supone que en el espacio tan corto de tiempo de unos 15 ms. en que se analiza la onda en las calderas convencionales, los fenómenos aparecidos se realizan de forma adiabática.
- Se desprecian rozamientos.
- Se desprecian fuerzas por gravedad.

Con los programas ONDA y TRUCHA creados, se pueden calcular en función del tiempo las siguientes variables:

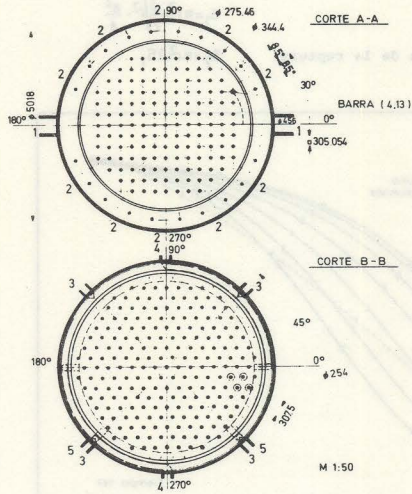
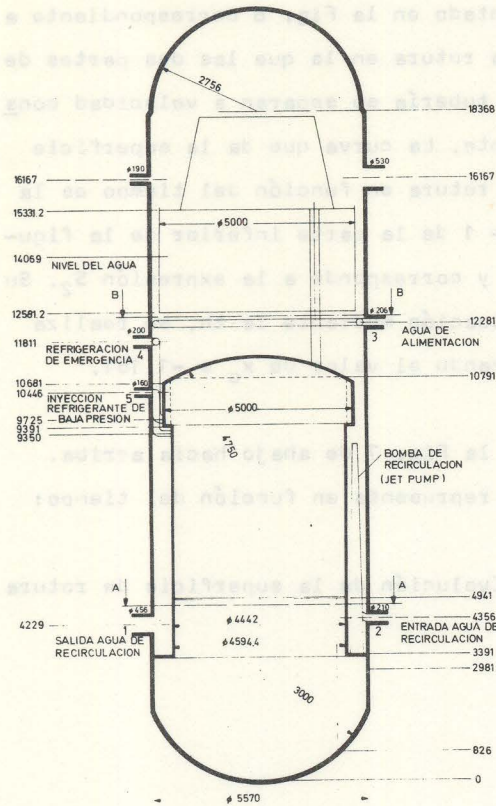
- Distribución de diferencias de presión sobre la pared, tapa y rejilla del barrilete.
- Distribución de fuerzas y fuerza total sobre la pared, tapa y rejilla del barrilete.
- Momentos provocados por las fuerzas sobre el barrilete.

lete.

- Fuerza sobre las barras del control.
- Fuerzas sobre las conducciones de la refrigeración de emergencia.

Además de estas, se pueden obtener otras variables que sirven de complemento a las anteriores.

CASO TÍPICO DE UNA CALDERA DE AGUA EN EBULLICIÓN



Para observar el comportamiento de los programas de cálculo, se ha realizado el estudio de una caldera nuclear típica de agua en ebullición. Un esquema de la misma con las medidas más importantes, se puede ver en la Fig. 5. Las rupturas más críticas que se pueden producir son las correspondientes a los puntos 1, 2 y 3. Las rupturas

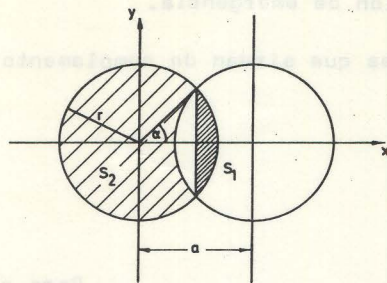
Fig. 5

en puntos de conexión por encima del nivel del agua como por ejemplo en las conexiones de salida de vapor no son importantes desde el punto de vista de las ondas de presión. Se van a ver los efectos para la ruptura 1 sobre el barrilete.

Para la ruptura 2 sobre la rejilla del barrilete y sobre las barras de control.

Para la ruptura 3 los efectos sobre las conducciones de la refrigeración de emergencia.

Con intención de ver la influencia del tiempo de apertura de la rotura y del subenfriamiento del sistema, se ha hecho un análisis paramétrico dándole al tiempo de rotura los valores de 0,5, 10 y 15 ms. y al subenfriamiento los valores de 30, 56, 70, y 90 kJ/kg co-



$a = \frac{2r}{t}$
 τ - tiempo
 t - tiempo de apertura de la ruptura

$$S_1 = \pi r^2 \frac{a}{2} \sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4}}$$

$$S_2 = \pi r^2 - 2S_1$$

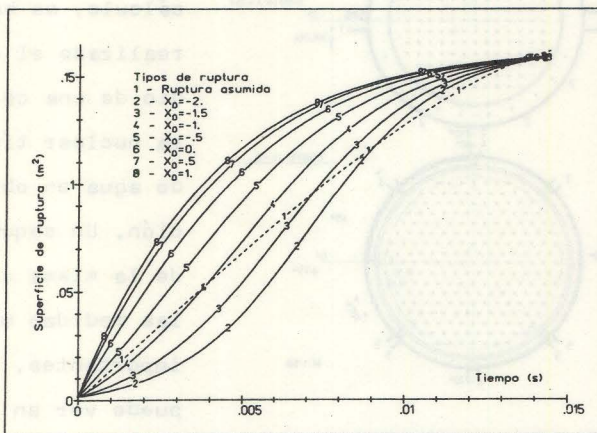


Fig. 6

respondientes respectivamente a 5.5, 10.4, 13.1 y 17°C.

