

BLINDAJES NUCLEARES

Por FRANCISCO JAVIER GOICOLEA,
Ingeniero de Caminos.

Muy interesante y de completa novedad en nuestras páginas es el presente estudio, en el que el autor expone problemas que presenta el proyectar blindajes nucleares, y sugiere al final el gran interés que tendrá para nuestras futuras instalaciones el empleo del hormigón pretensado para tales blindajes, tal como ha sido resuelto recientemente por los franceses, venciendo grandes dificultades.

El blindaje de los reactores nucleares para centrales de energía es principalmente un problema económico.

No solamente hemos de considerar el coste del material utilizado, sino su volumen, que, a su vez, influye en el tamaño del edificio y en las longitudes de las conducciones e instalaciones auxiliares que han de atravesarlo.

En esencia, es un problema ingenieril que requiere la contribución de la física nuclear, cuyos principios son la base del cálculo del blindaje.

Dada la multiplicación de las instalaciones nucleares, el problema se va haciendo más importante, y en países como Norteamérica se está creando una nueva rama de la Ingeniería: la Ingeniería de blindajes nucleares.

En España estamos en los principios de esta situación con la instalación del reactor de tipo piscina que actualmente se está construyendo en la Moncloa.

Al hablar de blindajes nucleares nos referíamos especialmente a los reactores nucleares, pues es en ellos donde el proyecto adquiere categoría ingenieril y porque los principios que informan el cálculo son los mismos para toda otra fuente de radiación.

El proyecto del blindaje de un reactor tiene diversos aspectos. No se trata solamente de blindar el núcleo del reactor; generalmente el circuito de refrigeración y las instalaciones auxiliares son también radiactivas y requieren blindajes.

Existe además el problema de carga y descarga del combustible y el almacenamiento de éste. El combustible usado es altamente radiactivo y ha de ser depositado en celdas calientes en espera de que su radiactividad decrezca.

El blindaje del reactor propiamente dicho consta de dos partes: blindaje térmico y blindaje biológico. El primero tiene como función absorber la energía de la radiación, principalmente gamma, que se transforma en calor, y el segundo es necesario para asegurar el trabajo sin riesgo de los operadores del reactor.

Principios generales.

Un reactor atómico consiste en un núcleo de material fisionable (combustible nuclear), en el cual se produce una reacción en cadena. Los átomos, al fisionarse, son fuentes de radiaciones, las más importantes de las cuales son las radiaciones alfa, beta, gamma, neutrones, productos de fisión y protones. Estas radiaciones son muy diferentes entre sí respecto a su energía, intensidad y alcance. Las más penetrantes, debido a su carácter eléctricamente neutro, son las radiaciones gamma y neutrones. Las otras tienen alcances muy pequeños, especialmente los productos de fisión, que se puede considerar quedan en el mismo lugar de la fisión.

Las partículas que forman las radiaciones sufren, con los átomos que componen los materiales del reactor, acciones y colisiones por medio de las cuales se va disipando su energía. Una hoja de papel sirve para detener las partículas alfa más penetrantes. Las partículas beta de máxima energía pueden penetrar hasta 0,53 cm. en el hormigón, y el mismo comportamiento tienen los positrones o partículas beta positivas. La única importancia de los rayos beta se debe a que en su proceso de atenuación dan lugar a rayos X inducidos a través de los procesos llamados bremsstrahlung y aniquilación.

De lo dicho se deduce que sólo hemos de tener en cuenta los rayos gamma y los neutrones. La atenuación de ambas radiaciones al atravesar la materia es de forma exponencial, es decir, que se requerirían espesores infinitos para reducirles esencialmente a cero. Pero afortunadamente no es necesario tanto: bastan atenuaciones del orden de 10^{10} ó 10^{12} para que la radiación emergente no sea peligrosa.

Fuentes de neutrones y su atenuación.

Al fisionarse un núcleo se producen, por término medio, dos y medio neutrones de una energía de 2 Mev (megaelectronvoltios). Se produce también radiación gamma. La energía de los rayos gamma, se-

gún la teoría cuántica, se emite como fotones, los cuales pueden ser considerados como partículas de radiación. Al hablar de radiación gamma de tal energía, significamos que los fotones poseen esa energía. También se producen, en el acto de la fisión, rayos beta y productos de fisión. Estos últimos son radiactivos, emitiendo en su proceso de descomposición más radiaciones, generalmente beta y gamma.

