

MÉTODOS MANUALES DE CÁLCULOS DE CRITICIDAD

Guillermo SANCHEZ LEON

Carolina ALVARO PEREZ

ENUSA

INTRODUCCION

Un problema asociado al manejo y almacenamiento de material fisionable es garantizar que dichas operaciones se realizan de forma que sea muy improbable que accidentalmente se produzca una situación crítica o supercrítica incontrolada. Para cumplir con este objetivo se recurre a datos experimentales y a técnicas de cálculo que frecuentemente implican el empleo de grandes ordenadores y consiguientemente un alto coste. En circunstancias especiales, es posible resolver el problema con cálculos sencillos que pueden realizarse manualmente o con el empleo de pequeños ordenadores (PC). A tres de estos métodos nos vamos a referir: Método del Angulo Sólido, Método de la Densidad Superficial y Método de la Densidad Equivalente.

METODO DEL ANGULO SOLIDO (M.A.S.)

El M.A.S. estima la influencia que, sobre la reactividad de una unidad de material fisionable, tiene la presencia de otras unidades vecinas de material fisionable, en función del ángulo sólido total Ω subtendido por éstos al ser "vistas" desde la unidad elegida. El cálculo determina si este ángulo es aceptable, en cuyo caso es posible utilizar la configuración para la que se ha realizado el cálculo o es necesario separar éstas hasta que el ángulo total Ω , subtendido por la unidad más desfavorable, sea inferior al tolerado. En definitiva, determina la distancia de separación que entre sí deben de tener un conjunto de unidades subcríticas aisladamente para que el conjunto permanezca subcrítico en las circunstancias más desfavorables. El método está basado en el supuesto de que se conoce la reactividad de cada unidad aisladamente, que los neutrones son emitidos isotrópicamente por cada unidad y tienen la misma probabilidad de interacción con las unidades próximas. Para que un conjunto de unidades subcríticas pueda ser considerado subcrítico, el ángulo sólido máximo tolerado para la unidad que subtiende al mayor ángulo está representado en la figura 1, cuya expresión analítica es:

K_{ef}	Ω total
< 0.3	0
$0.3 \text{ a } 0.8$	$9-10 K_{ef}$
> 0.8	0

Las condiciones que es necesario se satisfagan para aplicar la curva anterior son las siguientes:

1. Dos unidades se consideran independientes cuando la separación entre los bordes más próximos es mayor a 30 cm.
2. La K_{efectiva} de cualquier unidad no debe exceder de 0.90.
3. Cada unidad debe ser subcrítica estando completamente reflejada por el agua.
4. El ángulo máximo tolerado no excederá nunca de 6 estereoradianes.

El cálculo de K_{ef} de cada unidad se puede realizar por el empleo de la siguiente ecuación:

$$K_{\text{ef}} = \frac{K_{\infty}}{1 + M^2 B^2}$$

donde

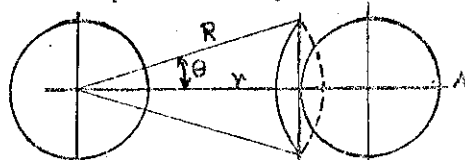
K_{∞} = cte. de multiplicación para un medio ambiente. infinito

M = Areas de migración

B = "Buckling" geométrico

Los valores de K_{∞} , M y B se pueden obtener de la ref.1. El ángulo sólido se calcula a partir de la integración de la ecuación $d\Omega = dA/r^2$ donde r es la separación entre los centros de las unidades. Frecuentemente la integración de esta ecuación es complicada; para simplificar el problema se suele emplear la aproximación del punto al plano que consiste en proyectar la superficie sobre el plano perpendicular al eje que une los dos centros de las figuras consideradas y tangente a la superficie de la figura para la que se calcula el ángulo. Por ejemplo, el ángulo sólido para la esfera A de la figura, vista desde la esfera B y considerando la aproximación del punto al plano será la siguiente:

$$\Omega = \frac{\pi r^2}{S} = \frac{\pi R^2 \sin^2 \theta}{R^2 \cos^2 \theta} = 2\pi (1 - \cos \theta)$$



La curva mostrada en la figura 1 es muy conservadora y posee grandes limitaciones por ello es frecuente que se elaboren curvas propias para aplicación en los distintos tipos de instalaciones, teniendo en cuenta las particularidades de las mismas. Este método se ha utilizado en algunas ocasiones en los estudios de criticidad de la Fábrica de Juzbado.

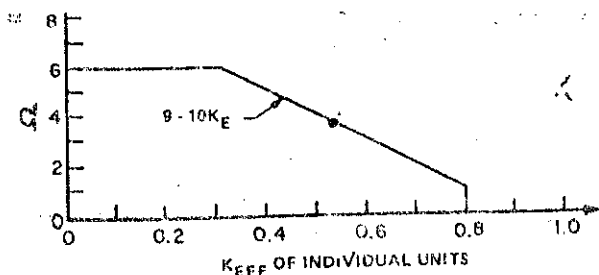


Fig. 1

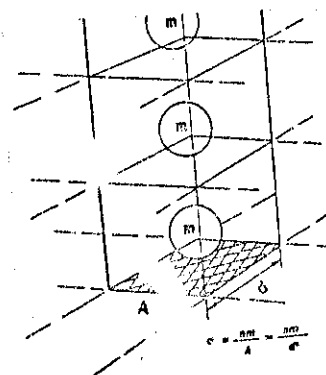


Fig. 2

METODO DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL

El método de la densidad superficial es especialmente útil para analizar la seguridad nuclear, respecto al control de la subcriticidad, en almacenes de material fisionable. Está basado en la idea de que un número de unidades suficientemente separadas conteniendo material fisionable pueden sustituirse por una lámina del mismo material depositada sobre el suelo y rodeada por una capa de agua que actúa como reflector. Bajo ciertas condiciones, si esta lámina es subcrítica, el conjunto de unidades a la que equivalen se puede asegurar que también lo es.

Existen varios métodos que desarrollan esta idea de forma diferente, aquí nos vamos a referir a uno de los más modernos y utilizados. Es necesario hacer la observación que los distintos métodos existentes no deben mezclarse indiscriminadamente. El método de la densidad aquí descrito se ha obtenido de la referencia 1, está muy bien estudiado y es de reciente creación. Se basa en la fórmula empírica, comprobada a partir de un gran número de datos experimentales, siguiente: $\sigma = 0.54 \sigma_0 (H.37 f)$ (1)

donde σ_0 es la densidad en gr/cm^2 de una lámina reflejada por agua y f es la fracción crítica (razón de la masa de una unidad de la red a la de una esfera del mismo material sin reflejar). Naturalmente que es necesario conocer la K_{ef} de una unidad aislada, cosa que en determinadas condiciones es posible obtener a partir de Tablas o fórmulas basadas en el "buckling" de la unidad.

