

ANALISIS DE LA CAPACIDAD ULTIMA DE UNA CONTENCIÓN MARK-III DE HORMIGÓN
ARMADO EN CONDICIONES DE ACCIDENTE

Antonio Moreno González

Silvino Morales Sanchís

EPTISA-GHESA-TRSA, EMPRESARIOS AGRUPADOS

C/ Magallanes, 3 - 28015 MADRID

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación preliminar de una Contención MARK-III de hormigón armado con las cargas de presión y gradientes térmicos de accidente.

Se han supuesto dos modelos diferentes de comportamiento de materiales.

Las zonas de hormigón con armaduras, se incluyen mediante un modelo ortotrópico de rigidez repartida. El modelo incluye una modificación de la participación del hormigón en función de la tensión de rotura a tracción y de un coeficiente de ligadura entre la armadura y el hormigón.

El recubrimiento metálico del interior se modeliza como un material elástico-plástico clásico.

El análisis permite definir de una manera realista la capacidad última de las contenciones de hormigón armado, y las áreas críticas tanto del recubrimiento interior como del hormigón estructural exterior.

1. INTRODUCCION

El Edificio de Contención de los reactores de agua ligera tiene, entre otras, la función de impedir el escape de productos potencialmente peligrosos. Por tanto se diseña de modo que, en caso de accidente, conserve su estanqueidad y su integridad estructural.

El accidente base de diseño considerado es un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA = Loss of coolant accident) que, en una contención del tipo MARK III (Fig. 1), provoca las condiciones de presión y temperatura que se describen en la Fig. 2.

En el caso de un LOCA con fusión del núcleo, puede producirse hidrógeno que, si escapa de la vasija, generará en el Edificio de Contención una mezcla potencialmente explosiva.

En tal situación el punto crítico es determinar si la capacidad última del Edificio de Contención será suficiente para soportar, sin perder su estanqueidad, la presurización que la explosión puede suponer.

El interés del tema queda patente en diferentes publicaciones recientes: En la Ref. 1 se efectúa un análisis de dos tipos de contención utilizando elementos finitos axisimétricos multicapa en el que los materiales se modelizan simplifícadamente teniendo en cuenta únicamente el punto de rotura del hormigón y el límite elástico de cada material de armado o pretensado. En las Ref. 2, 3, 4 y 5 se utilizan sólidos axisimétricos de cuatro lados, para determinar el modo fundamental de fallo y las zonas críticas de la Contención.

En esta ponencia se presentan resultados obtenidos con una versión especial del programa NONSAP-C (Ref. 6) adoptada en EMPRESARIOS AGRUPADOS, que permite un tratamiento completo del proceso no lineal de deformación de la contención de hormigón armado o pretensado hasta alcanzar su capacidad última.

2. DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA

La Fig. 1 muestra la disposición general de un Edificio de Reactor con Contención tipo MARK III.

Mientras que las estructuras del Pedestal, Vertedero y Pozo Seco son estructuras interiores, la Contención propiamente dicha está constituida por el Edificio Exterior y la Losa de Cimentación.

El Edificio Exterior está constituido por un recubrimiento metálico interior y un muro de hormigón armado exterior. Este conjunto estructural exterior es el objeto del análisis efectuado en esta ponencia.

3. CARGAS DURANTE EL ACCIDENTE BASE DE DISEÑO

En la Fig. 2 se muestra la distribución de presiones y temperaturas durante el accidente base de diseño.

La capacidad última de la contención deberá ser varias veces la presión de diseño.

4. DEFINICION DE LA ESTRUCTURA DEL EDIFICIO DE CONTENCIÓN

La contención incluye un forro interior de acero de 0,7 cm. de espesor. El resto de los elementos son de hormigón con la armadura indicada en la Tabla 1. Las letras indican la capa en la que se incluye la armadura.

