

# APLICACION DEL CONCRETO EN BLINDAJE CONTRA RADIACION

Tte. de Navio HERNAN RAMIREZ YUSTI



Hoy en día cuando las explosiones nucleares, el manejo de elementos radioactivos y la operación de equipos de alto voltaje han dado lugar a que el individuo se encuentre expuesto a cada momento a un mayor efecto de la radiación, es conveniente conocer las características de protección que nos brinda un material tan conocido como el concreto. En este artículo se mencionan solamente unas cuantas características de las radiaciones más comunes, así como también se hacen resaltar las propiedades de blindaje que caracterizan al concreto. Una información detallada, incluyendo curvas y cálculos, para aquellos que deseen un conocimiento más profundo del tema, se encuentra en las referencias que se relacionan al final del artículo.

## A) PRINCIPIOS DE BLINDAJE CONTRA RADIACION

### 1. Tipos de radiación

Radiación es un término con el cual se designan partículas nucleares y ondas electromagnéticas, las cuales son un resultado directo o indirecto de desintegración radioactiva, bombardeo de átomos o fisión. Esta radiación representa un ambiente peligroso para las actividades humanas, y afecta también tanto a materiales como a instrumentos. A fin de usar debidamente un reactor u otro equipo generador de radia-

ción, es necesario predecir y controlar los flujos radioactivos en el lugar de operación.

Un reactor nuclear emite varios tipos de radiación: fragmentos de fisión, partículas alfa, partículas beta, neutrones, y rayos gama. **En igual forma un tubo electrónico puede emitir radiación —X.** Los fragmentos de fisión y las partículas alfa y beta poseen carga eléctrica. Los rayos gama, rayos X y neutrones, no. Los fragmentos de fisión y las partículas alfa son de masa relativamente grande, y por consiguiente su recorrido es bastante corto, razón por la cual no se consideran generalmente para efectos de blindaje.

a. **Neutrones:** El neutrón es una partícula eléctricamente neutra, que posee una masa de 1.00897 unidades de masa atómica. (uma.) ( $1 \text{ uma.} = 1.6 \times 10^{-27} \text{ kg.}$ ). Debido a su carencia de carga, no experimenta fuerzas de repulsión cuando se aproxima a un núcleo atómico. En consecuencia, la pérdida de energía o desaceleración, que sufre un neutrón, se debe únicamente a choques con otras partículas. El recorrido de un neutrón depende por tanto de la energía inicial que posea y del número y tipo de choques que sufra.

En un proceso de fisión se liberan neutrones denominados neutrones de fisión, que pueden tener una energía cinética que varía entre 0.025 electronvoltios ( $1 \text{ ev.} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ ju}$

lios), y 15 millones de electronvoltios. (Megaelectronvoltios). Cuando los neutrones escapan de un reactor, se convierten en una parte importante del problema de radiación. Cualquier neutrón que tenga una energía por encima de 0.5 megaelectronvoltios se denomina "neutrón rápido". Estos neutrones rápidos pierden energía cuando chocan contra núcleos atómicos. A medida que ocurren tales choques, el neutrón pierde velocidad hasta que su energía cinética promedio es la misma del medio ambiente en el cual se encuentra. Una partícula atómica posee energía cinética merced a la energía térmica suministrada por el medio ambiente que la rodea, energía que depende de la temperatura. Un neutrón que se encuentra en equilibrio térmico con el medio ambiente en el cual se halla, se denomina un "neutrón térmico".

b. **Rayos Gama:** Los rayos gama se diferencian de los rayos—X, únicamente en el sentido de que estos últimos son de origen atómico, en tanto que los rayos gama son de origen nuclear. Tanto a los unos como a los otros se les aplica igualmente el término "fotón". En un reactor nuclear hay dos tipos de rayos gama: rayos gama primarios, que se originan en los procesos de fisión o que resultan de la de-

integración radioactiva de los productos de fisión; y rayos gama secundarios que se originan en las interacciones de neutrones con la materia. Un rayo de este tipo, generalmente conocido como rayo gama de captura, se presenta cuando un núcleo captura un neutrón. El número de rayos gama y la energía de ellos, que resultan de procesos de este tipo, son muy importantes para consideraciones de blindaje. Los rayos gama secundarios también pueden producirse en choques inelásticos de neutrones rápidos con diversos núcleos. En choques de este tipo, el neutrón y el núcleo contra el cual choca se funden en una sola partícula, un poco después se emite un neutrón de menor energía que el incidente, y la energía sobrante sale en forma de rayos gama. Para efectos de blindaje, es más importante considerar el efecto de los rayos gama, ya que por lo general el efecto de los neutrones queda automáticamente incluido en tales consideraciones.

c. **Rayos-X:** los rayos-X son ondas electromagnéticas que se producen cuando electrones animados de una alta velocidad, chocan contra átomos de un material. Estas ondas viajan a la velocidad de la luz, no son afectadas por campos eléctricos o magnéticos, y pueden ser reflejadas, refractadas, y polarizadas, a la vez que pueden producir fluorescencia y fosforescencia. Al igual que toda radiación electromagnética, los Rayos—X pierden intensidad en relación inversa con el cuadrado de la distancia a la fuente de radiación. Tienen además la capacidad de penetrar la materia, lo cual los hace útiles en aplicaciones médicas, pero por la misma razón constituyen un peligro si no se les controla. Más importante aún, es el hecho de que este tipo de radiación se genera en muchos tubos electrónicos de uso actual, especialmente en aquellos

---

#### TENIENTE DE NAVIO

#### HERNAN RAMIREZ YUSTI

Oficial del Cuerpo General de la Armada Nacional, egresado de la Escuela Naval con el grado de Teniente de Corbeta el 7 de diciembre de 1952. Se ha desempeñado como Oficial de Deberes Generales a bordo de Unidades a flote, como Oficial de Planta de la Escuela Naval y como Jefe de Personal del Comando de la Fuerza Naval del Atlántico. Cursó estudios de Ingeniería Nuclear en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, (EE. UU.), donde obtuvo el grado de "Master of Science". Actualmente, está en comisión en el Instituto Colombiano de Asuntos Nucleares, donde se desempeña como Jefe de la División de Física Nuclear.

utilizados en equipos de alto voltaje, y tal radiación puede salir del tubo si no se le coloca a este un blindaje adecuado. En general, radiación de este tipo emana de tubos electrónicos cuyo voltaje de placa se encuentra por encima de los 16 kilovoltios. Fig. Nº 1.