Si cada unidad consideramos que está localizada en el centro de un cubo y los cubos forman columnas, que a su vez forman una malla regular como en la figura 2, la densidad superficial es: $\sigma = nm/d^2$ (2), donde n es el número de unidades que forman cada columna, m es la masa de unidad en gramos, y d es la distancia de centro a centro, entre unidades.

Combinando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene que la distancia mínima, de centro a centro para asegurar que el conjunto es subcrítico, es:

$$d = 1.37 \left[\frac{nm}{\sigma_0 (1 - 1.37 f)} \right]^{1/2}$$

Es válido para una red planar infinita rodeada por una capa de agua (ó reflector equivalente) de al menos 15.5 cm. situada a una distancia mayor de d de la unidad más próxima.

METODO DE LA DENSIDAD EQUIVALENTE

El método de la densidad equivalente, al igual que el M.A.S y el M.D.S, sirve para garantizar el control de la subcriticidad en almacenes de unidades

fisionables. Fijando algún parámetro para el almacenamiento, (p. e., masa, número, distancia entre las unidades), permite calcular el límite de los tres parámetros.

El método se basa fundamentalmente en gran número de datos experimentales para configuraciones críticas de redes.

El método fue inicialmente desarrollado por Paxton. Posteriormente se han realizado varias formulaciones. Aquí nos referimos a la descrita en la ref. 2 que usa la siguiente relación

$$N = \left[\frac{2.1 \sigma_c}{m} (1 - 1.37 f) \right]^3 V^2$$

donde σ_c es la densidad superficial crítica, m la masa, f la fracción crítica, V el volumen de la celda ocupada por una unidad de la red, N el número total de unidades. Se asume una reflexión de, al menos, 20 cm de agua.

Para el caso específico de celdas cúbicas ($V=D^3$), formando redes cúbicas ($N=n^3$ para n unidades en cada cara) con una masa unitaria m, la separación mínima entre centros será:

$$D = \left[\frac{nm}{2.1 \sigma_c (1 - 1.37 f)} \right]^{1/2}$$

Este método generalmente admite separaciones menores entre unidades que el método de la densidad superficial (M.D.S) en cambio fija un número limitado de unidades en el almacenamiento mientras que el M.D.S admitiera un número infinito. Esas son las diferencias fundamentales entre ambos métodos.

REFERENCIAS

1. "Criticality Handbook", ARH600 R.D. Carter
2. "Nuclear Safety Guide" TID 70/6 Rev.2. J.J. Thomas.

6.11

MÉTODOS MANUALES DE CONTROL DE LA SUBCRITICIDAD

GUILLERMO SANCHEZ DE LEON

CAROLINA ALVARO PEREZ

ENUSA

INTRODUCCION

Cuando Enrico Fermi y su equipo se propusieron construir la primera pila nuclear de la historia en Chicago se enfrentaron al problema de garantizar que todas las operaciones conducentes a la fabricación de ésta se realizaran de forma que fuese muy improbable que accidentalmente se produjese una situación crítica o supercrítica (K -efectiva ≥ 1).

Para cumplir con tal objetivo, desarrollaron técnicas de diseño y administrativas que desde entonces, como en todas las ramas de la ciencia y de la técnica, están en continuo desarrollo.

En lo que se refiere a las técnicas de cálculo se han elaborado potentes programas de ordenador que permiten predecir la K -efectiva en circunstancias muy variadas con gran precisión.

Uno de los inconvenientes que plantean estos programas de cálculo es la necesidad de utilizar grandes ordenadores y gran tiempo de la CPU, con el coste que ello supone.

Para solventar estos inconvenientes en circunstancias especiales es posible resolver el problema con el empleo de métodos de cálculo manual o programando los mismos métodos en or-

denadores profesionales (PC).

En esta ponencia nos vamos a referir a tres de estos métodos:

- Método del Angulo Sólido
- Método de la densidad superficial
- Método de la densidad equivalente

Estos métodos son generalmente conservadores aunque pueden existir circunstancias particulares en que no sea así. Estas circunstancias es necesario conocerlas para poder aplicar correctamente dichos métodos.

METODO DEL ANGULO SOLIDO (M.A.S.)

Un conjunto de unidades subcríticas aisladamente puede convertirse en crítico debido a la influencia que sobre la reactividad de cada unidad tienen la presencia de otras unidades próximas.

El M.A.S. permite estimar la influencia que sobre la reactividad de una unidad de material fisionable tiene la presencia de otras unidades vecinas en función de los ángulos subtendidos por éstas al ser "vistas" desde la unidad elegida.

El cálculo determina si este ángulo es aceptable, en cuyo caso es posible utilizar la configuración para la que se ha realizado o es necesario separar éstas hasta que el ángulo total Ω , subtendido por la unidad más desfavorable, sea inferior al tolerado.

En definitiva, determina la distancia de separación que entre sí debe tener un conjunto de unidades subcríticas aisladamente para que el conjunto permanezca subcrítico en las circunstancias más desfavorables.

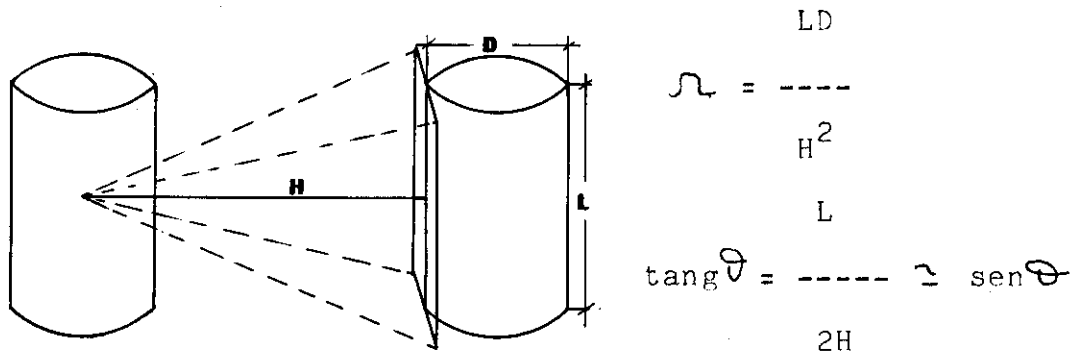
El método está basado en los siguientes supuestos:

- a) Se conoce la reactividad de cada unidad aislada
- b) Cada unidad emite neutrones de forma isotrópica y por tanto la interacción entre dos unidades depende del ángulo sólido subtendido por ésta.

