

PONENCIA PRESENTADA A LA XIV REUNION ANUAL DE LA SNE (M. 10/11. 1978)

7.13 DETERMINACION DE PARAMETROS ENVOLVENTES EN ESTUDIOS DE CRITICIDAD DE OPERACIONES CON MATERIAL FISIONABLE FUERA DE CENTRALES NUCLEARES

Guillermo Sánchez
Carolina Alvaro
Wifredo García

ENUSA (FABRICA DE JUZBADO - SALAMANCA)

0. INTRODUCCION

En las Fábricas de Elementos Combustibles para reactores nucleares es necesario manejar grandes cantidades de material fisionable, por lo que una preocupación fundamental es asegurar la subcriticidad bajo cualquier circunstancia previsible. Este objetivo se realiza imponiendo requisitos de seguridad nuclear a procesos e instalaciones, requisitos que se definen en función de los resultados de los análisis de criticidad realizados para cada caso. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en estas fábricas se da una gran variedad de configuraciones del material fisionable. Además estas instalaciones están sometidas a modificaciones continuas para adaptarse a las mejoras que se producen en los elementos combustibles. Si se pretendiese realizar los estudios de criticidad de forma específica para cada operación y cada instalación, incluidas las incidencias posibles, estos estudios se harían de duración y costes enormes, por lo que es necesario establecer una serie de parámetros cuyo control garantice un amplio margen de aplicabilidad de los resultados de los análisis. En la ponencia se describen los criterios empleados en ENUSA para cumplir con ese objetivo.

1. VALORES MAXIMOS PERMISIBLES

La reactividad de una unidad o array de unidades que contiene material fisionable viene determinada por el balance estadístico entre los neutrones producidos por fisión y los perdidos en el proceso de difusión, ya sea absorbidos por los núcleos presentes en el sistema o debido al escape a través de las superficies del mismo. Esquemáticamente, el balance se expresa como sigue:

$$(n^{\circ} \text{ neutrones}) = \text{Producción} - \text{Absorción} - \text{Escape}$$

La magnitud del último término de la ecuación anterior depende en gran medida de la geometría, ya que ésta influye considerablemente en la probabilidad de que un neutrón producido en el interior del sistema llegue a alcanzar el exterior. Resulta intuitivo que la proporción de neutrones que escapan aumenta con la relación superficie/volumen de la unidad, pues si en un instante tenemos neutrones difundiendo sobre todo el volumen del sistema, al instante siguiente sólo habrán escapado parte de los que se encontraban muy próximos a la superficie. De esto se sigue que, a igualdad de otros factores, una unidad esférica es más reactiva que otra de distinta forma.

Las ideas anteriores tienen una aplicación inmediata en seguridad nuclear: si para contener el material fisionable utilizamos recipientes con una relación superficie/volumen suficientemente alta podemos estar seguros de la subcriticidad. Este tipo de control de la criticidad, basado en limitar las dimensiones de las unidades o arrays de unidades para favorecer el escape neutrónico se denomina control de geometría segura y es extensamente utilizado en instalaciones en las que se maneja y almacena material nuclear, particularmente en aquellos casos en que las condiciones del material sean variables, no pudiendo descartarse la óptima moderación. El primer paso para establecer un control de este tipo consiste en determinar cuales son las dimensiones que garantizan la se-

guridad. En general, para cada forma geométrica se controla un solo parámetro, en aras de la sencillez y, por tanto, de la efectividad del control. Los parámetros que normalmente se limitan son:

- Espesor de lámina infinita.
- Diámetro de cilindro infinito.
- Volumen.
- Masa.

A la hora de determinar los límites de estos parámetros, los llamados Valores Máximos Permitidos (V.M.P.), es necesario suponer las condiciones de moderación y reflexión más desfavorables del material nuclear, de modo que los V.M.P. sean aplicables independientemente de las condiciones en que se encuentre éste. Para los V.M.P. de masa y volumen se supone además que la unidad es de forma esférica, que, como se ha dicho, es la más reactiva.

En Juzbado el material nuclear consiste en UO_2 con un enriquecimiento máximo previsto del 5% en peso, (la autorización actual es del 4.15%). Este material puede encontrarse en configuraciones homogéneas (polvo, lodos) o heterogéneas (redes de pastillas o de barras, elementos combustibles). Además, hay que considerar que el UO_2 puede hallarse mezclado con sustancias hidrogenadas, ya sea como situación normal (el proceso requiere la adición al polvo de oxalato amónico, por ejemplo) o como resultado de un error de manejo o accidente que dé lugar al vertido de agua sobre el uranio. Además existen tuberías por las que circula agua que contiene uranio en diferentes proporciones, aspiradores para la limpieza de equipos en cuyo interior es imposible controlar la humedad del polvo, etc.

Todo esto aconseja la utilización de controles geométricos. Con este objeto se han determinado los V.M.P. aplicables a mezclas homogéneas y heterogéneas de UO_2 enriquecido al 5% y material hidrogenado. La normativa de Seguridad Nuclear no define un criterio estricto para establecer los V.M.P., sino

que se limita a indicar que los "límites subcríticos", es decir, los valores de los parámetros que conducen a una K-efectiva unidad, deben reducirse en una cantidad que asegure suficientemente la subcriticidad.

La magnitud de esta reducción no se fija, sino que se admite un criterio variable según las características de la planta. En Juzbado se ha utilizado un criterio conservador, definiendo los V.M.P. como los valores de los parámetros correspondientes que pueden conducir a una K-efectiva de 0.95 como máximo. Con este criterio, y utilizando datos estándar de las ref 1 y 2, suponiendo siempre las mezclas o redes más reactivas y reflexión total por agua, se han calculado los siguientes V.M.P.

TABLA 1

VALORES MAXIMOS PERMITIDOS
 PARA MEZCLAS DE $UO_2 - H_2O$
 (Enriquecimiento 5%)

	Sistemas homogéneos	Sistemas Heterogéneos
Masa	31 Kg UO_2	25 Kg UO_2
Volumen	19.5 l	16 l
Radio de Cilindro infinito	11.2 cm	10.4 cm
Espesor de lámina infinita	10.25 cm	8.9 cm

Como se ve en la tabla los V.M.P. son muy restrictivos. No obstante resultan muy útiles, y de hecho en Juzbado existen muchas operaciones cuya seguridad se garantiza aplicándolos. Sin embargo, en muchas ocasiones, de cara a analizar la

Seguridad Nuclear de un cierto equipo, es conveniente disponer de unos V.M.P. más "adaptados" al equipo real y no tan restrictivos. Un modo de conseguir ésto es relajar los V.M.P. teniendo en cuenta que las unidades no son infinitas sino de dimensiones limitadas. De hecho la K-efectiva puede escribirse como:

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

donde K_{∞} y M^2 (área de migración) dependen de las características del material, mientras que Bg^2 ("Buckling" geométrico) depende de la geometría y, ligeramente, del material a través de la condición de contorno (distancia extrapolada) . Por ejemplo en el caso de un cilindro, de radio r y longitud l :

$$Bg^2 = Bg^2 (r, l; \lambda)$$

El buckling del cilindro infinito de radio máximo permisible, r_M , es $Bg^2 (r_M, \infty; \lambda)$. De la ecuación

$$Bg^2 (r, l; \lambda) = Bg^2 (r_M, \infty; \lambda)$$

se despeja una función $r=r(l)$ que da el radio máximo permisible de un cilindro de longitud l . De modo análogo se puede encontrar el espesor máximo permisible de una lámina de base con lados X e Y . En las figuras 1 a 4 se presentan los espesores y radios máximos en función de las otras dimensiones.

