

UN MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE SECCIONES EFICACES MACROSCÓPICAS DE ABSORCIÓN EN MUESTRAS DE ROCAS EN LA GEOFÍSICA DE POZOS

**Lázaro Roger García Parra *, Eduardo Herrera Peraza *,
Norma Rodríguez Martínez*, Yaroslav Borrego Morejón *,**

Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares. (ISCTN) *

ABSTRACT

Se realiza un estudio de los diferentes métodos para la determinación de las secciones eficaces macroscópicas de absorción de las rocas testigos de los pozos con vistas a la corrección del registro de neutrones de porosidad y para la determinación de la litología de la muestra. Se implementa el método a partir del sencillo método de la pila de Mireille que consiste en la medición de la sección eficaz macroscópica de absorción de un material en un prisma de grafito de 180 cm de arista. El experimento se efectuó usando como fuente de neutrones una fuente radioisotópica de Pu-Be con una intensidad de $2.1 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$. Se presentan los resultados obtenidos y se evalúa el método aplicado.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de la geofísica nuclear aplicados en la exploración de los recursos naturales para el examen de rocas o para el control de la actividad subterránea (humana o natural) están basados en la detección de los campos de radiación específicos (neutrónicos o de fotones de rayos gamma, principalmente) dentro del ambiente geológico.

La aplicación cuantitativa de cualquier método nuclear en geofísica está normalmente basado en una curva de la calibración que relaciona la señal medida con la variación de un parámetro geológico dado, como la porosidad de la roca, la densidad de la roca, el grado de algún elemento, etc., cuando todos los otros parámetros, como la fuente y los tipos de detector, la geometría de medición, la litología de la roca, etc. son fijados. Éstas son varias formas de obtener las curvas de calibración. La más popular, aunque no la más fácil, es completamente empírica: la señal es registrada desde la herramienta localizada en diferentes medios geológicos, para los cuales la variación del parámetro geológico en cuestión es bien conocido. Esta aproximación es muy difícil de comprender y muy costosa. La otra aproximación es puramente teórica. Partiendo del conocimiento de la composición elemental del medio geológico, de la fuente y de la construcción de la herramienta y de la geometría de la medición, se puede calcular la señal de la herramienta usando códigos de transporte de radiación bastantes sofisticados junto apropiados ficheros de datos nucleares.

Queda otra aproximación, una aproximación mixta, que relaciona la señal registrada por la herramienta etc. con algunos parámetros nucleares integrales del medio rocoso, como la longitud de moderación o de migración de los neutrones, la sección macroscópica de absorción, el número atómico equivalente. Esta aproximación, cuando es manipulada adecuadamente, nos permite “traducir” las curvas de calibración de la herramienta de un medio a otro, el cual, siendo geológicamente (o litológicamente) diferente, esta caracterizado por los mismos valores de los macroparámetros nucleares.

En un breve artículo es imposible cubrir todo el rango de parámetros nucleares involucrado en el problema presentado anteriormente. Limitaremos nuestras consideraciones por consiguiente a los métodos más populares que están relacionados con el petróleo. Nuestro interés principal estará en los métodos neutrónicos. Los macroparámetros nucleares de las rocas que son de interés para estos métodos, pueden calcularse o medirse en el laboratorio o, en cierta medida, en el campo.

Este trabajo está dedicado a los problemas de las mediciones en el laboratorio de las muestras de roca. En particular a la medición de la sección macroscópica de absorción de los neutrones térmicos.

Se establece un método de medición de la sección eficaz utilizando una fuente de neutrones isotópica colocada en el interior de un prisma de grafito. Aunque está basado en el principio del método de la pila de Mireille, sin embargo se hacen otras consideraciones, ya que se dispone en general de una pequeña cantidad de muestra, y no de cantidades de magnitud industrial.

Por lo tanto es necesario realizar la calibración a partir de sustancias utilizadas en carácter de muestra, que tienen sección de absorción conocida. A partir de esto se establece una curva de calibración y se estima con determinada aproximación el valor de la sección de absorción de la muestra de roca.

Se realiza la medición de la sección eficaz macroscópica de absorción en muestras de rocas de yacimientos de Cuba en la región central de la isla, el yacimiento la zona de Pina. Este yacimiento se caracteriza por la buena calidad del petróleo y el carácter vulcano-sedimentario y volcánico de los reservorios. El origen de estas rocas se atribuye a la actividad volcánica del Cretáceo del arco de las Antillas Mayores.