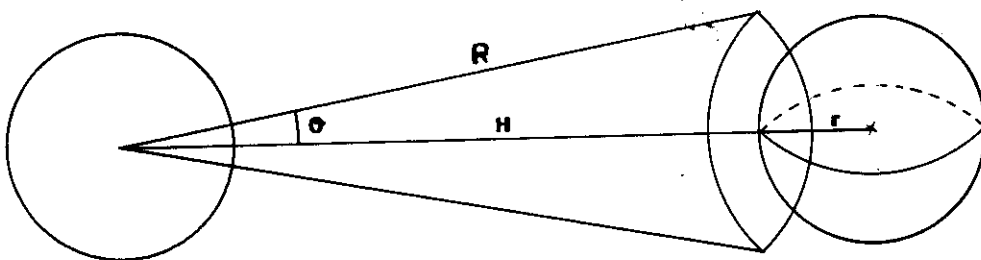
El cálculo del ángulo sólido puede ser complicado y dado que es un método que se pretende sencillo se recurre frecuentemente, y en lo que sigue así lo haremos, a una simplificación denominada aproximación del "punto al plano", que consiste en calcular el ángulo sólido para la proyección ortogonal de la figura sobre el plano más próximo que está en contacto con ella y que es perpendicular al vector que une su centro con el centro desde el que se calcula éste. (Ver Ref. 7, 8 y 9)

Ejemplos:

El ángulo sólido, con la aproximación del punto al plano para dos cilindros como los de la figura será:



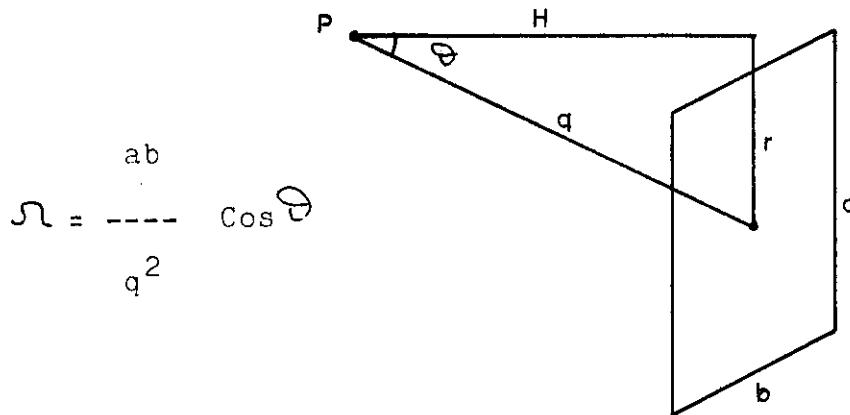
El ángulo sólido para dos esferas



$$\Omega = \frac{\pi r^2}{H^2} = \frac{\pi R^2 \text{Sen}^2 \vartheta}{R^2 \text{Cos}^2 \vartheta} = \frac{(1 - \text{Cos}^2 \vartheta) \pi}{\text{Cos}^2 \vartheta} = \frac{(1 + \text{Cos } \vartheta)(1 - \text{Cos } \vartheta) \pi}{\text{Cos}^2 \vartheta}$$

$$= 2 \pi (1 - \text{Cos } \vartheta)$$

El ángulo sólido para un plano desde un punto P



$$\Omega = \frac{ab}{q^2} \cos \theta$$

Estas formas son más conservadoras que el ángulo sólido real calculado a partir de la integración de la ecuación:

$$d\Omega = dA/r$$

Como hemos dicho, uno de los requisitos que es necesario conocer es la K-efectiva de cada unidad. Esta puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$K_{ef} = \frac{K_{\infty}}{1 + M^2 B^2}$$

donde:

K_{∞} : factor de multiplicación infinito

M^2 : Area de migración

B^2 : "Buckling" geométrico

Los valores de K_{∞} , $M^2 B^2$ se pueden obtener de numerosas tablas como son las incluidas en la referencia 10.

La determinación de qué ángulos sólidos son aceptables y cuales no, se realiza por comparación de las curvas 1 y 2. (Ver Fig. 1 y 2)

Las curvas anteriores se han obtenido de un gran número de datos experimentales y están ampliamente contrastadas.

La curva 1 es la que se emplea en condiciones más estrictas que consiste en suponer las unidades totalmente reflejadas. Esta curva es muy conservadora cuando se aplica a redes de unidades de bajo enriquecimiento. Cuando unidades de este tipo se pueden considerar parcialmente reflejadas (por ejemplo cuando sólo están reflejadas por una pared y el suelo) se puede utilizar la curva 2.

Conocido la K-efectiva de la unidad y el ángulo sólido subtendido por el resto de las unidades se comprueba si están dentro de la superficie encerrada por la curva elegida. Si es así, la subcriticidad de la unidad es aceptable, en otro caso, no. Se repite el proceso para todas las unidades. Si se obtiene que el ángulo subtendido por cada una de las unidades es aceptable, se puede asegurar que el conjunto también lo es. En el caso de que el conjunto de unidades sean iguales, el cálculo se simplifica, pues es suficiente hacer el cálculo para la unidad central que es la que subtenderá un ángulo mayor.

ENUSA dispone de dos programas de cálculo que permiten aplicar el método con gran simplicidad. Son el programa SNAKE que utiliza el ángulo sólido real y el SAC-3 que utiliza la aproximación del punto al plano.