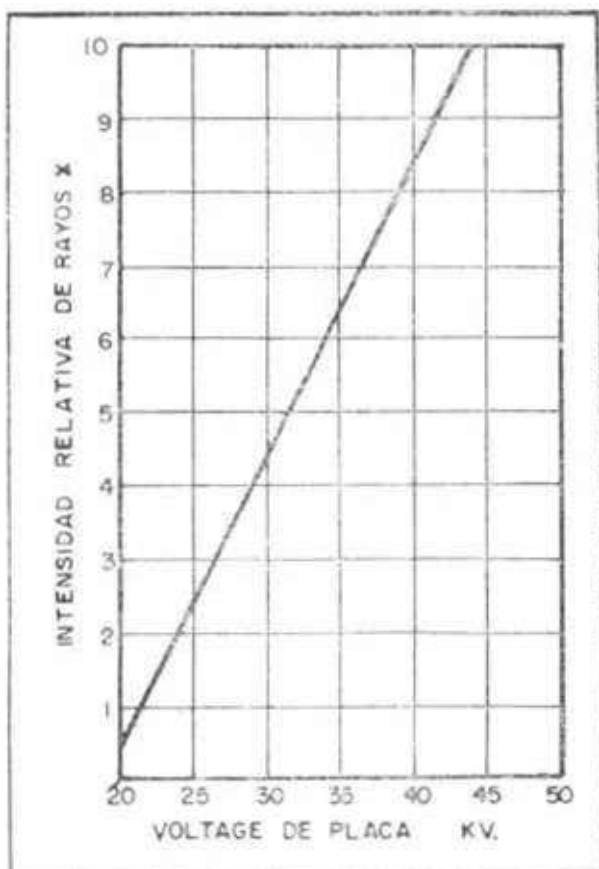


FIG. 1

Rayos X producidos en función del voltaje de placa.

En problemas de blindaje y para efectos biológicos se pueden tratar como si fueran rayos gama, aunque estos últimos son de mucha mayor energía, y por consiguiente mucho más penetrantes. Tubos tales como Klistrones, magnetrones, tiratrones, emiten bastantes rayos—X. Otros tubos tales como rectificadores de alto voltaje y tubos de rayos catódicos pueden emitir también rayos—X, pero ellos por lo general son de una intensidad menor, de manera

que son blindados por el mismo equipo.

## 2. Efectos Biológicos

La radiación electromagnética tal como los rayos—X y rayos gama, así también como los neutrones, penetran el tejido humano y forman iones positivos y negativos. Estos iones causan daño al tejido, el cual puede ser temporal o permanente. A menos que la dosis (cantidad de radiación absorbida) sea demasiado alta, no se presentarán efectos notables durante los días o semanas siguientes a la exposición y en algunos casos hasta que hayan transcurrido años. Este retardo en el efecto es, sin duda, la razón más importante para que se presenten casos de hiperexposición, ya que para cuando se presenten los síntomas, el tejido se habrá dañado.

Algunos de los efectos conocidos, debido a hiperexposición son:

Leucopenia. (Disminución de glóbulos blancos).

Aumento del tiempo de congelación de la sangre.

Amnesia.

Leucemia.

Ablandamiento de los huesos.

Cáncer de la piel.

Dermatitis.

Caída del cabello.

Mutaciones. (Puede que aparezcan solamente en la segunda o tercera generación).

Ulceras.

Esterilidad.

Cataratas.

## 3. Atenuación de Radiación

El objeto primordial del blindaje es el de reducir la intensidad de la radiación, bien sea emitida por una fuente, o existente en un determinado lugar. En consecuencia, quien quiera que vaya a diseñar un blindaje debe de tomar como propósito primordial el de

predecir los niveles de radiación que existen dentro y fuera del lugar que emana radiación. Es necesario conocer los niveles de radiación en los materiales que rodean la fuente de radiación a fin de suministrar el blindaje adecuado. Además, tal conocimiento se requiere, para determinar los efectos de la radiación en el lugar, así también como para satisfacer las exigencias más obvias que determinan el espesor del blindaje biológico del lugar.

**a. Atenuación de Neutrones:** Los neutrones rápidos interactúan con la materia, casi exclusivamente, mediante un proceso que se llama dispersión. Hay 2 tipos de dispersión. Se dice que la dispersión es elástica cuando únicamente se transfiere energía cinética. Tal es el caso de 2 bolas de billar cuando chocan. Esta reacción es importante con núcleos livianos que pueden absorber una gran fracción de la energía cinética del neutrón. En cambio, la dispersión es inelástica cuando el neutrón y el núcleo se funden para formar un núcleo compuesto, y a continuación se emite un neutrón de menor energía. Debido al estado de excitación en que queda el núcleo, se emite también un rayo gama que se lleva toda la energía de excitación que le sobra al núcleo, para que este pueda volver a su estado normal. Este fenómeno prevalece en los núcleos pesados debido a la gran cantidad de niveles de energía que permiten este tipo de interacción.