TABLA 1

CUADRO DE ARMADURAS

	INFERIOR		SUPERIOR		CORTANTE		
	X	Y	RADIAL	CIRCUNF.	VERTICAL		
LOSA	2 ϕ 57/25	2 ϕ 57/25	2 ϕ 57/2°	2 ϕ 57/25	2 ϕ 57/30		
	MERIDIONAL		CIRCUNFERENCIAL		DIAGONAL	U-2	a 90°
CILINDRO	INTERIOR	EXTERIOR	INTERIOR	EXTERIOR	MALLA A 45°	INTERIOR	EXTERIOR
	+ 14 m.	ϕ 57/0,9°	ϕ 57/0,9°	ϕ 57/35	2 ϕ 57/35	2 ϕ 57/100	
+ 14 a 41 m.	"	"	"	1 ϕ 57/35	"		
41 a 47 m.	"	2 ϕ 57 ϕ 0,9	"	2 ϕ 57/35	"		
	b	d	b	d	c		
CUPULA							
50°	ϕ 57/1,5°	-	ϕ 57/40	ϕ 57/40	2 ϕ 35/140	2 ϕ 30 /1.2°	2 ϕ 57/1.2°
90°	-	-	-	-	-	"	"
	b	-	b	d	c	a	d

5. MATERIALES

En la tabla 2 se indican los materiales utilizados en sus propiedades.

TABLA 2

PROPIEDADES	FORRO	ACERO ARMADURAS	HORMIGON
	ASTM A240 Tipo 304 Acero Inox.	ASTM 615 grado 60	
MODULO ELASTICIDAD, E	$2 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$	$2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$	$0.3 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$
COEFICIENTE DE POISSON " γ "	0,3	0,3	0,2
LIMITE ELASTICO τ_y	2000 Kg/cm^2	4200 Kg/cm^2	C - 350 Kg/cm^2 T - 35 Kg/cm^2
MODULO DE PLASTICIDAD " E_p "	7400 Kg/cm^2	11700 Kg/cm^2	
DEFORMACION ULTIMA	--	--	0,003

6. MODELO

El modelo utilizado se describe en la Fig. 3. Está constituido por un sector de 4° con desplazamiento circunferencial restringido. El elemento utilizado es un elemento tridimensional de ocho nudos, Fig. 4. El modelo completo tiene 224 elementos, con 470 nudos y 910 grados de libertad. Para el forro se ha utilizado un elemento membrana de 4 nudos.

Para el hormigón armado se ha utilizado un material con rigidez homogeneizada. En la Fig. 5 se indica el proceso de homogeneización. En dicha figura, b es un parámetro de cohesión acero-hormigón que se anula cuando las armaduras se plastifican.

La fisuración del hormigón se tiene en cuenta redistribuyendo las tensiones sobre el acero.

El material del forro se supone elasto-plástico con endurecimiento lineal.

7. EJEMPLOS DE CALCULO

Como ejemplo de cálculo se ha procesado una hipótesis de carga debida a temperatura y una segunda hipótesis debida a presión interior.

7.1 CARGAS TERMICAS EN CONDICIONES DE ACCIDENTE

La hipótesis de carga térmica corresponde a la hipótesis de accidente base de diseño.

La distribución de temperaturas se ha calculado a partir de las condiciones térmicas más desfavorables en el momento del accidente en el exterior del edificio y con las temperaturas interiores definidas en la Fig. 2.

Con un programa de cálculo de transitorios térmicos (Ref. 7) se ha calculado la distribución más desfavorable de temperaturas en los elementos de edificio de Contención.

En la Fig. 6 se muestran las zonas fisuradas debido a dichas cargas térmicas. Se observa que no hay fisuración en dirección meridional y que la fisuración circunferencial afecta únicamente a una pequeña capa exterior.

Teniendo en cuenta que las cargas térmicas se relajan cuando el muro se fisura, se concluye que la fisuración por cargas térmicas será menor que la descrita en la Fig. 8.

Al superponer estas cargas con las cargas de presión interior, aumentará la zona fisurada, lo que contribuirá a relajar las tensiones térmicas y a reducir, por tanto, la participación ya de por si pequeña, de dichas cargas, tal como se ve en la Fig. 4.