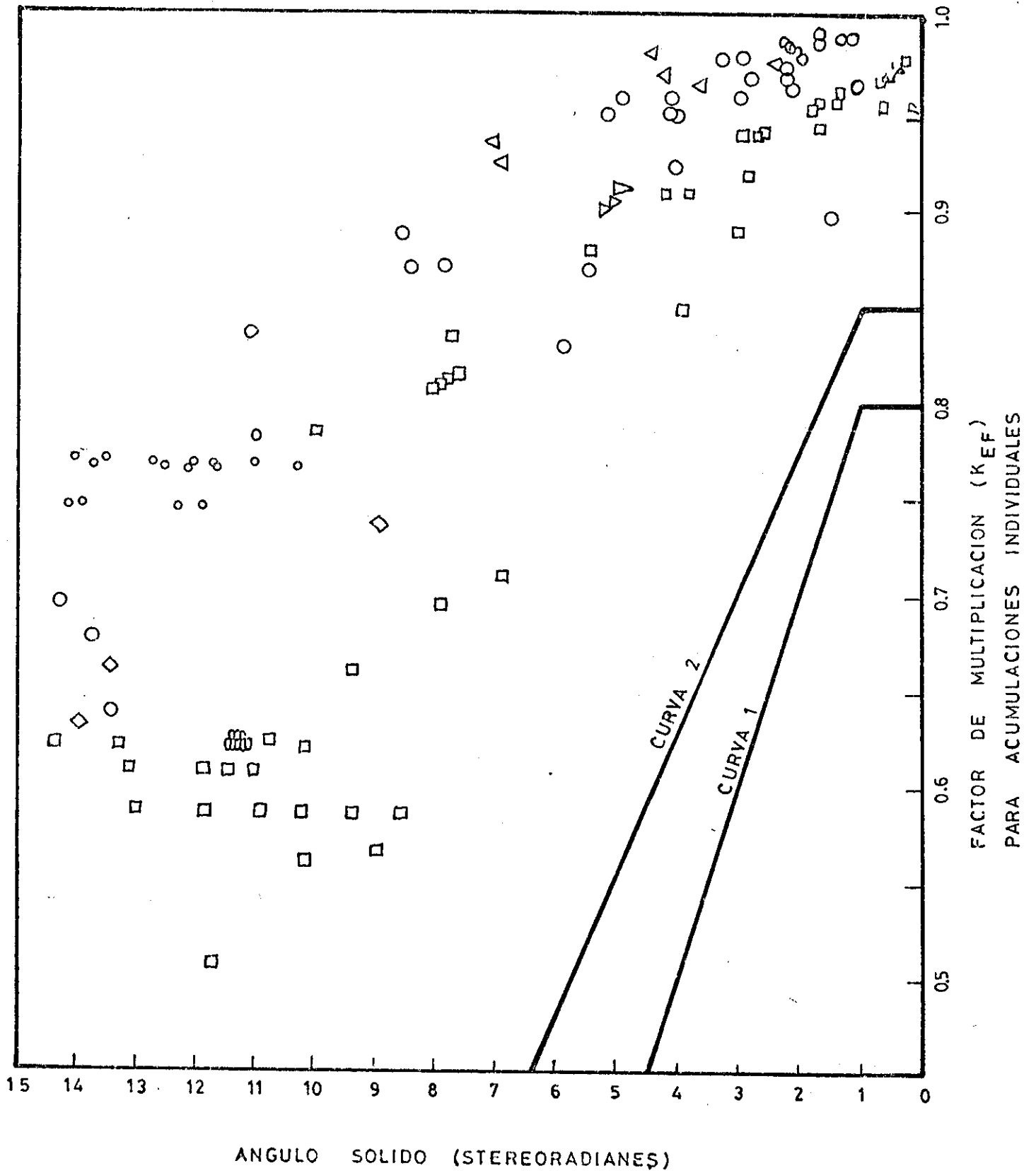


Fig. 1

CURVA 1

<u>K_{EF}</u>	<u>Angulo solido tolerado</u>
< 0.3	$\Omega = 6$
$0.3 \alpha 0.8$	$\Omega = 9-10 K_{EF}$
> 0.8	$\Omega = 0$

CURVA 2

< 0.47	$\Omega = 6$
$0.47 \alpha 0.85$	$\Omega = 12 \frac{1}{3} - 13 \frac{1}{3} K_{EF}$
> 0.85	$\Omega = 0$

Fig. 2

METODO DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL

El método de la densidad superficial permite realizar una evaluación rápida y sencilla de las interacciones en sistemas formados por unidades que contienen material fisiónable. Está basado en las correlaciones de los datos correspondientes a sistemas críticos formados por unidades subcríticas que muestran, que los parámetros de un sistema crítico están relacionados con el espesor de la lámina que se formaría si el material contenido en el sistema se "derramara" sobre el área de la base.

Cuando el sistema no está reflejado y las unidades contienen una solución de material fisiónable, el espesor de la lámina es idéntico a la altura crítica de una unidad de forma y composición similares a las del sistema. La misma equivalencia se encuentra entre sistemas planos, infinitos y reflejados de unidades que contienen material fisiónable y láminas infinitas y reflejadas de composición idéntica. Cuando las unidades contienen un metal el sistema puede describirse en términos de su forma y de su densidad superficial.

El estudio de sistemas, cuyas unidades contienen una solución de material fisiónable por el método de la densidad superficial, comienza considerando los parámetros que caracterizan al sistema y a una unidad crítica de forma y composición idénticas a los del sistema.

Estos parámetros son el factor de forma y la densidad superficial volumétrica que se definen del modo siguiente:

	sistema	unidad
Factor de forma	$HA^{-1/2}$	$t_c a^{-1/2}$
Densidad superficial volumétrica	$t_a = V_c / a$	t_c

donde:

H= altura del sistema

A= área de la base del sistema

V_c = volumen de solución contenido en el sistema

t_c = altura crítica de la unidad

a= área de la base de la unidad

En la figura 1 aparece representado el factor de forma frente a la densidad superficial volumétrica para sistemas de unidades que contienen soluciones de uranio enriquecido al 4,9 y al 93%. En esta figura se observa que cuando $HA^{-1/2}$ es igual a $t_c a^{-1/2}$, los valores de t_a y t_c son muy similares y que cuando se introducen un material hidrogenado entre las unidades hay una reducción del volumen de solución necesario para que el sistema sea crítico.

Cuando el sistema está reflejado también se reduce el volumen de solución necesario para que sea crítico pero además varían algunas de las relaciones básicas que se observan en el estudio de sistemas no reflejados. Por ejemplo, el volumen crítico de un sistema cúbico no reflejado aumenta como una función de $(\rho/\rho_0)^{-s}$ donde ρ es la densidad promedio del sistema, ρ_0 es la densidad de las unidades y s es aproximadamente igual a 2. Sin embargo, cuando se añade un reflector el valor de s es sustancialmente menor que 2 cuando el valor de ρ/ρ_0 es

próximo a 1 y se acerca asintóticamente a 2 cuando disminuye.

Se puede también demostrar que cuando s es igual a 2, t_a toma un valor constante y cuando s es menor que 2, t_a decrece como una función de ρ/ρ_0 (figura 2).

Por otra parte para un mismo valor de ρ/ρ_0 el volumen crítico es mayor para un sistema cúbico que para un sistema "desproporcionadamente bajo" ($HA^{-1/2} < 1$).