Un blindaje eficiente contra neutrones exige una mezcla balanceada de núcleos livianos y pesados. Ambos procesos de dispersión se pueden presentar simultáneamente. El resultado neto es que la desaceleración de neutrones rápidos desde una energía alta hasta una energía intermedia, se efectúa principalmente debido a choques inelásticos con núcleos pesados. La desaceleración desde una energía intermedia hasta energía termal, se lleva a ca-

bo esencialmente por choques elásticos con núcleos livianos. El proceso de atenuación termina con la absorción del neutrón en una energía termal o próxima a ella. El proceso de absorción es importante a energías termales. Un blindaje de concreto, aunque no es el medio más eficiente, sí es eficaz en cuanto se trata de incluir tantos núcleos livianos como pesados en un material. Además tiene la ventaja de la economía, exigida para blindajes de plantas nucleares.

En general, la atenuación de neutrones obedece una ley exponencial dada por

$$I = I_0 e^{-kx}$$

donde

$I_0$  = flujo neutrónico incidente en el material.

$I$  = flujo de salida del material.

$x$  = espesor del material, normal a la dirección del flujo.

$k$  =  $1/L$  para neutrones termales.

=  $N\sigma$  para neutrones rápidos.

$L$  = Longitud de difusión de neutrones termales, o sea la distancia media recorrida por el neutrón termal desde que se vuelve termal hasta que es absorbido.

$N$  = Número de átomos de material por unidad de volumen.

$\sigma$  = Sección eficaz de atenuación.

$e$  = Base de los logaritmos naturales = 2.718.....

Se entiende por sección eficaz de un proceso la probabilidad de que ese proceso suceda. Se mide en centímetros cuadrados, representativo del área que presenta la partícula a un determinado choque. A mayor sección eficaz, mayor probabilidad de que el proceso suceda.

La figura N° 2 muestra la sección eficaz de atenuación en función del peso atómico del elemento.

**b. Atenuación de rayos gama y rayos—X:** Los rayos gama poseen mayor

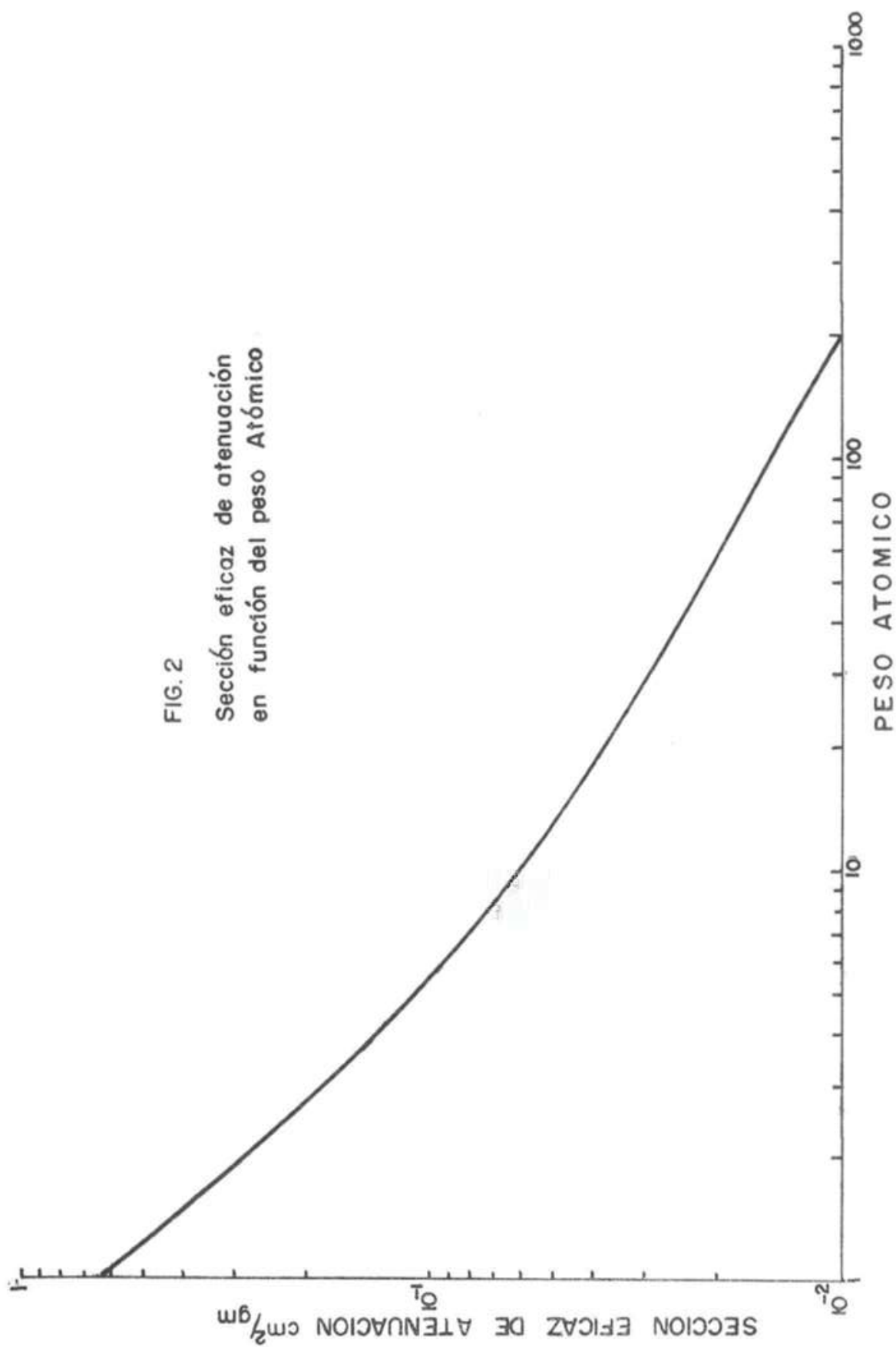


FIG. 2  
 Sección eficaz de atenuación  
 en función del peso Atómico

energía que los rayos—X. La posición de ambos en el espectro electromagnético se indica en la figura N° 3.