Hemos dicho que la energía media de los neutrones emitidos en la fisión es de 2 Mev. En realidad los neutrones se emiten en una amplia banda de energías (espectro de fisión), que llega hasta más de 10 Mev. Los neutrones de estas altas energías son poco numerosos, pero, en cambio, son los más penetrantes y más dafinos, por lo cual son los factores que controlan el espesor del blindaje.

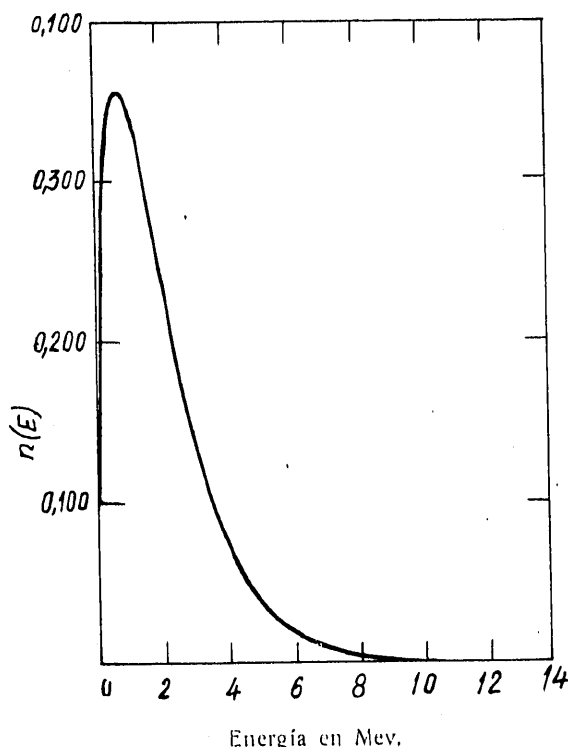


Fig. 1.ª — Espectro de fisión.

La atenuación de neutrones se verifica de tres maneras: choque inelástico, choque elástico y captura.

A altas energías sólo tienen importancia los dos primeros procesos. La captura prácticamente no existe más que a bajas energías.

En el choque inelástico de un neutrón con un núcleo, éste absorbe parte de la energía de aquél, quedando en un estado excitado. El neutrón emergente del choque ha perdido energía y ha cambiado su dirección. El núcleo excitado vuelve a su estado básico de energía por medio de la emisión de uno o varios fotones.

La posibilidad de que un neutrón sufra más colisiones, aumenta cuando decrece su energía. Cuando la energía del neutrón ha disminuido hasta alcanzar la correspondiente a la agitación térmica del ambiente (0,025 ev.), se dice que el neutrón es lento o térmico. Los neutrones térmicos son muy fácilmente capturados por los materiales. Un neutrón rápido puede disminuir su energía por causa de un choque inelástico a 200 Kev. (Kiloelectronvoltios), en cuyo caso, la subsiguiente moderación o termalización y captura, son prácticamente seguras.

Fuentes de rayos gamma y su atenuación.

Los rayos gamma tienen varias procedencias.

En el acto de la fisión se producen rayos gamma de energías entre 7,5 Mev y menor que 1 Mev. Hay que tener en cuenta también los rayos gamma inducidos, tanto en el núcleo del reactor como en el blindaje, durante el proceso de moderación de los neutrones, según vimos antes. Cuando los neutrones son capturados, los núcleos compuestos emiten uno o más rayos gamma de captura, con energías que llegan hasta los 10 Mev. Estos rayos gamma de captura son, en muchas ocasiones, la fuente de radiación más intensa y más peligrosa, pues se pueden originar en la parte exterior del blindaje, sin que, por consiguiente, haya protección para ellos.

Durante la descomposición radiactiva de los núcleos compuestos se emiten nuevos rayos gamma. En resumen, tenemos un proceso complejísimo y difícil de calcular, cuyo esquema se aprecia en la figura 2.ª.

El proceso de atenuación de rayos gamma es distinto del de neutrones. Los rayos gamma sufren tres interacciones con la materia: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.

El primero tiene gran importancia para gammas de energías hasta 1 Mev. Cuanto mayor es el número atómico de un elemento, mayor es la posibilidad de que se produzca el efecto fotoeléctrico.