Se hace observar que las normas de seguridad alemanas recomiendan para los cálculos un tiempo de rotura de 15 ms.

El tipo de rotura elegido es el representado en la Fig. 6 correspondiente a una rotura en la que las dos partes de la tubería se separan a velocidad constante. La curva que da la superficie de rotura en función del tiempo es la nº- 1 de la parte inferior de la figura y corresponde a la expresión S_2 . Su situación mediante la x_0 , se realiza tomando el valor de $x_0 = -1.151$.

En la Fig. 7 de abajo hacia arriba, se representa en función del tiempo:

- Evolución de la superficie de rotura

- Velocidad de salida de refrigerante por la rotura

- Masa total de refrigerante perdida

- Diferencia de presión en el frente de onda.

Para la rotura 1 están representados los casos correspondientes a los subenfriamientos de 70 y 90 kJ/kg. Las cuatro curvas 1,2,3, y 4 corresponden a tiempos de apertura de 0,5, 10 y 15 ms.

La forma de la solución de la velocidad en función del tiempo, se puede comprender atendiendo a la evolución de la rotura en cada caso. La velocidad crece inicialmente a partir del valor cero para disminuir posteriormente. Este descenso corresponde al tiempo en que la apertura de la ruptura crece. En este espacio de tiempo por la ley de conservación de la masa, la velocidad va a decrecer. Cuando la rotura ha alcanzado su valor total, la velocidad vuelve a crecer y tiende a estabilizarse en las proximidades del va

lor crítico. Este efecto durante la apertura de la rotura, también se puede observar en la evolución de la diferencia de presión en el frente de onda. Se ve claramente para el subenfriamiento de 90 kJ/kg. Y en la curva 2 correspondiente a un tiempo de apertura de 5 ms., que la diferencia de presión pasa de su valor inicial a otros inferiores, para después entre 0.5 y 2 ms. crecer. Este crecimiento se debe a la rápida apertura de la ruptura. Después de estar la rotura totalmente abierta, la diferencia de presión en el frente de onda vuelve a descender.

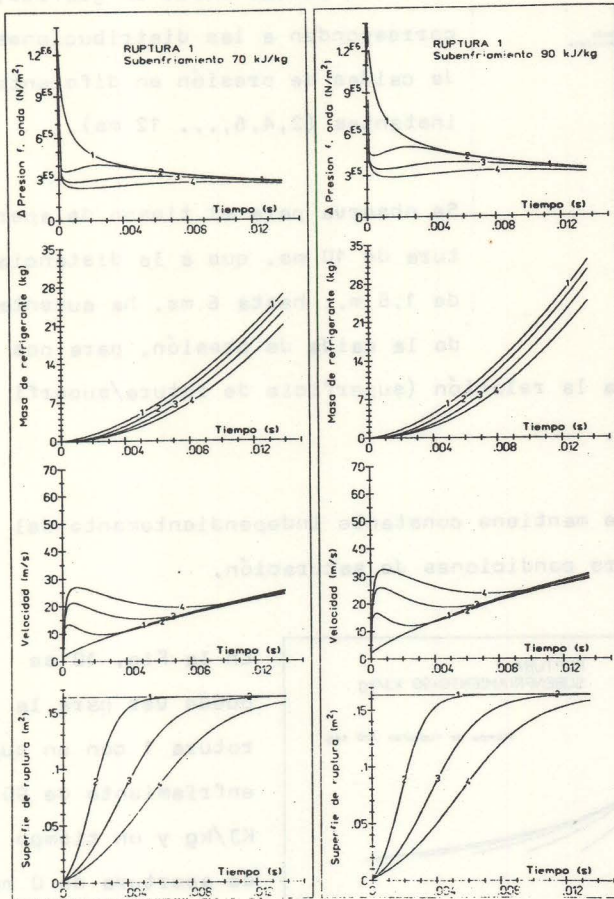


Fig. 7

En la fig. 8 se puede ver como evoluciona la onda sobre la pared y tapa del barrilete. Esta figura corresponde a un subenfriamiento de 90 kJ/kg y un tiempo de apertura de 0 ms. En ella se ha desarrollado el barrilete y se ha representado una mitad, que corresponde a la zona comprendida entre 0° y 180° , medidos a partir de la ruptura. Las ordenadas corresponden a las distancias a partir de la fijación del barrilete y medidas según la altura. La coordenada vertical es la diferencia de presión en Bar.

Se observa como la onda se propaga en forma de circunferencia a partir del punto de ruptura. Están representados los estados al cabo de 2, 4, 6, ... 12 ms. Después de aproximadamente 7 ms. se encuentran en la posición correspondiente a los 180° los dos frentes de onda que se han propagado sobre cada una de las mitades del barrilete. Esta superposición produce un aumento brusco de la diferencia de presión entre la parte interna y externa del barrilete en los puntos afectados, que queda reflejada en la figura. En la parte derecha se observa la evolución de la onda sobre la tapa del barrilete por medio de su posición en diferentes instantes.