Otro modo de relajación de un V.M.P. se basa en hacer hipótesis acerca del grado de moderación del material. En el caso de sistemas homogéneos la reactividad del material viene determinada por la relación H/U (átomos de hidrógeno/átomos de uranio), suponiendo que no existan otros moderadores, como carbono, mientras que en el caso heterogéneo la dependencia es más compleja. Si estamos seguros de que la relación H/U en una unidad homogénea tiene un cierto valor máximo, o se encuentra

en un cierto intervalo, podemos aplicar un V.M.P. relajado, el calculado para la peor de las relaciones H/U creibles en la unidad. Naturalmente, este tipo de relajación sólo es admisible cuando la relación H/U se ha determinado previamente mediante análisis y existe un control de moderación lo suficientemente estricto como para asegurar que no pueden darse variaciones apreciables en ella. Los V.M.P. en función de la relación H/U para sistemas homogéneos se han calculado a partir de los datos disponibles en la ref.1 y se presentan en las figuras 5 a 8.

Este tipo de relajación de los V.M.P. puede utilizarse también para sistemas heterogéneos, aunque en este caso el cálculo es más complicado y exige la utilización de programas de ordenador capaces de generar una librería de secciones eficaces adecuada al problema y de calcular la K-efectiva de sistemas tridimensionales, generalmente utilizando métodos Montecarlo. En ENUSA se dispone de un paquete que incluye opciones de este tipo, el SCALE, desarrollado en Oak Ridge. La secuencia de programas XSDRNPM+KENOIV se ha utilizado para una aplicación de este tipo, en concreto se trata de relajar el espesor de lámina segura para material heterogéneo, incluido en la tabla 1, ya que este espesor se ha calculado utilizando como base la malla de barras más reactiva, que supone un diámetro de pastilla que no se utiliza en Juzbado y además un "pitch" entre las barras. Sin embargo, la mayor parte de las acumulaciones de barras presentes en la Fábrica son compactas, es decir, las barras están en contacto, lo que, incluso en inundación total, sitúa al sistema en la zona submoderada. Utilizando el tipo de barras más reactivo presente en la Fábrica y suponiéndolas en contacto formando una malla cuadrada, que en cálculos previos se mostró más reactiva que la triangular, se han realizado varios cálculos XSDRNPM+KENOIV para diferentes espesores de una lámina infinita, totalmente reflejada e inundada: el espesor que proporciona una K-efectiva de 0.95 (incluidas incertidumbres) es de 23.3 cm. Por tanto, para acumulaciones de este tipo el V.M.P. general, 8.9 cm, puede relajarse, aumentándose a más del doble.

2. CONTROL DE MODERACION PARA SISTEMAS HOMOGENEOS

El espectro de los neutrones producidos por fisión presenta un pico a una energía de 0.72 Mev., siendo la energía promedio de 2 Mev. Sin embargo, la sección eficaz de fisión del ^{235}U es casi o 1000 veces mayor para neutrones térmicos que para energías en torno a 1 Mev. En consecuencia, la eficiencia de los neutrones para producir fisión es mucho mayor si existen elementos ligeros mezclados con el material fisiónable, ya que de este modo los neutrones pueden reducir su energía por colisión con estos núcleos. La reactividad de un sistema depende mucho de la proporción de este tipo de elementos moderadores.

En el caso de la Fábrica de Juzbado, el moderador más significativo es el hidrógeno que pueda estar presente en el material nuclear procedente del agua que pueda incorporarse a éste, accidentalmente o como consecuencia del proceso. En aquellas operaciones en que, debido a la gran cantidad de material nuclear que interviene o a otras causas, el control geométrico no es práctico, es necesario establecer un control de moderación, pues la subcriticidad depende en gran medida del grado de moderación del material.

En el caso de sistemas homogéneos, un buen parámetro para caracterizar la moderación es la relación H/U. En general la reactividad de un sistema es pequeña para H/U baja (Zona submoderada), presenta un máximo para una H/U intermedia (óptima moderación) y decae para altas H/U (Zona sobremoderada) pues la sección eficaz de absorción del hidrógeno para neutrones térmicos es considerable. Teniendo en cuenta esto, para establecer un control de moderación para un sistema homogéneo, previamente es necesario:

- a) Fijar la máxima relación H/U admisible en el material en condiciones normales.

- b) Determinar la máxima cantidad de hidrógeno que, como consecuencia de un error o accidente, puede incorporarse al material manteniéndose este subcrítico.

Conocidas estas cantidades, han de arbitrarse las medidas necesarias para que, en el caso más desfavorable, no se sobrepase la segunda y en el proceso normal nunca se supere la primera. Estas medidas consisten en controles ingenieriles (hermeticidad de los contenedores, análisis del contenido en agua, etc) o en procedimientos administrativos (restricciones en las operaciones de limpieza, prohibición de la presencia de sustancias hidrogenadas en diversas áreas). Además, el control de moderación debe tenerse en cuenta en el diseño de la instalación, asegurando la integridad de la cubierta en caso de acumulación de nieve, alejando las conducciones de agua de las zonas controladas etc.

2.1. Relación H/U máxima admisible

Para establecer la máxima H/U que puede admitirse como condición normal se ha adoptado el criterio de que por debajo de ella sea imposible conseguir la criticidad, independientemente de la forma o dimensiones del sistema. Para determinar esta relación H/U se ha calculado la K infinita de diferentes mezclas de UO_2 y agua, hasta obtener una K infinita igual a 1, lo que se ha conseguido para $H/U = 0.46$. Este valor es el que se ha tomado como H/U máxima admisible.

Para confirmar que dicho valor es conservador se han calculado los radios de esferas totalmente reflejados por agua con distintas densidades de uranio y siempre con $H/U = 0.46$ que proporcionan una K efectiva de 0.95, que es el límite máximo de reactividad admitido en los análisis de criticidad. En este caso la densidad tiene importancia en la reactividad, debido a que implica un aumento o disminución de

la cantidad de material nuclear en la zona superficial de la esfera, zona en la que la proporción de neutrones moderados es mayor, puesto que la reflexión en el agua circundante va acompañado de moderación. Los resultados obtenidos, que aparecen en la figura 9, muestran claramente que el límite de $H/U = 0.46$ garantiza completamente la seguridad nuclear de cualquier unidad homogénea aislada que lo cumpla.

Un requisito que debe cumplir un control de moderación es tener en cuenta todo tipo de aportes de humedad al material, entre los cuales hay uno que resulta muy difícil evitar: la absorción del vapor de agua atmosférico debido a la higroscopicidad del material, que en Juzbado se encuentra en gran proporción en forma de polvo. Por este motivo, se ha realizado una medición experimental de dicha higroscopicidad, consistente en la determinación de la relación H/U de una muestra de polvo inicialmente seco tras una permanencia prolongada en un ambiente saturado en vapor de agua a la temperatura normal de operación en la instalación. El resultado ha mostrado que la relación H/U de saturación por higroscopicidad del polvo es inferior a 0.30, perfectamente compatible con el control de limitar la relación H/U a 0.46.