7.2 CALCULO DE LA CAPACIDAD ULTIMA

Para la obtención de la capacidad última se ha procesado el histograma de carga descrito en la Fig. 7. La carga máxima es de 38 T/m^2 (54 psi).

Las zonas con pendiente nula o reducción de pendiente se corresponden con los niveles de presión que fisuran la sección de hormigón y que tienden a producir la plastificación de las armaduras.

En la Fig. 7 se representan también la evolución de las deformaciones y desplazamientos meridionales de un punto situado a media altura en el cilindro. La fisuración del hormigón por tensión meridional comienza aproximadamente al 75% de la carga máxima ($28,5 \text{ l/m}^2$). A partir de este momento aumenta la deformación debido a que el acero absorbe las cargas liberadas por la rotura del hormigón. Después, la deformación sigue aumentando porque las armaduras siguen absorbiendo esfuerzos de rotura e incrementos de carga.

Las armaduras meridionales se plastifican con una carga entre el 85 y el 100% de la carga máxima.

La complejidad de este proceso exige que se multiplique el número de iteraciones y de correcciones de la matriz de rigidez necesarias para alcanzar la convergencia.

En la Fig. 8 se describe la evolución de la deformación circunferencial y del histograma de carga.

La fisuración debida a tensiones circunferenciales comienza aproximadamente al 63% de la carga (24 t/m^2 , 36 psi). A partir de esta carga, la armadura circunferencial empieza a recoger la carga liberada por la fisuración del hormigón.

Al aumentar la carga se produce la plastificación de las armaduras, aproximadamente al 67% de la carga máxima (25.5 T/m^2 , 36 psi).

Puesto que la deformación admisible en el forro es muy superior al 0,2%, salvo efectos locales, la carga última es la que produce la plastificación de las armaduras.

En este caso $25,5 \text{ T/m}^2$, osea, 2,4 veces la carga de diseño. El modo de fallo es por plastificación de las armaduras circunferenciales.

7.3 PROCESO DE FISURACION

En la Fig. 9 se muestra la fisuración correspondiente a una carga del 63% de la carga máxima. Se observa que la fisuración por tensión circunferencial afecta únicamente a la capa interior de la contención, donde el porcentaje supuesto de armadura es prácticamente nulo.

La fisuración por tensión meridional afecta unicamente a una pequeña zona del arranque del edificio. Esta situación contrasta con la indicada en la Fig. 10 en la que, con un 64,5% de la carga, la fisuración circunferencial se ha extendido a todo el cilindro y parte de la cúpula.

La diferencia entre ambas figuras ilustra el mecanismo por el que, una vez comenzado el proceso de fisuración, éste se propaga inmediatamente al resto de la estructura aún con pequeños aumentos de carga.

En la Fig. 11 se muestra el estado de la fisuración con el 91% de la carga. En este caso la fisuración circunferencial afecta a todo el edificio incluida la zona de arranque del cilindro. La fisuración por tensión meridional afecta a todo el edificio salvo una zona del zócalo

8. CONVERGENCIA

En la Fig. 8, la línea con cruces representa la deformación circunferencial calculada efectuando un mayor número de pasos de carga en el intervalo de carga de fisuración del hormigón. La comparación de esta línea con la línea continua (menor número de pasos de integración) muestra que, cuando el número de pasos es insuficiente, el programa puede dar un estado de deformaciones que no se corresponde con el real. La rápida subida de la línea correspondiente a un mayor número de pasos, con apenas variación de la carga, se corresponde con la transferencia de la carga del hormigón a las barras de armado. Después de la subida inicial debería haber un tramo horizontal indicativo de que la transferencia de cargas habría terminado. El que no lo haya significa que la convergencia no es correcta. De hecho, se obtiene una carga de plastificación del orden del 25% inferior a teórica. Esta diferencia se debe a que, como se deduce de la comparación de las figuras 9 y 10, la fisuración circunferencial es un proceso casi

instantáneo que produce grandes desequilibrios en el sistema impidiendo la convergencia. Una manera de solucionar este problema es modelizar la carga y la estructura de modo que la fisuración circunferencial se produzca sucesivamente por pequeñas zonas.