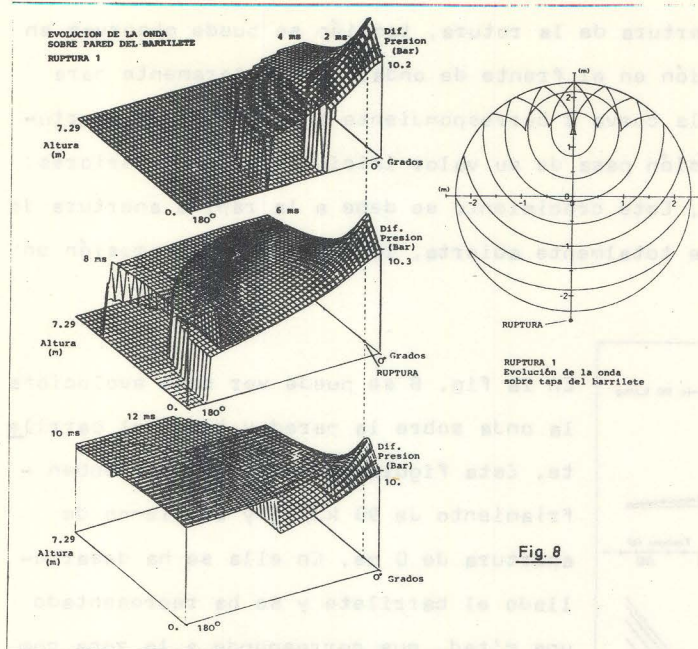


Fig. 8

Valores más concretos de la evolución de la onda para el subenfriamiento de 90 kJ/kg están representados para los cuatro tiempos de apertura en la figura 9. Las abscisas son distancias medidas a partir del punto de rotura. Las diferentes curvas sobre un gráfico, corresponden a las distribuciones de caídas de presión en diferentes instantes (2,4,6,... 12 ms).

Se observa para el tiempo de apertura de 10 ms. que a la distancia de 1.5 m., hasta 6 ms. ha aumentado la caída de presión, para posteriormente disminuir.

Este efecto se debe a la relación (superficie de rotura/superficie de propagación en el punto considerado).

En el punto cero la diferencia de presión se mantiene constante independientemente del tiempo de rotura, ya que allí existen siempre condiciones de saturación.

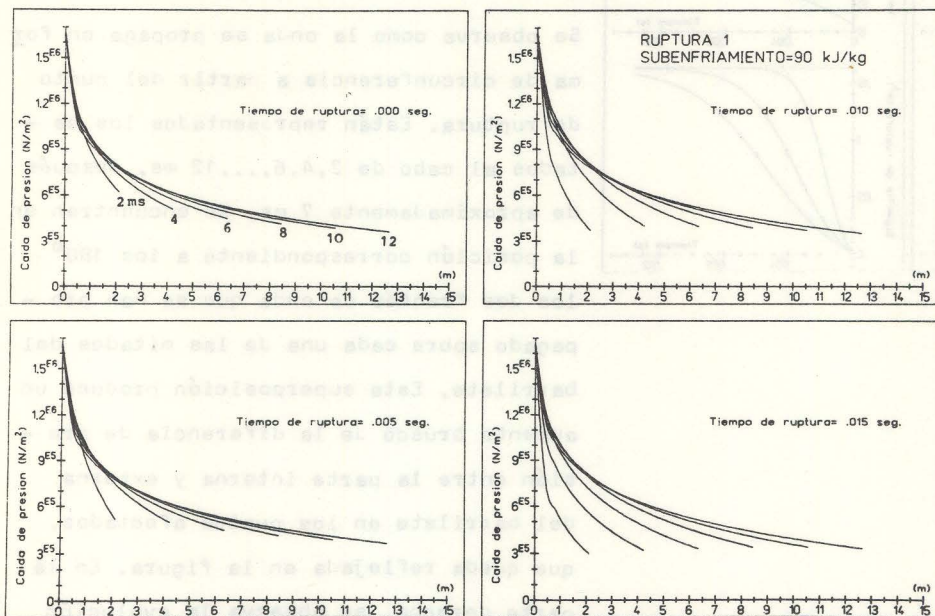


Fig. 9

En la Fig. 10 se puede ver para la rotura 1 con un subenfriamiento de 90 KJ/kg y un tiempo de apertura de 0 ms en diferentes instantes, la distribución de esfuerzos sobre los anillos en que ha sido dividido el barrilete según la altura.

La Fig. 11 muestra la evolución de la fuerza y momento total sobre el barrilete en función del tiempo para los cuatro diferentes tiempos de apertura de la rotura. El barrilete está sometido a

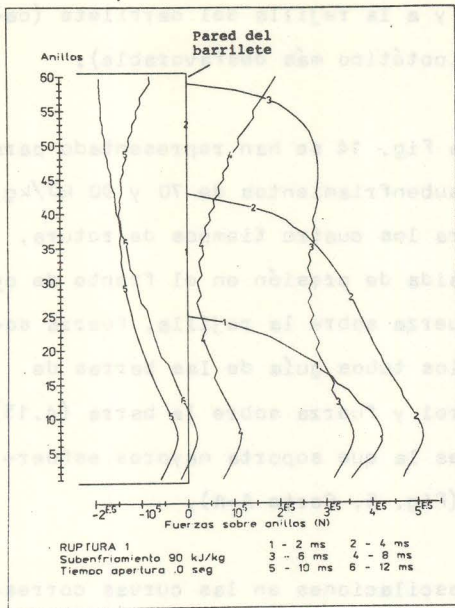


Fig. 10

a un esfuerzo total cuya forma se asemeja a una senoide amortiguada con una frecuencia aproximada de 70 a 75 Hz. El tiempo de apertura no parece afectar excesivamente a la evolución del esfuerzo.