2.2. Limitación de sustancias hidrogenadas

El control de moderación debe completarse con el establecimiento de un límite a la cantidad de hidrógeno que, debido a errores, puede incorporarse al material. Para determinar este límite hay que tener en cuenta que el vertido del material hidrogenado, por ejemplo agua, puede realizarse bruscamente, concentrándose el moderador de manera momentánea en una zona reducida, en la que se alcanza una H/U considerable. Así, aunque la cantidad de agua sea insuficiente para una vez difundida en todo el polvo dar lugar a una relación H/U significativa, la concentración inicial pudiera ser crítica. Para prever este efecto, el cálculo

del límite de hidrógeno se ha basado en el análisis de la reactividad de dos esferas concéntricas de material nuclear: en la interna, se supone la mezcla más reactiva de UO_2 y agua, que resulta corresponder a $(UO_2) = 2.27 \text{ g/cm}^3$ y $(H_2O) = 0.79 \text{ g/cm}^3$, mientras que en la externa se considera polvo con una relación $H/U = 0.46$. Con este modelo variando el radio de la esfera interior y manteniendo el de la exterior con un valor constante, lo suficientemente grande como para poder considerarlo infinito, se ha encontrado la situación que conduce a una K efectiva de 0.95 (calculada con un 95% de confianza). La cantidad de hidrógeno que contiene la esfera interna en este caso es de 1660 g, y éste es el límite que se establece como máximo admisible, formando parte de compuestos que pueden incorporarse al polvo, en las áreas sometidas a control de moderación.

3. METODO ENVOLVENTE PARA CONFIGURACIONES HETEROGENEAS

En los apartados anteriores se han descrito procedimientos que permiten relajar los V.M.P. en función de la relación H/U para medios homogéneos, así como las características que debe tener un control de moderación para este tipo de sistemas. Sin embargo, cuando se trata de sistemas heterogéneos, estas cuestiones se vuelven más complicadas, debido a que la reactividad de una red depende de gran cantidad de factores: la forma y densidad de las unidades, el "pitch", la densidad de moderador en los intersticios, el índice de coordinación, etc. Aunque, en general, la relación H/U sigue siendo indicativa de la reactividad, sistemas heterogéneos con igual relación H/U pueden, debido a la variación de otros parámetros, presentar reactividades bastantes diferentes. Dada la gran variedad de configuraciones posibles, el establecimiento de parámetros envolventes de todas ellas es prácticamente imposible. Esto hace que, en lo referente a sistemas heterogéneos, sea más práctico y seguro analizar cada caso particular que aplicar resultados generales. Por supuesto, la consecuencia es una multiplicación de trabajo, tiempo y costes.

En Juzbado, las configuraciones heterogéneas que se presentan consisten en redes de pastillas o de barras combustibles, con "pitches", diámetros, y condiciones de moderación diversos. Tratando de encontrar configuraciones envolventes para situaciones en las que se manejan mezclas heterogéneas se ha utilizado el sistema SCALE para determinar las condiciones de óptima moderación de redes triangulares e infinitas de todos los tipos de pastillas verdes y sinterizadas que se manejan en la Instalación. Para ello se ha supuesto que en los intersticios de la red hay agua de densidad nominal y se ha ido variando el pitch consiguiéndose con ello encontrar la máxima reactividad debida a heterogeneidades en el sistema. Los resultados obtenidos aparecen en las figuras 10 y 11 y muestran que las máximas K-infinitas para los diferentes tipos de pastillas son muy próximas permitiendo, en aquellas situaciones en las que hay suficientes márgenes de subcriticidad, extender la validez de los análisis realizados para un determinado tipo de pastillas a otros distintos.

Por otra parte, de acuerdo con la Ref. 3, una red de pastillas óptimamente espaciadas es más reactiva que cualquier otra configuración heterogénea y por este motivo el estudio de una unidad, suponiéndola llena de pastillas formando la red de mayor K-infinita cubre conservadoramente cualquier contenido heterogéneo de la misma.

Estos resultados son de gran utilidad en esta instalación ya que en la mayor parte del proceso se manejan diversas configuraciones heterogéneas que exigirían estudios diferentes si no se dispusiera de los resultados citados.

Se ha conseguido por tanto una mayor simplicidad en los estudios de criticidad junto con un ahorro considerable en el tiempo de ordenador.

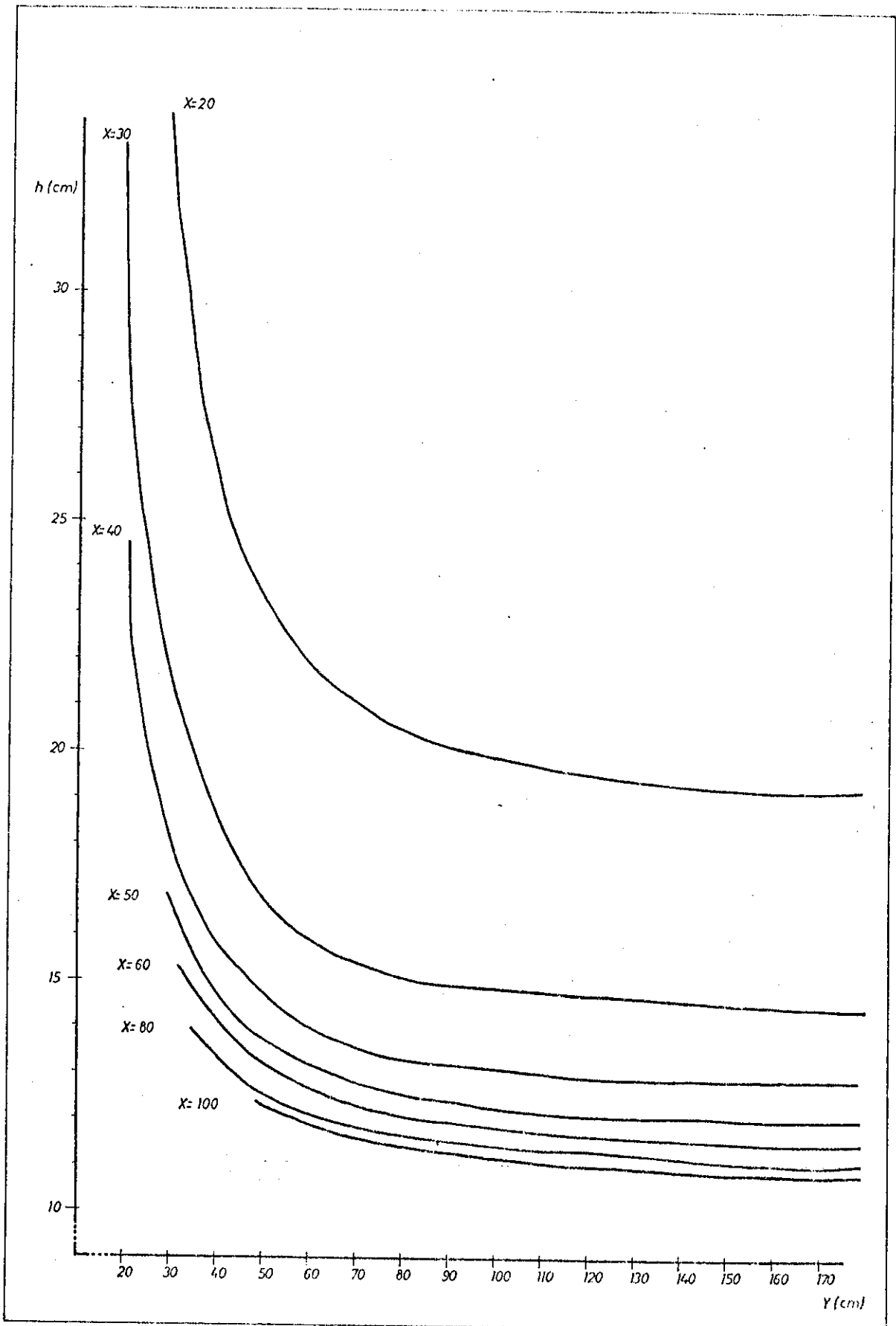


FIGURA 1
 Espesor seguro de lámina homogénea frente
 a las dimensiones de la base.