Este aumento está descrito por una relación R definida del modo siguiente:

$$R = \frac{\text{volumen crítico de un sistema con un factor de forma dado}}{\text{volumen crítico de un sistema cúbico}}$$

Esta relación permite encontrar el valor de t_a para un sistema de factor de forma $HA^{-1/2}$ a partir del valor de t_a para un sistema cúbico (t_{ac}) usando la expresión:

$$t_a = (t_{ac} R / HA^{-1/2})^{1/3} HA^{-1/2}$$

En la figura 3 está representado t_a en función de $HA^{-1/2}$ para sistemas de baja densidad ($\rho/\rho_0 \leq 0.05$) obteniéndose para un sistema plano e infinito que t_a tiene un valor entre 1.7 y 1.8 pulgadas. Este resultado ha sido verificado por otros métodos de cálculo.

Los sistemas que se han considerado hasta aquí están formados por unidades que son relativamente pequeñas comparadas con el

tamaño de una unidad crítica de forma y composición similares. Este tamaño relativo puede ser descrito en función de la fracción crítica que se define del modo siguiente:

$$f = \frac{\text{masa de la unidad}}{\text{masa crítica de una unidad de forma y composición similar}}$$

Si definimos el grado de variación, S, entre t_a y t_c como $S = t_a/t_c$ donde $HA^{-1/2} = t_c a^{-1/2}$ y representamos S frente a f para los sistemas que se detallan (figura 4) se obtiene que el valor de S es próximo a 1 cuando f es igual o menor que 0,39 y que S tiende a 0 cuando f se aproxima a 1.

Esto nos dice que el método está restringido a sistemas formados por unidades cuya fracción crítica es menor o igual que 0,39.

Por último señalar que los datos críticos correspondientes a sistemas cuyas unidades contienen U^{235} metal, muestran que t_a es una función de la forma y densidad del sistema, del tamaño de la unidad y del grado de reflexión.

Usando este método se decide la composición y forma del sistema así como el tamaño de las unidades. Una vez fijada la composición del material, el espesor de la lámina segura (t_s) se determina reduciendo t_a o t_c por un factor apropiado. Como todos los sistemas están sujetos a algún grado de reflexión se tomarán t_a o t_c para sistemas totalmente reflejados.

A partir del valor de t_s se encuentra cual debe ser la separación entre unidades para que el sistema sea seguro.

Esta formulación es la desarrollada por GUTMAN y viene recogida en las referencias 1, 2 y 3.

Otra formulación reciente y bien verificada es la recogida por THOMAS en la referencia 7, según la cual la densidad superficial, \bar{G} , de la lámina que se forma cuando todo el material fisionable contenido en el sistema se derrama sobre la base del mismo debe ser:

$$\bar{G} = 0,54 \bar{G}_0 (1 - 1.37 f)$$

donde:

\bar{G}_0 : densidad superficial de una lámina infinita reflejada por agua.

masa de una unidad

f:-----

masa crítica de una esfera no reflejada del mismo material

Esta expresión es aplicable a sistemas planos e infinitos rodeados de una capa de agua de, al menos, 15,5 cm (o su equivalente), situada a una distancia de la unidad más próxima mayor que la separación mínima que debe existir entre las unidades.

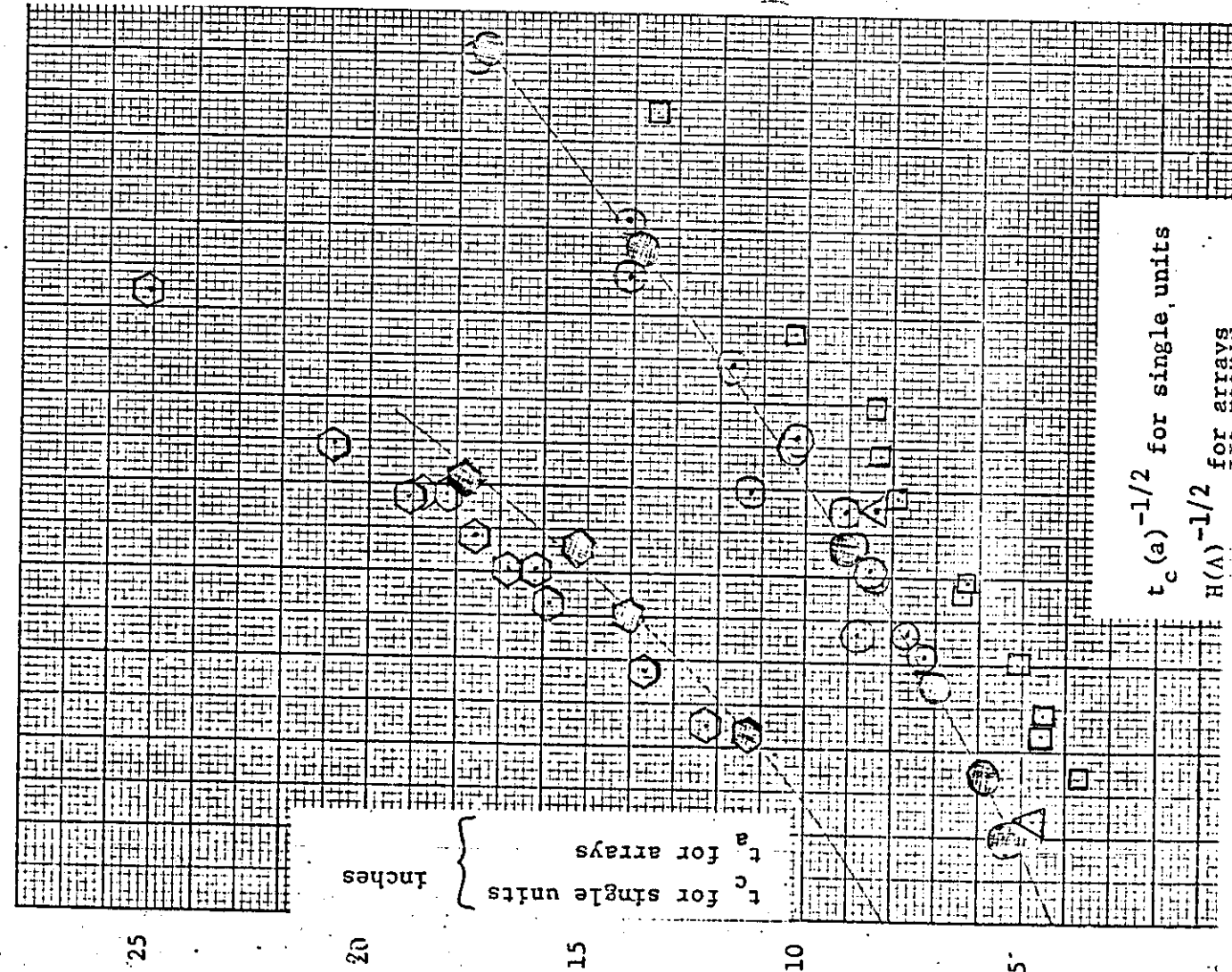


Figure 1

t_a as a function of $H(A)^{-1/2}$ for unreflected critical ^{235}U solution arrays, and t_c as a function of $t_c(a)^{-1/2}$ for unreflected critical single units of ^{235}U