En la Fig. 12 donde para el tiempo de rotura de 0. ms están representados el esfuerzo y momento total para los cuatro subenfriamientos analizados, se ve una mayor influencia en los esfuerzos y momentos procedentes de la variación del subenfriamiento. El desplazamiento de los máximos se debe al aumento de la velocidad del sonido con el subenfriamiento.

En la Fig. 13 se puede ver la dependencia del esfuerzo y momento máximo respecto al subenfriamiento y al tiempo de apertura de la rotura. La dependencia res-

pecto al subenfriamiento es practicamente lineal, viendose por extrapolación como para un subenfriamiento 0. corresponde un esfuerzo nulo, lo que es lógico, ya que si el refrigerante se encuentra en condiciones de saturación las ondas de presión quedarán rapidamente amortiguadas.

Respecto al tiempo de apertura, el esfuerzo y momento máximo parecen mantenerse constantes. Solo para tiempos de apertura del orden de 15 ms. y superiores, los valores tienden a decrecer ligeramente.

En el caso de que la rotura se produzca en la conexión de la entrada del agua de realimentación (Fig. 5.), la onda de presión aparecida podría propagarse a través de la bomba de recirculación y en la parte inferior de la vasija ; afectar a las barras de con-

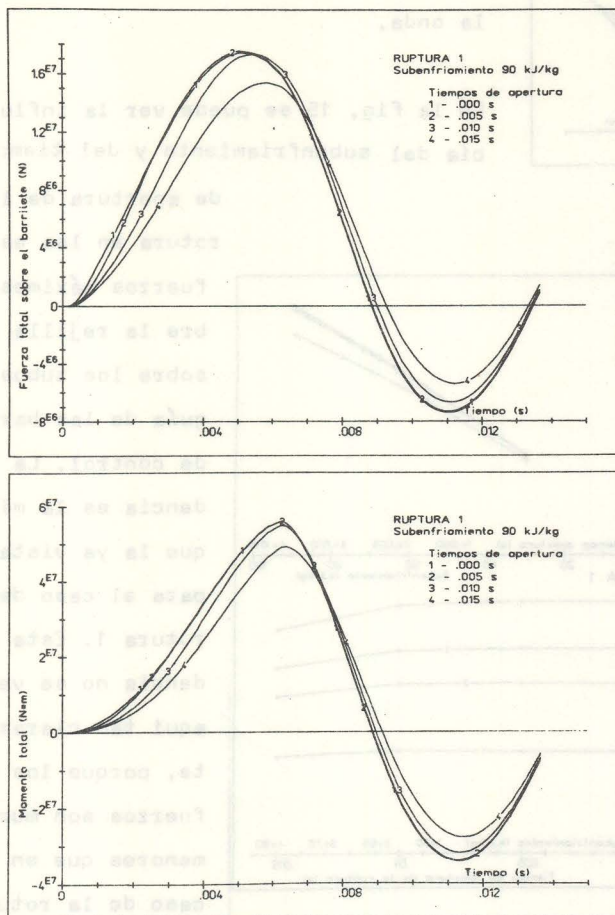


Fig. 11

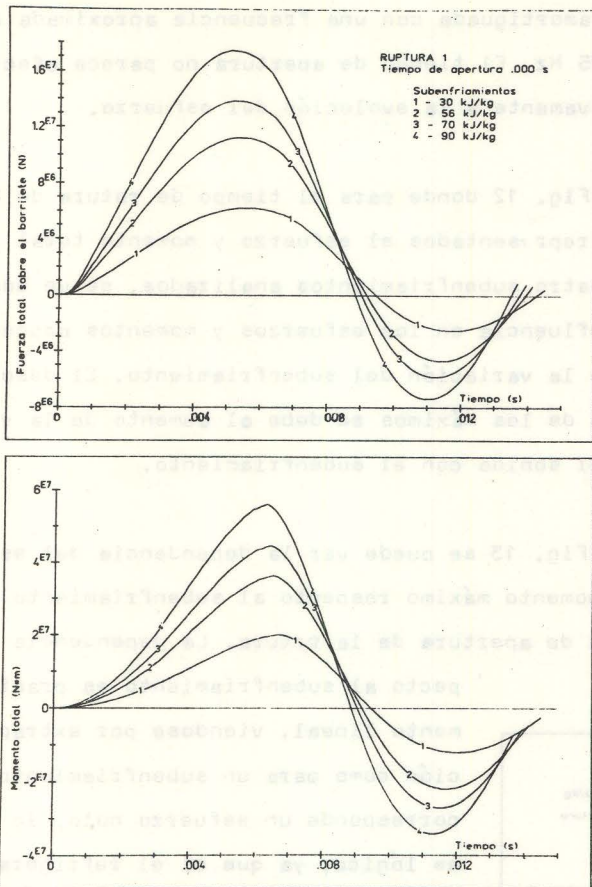


Fig. 12

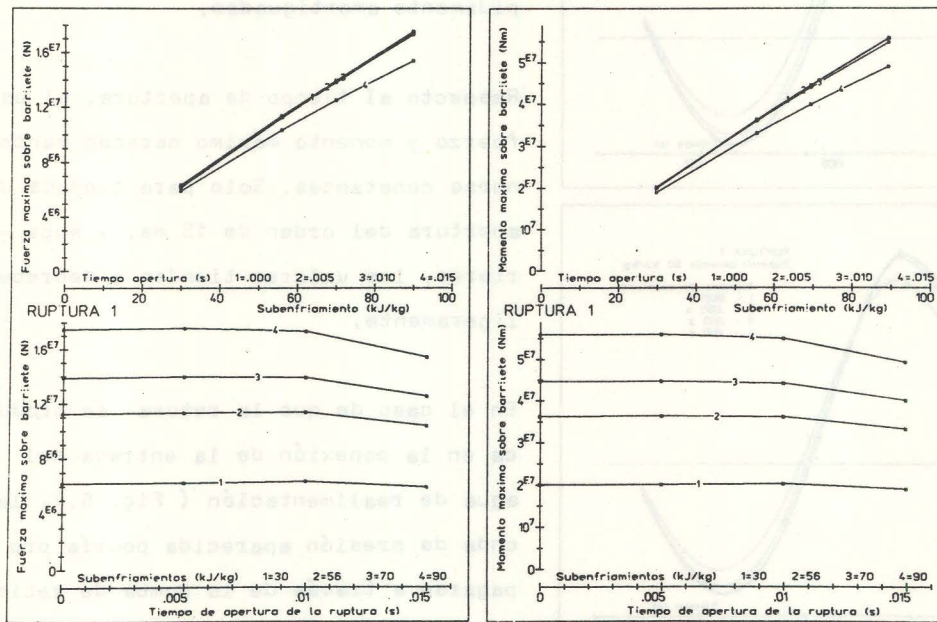


Fig. 13

control y a la rejilla del barrilete (caso hipotético más desfavorable).

En la Fig. 14 se han representado para los subenfriamientos de 70 y 90 kJ/kg. y para los cuatro tiempos de rotura, la caída de presión en el frente de onda fuerza sobre la rejilla, fuerza sobre los tubos guía de las barras de control y fuerza sobre la barra (4.13) que es la que soporta mayores esfuerzos (Fig. 5, Corte A-A).