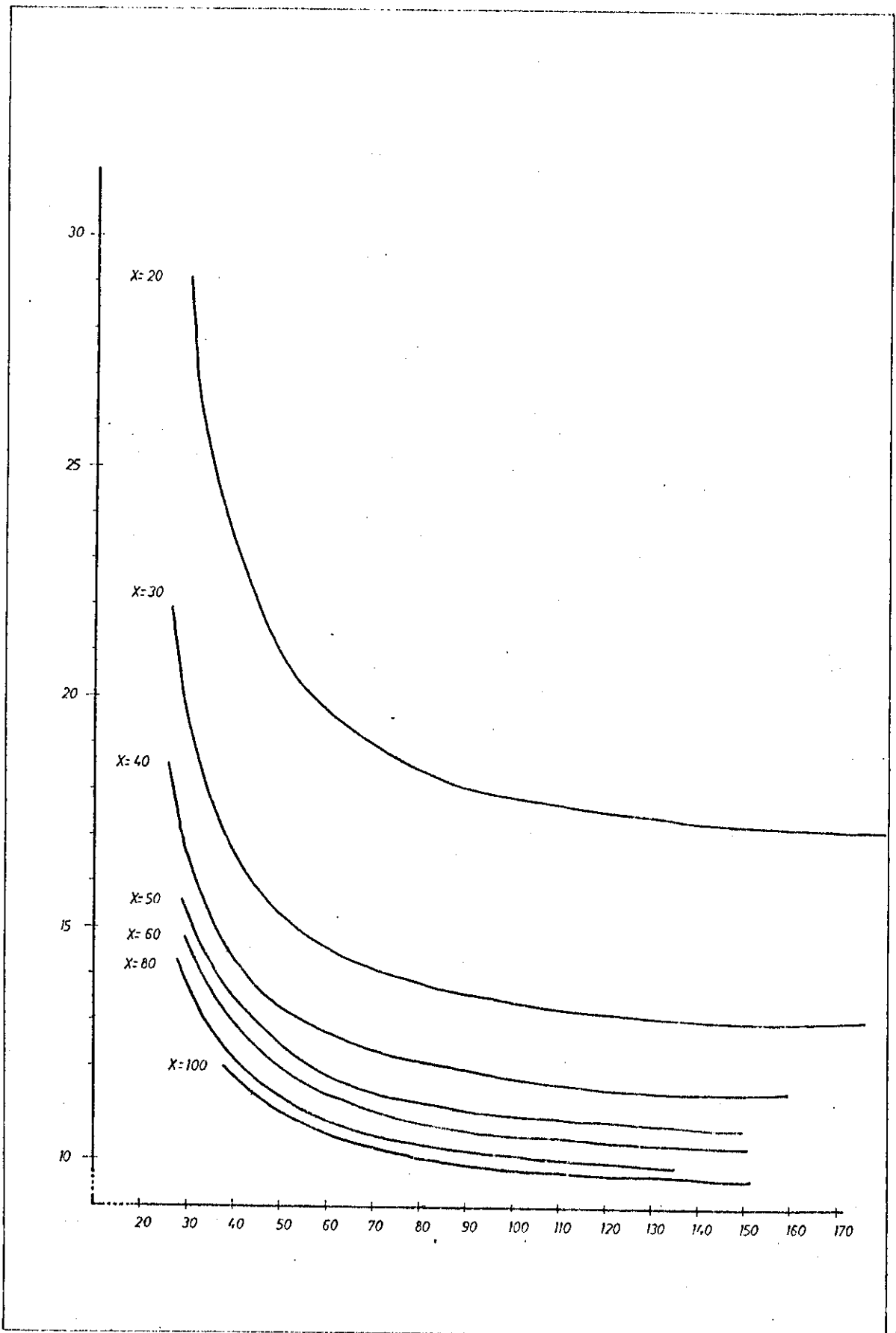
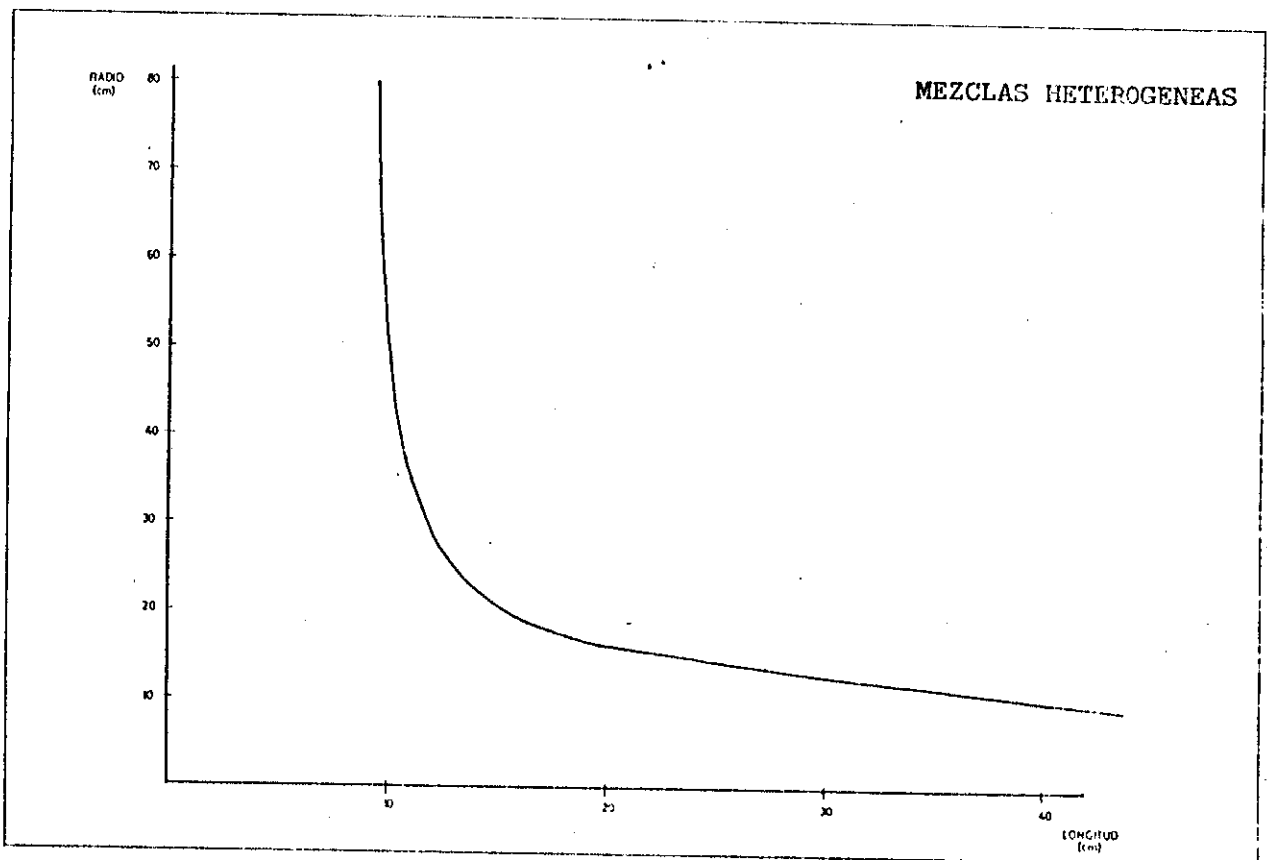
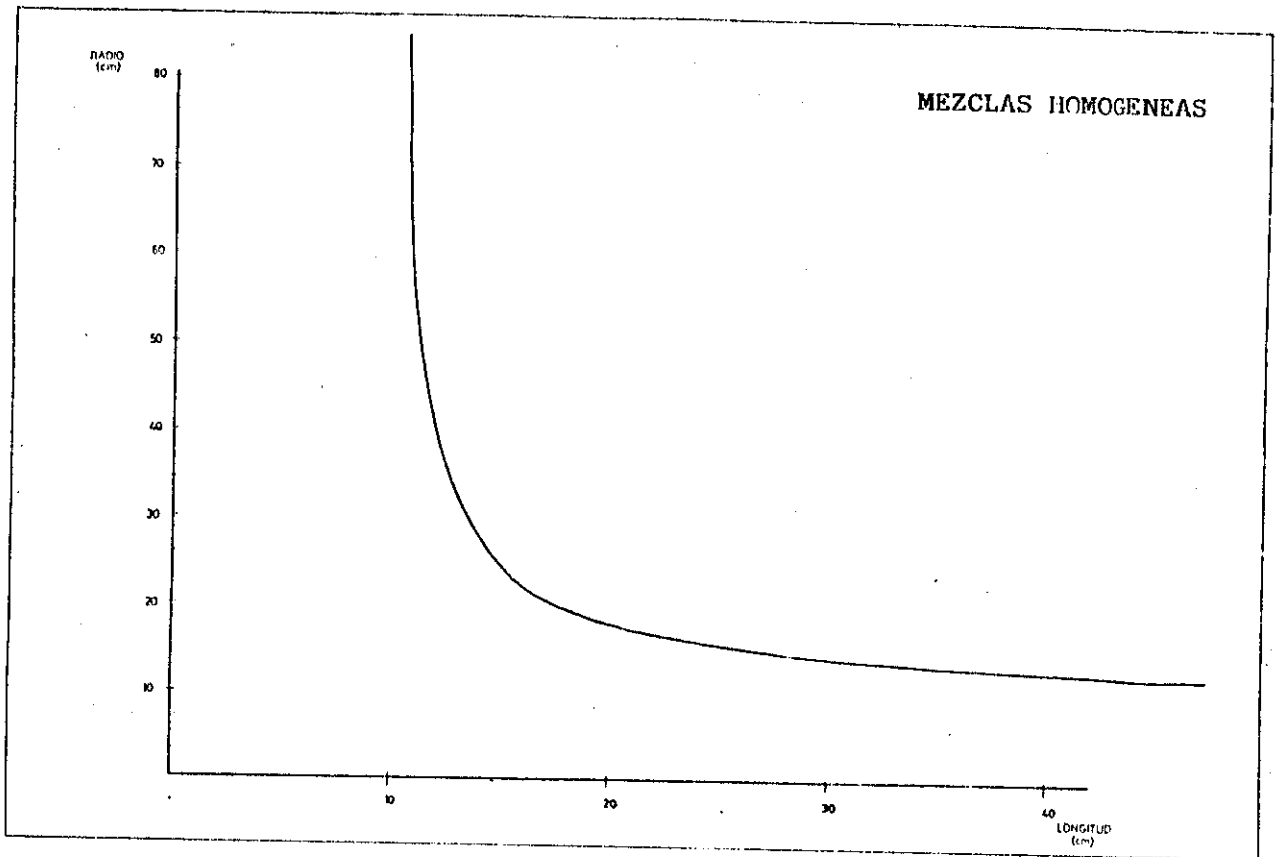