- $\text{U}(4.9)\text{O}_2\text{F}_2$

32-43 g $^{235}\text{U}/\text{l}$ in

single critical units
- $\text{U}(93)\text{O}_2\text{F}_2$

384-535 g $^{235}\text{U}/\text{l}$ in

single critical units
- $\text{U}(4.9)\text{O}_2\text{F}_2$

44 g $^{235}\text{U}/\text{l}$ in 24.1 cm

diameter aluminum

cylinder arrays
- $\text{U}(93)\text{O}_2\text{F}_2$ and

 $\text{U}(93)\text{O}_2(\text{NO}_3)_2$

384-535 g $^{235}\text{U}/\text{l}$ in

15.2 cm diameter

aluminum cylinder

arrays
- $\text{U}(93)\text{O}_2(\text{NO}_3)_2$

384 g $^{235}\text{U}/\text{l}$ in 5

liter Plexiglas

cylinder arrays
- $\text{U}(93)(\text{NO}_3)_2$

384 g $^{235}\text{U}/\text{l}$ in

5 3/8" and 5 5/8"

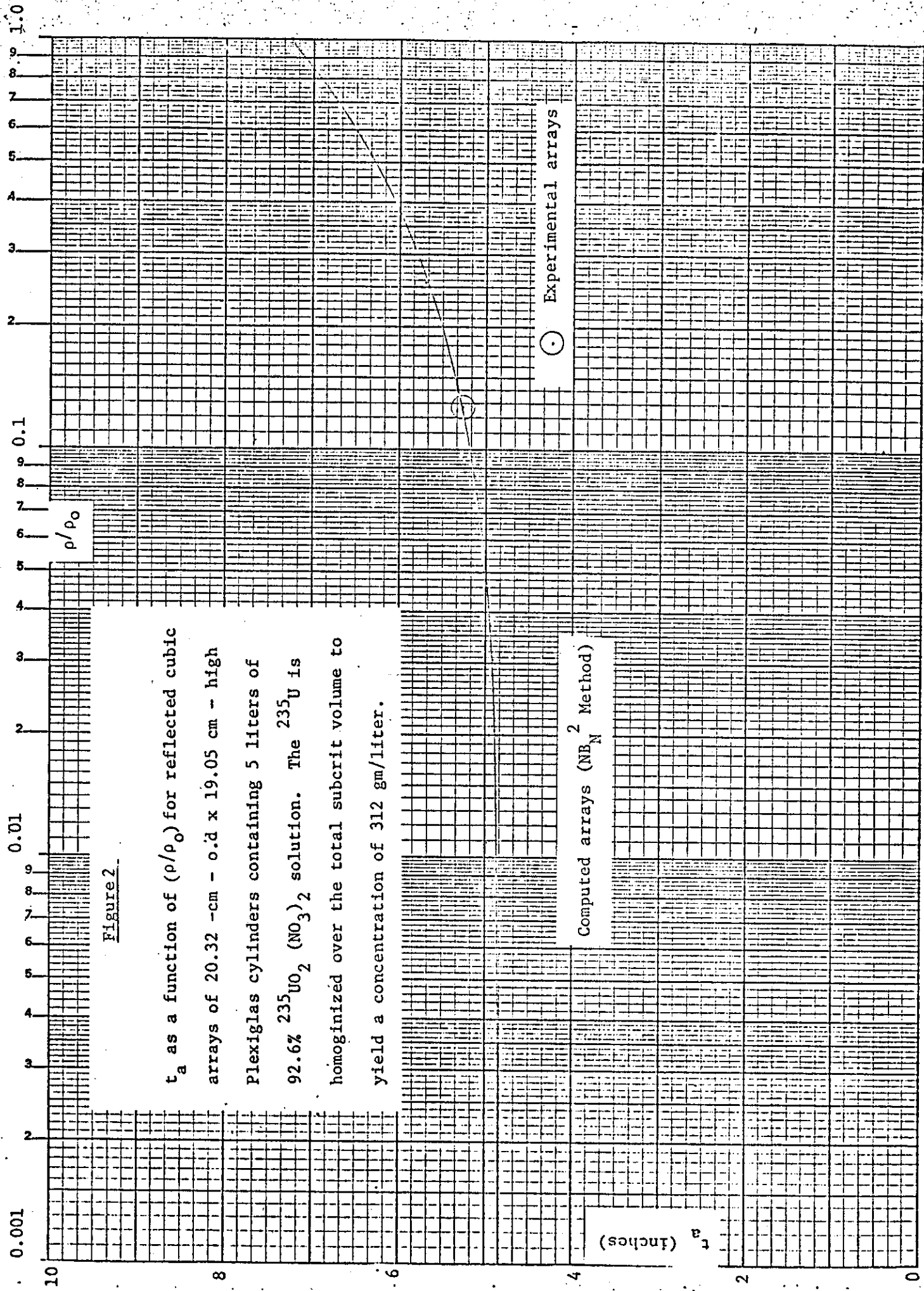
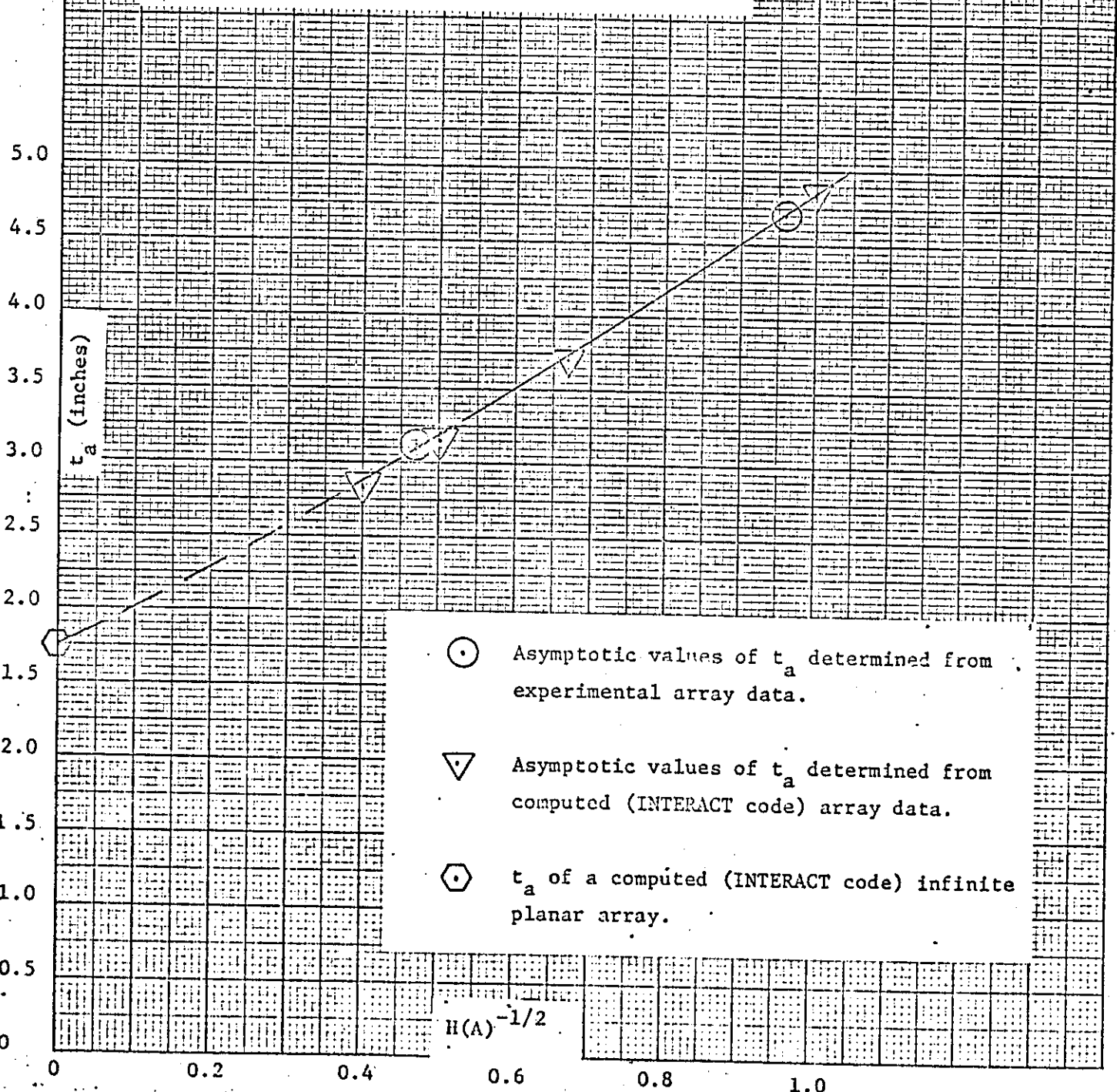