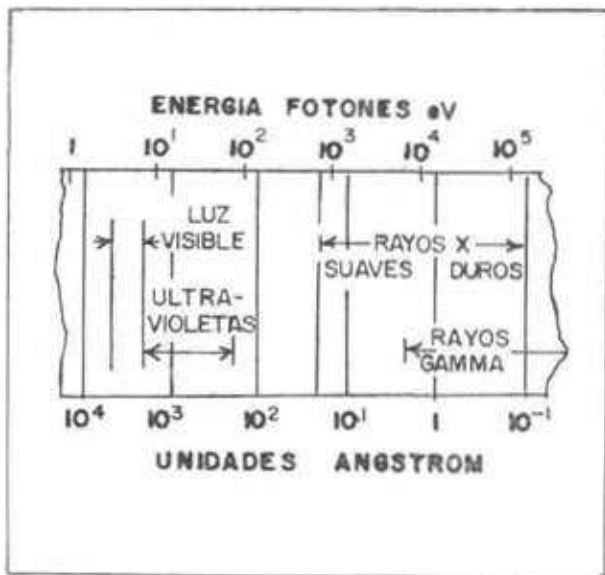


FIG. 3  
Espectro electromagnético.

La atenuación de rayos gamma y rayos—X se lleva a cabo mediante la interacción de ellos con la materia. Esto puede ocurrir de varias maneras. Los tres procesos principales son: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. Fig. N° 4. Para rayos gamma de baja energía, el proceso más importante es el efecto fotoeléctrico, en el cual un fotón puede chocar con un electrón, sacarlo de su órbita y perderse por absorción. A medida que la energía del fotón aumenta se vuelve menos probable la absorción del fotón, y el choque se vuelve más elástico, en tal forma que el fotón más bien rebota en lugar de ser absorbido, pero pierde energía en el choque. Este proceso se conoce como efecto o dispersión Compton. Si el fotón tiene una energía bastante alta durante el tiempo que él permanece en el campo eléctrico del núcleo o partícula cargada, puede convertirse en dos partículas de signo opuesto pero de igual masa: un electrón y un po-

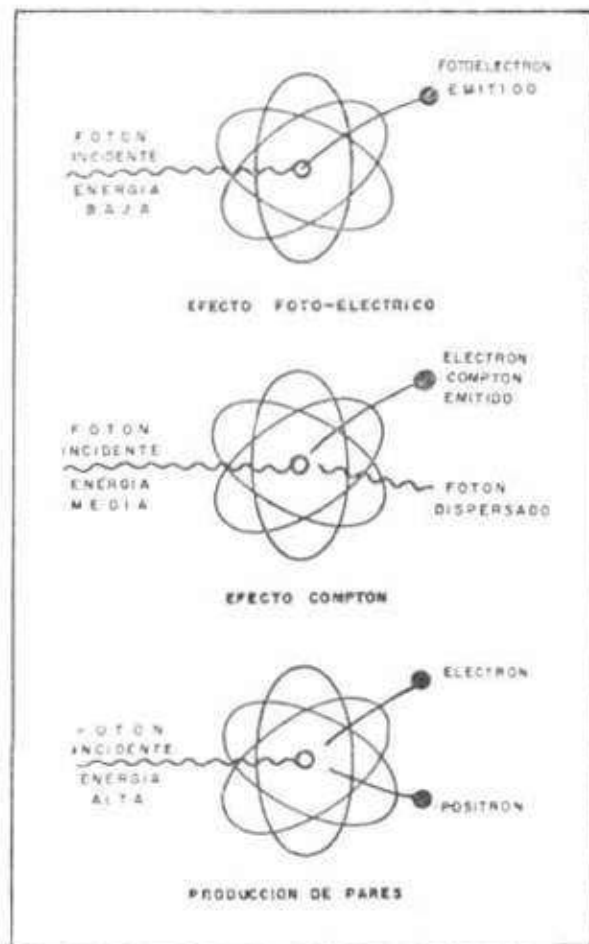


FIG. 4  
Procesos de interacción de rayos  $\gamma$  y rayos X con la materia.

sitrón. Este proceso se conoce como producción de pares, y exige que el fotón tenga por lo menos una energía de 1.02 megaelectrovoltios. El exceso de energía por encima de este valor aparece como energía cinética de las dos partículas que se producen.

La sección eficaz total para rayos gamma y rayos—X, o coeficiente de atenuación lineal, es la suma de las secciones eficaces individuales de los tres procesos enunciados. La sección eficaz de absorción de energía es la sección eficaz total menos aquella correspondiente al efecto Compton.

Tanto el efecto fotoeléctrico como el Compton disminuyen a medida que aumenta la energía del rayo gamma, mientras que la producción de pares au-

menta. Esto significa que la sección eficaz total tendrá un valor mínimo a una determinada energía, y los rayos gama de tal energía fluirán a través del material en mayor número que a otras energías, bien sea más altas o más bajas.

En general los rayos gama y los rayos—X son atenuados en proporción con la masa atómica del material. Por lo tanto es ventajoso construir un blindaje contra radiación gama, con el material más denso que se pueda obtener. El carácter básico de la atenuación de radiación gama es por naturaleza exponencial. Una atenuación simplemente exponencial, de acuerdo con la sección eficaz total, representaría el flujo de radiación que no ha sufrido choque en el material. También representaría el flujo total si solamente ocurriera absorción en el material. Sin embargo el flujo en cualquier punto es una combinación del flujo que no sufre alteración y el flujo que es dispersado. En consecuencia, se debe aplicar un factor de corrección al flujo no alterado, factor que recibe el nombre de "factor de acumulación" el cual ha de multiplicar al flujo transmitido.