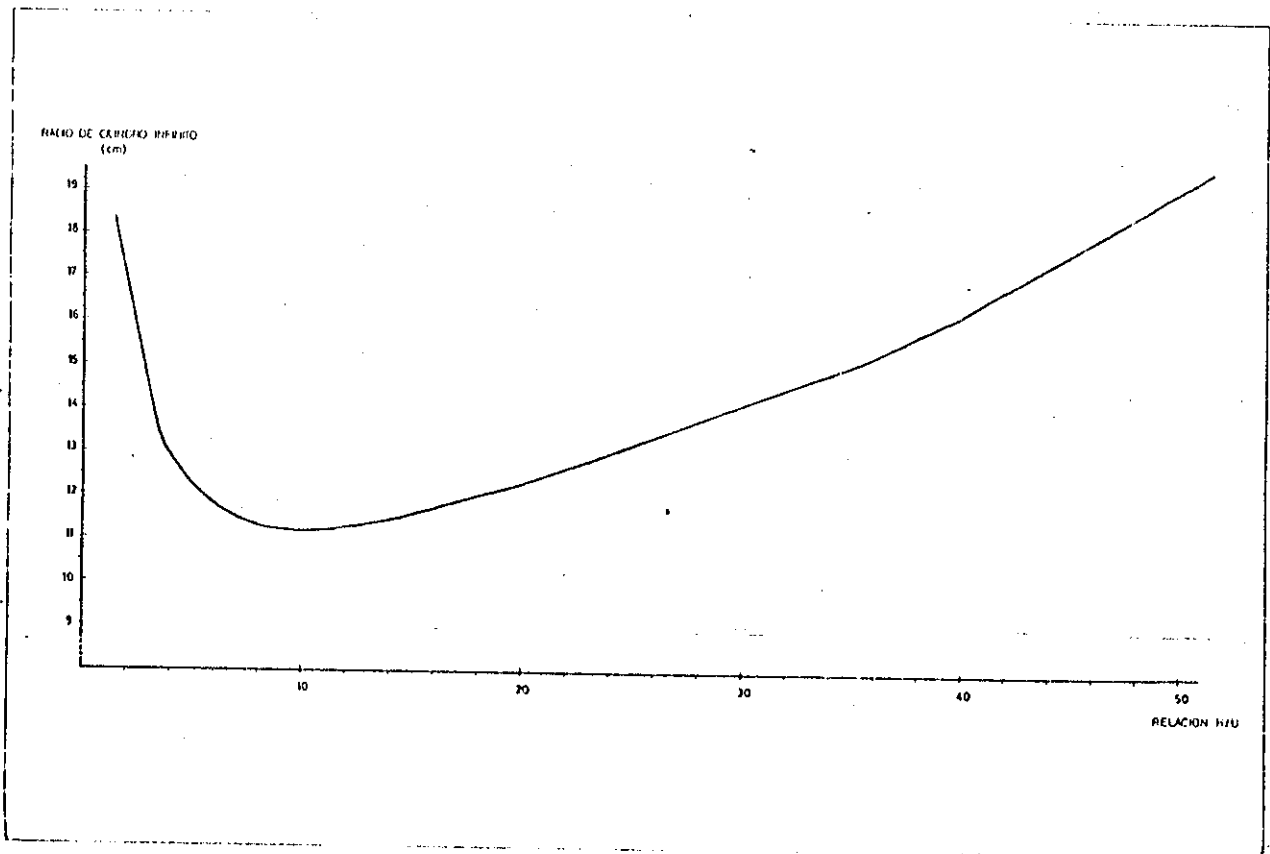
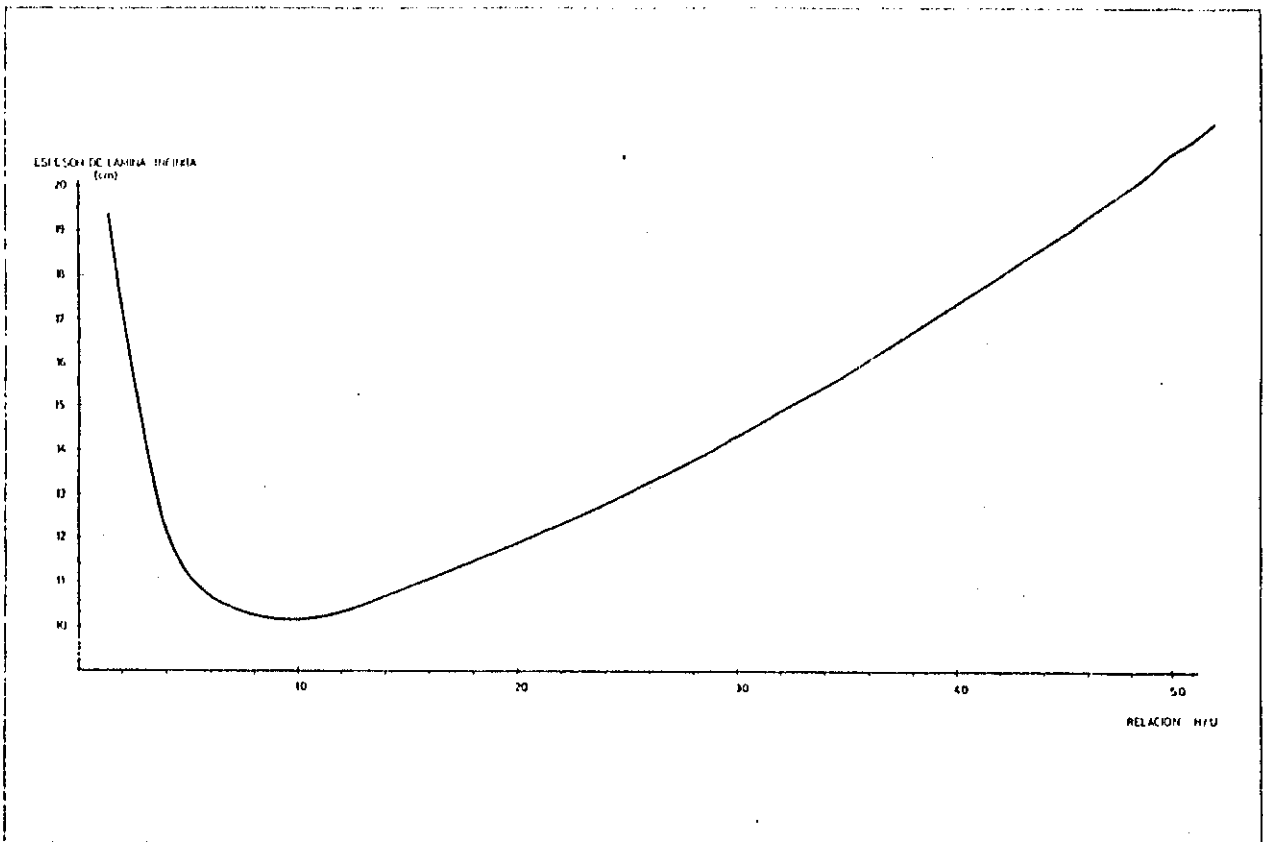