El efecto Compton predomina a energías medias y la producción de pares a energías altas. El efecto Compton es directamente proporcional al número atómico y la producción de pares a su cuadrado. Esto nos indica que son los materiales pesados los que mejor atenúan los rayos gamma.

El efecto Compton es el equivalente del choque inelástico en el caso de neutrones. Reduce la energía y cambia la dirección de los rayos gamma. Su cálculo ofrece gran complicación.

Al final de los procesos de atenuación descritos, tenemos en el exterior del blindaje una cierta cantidad de radiación, compuesta por rayos gamma de varias energías, neutrones rápidos, que han logrado atravesar el blindaje sin ser moderados, y neutrones lentos.

La función del blindaje consiste en que esta radiación emergente esté por debajo de ciertas tolerancias, dentro de las cuales no hay riesgo inmediato, ni permanente, para el personal que trabaja en el reactor.

por la radiación en el aire. Un roentgen es una cantidad de radiación gamma o X tal, que en 1 cm.³ de aire seco, en las condiciones *standard* de temperatura y presión, produce iones que transporten 1 unidad electrostática de electricidad (1 e.s.u.) de cualquier

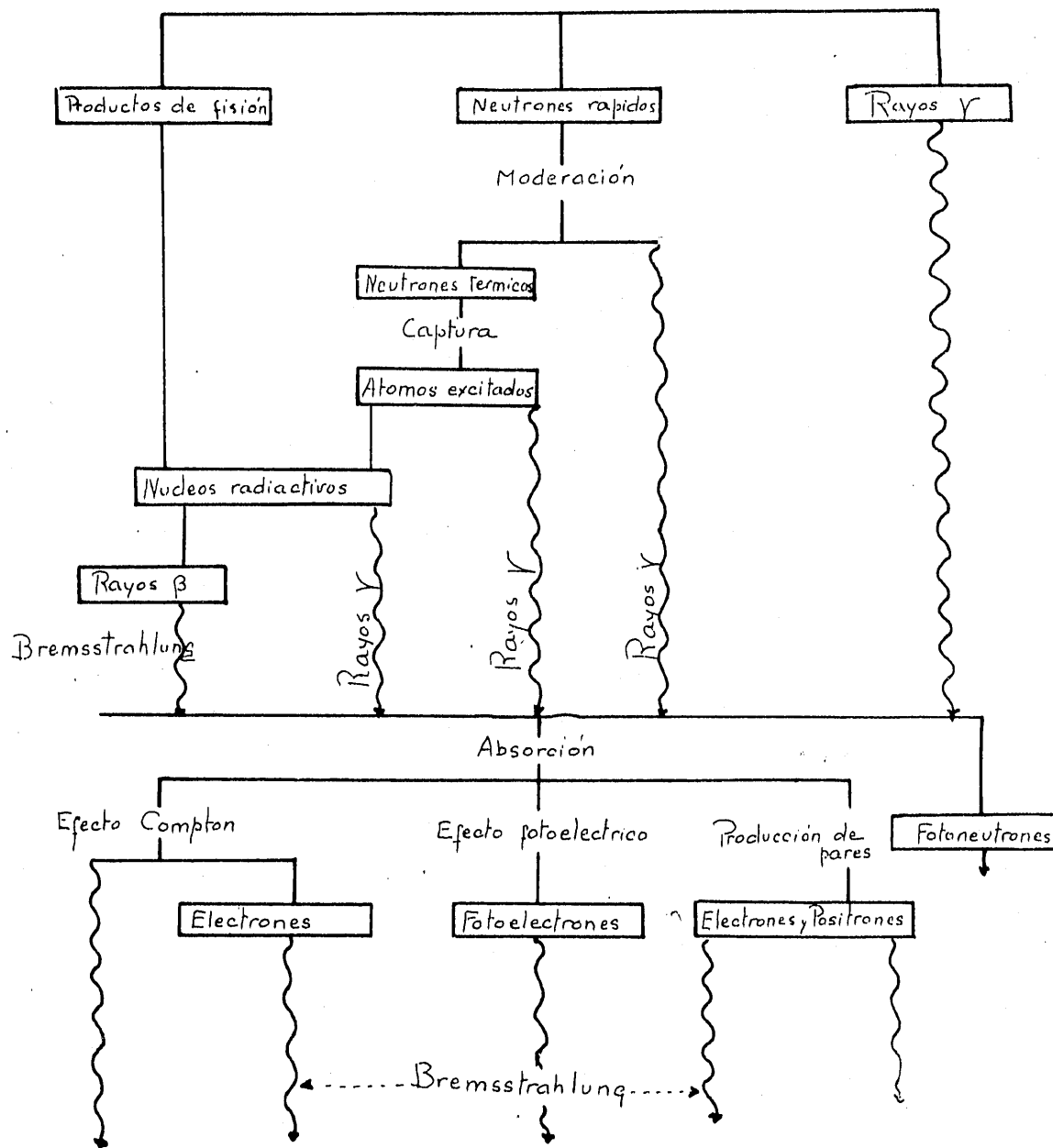


Figura 2.^a

Niveles permisibles de radiación.

Para medir los niveles de radiación y su efecto biológico, se ha desarrollado una serie de medidas que vamos a exponer a continuación:

El roentgen (r), que mide la ionización causada

signo. La intensidad de la radiación se mide en roentgen por unidad de tiempo, roentgen por hora o miliroentgen por hora.

El roentgen se refiere exclusivamente a la ionización del aire, sin decirnos gran cosa acerca del daño producido en los tejidos biológicos. Tampoco nos

dice nada del efecto causado por otra radiación. Por ello se ha creado el rep, equivalente físico del roentgen. Un rep es la dosis de cualquier radiación que resulta en la absorción de 93 ergios por gramos de tejido. Posteriormente se ha introducido el rad, que supone una absorción de 100 ergios por gramo.

Las diversas radiaciones producen efectos biológicos diferentes. Se estima esta diferencia por medio de unas cantidades, llamadas efectividad biológica relativa (R.B.E.), que compara el efecto de dicha radiación con el producido por rayos X de 200 Kev.

Para apreciar el verdadero daño biológico causado por la radiación en cuestión, habrá que multiplicar el número de rad por el R.B.E.