En general la intensidad de salida está dada por

$$I = I_0 B_e^{-\mu x}$$

donde

- $I_0$  = intensidad incidente sobre el material.
- $I$  = intensidad que atraviesa el material.
- $B$  = factor de acumulación.
- $\mu$  = coeficiente lineal de absorción.
- $x$  = espesor del material, normal a la dirección del flujo de radiación.
- $e$  = Base de los logaritmos naturales = 2.718....

En algunos casos la fórmula de atenuación se da en función de la densidad del material así:

$$I = I_0 B_e^{-\frac{\mu p x}{p}}$$

donde

$$\frac{\mu}{p} = \text{coeficiente de absorción de masa.}$$

$$\approx 0.05 \text{ cm}^2/\text{gm}$$

$$p = \text{densidad del material.}$$

Conociendo por tanto la radiación existente en el medio,  $I_0$ , y sabiendo por los reglamentos de seguridad la máxima dosis ( $I$ ) que se puede soportar sin perjuicio para la salud, el coeficiente de absorción de masa del material y la densidad del mismo, es posible determinar el espesor adecuado para asegurar una determinada protección.

Una medida importante en todo material, es el espesor semirreductor del mismo. Por este se entiende el espesor del material, suficiente para disminuir la intensidad de la radiación a la mitad. Conociendo este factor, es fácil determinar cuál ha de ser el espesor necesario para reducir la radiación en una determinada cantidad. Este valor es exacto, sin embargo, únicamente cuando se trata de radiación homogénea, es decir de igual energía. En tal caso se puede usar la fórmula

$$\frac{I_0}{I} = 2^N$$

donde  $N$  es el número de espesores semirreductores del material. Para algunos materiales más comunes tal espesor es el siguiente:

Plomo	1.9	cms.
hierro	3.81	cms.
Concreto	11.43	cms.
Tierra	19.05	cms.
Agua	30.54	cms.

Una buena referencia para considerar la dosis que puede recibir el cuerpo sin mayor peligro, es la recomen-

dada últimamente por el National Bureau of Standards de Estados Unidos, de 100 miliroentgen por semana, o sea de 2.5 miliroentgen por hora de trabajo. Un Roentgen es equivalente a 83 ergios de energía por gramo de aire. Depende por tanto del material de absorción. En el caso del tejido humano se utiliza como unidad el REP que equivale a 93 ergios por gramo de tejido.

## B) DISEÑO DE BLINDAJE

Un aspecto importante en el proceso de diseño de un blindaje, es la selección del material o materiales a usar. Al hacer esta selección, se debe tener en cuenta el proceso físico de atenuación, así como los problemas de ingeniería relacionados con él. Para plantas nucleares estacionarias, esta selección depende grandemente de las consideraciones económicas.

### 1. Selección de material

La selección de material requiere que este contenga átomos pesados y livianos en la debida relación. Esto asegurará el que los neutrones sufran dispersión tanto elástica como inelásticamente, y que además haya la debida atenuación de los rayos gama secundarios. La combinación adecuada no se consigue fácilmente sino a costos bastante elevados lo cual no los hace aceptables económicamente. También se pueden alternar láminas de buen y mal material para blindajes, pero aún así, el costo es alto. El Tungsteno, por ejemplo, magnífico elemento de blindaje, es sumamente caro.

### 2. Blindaje de concreto

El concreto es un material excelente para blindaje por cuanto contiene a la vez Hidrógeno y elementos pesados. El hecho de que su composición se pueda variar, da lugar a que constituya un material de blindaje bastan-

te versátil pudiéndose alterar la misma para acomodarla a diferentes situaciones. Tiene buena resistencia mecánica, necesita poco mantenimiento, y se obtiene a un costo relativamente razonable.

Los concretos son bastante resistentes al calor, pero a temperaturas demasiado elevadas pueden sufrir pérdidas en su contenido de agua, y en consecuencia, pérdida de su capacidad de blindaje. Por tanto es conveniente mantenerlo refrigerado, para que se pueda contar con un blindaje constante.

Se puede aumentar la eficiencia de un blindaje de concreto introduciendo elementos pesados. Esto se puede hacer mediante agregación, mediante introducción de varillas metálicas, o de ambas maneras. También se puede mejorar por la introducción de materiales que tengan secciones eficaces bastante altas para neutrones, bien sea con poca o ninguna producción de radiación gama por captura, lo que se consigue bien sea incluyendo Boro en el agregado, o mediante la colocación de láminas de Boro en lugares apropiados a través del blindaje.

Al llevar a cabo los cálculos de blindaje, es necesario saber la composición del blindaje tan exactamente como sea posible. Por supuesto, no hay problema para determinar la composición del blindaje de plomo y acero, pero existen dificultades cuando se trata de blindaje de concreto. El contenido de agua en el concreto no es definido, pero él constituye un factor importante, por cuanto el agua es el principal contribuyente de Hidrógeno y casi exclusiva fuente de él.

La composición elemental exacta del concreto es también difícil de predecir. Por consiguiente, es conveniente tener una compilación de varios concretos de cada tipo, así que pueda observarse el efecto de cambios en la