Parámetros neutrónicos de las rocas

Cualquiera de los métodos neutrónicos para medir los parámetros neutrónicos de las rocas in situ, es difícil, salvo el método de la determinación del tiempo de vida media del neutrón con el generador de neutrones de pulsos de pozo. Este método también puede medir, en cierta medida, el coeficiente de difusión de neutrones térmicos de las rocas. Sin embargo, incluso en el caso de este método la señal medida exige una interpretación bastante sofisticada para obtener sección macroscópica de absorción (Σ_a) de neutrones térmicos en el medio rocoso y el coeficiente de difusión D. Todas las otras mediciones están por tanto limitadas a los métodos del laboratorio en las muestras de rocas. Las muestras de rocas pueden pesar de varios gramos a incluso varias toneladas. En el último caso debido a su tamaño la homogeneidad del material de la muestra es un problema serio, cuando cada roca es una mezcla al azar de varios componentes. La normalización evidente plantea:

$$V_m + V_{sh} + \Phi = 1 \quad (1)$$

$$S_w + S_h + S_g = 1$$

Este carácter heterogéneo variable del material de la roca es un obstáculo serio en cualquier método experimental de determinación de los parámetros neutrónicos de la roca. Estos parámetros siempre se relacionan con el número de núcleos por centímetro cúbico, este número varía el espacio rocoso de un punto a otro. Por el rango del parámetro de las secciones macroscópicas este obstáculo puede ser superado por ensayos separados en constituyentes particulares de la roca, como la matriz de la roca, los esquistos, salmueras, etc. Otros parámetros, sin embargo como el área de migración o la longitud de difusión, debe ser determinado para toda la muestra de roca. En el caso cuando para la medición de un parámetro dado se requiere de una muestra grande de roca, esto causa un serio problema técnico. Además, cuando uno necesita agrandar el tamaño de la muestra de roca durante el ensayo, estos problemas técnicos hacen toda la medición casi imposible.

Se puede distinguir un número de macroparámetros neutrónicos de la roca. Ellos pueden ser calculados todos usando una teoría más o menos sofisticada del transporte neutrónico y los ficheros de datos nucleares junto con el conocimiento de la composición elemental de la roca y su densidad volumétrica. A veces la composición elemental no es bien conocida y/o la aplicación de códigos de transporte muy sofisticados con apropiados ficheros de datos nucleares no es ni posible ni razonable. Además, cada cálculo teórico necesita una confirmación experimental.

Los macroparámetros neutrónicos más comunes de las rocas, utilizados en geofísica nuclear para los neutrones térmicos son

Sección macroscópica de absorción, Σ_a

Longitud de difusión, L_d

Longitud de migración, $M = (L_s^2 + L_d^2)^{1/2}$

Coeficiente de difusión, D (para el flujo o la densidad neutrónica)

Tiempo de vida del neutrón, $\tau = (v \cdot \Sigma_a)^{-1}$

Sección macroscópica de absorción de los neutrones térmicos en la roca.

Revisaremos aquí algunos de los métodos experimentales utilizados para la determinación de Σ_a , L_d , D , τ , y L_a en las rocas.

Entre todos los macroparámetros de las rocas, la sección macroscópica de absorción Σ_a de los neutrones térmicos es el más deseado. Aplicando el modelo de roca simplificado con solo tres constituyentes (matriz de la roca, lutita y líquidos de saturación) este valor está dado por:

$$\Sigma_a = (1 - \Phi - V_{sh}) * \Sigma_{am} + V_{sh} \Sigma_{sh} + S_w \Phi \Sigma_w + (1 - S_w) \Phi \Sigma_h \quad (2)$$

Los valores de Σ_a , Φ , y V_{sh} son obtenidos directamente por las mediciones de campo, el parámetro S_w es conocido, Σ_{am} , Σ_{sh} , Σ_w y Σ_h son conocidos para una litología dada. Este, sin embargo, no es el caso, especialmente el relacionado con la sección de absorción de la matriz, Σ_{am} , y la de la lutita, Σ_{sh} . La presencia de elementos de trazas (minoritarios) altamente absorbente en la matriz de la roca es la fuente del problema.

Este es el porqué de la necesidad de la determinación experimental de los valores de Σ_{am} y Σ_{sh} .

Otra razón de interés del valor de Σ_{am} , es que en todos los métodos de neutrones térmicos la señal medida es inversamente proporcional al valor de Σ_a de toda la roca y el mismo valor de Σ_a es incorporado en la longitud de difusión L_d de los neutrones térmicos.