FIGURA 2

Espesor seguro de lámina heterogénea frente a las dimensiones de la base.

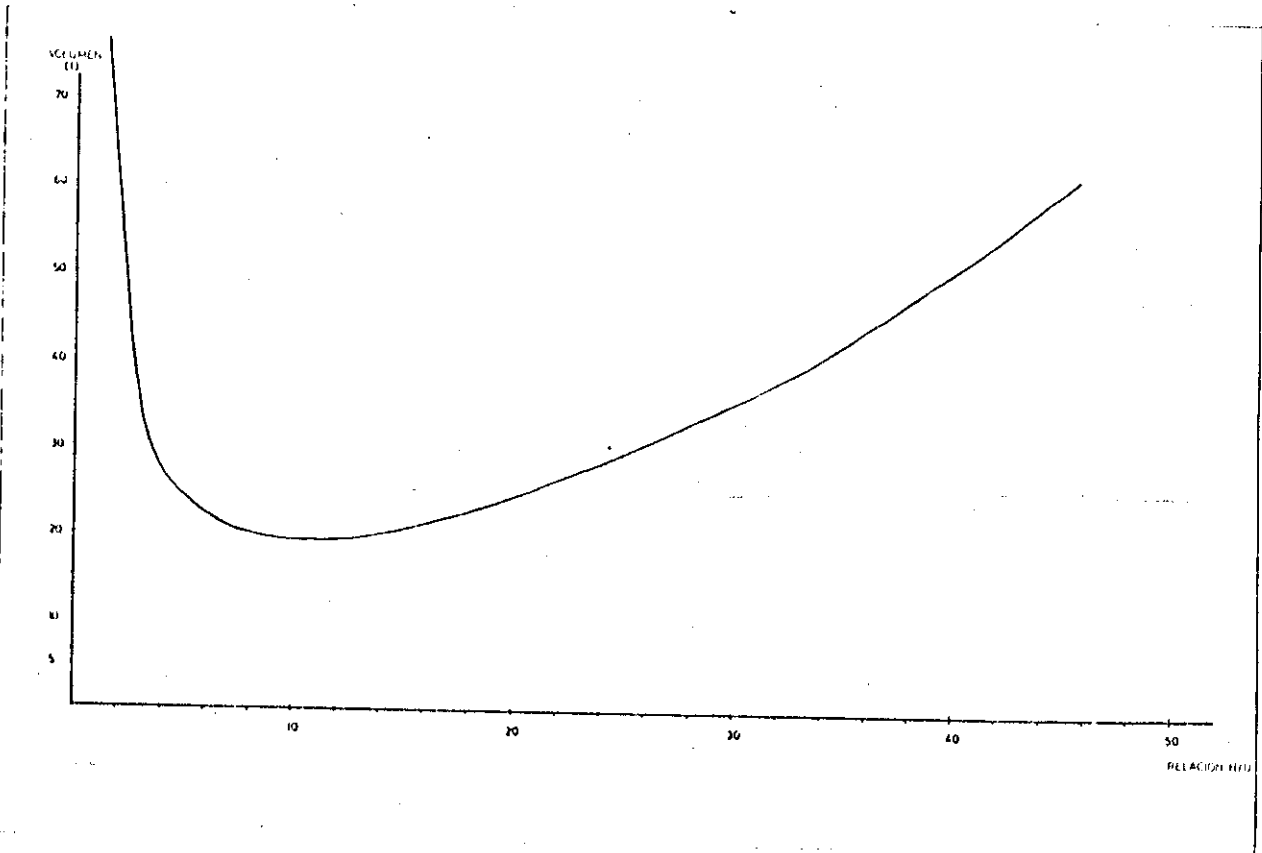
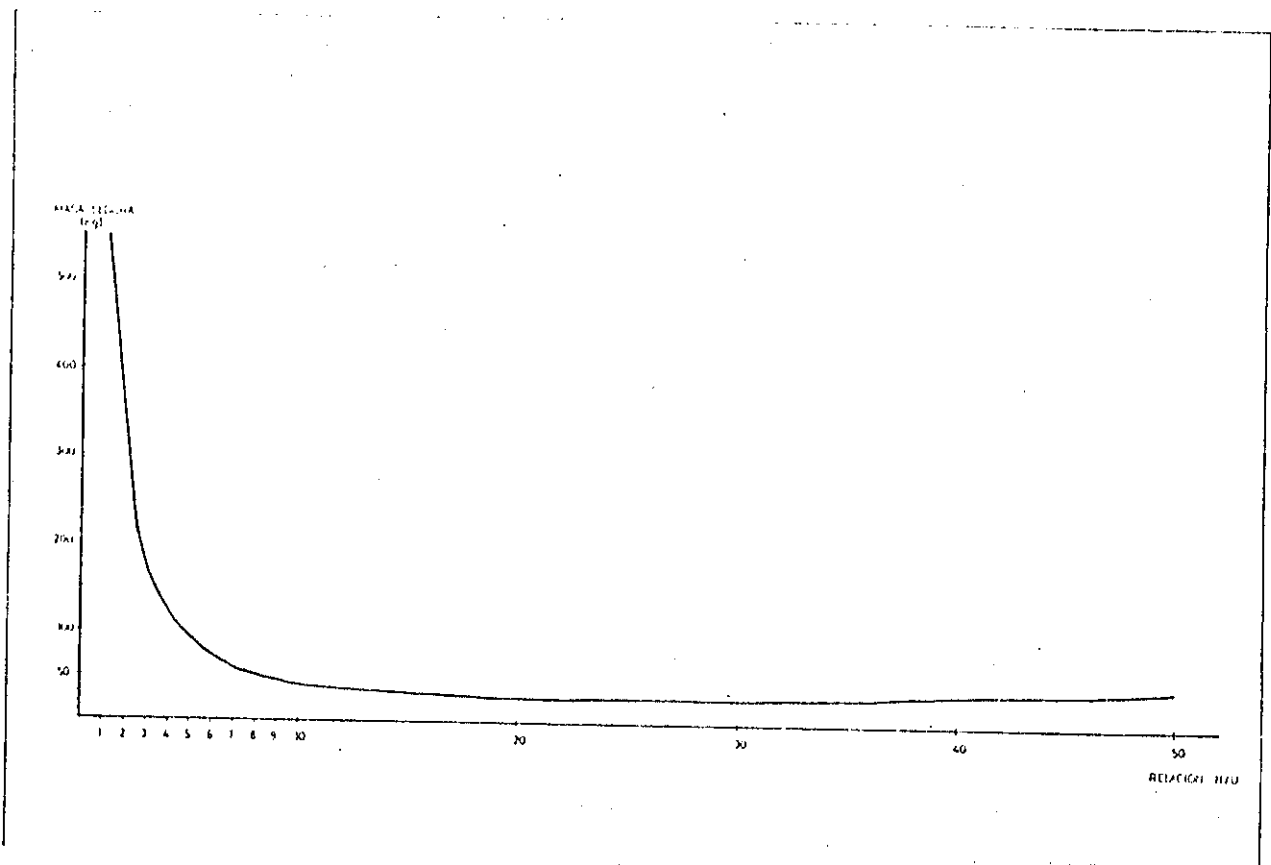