La carga última en las armaduras meridionales coincide, prácticamente con la teórica. Ello se debe a que la existencia de momentos flectores importantes en las secciones, implica diferencias significativas entre las deformaciones de los elementos exteriores e interiores. De esta manera el proceso de fisuración meridional es progresivo y el desequilibrio introducido en cada fase es absorbido sin problemas numéricos.

9. CONCLUSIONES

Según se ha expuesto, la versión presentada del NONSAP-C permite tratar con to da su complejidad el proceso de fisuración de estructuras de hormigón armado. Los resultados muestran que:

- Las cargas térmicas no producen una fisuración significativa del Edificio de Contención.
- La presión de diseño (15 psi) no produce fisuraciones. Por lo tanto, en las condiciones de diseño se satisfacen los requisitos de estanqueidad y resistencia.
- La capacidad última de la contención es varias veces la carga de diseño (ma yor de 2,4 veces).
- El fallo crítico es por plastificación de las armaduras circunferenciales.
- El hormigón comienza a fisurarse aproximadamente a 2,4 veces la carga de di seño.
- El proceso de fisuración circunferencial afecta, de forma prácticamente in- mediata, a todo el cilindro de la contención lo que genera una inestabili- dad de la solución, y una subestimación de la carga última.
- El proceso de fisuración meridional es progresivo y no genera inestabilida- des.

10. REFERENCIAS

- Ref. 1 C.N. Krishnaswamy, R. Namperamal y A. AL-Dabbagh. "Ultimate Internal Pressure Capacity of Concrete Containment Structures", SMIRT-7, 1983, J3/6.
- Ref. 2 S. Sharma. M. Reich. "Nonlinear Finite Element Analysis of a Reinforced Concrete Mark III Containment under Pressure and Gravity Loads", SMIRT-7-1983 J2/8.
- Ref. 3 J.P. McGaughy y F.T. Lin. "Ultimate Internal Pressure Capacity of a Reinforced Concrete Mark III Containment", SMIRT-7-1983 J3/7.

- Ref. 4 R.S. Dunham, Y.R. Rashid. "Recent Results on the Evaluation of the Overpressure Response of Concrete and Steel Containments", N.E.D. 90 (1985) 193-208.
- Ref. 5 M. Fardis y Alex Nacar. "Static Ultimate Capacity of R/C Containment". Journal of Structural Engineering, Vol 110, num. 5 May-1984 ASCE.
- Ref. 6 P.D. Smith y C.A. Anderson. NONSAP-C. "A Nonlinear Stress Analysis Program for Concrete Containments Under Static, Dynamic and Longterm Loading", NUREG-CR-0416.
- Ref. 7 THOR. "Programa para el Cálculo de Transitorios Térmicos". EMPRESARIOS AGRUPADOS.