Las oscilaciones en las curvas correspondientes a los esfuerzos sobre los tubos guía, se deben a sucesivas filas de tubos que van siendo afectadas por la onda.

En la Fig. 15 se puede ver la influencia del subenfriamiento y del tiempo

de apertura de la rotura en los esfuerzos máximos sobre la rejilla y sobre los tubos guía de las barras de control. La tendencia es la misma que la ya vista para el caso de la rotura 1. Esta tendencia no se ve aquí tan claramente, porque los esfuerzos son mucho menores que en el caso de la rotura 1 y las escalas de

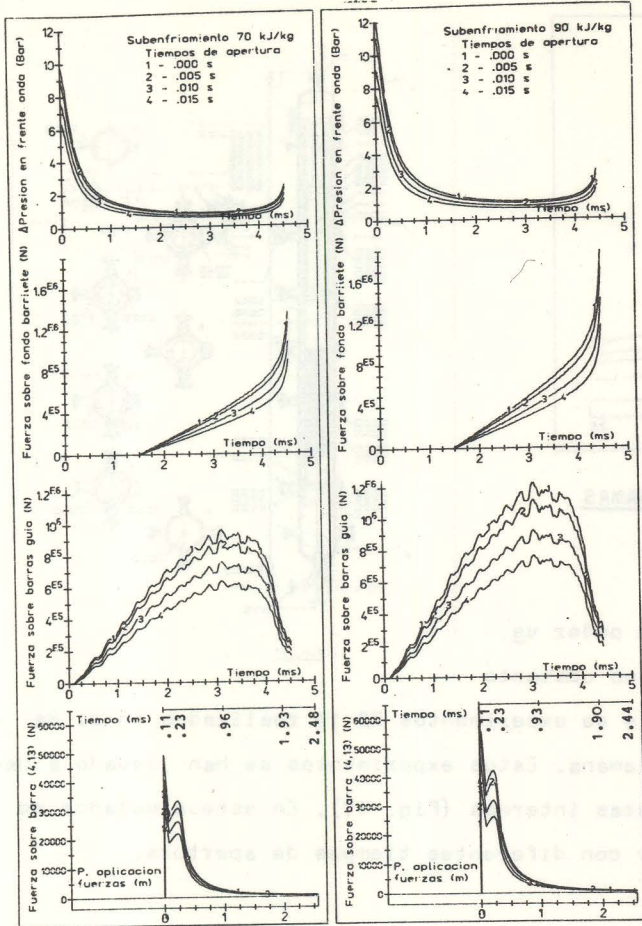


Fig. 14

los graficos se han mantenido iguales para poder realizar comparaciones. Con unas escalas mas apropiadas se puede apreciar mejor esta dependencia.

Si la rotura se ha producido en la posición 3 (Fig. 5), es decir, en la unión de la conducción del agua de realimentación y bajo la hipótesis de no existencia del anillo distribuidor, la onda incidirá directamente sobre la conducción de la refrigeración de emergencia.

En la Fig. 16 se pueden ver las cargas sobre el tramo vertical para un tiempo de apertura de 0 ms. y los cuatro subenfriamientos analizados. El recuadro que aparece en las abcisas representa el tramo vertical de la refrigeración de emergencia. La cota cero corresponde a la posición de la rotura. Las curvas 1,

2,3,y 4 corresponden a los subenfriamientos de 30,56, 70 y 90 kJ/kg respectivamente. En esta figura se puede leer por ejemplo que a una distancia de 1 m. de la cota de ruptura sobre la refrigeración de emergencia para un subenfriamiento de 56 kJ/kg se tiene un esfuerzo de unos 12000N. en un momento determinado.