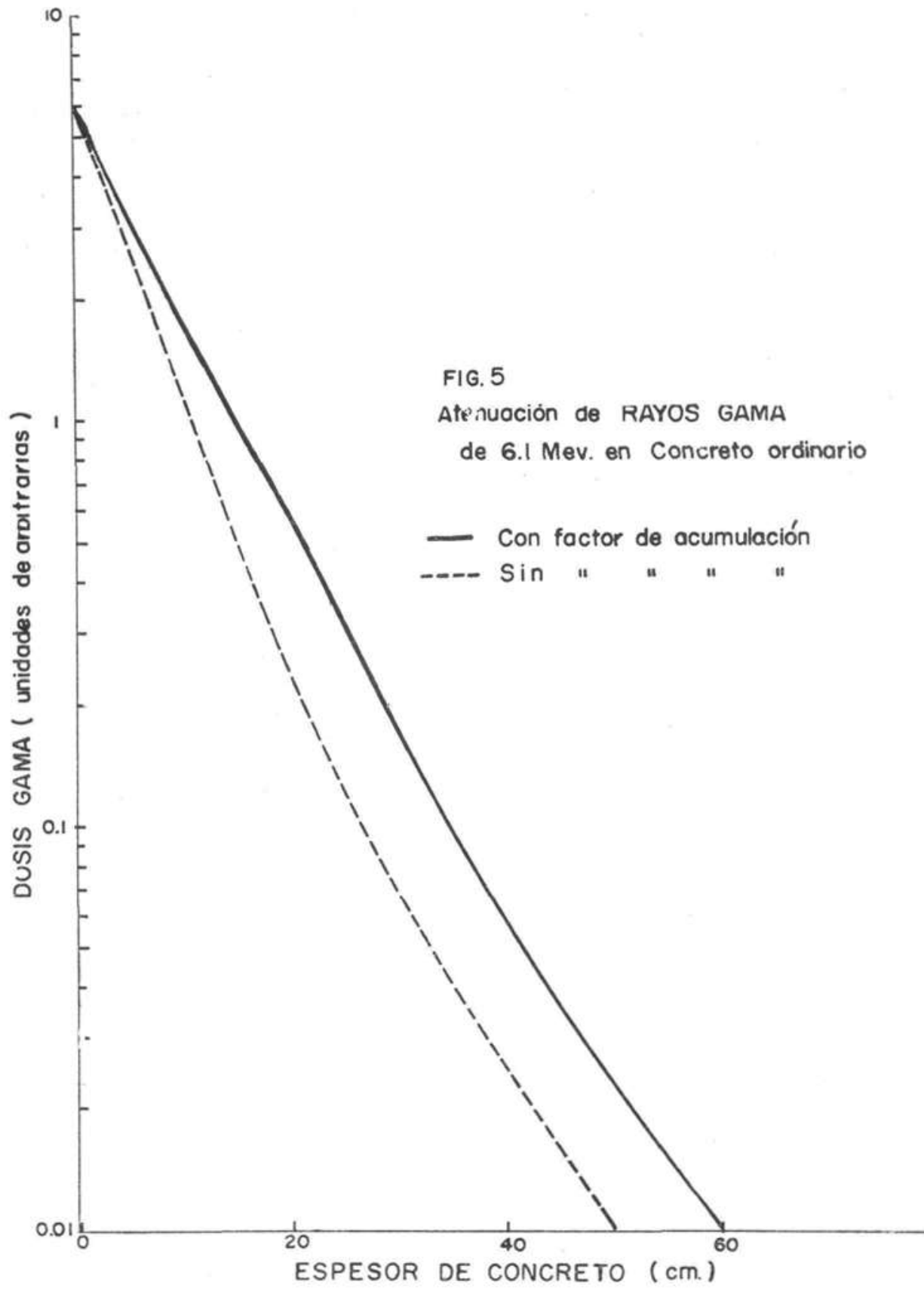


FIG. 5  
 Atenuación de RAYOS GAMA  
 de 6.1 Mev. en Concreto ordinario

— Con factor de acumulación  
 - - Sin " " " "

composición elemental de las constantes nucleares que rigen precisamente el poder de blindaje.

### 3. Tipos de concreto

Para fines de blindaje se han usado gran cantidad de tipos de concreto. Ellos varían desde el concreto ordinario de cemento Portland, hasta concretos que usan mineral de hierro y partículas de acero como agregado.

a. **Concreto ordinario:** Hay muchos tipos de concreto ordinario. Las diferencias se deben a variaciones en las proporciones de mezcla, y composición elemental del cemento, arena, cascajo y agua. La densidad del concreto ordinario varía entre 2.2 y 2.4 grm/cc. Algunos concretos de peso liviano usan agregados que contienen Boro, con un peso de alrededor de 1.3 grm/cc.

b. **Concreto pesado:** Las composiciones de los concretos pesados son más variadas que aquellas de concreto ordinario, ya que se utilizan como agregados muchos minerales diferentes. Algunos de los agregados que tienen hierro son los minerales naturales de hierro, magnetita y limonita junto con ferrofósforo, un derivado de un proceso usado para obtener fósforo elemental a partir de los fosfatos. También se han usado como agregados de concretos pesados un mineral de Bario conocido como Baritas, e Ilmenita, un mineral de Titanio. Además, se pueden incluir partículas metálicas en el agregado. Las densidades de estos concretos varían radicalmente de 2.5 a 4.5 grm/cc, dependiendo del agregado que se utilice.

c. **Concretos especiales:** También se hacen concretos para propósitos especiales tales como alta absorción de neutrones con producción baja de rayos gamma por captura. Esto se hace incluyendo Boro en el agregado, o como un aditivo especial. También pueden di-

ñarse concretos que conserven su contenido de agua a pesar de que se encuentre sometido a altas temperaturas.

### 4. Constituyentes del concreto

No es fácil, ni tampoco es económico especificar los constituyentes elementales exactos del concreto deseado. Es por consiguiente útil tener una idea del margen de variación de los elementos de un tipo dado de concreto. Es aún más importante saber el efecto de tales variaciones en las propiedades de blindaje del concreto. Un resumen de las constantes de blindaje para varias mezclas de un tipo dado de concreto, constituye una guía para establecer las especificaciones del blindaje con concreto.