FIGURAS 3 y 4
Radio seguro de cilindro frente a longitud.



FIGURAS 5 y 6

Espeesor de lámina y radio de cilindro seguro frente a relación H/U.



FIGURAS 7 y 8
 Masa y volumen seguros frente a relación H/U.

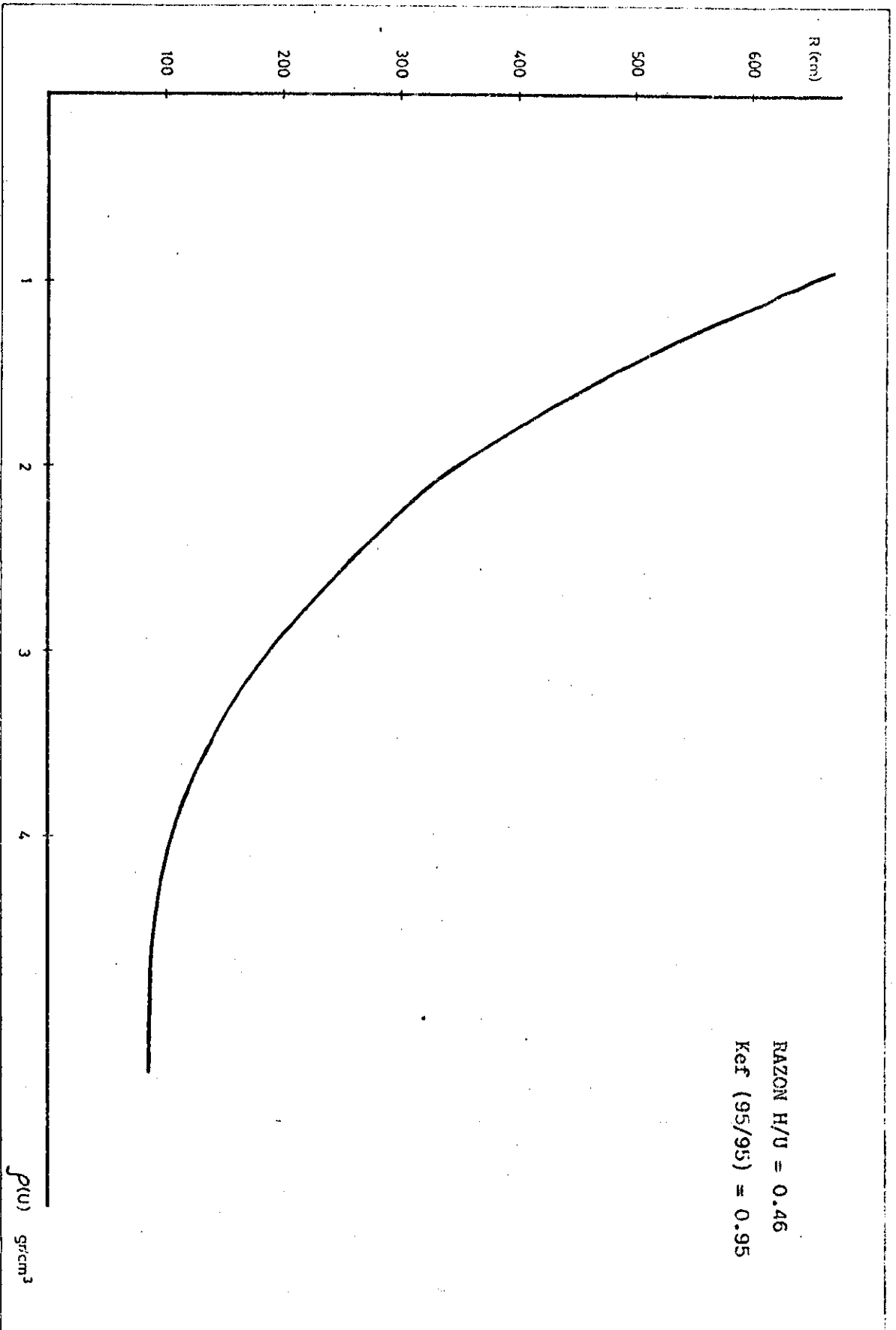


FIGURA 9

Radio de esferas totalmente reflejadas
frente a la densidad.