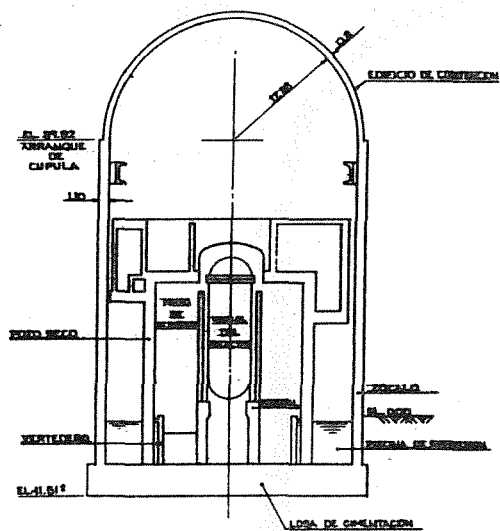


FIG-1 EDIFICIO DEL REACTOR - DISEÑO MARK-III

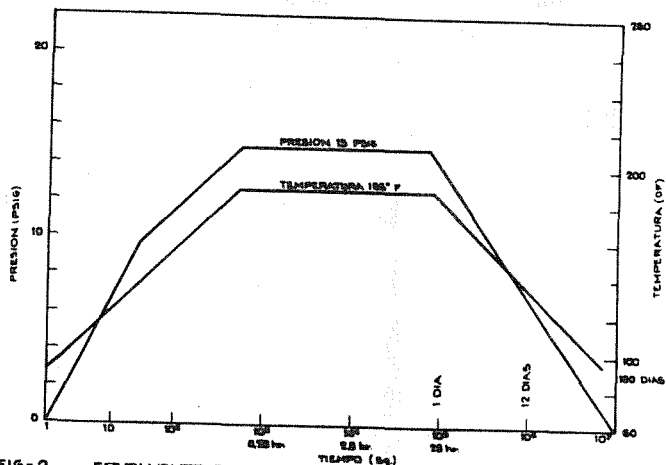


FIG-2 ENVOLVENTE DE PRESION Y TEMPERATURA EN CASO DE ACCIDENTE

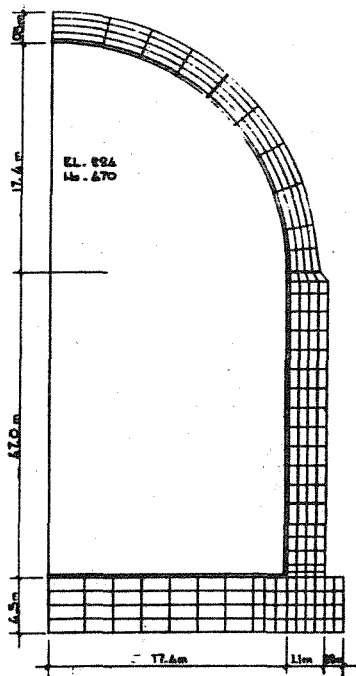


FIG. 3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

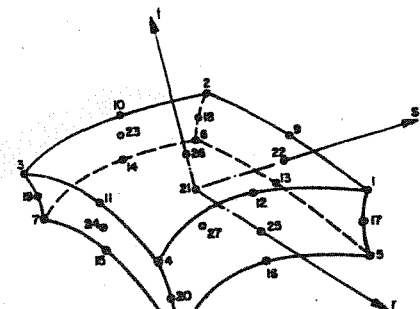


FIG. 4 ELEMENTO SOLIDO TRIDIMENSIONAL

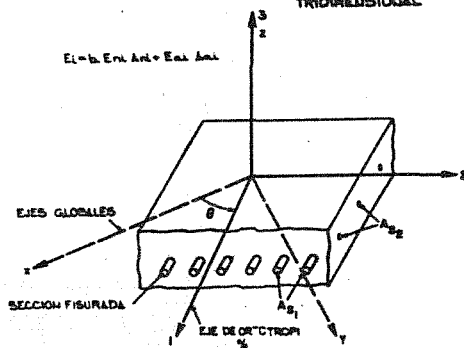