La señal neutrónica depende de forma compleja de L_d . Por lo tanto en el caso del “traslado” de las curvas de calibración de los neutrones térmicos de una litología a otra el parámetro Σ_a se hace crucial.

Finalmente el valor de Σ_{am} puede ser tratado como un parámetro geoquímico (relacionado con la ocurrencia de elementos de trazas) que caracteriza el origen de una formación geológica dada. Este argumento es especialmente importante cuando la correlación y el origen de las formaciones magmáticas se discuten.

Existen dos razones principales de porqué la medición de la sección de absorción de las rocas no es fácil. La primera está en el rango de los valores de los valores de Σ_{am} entre 4 y 25 unidades de captura (u.c.) (1 u.c. = 10⁻³ cm⁻¹), la cual es muy baja en comparación con la sección de dispersión Σ_s de las rocas. Esta última es siempre mayor que el valor de Σ_{am} por un factor entre 3 y 100. La otra razón es la imposibilidad de cambiar el tamaño de la muestra geológica manteniendo constante su densidad total (esto puede efectuarse solo en circunstancias muy particulares). Además, la cantidad disponible de material de roca es usualmente bastante limitada (del orden de pocos kilogramos) y la forma de la muestra puede ser regular solo cuando la roca es triturada y puesta en algún contenedor.

Existen varios métodos conocidos de medición de la sección macroscópica de absorción de las muestras de rocas. Se pueden dividir en aquellos que utilizan reactores nucleares, generadores de neutrones de pulsos y los que emplean fuentes neutrónicas encapsuladas estables (fuentes isotópicas). Revisaremos algunos de estos métodos en particular los que emplean fuentes isotópicas.

Métodos que utilizan generadores de neutrones de pulsos

Existe un método bien conocido de medición de los parámetros de difusión y absorción de los neutrones térmicos usando un generador de neutrones de pulsos. El método fue propuesto por Von Dardel (1954). La muestra de una forma bien conocida es irradiada por una descarga de neutrones rápidos que se moderan dentro de una muestra y entonces da el flujo que decae de neutrones térmicos. La curva de decaimiento (die away) puede ser desarrollada en series de modos exponencialmente decrecientes. la constante de decaimiento λ_0 del modo fundamental puede ser desarrollada en la siguiente expresión:

$$\lambda_0 = v \Sigma_a + DB^2 - CB^4 + FB^6 \quad (3)$$

donde:

$v\Sigma_a$ es el producto de la sección de absorción de la muestra y la velocidad del neutrón v promediada por energía (por todo el flujo de la muestra)

D es el coeficiente de difusión de neutrones térmicos promediado por energía

C es el coeficiente de difusión de enfriamiento promediado por energía, etc.

El valor del laplaciano material B^2 es, hablando aproximadamente, inversamente proporcional al cuadrado del tamaño de la muestra (por lo tanto para un medio infinito $B^2 = 0$). Variando el tamaño de la muestra se puede medir los valores de λ_0 para diferentes valores del laplaciano material B^2 , el cual insertado en la ecuación (3) da, desde el mejor ajuste, los parámetros $v\Sigma_a$, D , C , F , etc. del material de la muestra (aquí, sin embargo la existencia de la distancia de extrapolación hace que el problema no sea tan trivial). Este método aplicado satisfactoriamente a la investigación de los materiales de los reactores, no puede ser utilizado para muestras geológicas debido a la condición de mantener la densidad volumétrica de las muestras de todos los tamaños constantes. Este método fue utilizado por Antonov et. al. (1966) para medir los parámetros $v\Sigma_a$, D , C en el petróleo y la arena (densidad mineralógica $\rho = 2,71$ g/cm³) de porosidad 40 % saturado de agua fresca. Otros métodos fueron desarrollados. Miller y sus colaboradores (1969, Miller 1967) establecieron otro método de determinar la Σ_a de las muestras de rocas. La muestra cilíndrica (4 cm de diámetro por 8 cm de altura) fue encapsulada en plexiglass de 2 cm de espesor cubierto por fuera con una mezcla de $B + ZnS$ considerada como fotocátodo del fotomultiplicador. Tal sistema fue irradiado por descargas de neutrones rápidos de 14 MeV y se midió la curva de λ . La constante de decaimiento del modo fundamental λ_0 de esta curva es correlacionada con la Σ_a de la muestra usando la curva de calibración, como muestras de calibración se emplearon 30 mezclas diferentes de arena de cuarzo + grafito + ácido bórico. Un método similar fue propuesto por Youmans (1969, 1973). Su muestra sin embargo es mucho mayor que la empleada Miller.