FIGURA 10

REDES TRIANGULARES INUNDADAS DE PASTILLAS VERDES

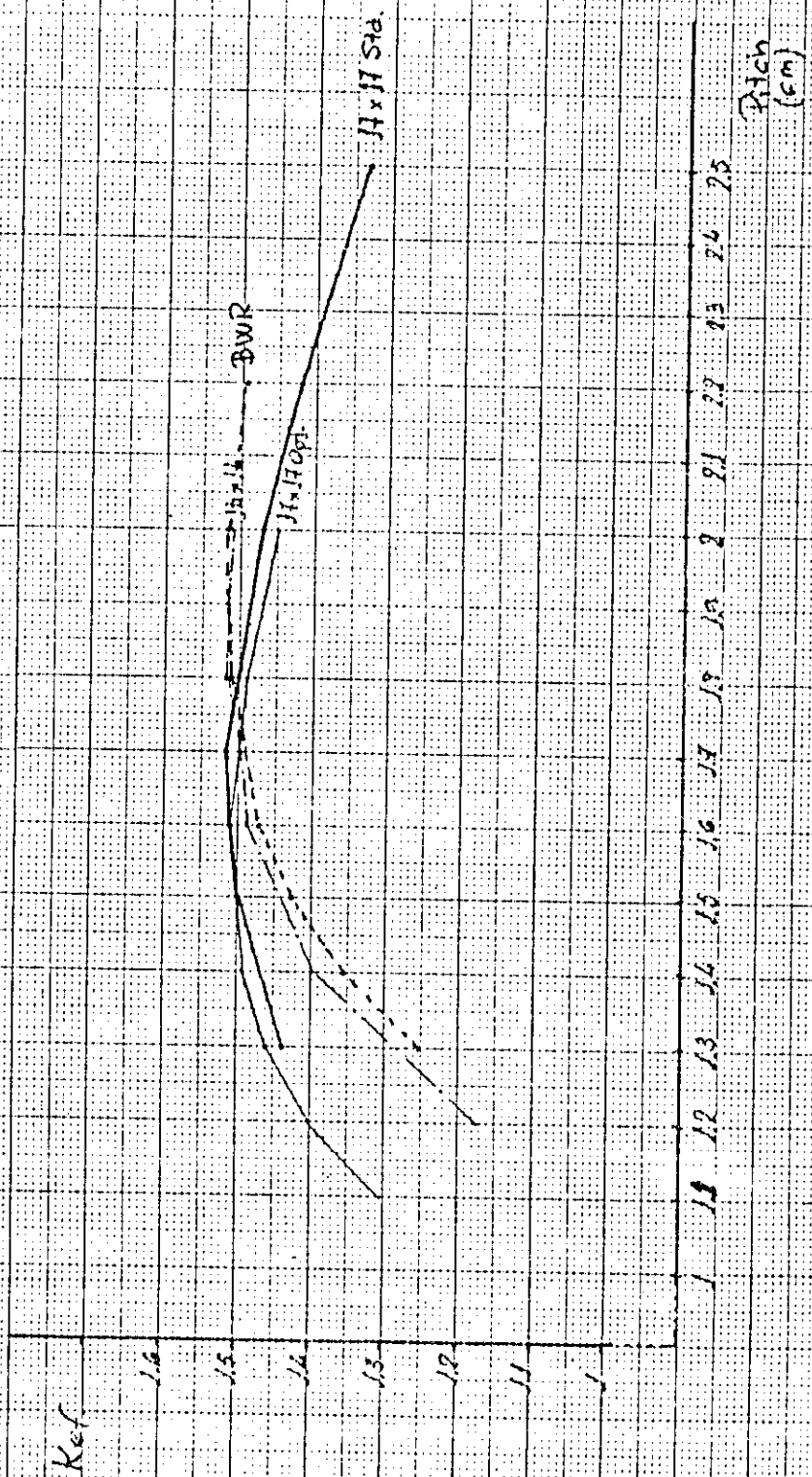
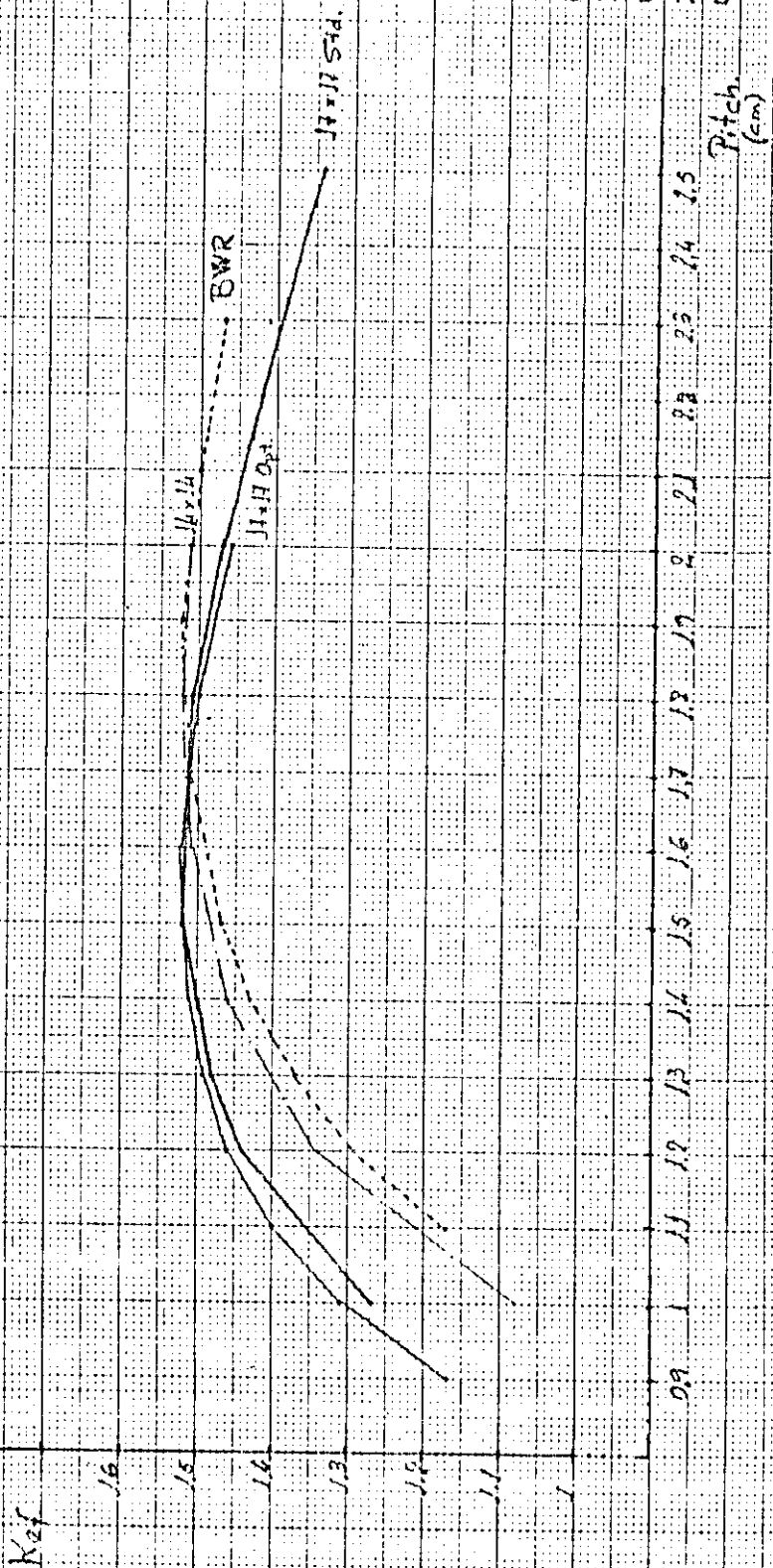


FIGURA 11

REDES TRIANGULARES INUNDADAS
DE PASTILLAS SINTERIZADAS



REFERENCIAS

1. ARH-600. R.D. Carter, G.R. Kiel, K.R. Ridgway, 1968.
2. DP-1014, "Critical and safe masses and dimensions of lattices of U and UO₂ rods in water", H.K. Clark, 1966.
3. "Nuclear Safety Guide" TID 7016 Rev.2