### 5. Composiciones elementales

La composición de concretos usados para blindaje es bastante compleja. Sin embargo, en una forma bastante amplia puede especificarse que:

a) **Concreto Ordinario:** Contiene Oxígeno, Carbono, Magnesio, Aluminio, Silicio, Hidrógeno, Calcio, Hierro y Azufre. En mayor cantidad se presentan el Oxígeno, el Calcio y el Silicio.

b) **Concreto Ferrofósforo:** Contiene Hidrógeno, Oxígeno, Carbono, Magnesio, Aluminio, Silicio, Calcio, Cromo, Manganeso, Hierro y Fósforo. Estos dos últimos priman en porcentaje. Algunos tipos de este concreto incluyen también elementos como Titanio y Vanadio.

c) **Concreto Magnetita:** Contiene Hidrógeno, Magnesio, Aluminio, Silicio, Fósforo, Vanadio, Cromo, Manganeso, Calcio, Oxígeno y Hierro. Estos tres últimos son los predominantes en porcentaje. El Oxígeno y el Hierro se presentan en los minerales, y el Calcio como constituyente del cemento.

d) **Concreto Barita:** Contiene Hidrógeno, Magnesio, Aluminio, Silicio, Azu-

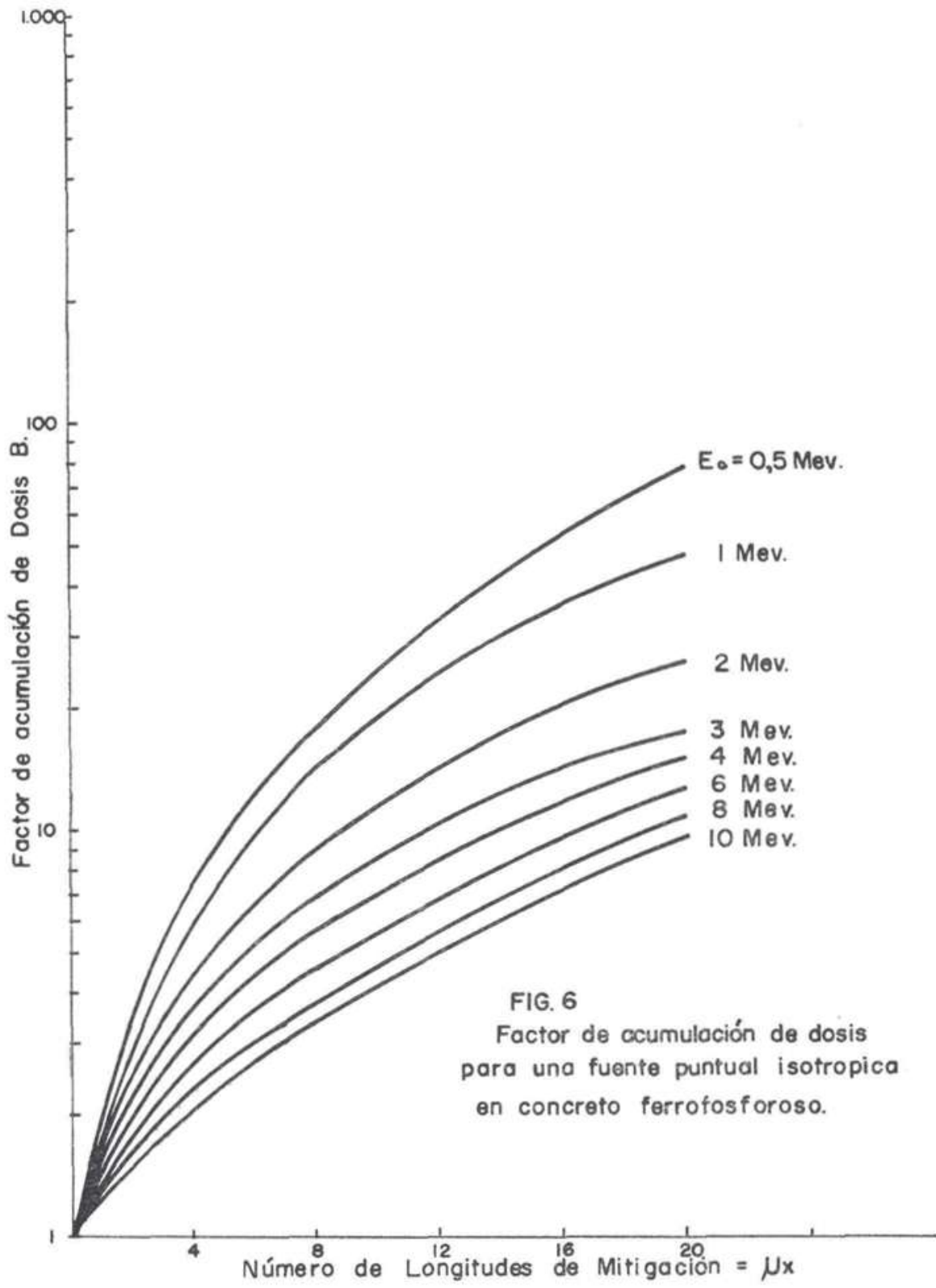


FIG. 6  
 Factor de acumulación de dosis  
 para una fuente puntual isotropica  
 en concreto ferrofosforoso.