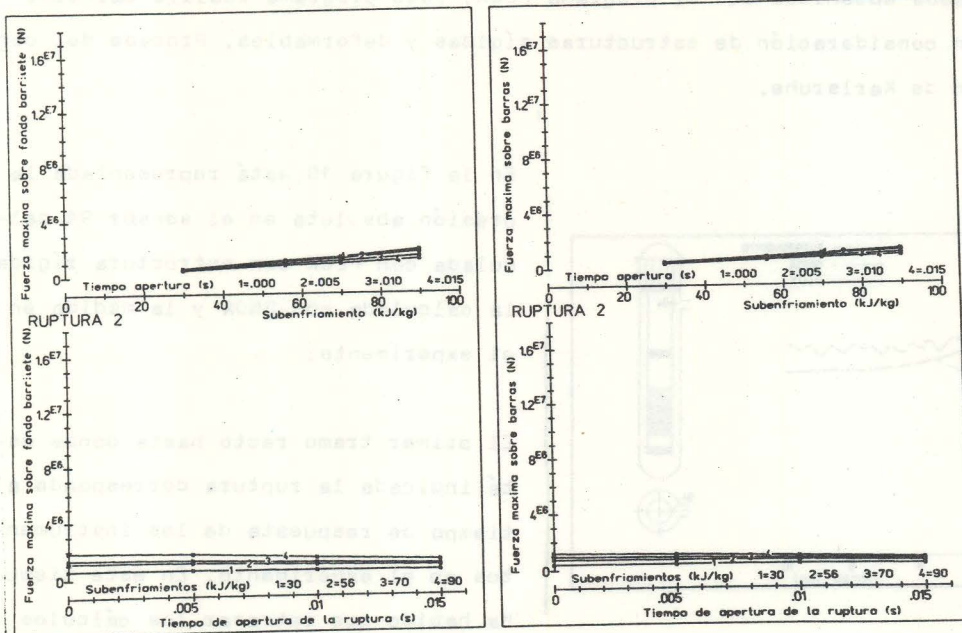


Fig. 15

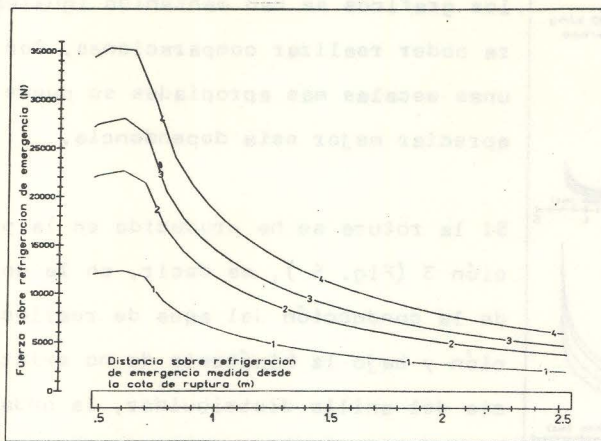


Fig. 16

COMPARACION CON EXPERIMENTOS Y OTROS PROGRAMAS DE CALCULO

Existen muy pocos experimentos con los que poder verificar los modelos de cálculo expuestos, no obstante han sido posible comparaciones con la serie de experimentos RS 16 realizados en el Battelle-Institut en la República Federal Alemana. Estos experimentos se han llevado a cabo en un simulador de la vasija y estructuras internas (Fig. 17). En este simulador se han producido roturas a diversas alturas y con diferentes tiempos de apertura.

Algunos de estos experimentos han sido calculados con el programa ONDA y comparados también con los resultados obtenidos con el programa FLUX. Este programa realiza cálculos tridimensionales con consideración de estructuras rígidas y deformables. Procede del centro de investigación de Karlsruhe.

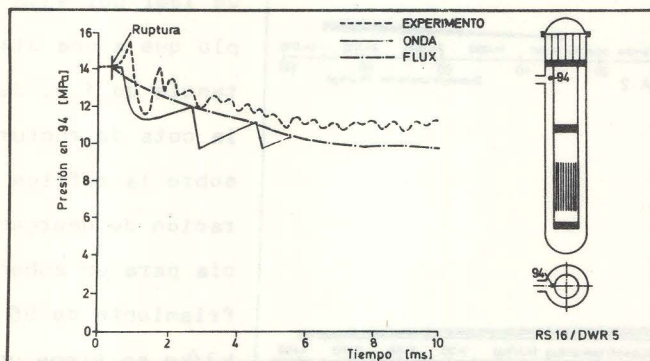


Fig. 18

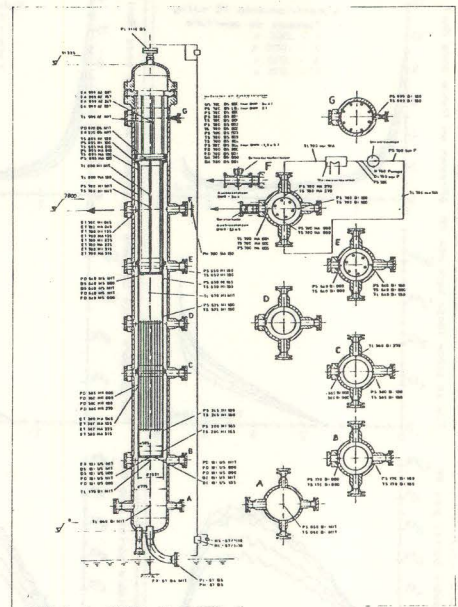


Fig. 17

En la figura 18 está representada la presión absoluta en el sensor 94 calculada con FLUX con estructura rígida, la calculada con ONDA y la medida en el experimento.