Obtenemos así una nueva unidad de medida, el equivalente humano del roentgen (rem) tal que:

Dosis en rem = R.B.E. $\times$ dosis en rad.

La Medicina ha estudiado los peligros que para la salud representan las diversas dosis de radiación, y aunque hay una clara tendencia a rebajar cada vez más las dosis tolerables, en el momento actual se admite la cifra de 7,5 mr./hr. como aquella que permite un trabajo de cuarenta horas por semana.

Materiales adecuados para el blindaje.

Hemos visto que el blindaje ha de cumplir tres funciones: moderación de neutrones, absorción de neutrones y absorción de rayos γ . Podemos añadir una cuarta condición: es que la captura y moderación de neutrones no produzca rayos gamma tan intensos que sean a su vez difíciles de atenuar. Supongamos que en la parte exterior del blindaje hay un material de gran sección de captura de neutrones, de tal manera que deja reducidos éstos a proporciones tolerables, pero que produce rayos gamma de captura de energía alta. Entonces no hemos logrado más que sustituir un peligro por otro. El calculista ha de ir teniendo en cuenta los efectos inducidos, de manera que, al final, el efecto de todas las radiaciones en conjunto sea tolerable.

Los materiales pesados, el plomo, el hierro, etcétera, no son, en general, buenos moderadores, pero sirven para hacer perder parte de su energía a los neutrones por medio de colisiones inelásticas, y una vez cumplido su objeto, son terminados de moderar fácilmente por agua u otro elemento a base de hidrógeno. Además, el agua es muy buen absorbente de neutrones. Por ello, la combinación del hierro con el agua en capas sucesivas es óptima. Se puede considerar que cuando un neutrón sufre una colisión inelástica con el hierro, queda moderado en el acto y su ulterior captura es casi segura.

Este complemento de funciones se debe a que el

hidrógeno tiene una gran sección eficaz de moderación y captura, pero solamente a bajas energías; por ello necesita un cuerpo pesado como el hierro, que rebaje la energía de los neutrones por medio del choque inelástico. El plomo tiene sección eficaz inelástica menor que el hierro; por eso no se emplea como defensa contra los neutrones. En cambio, la sección eficaz para los rayos γ es muy grande, y es aquí donde encuentra su utilidad. Si se ve que los neutrones rápidos y térmicos tienen niveles convenientes, pero que la radiación gamma es mucho más elevada, entonces se introduce una capa de plomo para reducir esta última.