En 1981 Czubek propuso otro método de medición de los valores de $v\Sigma_a$ en pequeñas muestras de rocas. La muestra de forma esférica o cilíndrica (el tamaño de la muestra se fija para todo el experimento) compuesta de roca triturada saturada de una solución de ácido bórico es encapsulada, en las mediciones consecutivas, en el moderador de plexiglass de espesor variable R . Todo el sistema es irradiado por una corta descarga de neutrones de 14 MeV, la curva de atenuación de los neutrones térmicos es registrada a través de una pequeña abertura en la cubierta de Cadmio de todo el sistema muestra+moderador. La constante de decaimiento λ_0 del modo fundamental es extraída de esta medición. Cada valor de λ_0 corresponde a un espesor R del moderador con la muestra adentro. Para un sistema geométrico dado: muestra + moderador la curva "teórica" es calculada donde el valor aparente de λ_0^* es obtenido cuando se asume el valor cero del laplaciano para la muestra interior. La intersección de la curva "teórica" $\lambda_0^*(R)$ con la experimental $\lambda_0(R)$ da el valor de $v\Sigma_a$ para la muestra compuesta. El valor de $(v\Sigma_a)_m$ para la matriz de la roca en la muestra se obtiene de:

$$(vS_a)_m = \frac{l_o^* - F \cdot S_w (vS_a)_w}{1 - F} \quad (4)$$

Donde λ_o^* es el valor de λ_o del punto de intersección de las dos curvas $\lambda_o^*(R)$ y $\lambda_o(R)$ (la última es la experimental), S_w es el índice de saturación de la muestra, y $(vS_a)_w$ corresponde al valor de vS_a de la solución “envenenada” de ácido bórico. El valor de $(vS_a)_w$ puede ser conocido de un experimento similar, cuando en el contenedor de la muestra solo se coloca el líquido envenenado (sin la matriz de la roca). Este valor está realmente calculado de la composición elemental del líquido. La porosidad y el índice de saturación son medidos muy cuidadosamente pesando todos los componentes de la muestra. La saturación de la muestra se realiza en el vacío.

El conocimiento completo de los valores de vS_a , D , y C para el moderador de plexiglass es necesario para el cálculo de la curva “teórica” $\lambda_o^*(R)$. Estos parámetros han sido medidos usando el método “normal” del laplaciano variable (Drozdowicz et al., 1980).

El método es enteramente libre de la influencia de la sección de transporte de la muestra sobre los resultados de la sección de absorción. Para calcular la curva “teórica” solo son necesarios los parámetros neutrónicos del moderador de plexiglass y la forma y tamaño exactos de la muestra. La forma del espectro de neutrones térmicos en el sistema, también es tomada en cuenta (Czubek et al., 1983). El diámetro de la muestra (para cilindros este es el cilindro regular) puede estar entre 4 y 10 cm, por tanto el volumen de la muestra puede estar entre 70 y 600 cc (pero solo se necesita una muestra para toda la medición). Los resultados pueden ser evaluados como ensayos relativos (es decir asumiendo que los parámetros neutrónicos del plexiglass son bien conocidos y fijos) o absolutos (es decir tomando en cuenta la exactitud estadística con la cual son conocidos los parámetros neutrónicos del plexiglass).

La limitación del método es que la sección de absorción de la muestra compuesta debe ser siempre mayor que la del plexiglass (por tanto, mayor que alrededor de 20 u.c.). Otra limitación técnica es que el límite superior de la determinación de λ_o es 50000 1/s. Todo el procedimiento de medición es bastante bajo. Toma tres días medir una muestra. Cada detalle del procedimiento, la teoría del método, la teoría de la evaluación de los datos, etc. es accesible en la literatura abierta y puede ser obtenido a solicitud en el laboratorio.

Métodos que utilizan fuentes isotópicas de neutrones estables.