El primer tramo recto hasta donde está indicada la ruptura corresponde al tiempo de respuesta de los instrumentos en el experimento. En este tiempo ha habido que retrasar los cálculos para poder efectuar comparaciones.

La primera subida de presión observada en la curva del experimento se debe a una sobre-

presión que es necesaria para romper la membrana que tapona la rotura.

El tramo recto de ONDA en la zona inicial después de la rotura, corresponde al tiempo que la onda tarda en alcanzar el sensor.

Las oscilaciones observadas en ONDA corresponden a superposiciones de la onda en la zona del sensor. Estas oscilaciones coinciden satisfactoriamente con las de mayor amplitud del experimento. Las oscilaciones intermedias del experimento corresponden a reflexiones de onda en el barrilete y ruptura.

Hay que hacer observar que este experimento no es el más apropiado para realizar comparaciones, pues el barrilete simulado es de pequeño diámetro y la primera superposición de onda se produce rápidamente. A partir de este momento empiezan a perder validez las hipótesis de cálculo. No obstante, los resultados son siempre conservativos. El programa FLUX es más exacto, ya que se acerca más a los valores reales, pero es incapaz de dar las ya citadas oscilaciones.

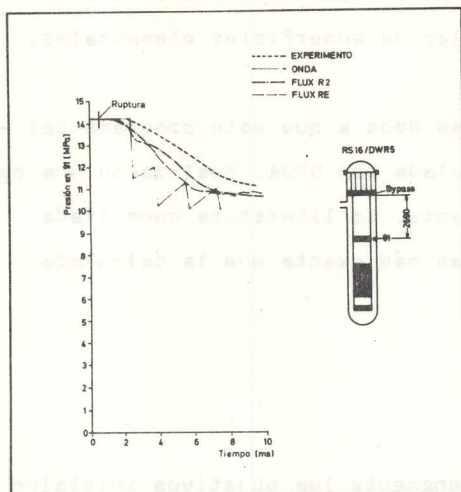


Fig. 19

En la figura 19 está representado lo mismo para el sensor 91. FLUX R2 es el cálculo con estructura de - formable.

FLUX RE es el cálculo con estructura rígida.

El error máximo en los resultados de ONDA ha sido del orden del 20%, siendo los resultados en cualquier caso conservativos. Este error es admisible si se tiene en cuenta que la consecución de una de las curvas representadas requiere con ONDA un tiempo de cálculo de 10 s. en un computador CONTROL DATA CDC 76-12, mientras que el mismo cálculo con FLUX en un computador

IBM 370/168 requiere un tiempo de 40 minutos.

Otra serie de experimentos que han sido recientemente realizados en Alemania es la serie HDR. La sección de ensayo es una vasija con componentes de tamaño real. Los resultados de los experimentos tardarán tiempo en ser publicados, pero han sido posible comparaciones por medio de cálculos realizados para este experimento con los programas ONDA y YAQUI. YAQUI es un programa procedente de los Alamos (USA) y está basado en un modelo Lagrange-Euler con consideración de estructuras rígidas.

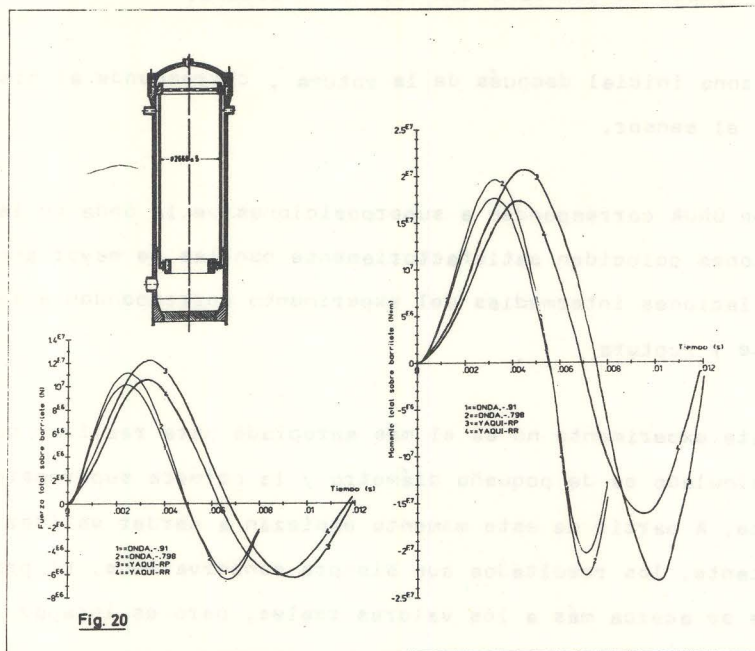


Fig. 20

En la Fig. 20 se puede ver un esquema de la sección de ensayo y las fuerzas y momentos totales calculados con ONDA y YAQUI. Los cálculos con ONDA responden a dos espesores diferentes del anillo de agua entre vasija y barrilete. La curva 3 se ha obtenido dividiendo al barrilete en una red de superficies ele-

mentales según líneas de puntos de igual velocidad y perpendiculares a ellas. Para la curva 4 se ha dividido el barrilete en una red rectangular de superficies elementales.

El desplazamiento de los cálculos realizados con YAQUI se debe a que este programa calcula una velocidad del sonido un 25% inferior a la calculada con ONDA. Realizando una corrección de velocidad, los cálculos coinciden prácticamente. La literatura consultada muestra que la velocidad del sonido calculada con ONDA es más exacta que la calculada con YAQUI.