Figure 2

t_a as a function of (ρ/ρ_0) for reflected cubic arrays of 20.32 -cm - o.d x 19.05 cm - high Plexiglas cylinders containing 5 liters of 92.6% ²³⁵UO₂ (NO₃)₂ solution. The ²³⁵U is homogenized over the total subcrit volume to yield a concentration of 312 gm/liter.

Figure 3

t_a as a function of $H(A)^{-1/2}$ for reflected arrays of 20.32-cm.-o.d. x 19.05-cm-high Plexiglas cylinders containing 5 liters of 92.6% $^{235}\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ solution. The ^{235}U is homogenized over the total subcrit volume to yield a concentration of 312 gm/liter.



- Asymptotic values of t_a determined from experimental array data.
- ▽ Asymptotic values of t_a determined from computed (INTERACT code) array data.
- ⬡ t_a of a computed (INTERACT code) infinite planar array.

KEUFFEL & ESSER CO. MADE IN U.S.A.

Figure 4

Variance between values of t_a and t_c For U(93) solutions of similar compositions in systems of similar shape.

1.2

1.0

0.8

0.5

0.4

0.2

$$s = t_a/t_c \text{ where } H(A)^{-1/2} = t_c (a)^{-1/2}$$

△ 6 inch diameter aluminum cylinders in unreflected arrays. 384-535 g ²³⁵U/l

◇ 5 inch diameter aluminum cylinders in unreflected arrays.

□ 8 inch diameter aluminum cylinders in unreflected arrays. 535 g ²³⁵U/l

⊕ 8 inch diameter aluminum cylinders in unreflected arrays. 85 g ²³⁵U/l

○ 9.5 inch diameter aluminum cylinders in unreflected arrays. 85 g ²³⁵U/l

▽ 20.32 cm O.D. x 19.05 cm O.H. Plexiglas cylinders in reflected infinite planar array. 312 g ²³⁵U/l

Fraction of critical mass (f)

METODO DE LA DENSIDAD EQUIVALENTE

El método de la densidad equivalente nos permite determinar el número de unidades que hacen crítica una distribución de las mismas.

Este método está basado en la siguiente ley:

"En un sistema crítico, si las densidades aumentan hasta n veces su valor inicial y las dimensiones lineales disminuyen hasta hacerse n veces menores que su valor inicial, el sistema continua siendo crítico".

El origen de esta ley no se conoce con certeza, pero su primera mención aparece en un informe del LASL, donde SERBER pone de manifiesto que el radio crítico de una esfera no reflejada de material fisionable es inversamente proporcional a su densidad, verificándose por tanto:

$$M_c = M_{c0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-2} \quad (1)$$

donde M_c es la masa crítica inicial, ρ la densidad inicial, M_{c0} la masa crítica final y ρ_0 la densidad final.

El método de la densidad equivalente se basa en la suposición de que una ecuación tal como la (1) permite describir correctamente un sistema, reflejado o no, formado por unidades que contiene material fisionable.

Es decir:

$$M_c = A^* \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-S} \quad (2)$$

$$N_c = A \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-S} \quad (3)$$

donde:

M_c : masa crítica del sistema

N_c : número de unidades que hace crítico el sistema

ρ : densidad del sistema

ρ_0 : densidad de las unidades que forman el sistema

y A , $A^{\#}$ y m son constantes que dependen de los parámetros que caracterizan al sistema y del reflector.

El valor de estas constantes se determina con la ayuda de datos obtenidos teóricamente y experimentalmente.

En la figura 1 se representa $\log M_c$ frente a $\log \frac{\rho}{\rho_0}$, para sistemas cúbicos, reflejados o no, formados por unidades cilíndricas que contienen U^{235} metal.