Title and Crawford (1983, 1984) reportaron un método muy simple de medición de Σ_a de las muestras de rocas (la muestra de roca es triturada) de un volumen de 300 ml. La muestra en un contenedor de polietileno, tiene una porosidad Φ es saturada en agua destilada o en una solución acuosa de NaCl. La sección de absorción del líquido de saturación es conocida de su composición y de las tablas de sección eficaz. Toda la muestra se sitúa en el centro en el centro de un tanque de 55 galones lleno con agua. El detector de He 3 (0.25" x 2", 40 atm) es colocado cerca de la muestra. La fuente de Pu-Be de salida neutrónica de 10^6 n/s es colocada a 20 cm desde el eje del tanque en el plano medio de la muestra, en un ángulo de 90 grados con el detector. Todo el sistema es calibrado con muestras artificiales preparadas con mezcla de arena Ottawa con soluciones de ácido bórico. Los puntos de calibración ajustan una línea recta: velocidad de conteo contra sección eficaz de absorción con una sensibilidad de alrededor del 0.8 % de variación en la velocidad de conteo por cada una unidad de captura. El cambio de la sección de absorción desde 10 hasta 21 u.c. da un decrecimiento lineal de la velocidad de conteo desde 1350 cps hasta 1240 cps. El punto del agua pura (22.2 u.c.) cae por fuera de la curva de calibración y los autores sugieren alguna corrección por la sección de dispersión de la matriz de la roca. La corrección es hecha por el cálculo de la sección

de dispersión de la muestra (del conocimiento de la composición elemental en los elementos mayoritarios) y es del orden de 0.5 u.c. Los autores calculan la incógnita Σ_{am} de la ecuación simple:

$$S_{am} = \frac{S_a - FS_w.S_{am}}{1 - F} \quad (5)$$

Asumiendo la porosidad Φ y el contenido de agua ΦS_w son bien conocidos (es decir sin error en su determinación) y el Σ_{am} calculado de las tablas (sin error tampoco), donde Σ_a es obtenido de la curva de calibración (la cual es otra vez asumida como perfecta probablemente). Bajo estas suposiciones los autores estiman la precisión de su método en alrededor de 0.5 u.c. (sin dar ningún análisis detallado del problema).

El método de Kreft y sus colaboradores (Dydejczyk et al., 1984) , está basado en dos mediciones consecutivas con la muestra de la roca del volumen de 1425 cc. La muestra seca, junto con el contador de BF_3 situado en ella es cubierta por una lámina de Cadmio removible y colocada en un tanque con parafina. La fuente de neutrones de salida 5×10^{-5} n/s es situada cerca de 10 cm por debajo del fondo de la muestra. La velocidad de conteo IC_d (entre 27 y 86 cps) observada cuando la cubierta de cadmio está colocada es muy sensible al contenido de hidrógeno y no es sensible a la sección de absorción de la muestra. Cuando la cubierta de cadmio es removida, la velocidad de conteo I_b (entre 1200 y 1900 cps) es una función combinada del contenido de hidrógeno y de la sección de absorción de la muestra. Usando una aproximación totalmente pragmática se puede asumir que la sección de absorción ajustada a una combinación lineal de segundo orden de las velocidades de conteo. Posteriormente en 1989 Kreft y sus colaboradores desarrollan un método para muestras pequeñas de rocas el cual emplea una fuente Cf^{252} de alrededor de $4 \cdot 10^6$ n/s y un detector BF_3 miniatura insertado en una muestra anular colocada en un gran bloque de polietileno. En este caso solo se necesita una muestra de calibración y no es necesario preparar la muestra solo triturarla. La desviación standard que se obtiene sobre el valor medido es de 10 % para muestra de 25 cm^3 y de alrededor 3 % para muestras de 300 cm^3 .

El método de la pila de Mireille que explicaremos en detalle más adelante también es un método que emplea una fuente isotópica y la evaluación de la sección de absorción mediante intercomparación con el material moderador de la pila que puede ser de grafito o berilio.

Intercomparación de los métodos para la determinación de la sección macroscópica de absorción

No existe una única y absoluta prueba para la comparación de los métodos de medición de la sección de absorción de la matriz de roca, excepto posiblemente cuando el mismo espécimen es tratado por diferentes laboratorios y los resultados son reportados junto con sus desviaciones standard. Aun en este caso las desviaciones standard deben ser compatibles, como ellos deben tener el mismo significado físico y estadístico. Como se demostró tempranamente, cada laboratorio ahora aproxima este problema de forma diferente. Una práctica común es que todos los métodos que usan muestras de calibración asumen una exactitud absoluta de su standard y el error introducido por la inexactitud de la propia curva de calibración es usualmente despreciada (o por la inexactitud en los coeficientes de peso).

Algunos laboratorios tienen ensayos realizados con el mismo tipo de roca (aunque no necesario sobre el mismo espécimen). Los resultados son listados en la Tabla 11. Podemos ver por ejemplo que para la dolomita Kasota todo el rango de los valores de Σ_{am} fue registrado en un laboratorio con tres muestras diferentes, mientras en otro laboratorio el valor obtenido es mucho más bajo. Un

efecto similar se observa para la muestra de basalto S10 Zamek (en este caso la sección de absorción fue medida sobre el mismo espécimen).