CONCLUSION

Para concluir, se puede decir, que se han conseguido plenamente los objetivos iniciales de partida. Se ha logrado la creación de nuevos métodos de cálculo que posibilitan el análisis de la onda de presión aparecida en el accidente de rotura del primario de una caldera. Estos posibilitan la simulación tanto de calderas de agua a presión, como de agua en ebullición, y dentro de estos tipos, una amplia gama de geometrías.

Se ha logrado encontrar un compromiso en cuanto a las hipótesis simplificativas en el tratamiento teórico del problema, que conduce a resultados conservativos y suficientemente exactos. Este compromiso ha sido tomado considerando la exactitud de los cálculos y el precio de los mismos. Se recuerda, que una de las condiciones de partida fue la creación de métodos de cálculo que posibilitasen amplios estudios paramétricos. Estos estudios hubiesen sido prohibitivos con programas que por su complejidad requiriesen grandes

tiempos de computador. La hipótesis simplificativa más importante que ha habido que hacer, ha sido la consideración de las estructuras como rígidas.

El precio de los cálculos realizados para el análisis paramétrico de la caldera típica de agua en ebullición expuestos en este trabajo, ha sido de unas 200.000 ptas. en un computador CONTROL DATA 76-12. Este es a su vez aproximadamente el precio de un solo cálculo, con la consideración de estructuras deformables con el programa FLUX del que también se ha hablado en este trabajo, en un computador IBM 370/168. El tiempo total requerido con los programas expuestos para el análisis paramétrico, ha sido de unos 1200 segundos de computador, mientras que un solo cálculo con FLUX requiere un tiempo de unos 40 minutos.

Se debe, por tanto, en el estudio de las condiciones de seguridad de una caldera frente a los efectos de la onda de presión, empezar por un análisis con programas tipo ONDA y TUCHA, de los que se conoce su grado de aproximación y con los que se pueden hacer numerosos cálculos para conocimiento del problema, y posteriormente, si es necesario, realizar cálculos muy concretos con programas de mayor exactitud.

Los cálculos realizados dejan ver una fuerte dependencia de los esfuerzos aparecidos con el subenfriamiento del sistema. Esta dependencia es prácticamente lineal, no registrando se fuerza alguna para subenfriamientos nulos.

La dependencia con el tiempo de apertura de la rotura, solo es tangible cuando los tiempos de rotura son superiores a los 10 ms.

Las fuerzas aparecidas son mayores al aumentar la superficie total de rotura.

Las comparaciones con experimentos dejan ver una aproximación suficiente de los cálculos y sobre todo unos resultados siempre de caracter conservativo.

Recientemente se han hecho con los programas ONDA y TUCHA estudios paramétricos para la caldera nuclear de Gundremmingen de agua en ebullición sobre el Danubio en la República Federal Alemana y para la BBC (Brown, Boveri) que proyecta ya en sus reactores de agua a presión tapas de descarga de presión para aminorar los efectos de onda de presión. En ambos casos ha quedado justificado el interes y validez de los métodos de cálculo creados que suponen una herramienta facil, rápida y barata en el conocimiento del comportamiento de una caldera o en su proyecto, en lo que se refiere a la acción de las ondas de presión.

BIBLIOGRAFIA

- /1/ Anthony, A. , Cyril, W.:
Yaqui: An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computer Program for Fluid Flow at all Speeds.
Los Alamos. Scientific Laboratory - U. California
LA-5100, UC-32, ISSUED : March 1973
- /2/ Battelle- Institut Frankfurt:
Ergebnisse der ersten DWR-Versuche mit Einbauten (DWR1-DWR5).
RS 0016 B BF-RS00168-10-1
- /3/ Benkert, J., Mika, C. Stegemann, D., Valero, M.:
Belastungen auf Einbauten in Reaktordruckbehältern durch Unterdruckwellen.
Institut für Kerntechnik, TU Hannover, IKH 97/78
- /4/ Schlechtendahl, E.G., Krieg, R., Schumann, U.:
Analyse der fluid-strukturdynamischen Wechselwirkung von Reaktordruckbehältereinbauten beim Blowdown.
Institut für Reaktorentwicklung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Deutschland (1977)
- /5/ Schmidt, D.:
Reaktorsicherheitstechnik
Springer-Verlag
- /6/ Stegemann, D.:
Kühlmittelverlust. Störfall-Analyse.
Institut für Kerntechnik, TU Hannover,
IKH 70/76

NOTA DE AGRAJECIMIENTO

En compañía de este resumen de lo que en su día fue mi tesis doctoral, quiero que conste mi más sincero agradecimiento al Profesor Dr. Sr. D. Agustín Alonso Santos, Director del Departamento de Seguridad Nuclear de la JEN. y Catedrático de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, por su ayuda y dirección en la realización de mi trabajo.

Igualmente quiero agradecer al Profesor Dr. Sr. D. Dieter Stegemann, Director del Instituto de Tecnología Nuclear de Hannover (República Federal Alemana) sus orientaciones y sobre todo el haberme ofrecido la posibilidad de realizar mi trabajo en el Instituto de su dirección.

Al Dipl.-Ing. Sr. D. Wolfgang Wiesenack y en general a todos los miembros del Instituto de Tecnología Nuclear de Hannover les agradezco su ayuda y apoyo durante mi estancia en el mismo.

Por último y también muy sinceramente deseo expresar mi agradecimiento al Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe (RFA), ya que a través de el y dentro del margen de colaboración hispano-alemana, ha sido posible mi estancia en la República Federal Alemana.