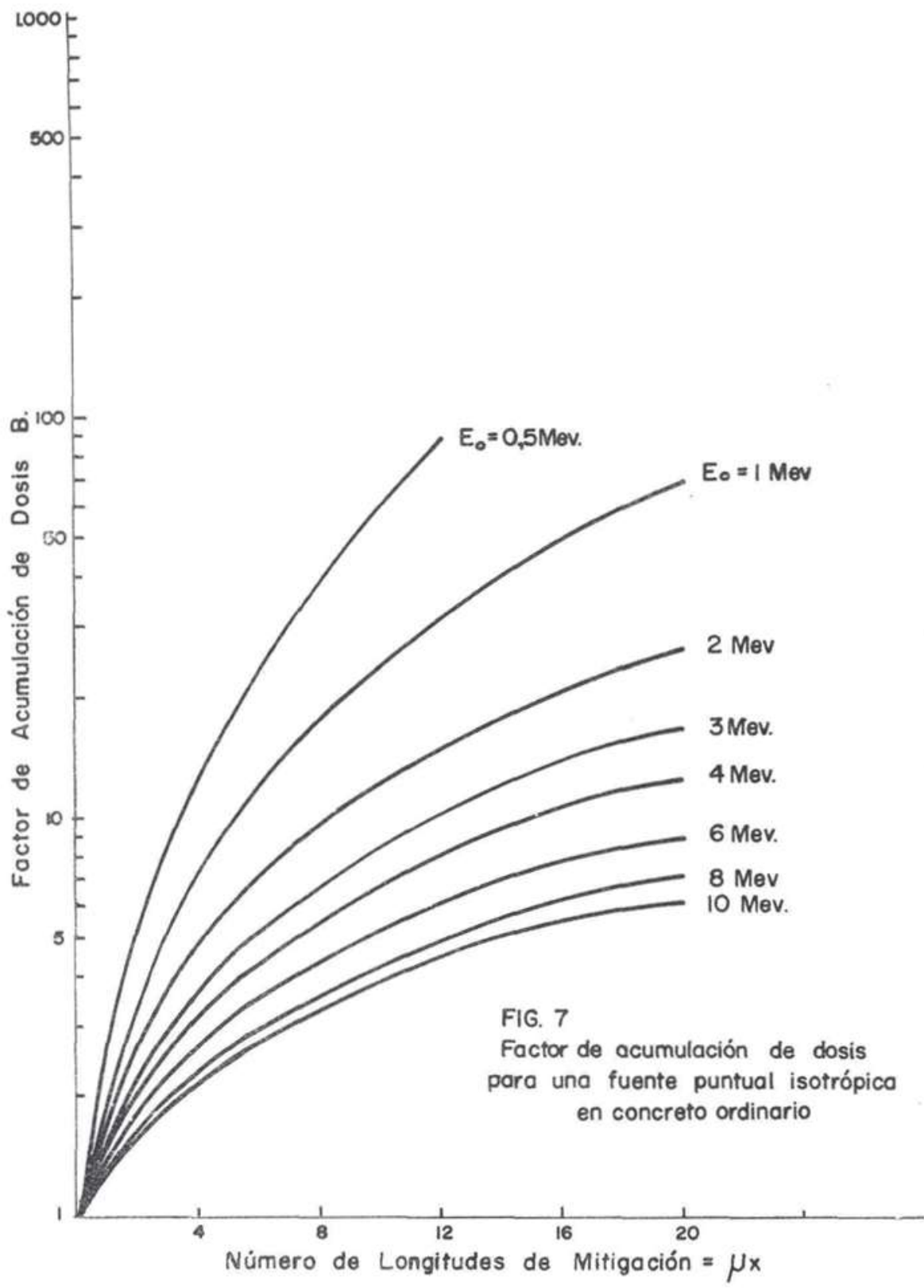


FIG. 7  
 Factor de acumulación de dosis  
 para una fuente puntual isotrópica  
 en concreto ordinario

fre, Calcio, Hierro, Bario y Oxígeno. Estos dos últimos poseen el mayor porcentaje. Algunos concretos de este tipo, incluyen además el Carbono.

Existen además otros tipos de concreto como el que contiene Ilmenita. Su constitución es asimismo variada. Una mayor información sobre los mismos y sobre los aquí discriminados se puede encontrar en la publicación del laboratorio Nacional de Argonne, Estados Unidos, designada ANL-6443 "A Summary of Shielding Constants for Concrete" por R. L. Walker y M. Gritenhuis. Esta publicación recopila además los porcentajes de composición de los diferentes tipos de concreto utilizados en blindaje, el valor de las diferentes constantes físicas y nucleares de cada uno de ellos así como también suministra curvas que permiten el cálculo fácil de la atenuación de la radiación para cada tipo de concreto. (Figs. Nos. 5, 6 y 7). Se recomienda como una buena referencia para aquellos que tengan que diseñar construcciones tales como refugios, en donde es necesario considerar la posibilidad de exposición y la forma de preservarse de ella por medio de un blindaje adecuado y económico. En estas curvas se obtiene el valor del factor de acumulación contra radiación gamma, en función de lo que se conoce como longitud de mitigación o relajación. Por ella se entiende la distancia de un material, en el cual el producto  $x = 1$  dá como resultado la atenuación de la radiación en un factor de  $e = 2.7181$ .

La Figura N° 2 dá los valores de la sección eficaz de atenuación para diferentes pesos atómicos. La tabla siguiente indica los valores efectivos de los pesos atómicos que se pueden considerar para diferentes concretos y con los cuales puede utilizarse tal curva.

**TABLA I**

NUMEROS ATOMICOS EFECTIVOS PARA DETERMINAR SECCIONES DE ATENUACION PARA DIFERENTES CONCRETOS

TIPO	Densidad gr/cc	Peso Atómico
Ordinario	2.33	12
Ordinario	2.35	11
Ferrofosforoso	4.68	21
Ferrofosforoso	4.82	21
Baritas	3.50	27
Baritas	3.30	25
Magnetita	3.55	17
Magnetita	3.29	17
Ilmenita	3.44	18
Magnetita y Acero	4.70	22
Limonita y Acero	4.23	21

REFERENCIAS:

1. ANL-6443 "A Summary of Shielding Constants for Concrete" por R. L. Walker y M. Gritenhuis.
2. Reactor Shielding Desing Manual, por Theodore Rockwell III — D. VAN Nostrand CO. INC.
3. Radiation Shielding por B. T. PRICE, C. C. Horton y K. T. Spinney. Pergamon Press N. Y.

*Cuarenta y nueve (49) horas después de que ha ocurrido una explosión atómica la intensidad de la radiación se ha reducido al 1% de aquella que existía una hora después de la explosión. Sin embargo, la radiación puede ser tan intensa al principio que 1% de ella sea en extremo peligrosa.*