De esta figura se deduce:

- 1.- Las ecuaciones 2 y 3 describen correctamente a los sistemas no reflejados y a los sistemas reflejados con $\frac{\rho}{\rho_0} \leq 0,1$.
- 2.- El valor de S depende de la masa y de la relación entre la altura y el radio de las unidades.

En base a estos resultados, se han desarrollado diversos trabajos con el fin de encontrar expresiones adecuadas para A y S .

Por ejemplo, GUTMAN (ref. 3) escribe para sistemas cúbicos:

$$N = M_{cs} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-S}$$

donde:

M_{cs} : masa crítica de una esfera no reflejada de igual
composición que las unidades del sistema.

$$S = 2(1-f)$$

masa de una unidad del sistema

$$f = \frac{\text{masa crítica de una unidad similar}}{\text{masa crítica de una unidad del sistema}}$$

Cuando el sistema está reflejado hay que reducir el valor de N por un factor de reflexión, R, apropiado.

Otra formulación reciente y bien verificada es la recogida por THOMAS en la referencia 7.

$$N = \frac{2,1 \sqrt{\sigma_0}}{m} (1 - 1,37 f)^3 V^2$$

donde:

$\sqrt{\sigma_0}$: densidad superficial de una lámina crítica e
infinita reflejada por agua.

masa de una unidad

$$f = \frac{\text{masa crítica de una esfera no reflejada del mismo material}}{\text{masa de una unidad}}$$

m = masa de la unidad

V = volumen asociado a una unidad

Se ha supuesto que el sistema está reflejado por una lámina de agua de, al menos, 20 cm.

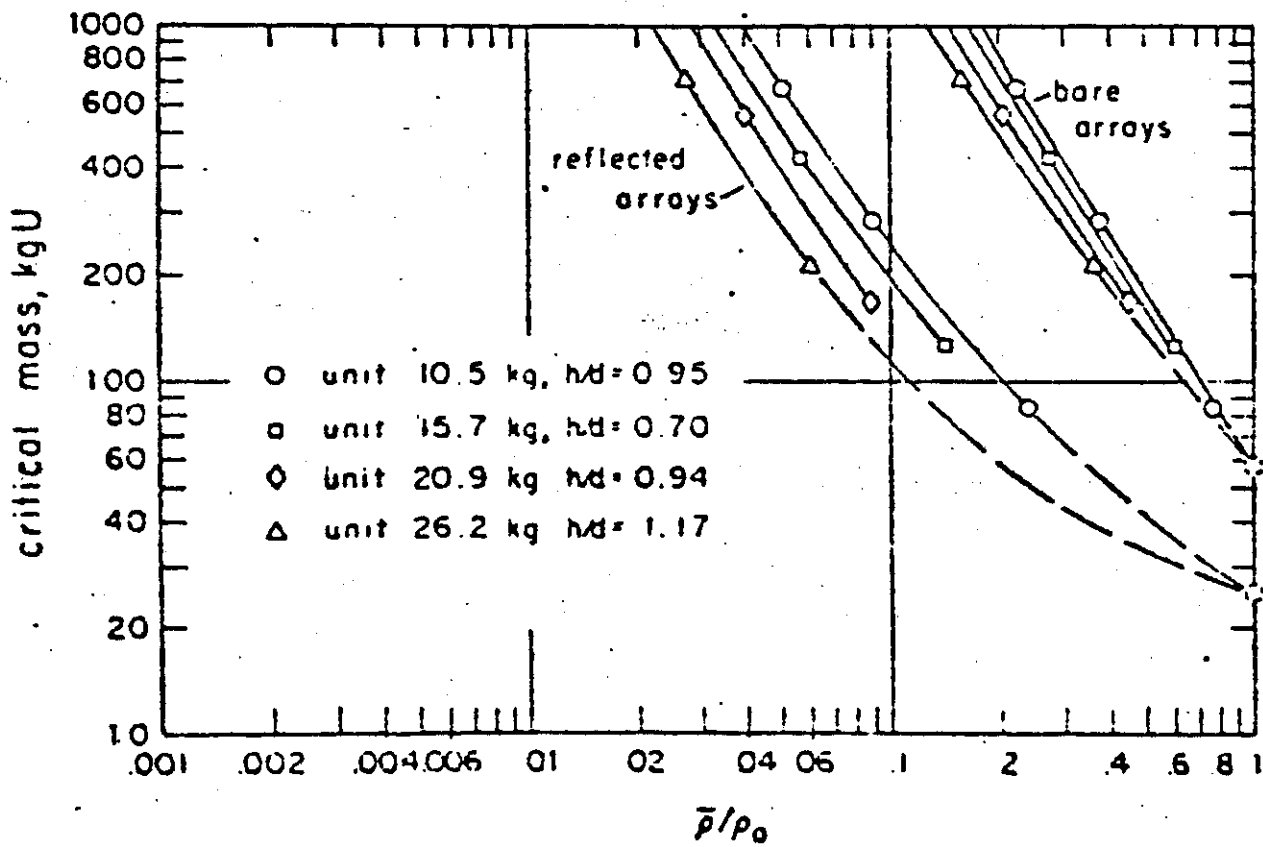


Fig. 1 . Critical masses of air-spaced arrays of 10.5-, 15.7-, 20.9-, or 26.2-kg cylinders of U(93) metal. There is the same number of units along each of the three principal axes; surface-to-surface spacing is uniform.

REFERENCIAS

- 1.- Thomas Gutman, "The Surface Density Method; A Simple Means for Describing Critical Interacting Array Parameters".
- 2.- Thomas Gutman, "A Surface Density Evaluation of Critical Array Data".
- 3.- Thomas Gutman, "A Survey of Methods for Evaluation Neutron Interaction".
- 4.- Ronald Allen Knief, "Nuclear Criticality Safety, Theory and Practice", (1985).
- 5.- J. T. Thomas, "Surface Density and Density Analog Models for Criticality in Arrays of Fissile materials". Nucl. Sci.Eng, 62, 424 (1977).
- 6.- H. C. Paxton, "Criticality Control in Operations with Fissile Material". LA-3366 (Revision), Los Alamos National Laboratory (1972).
- 7.- J. T. Thomas, Ed, "Nuclear Safety Guide/TID-7016/Rev 2". (1978).
- 8.- "Criteria for Establishing and Applying a Solid Angle Method for Nuclear Criticality Safety" ANSI 8.13.1 (1979).
- 9.- D. R. Oden, "Critique of the Solid Angle Neutron Interaction Method" BNFL 2233.
- 10.- ARH 600, Criticality Handbook (1975).