FIG. 5 MODELO DE MATERIAL PARA EL HORMIGON ARMADO

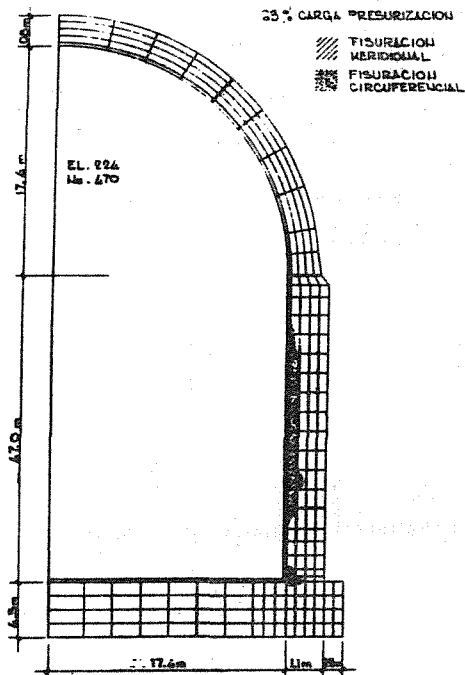


FIG. 9 FISURACION AL 25% DE LA CARGA MAXIMA

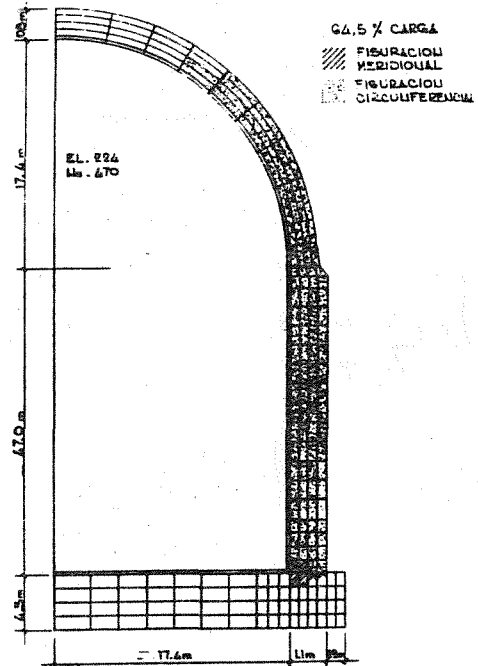


FIG. 10 FISURACION AL 64.5% DE LA CARGA MAXIMA

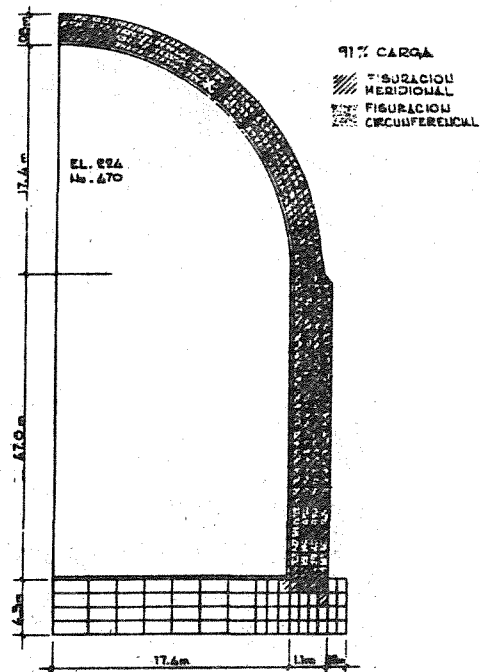


FIG. 11 FISURACION AL 91% DE LA CARGA

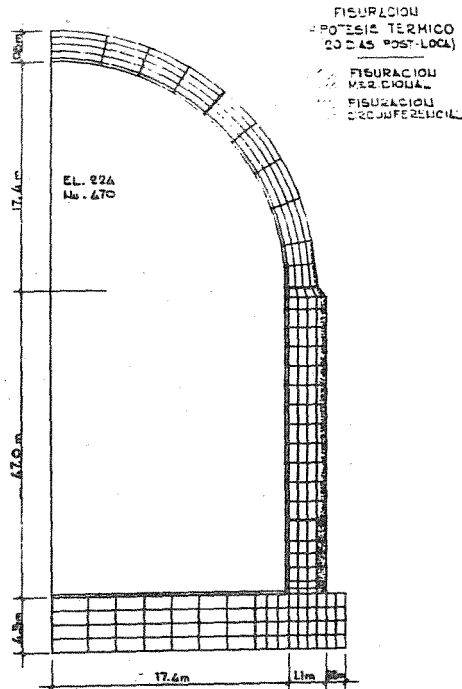


FIG. 6 FISSURACION POR EFECTOS TERMICOS