En muchas ocasiones se emplea el boro, mezclado con el hierro o con el hormigón. El boro tiene una gran sección de captura de neutrones, produciéndose la reacción (n, α), es decir, dando lugar no a rayos γ , sino a partículas α que son fácilmente absorbidas.

Hemos dejado el hormigón para el último lugar debido a su gran importancia. El hormigón combina en su masa elementos ligeros, hidrogenados, con elementos pesados, por lo cual podemos intuir que es un buen material para blindaje, como en efecto ocurre. El hormigón atenúa mejor los neutrones que los rayos γ . Sus propiedades pueden mejorarse empleando agregados pesados, tales como barita, magnetita, bolas de acero, limonita, etc., que aumentan su atenuación de rayos γ . Otras veces se introducen compuestos de boro para aumentar la sección eficaz de captura de neutrones. En algunos reactores, tal como el *water boiler* de 10 Kw. del State College de Raleigh (North Carolina), se mezcló el hormigón con colemanita para aumentar la captura de neutrones. Esto trajo como consecuencia una inhibición del fraguado, que se evitó haciendo la mezcla en dos etapas.

El hormigón ofrece, además de las buenas propiedades nucleares, las técnicas y económicas, pues es fácilmente moldeable y barato. Aunque no pueda, en general, constituir por sí solo el blindaje de un reactor (necesitamos los otros materiales de que hemos hablado), constituye la parte principal del blindaje de gran parte de los reactores construidos.

La importancia económica del blindaje es considerable. Viene a representar un 15 por 100 del valor total de la central nuclear. Reactores como el EBWR de Argonne Nat. Lab. en Chicago, o como el CP-5 del mismo laboratorio, en los cuales hemos tenido ocasión de trabajar, tienen espesores de hormigón de unos 3 m. Con un diámetro interior de unos 5 m. es fácil calcular el gran volumen de hormigón que representa. Por otra parte, las tuberías y tubos de experimentación han de atravesar este espesor, lo cual supone considerables gastos por las longitudes apreciables que constituyen y el elevado precio de los materiales que forman los reactores. Por lo tanto, es obvia la importancia de un apropiado proyecto que

económice materiales y espesores dentro de la necesaria efectividad.

Hay que tener en cuenta un factor que puede ser muy interesante: los reactores de potencia suelen estar contenidos en un recipiente a elevada presión, que, en el caso de los reactores americanos refrigerados por agua, oscila entre 40 y 140 atmósferas. Los diámetros de los recipientes varían entre 2,5 y 3,5 m. Ello exige recipientes de acero al carbono, revestidos interiormente de acero inoxidable, con espesores de pared que, en casos como el de Ship-pugport (60 000 Kw.), es de 21 cm. El precio de un recipiente como éste es próximo al millón de dólares.

Pero puesto que exteriormente hay un blindaje de hormigón, cuya resistencia no se utiliza, cabe pensar en su empleo mediante un adecuado pretensado. En este caso, el blindaje cumplirá el doble papel de resistir la presión interior y reducir la radiación, niveles y tolerancias prefijados.

El problema presenta muchas dificultades de ejecución, pero han sido brillantemente vencidas por los franceses en la envoltura precomprimida que

acaban de construir para el reactor G-2 de Marcoule. Se trata de un cilindro de 14 m. de diámetro interior y 3 de espesor, cerrado en sus extremos por dos cúpulas hemisféricas. Dicho cilindro alberga en su interior el reactor, manteniendo una presión de servicio de 15 Kg./cm.², si bien va a ser probado por medio de presión hidráulica a 30 Kg./cm.².

El cilindro está pretensado circunferencialmente, longitudinalmente y en sentido transversal y recubierto interiormente por una chapa de acero inoxidable de 3 cm. de espesor para asegurar la impermeabilidad.

El tema planteado creemos que es muy sugestivo, especialmente para países como el nuestro, que no cuenta con una industria metalúrgica tan enormemente desarrollada como los U.S.A., ya que de la realización de tales ideas depende la posibilidad de poder construir las centrales nucleares, que necesitaremos en plazo breve, con medios propios, evitando gastos en divisas que seguramente no podría resistir nuestra economía.