El problema de la estandarización del cálculo del error es crucial en la intercomparación de los métodos. Otro problema es cual método es el más conveniente. El método de Kreft parece ser el más fácil y más barato. Su exactitud y estabilidad ha de ser verificada durante algunas otras investigaciones. Todos estos métodos excepto el de Czubek son relativos, es decir necesitan algún standard. El método de Czubek siendo un método absoluto, sin embargo consume mucho tiempo.

Los métodos difieren en la manera de preparación de la muestra. Todos requieren de muestras trituradas. La muestra puede ser seca en los métodos establecidos por Miller, Kreft, etc. En todos los otros métodos la muestra ha de ser saturada en agua, y para el método de Czubek aun algún material absorbente más, aunque no necesariamente líquido.

Existe una diferencia más entre los métodos: la cantidad a medir realmente. Todos los métodos basados en la medición de la constante de decaimiento de la curva de decaimiento. (Antonov, Miller, Allen and Mills, Czubek) son sensibles al promedio de $v \cdot \Sigma_a$, el cual por la ley $1/v$ de la sección de absorción hace el resultado independiente del espectro de neutrones térmicos en el sistema. Todos los otros métodos, basados en la detección del decrecimiento del flujo neutrónico en la vecindad de la muestra son sensibles a la propia sección de absorción. Esto hace a los últimos métodos vulnerables al cambio en el espectro de neutrones térmicos el cual puede diferir de una muestra a la otra aun cuando las dos muestras tengan el mismo valor de la sección de absorción. El método de Kreft, debido a la detección de la señal del flujo de los neutrones epitérmicos quizás no está influenciado por este efecto.

El método de la Pila de Mireille

El método de la pila de Mireille fue primeramente utilizado por Raievski y luego refinado por Reichardt. Este permite una rápida medición de la sección de absorción de pequeñas cantidades de sustancias débilmente absorbentes como el grafito y el berilio y es particularmente muy adecuado para mediciones de rutina (pruebas de pureza industrial). En la figura 1 se muestra un conjunto típico para mediciones de grafito. Cerca de dos de las caras extremas de un prisma de 180 cm x 180 cm x 180 cm de grafito (longitud de difusión L) se colocan una fuente de Ra-Be y un contador BF3. El grafito puede ser sustituido por un material o muestra de prueba en un canal de medición (longitud de difusión L') en un volumen V . Si Z es la velocidad de conteo de cuando hay grafito en el volumen V , entonces de acuerdo a la teoría de las perturbaciones, Z' es la velocidad de conteo después de la inserción de la muestra de prueba, estará dada por:

$$\frac{Z' - Z}{Z} = A \left(\frac{L^2}{L'^2} - 1 \right) \quad (6)$$

La constante A puede determinarse por el cálculo o por mediciones de normalización sobre diferentes tipos de grafito. La ecuación (6) hace posible entonces la determinación de L^2/L'^2 y por lo tanto Σ_a'/Σ_a . Estaremos satisfechos aquí con una elemental obtención de la ecuación (6) bajo condiciones simplificadoras; un cálculo más exacto puede ser encontrado en Reichardt. Asumamos que una fuente puntual de neutrones de Intensidad Q es ubicada en r_0 y emite solo neutrones térmicos. Entonces con el grafito en el canal de medición (en V), el flujo térmico obedece a la siguiente ecuación

$$\Delta\Phi(r) - 1/L^2 \Phi(r) = -Q/D \delta(r - r_0) \quad (7)$$

si denotamos el kernel de difusión para una fuente puntual en un pila finita por $\mathbf{G}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r})$, entonces

$$\Phi(\mathbf{r}) = Q \cdot G(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}), \quad (8)$$

es la solución de la ecuación (7). En particular, el flujo $\Phi(\mathbf{r}_1)$ en el punto $\mathbf{r}_1$ en el cual el contador es colocado está dado por $QG(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1)$. Z es proporcional a esta cantidad. Si la muestra está en el volumen V , entonces tenemos que

$$\Delta\Phi'(\mathbf{r}) - 1/L^2 \Phi'(\mathbf{r}) = -Q/D \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \text{ fuera de } V \quad (9)$$

$$\Delta\Phi'(\mathbf{r}) - 1/L^2 \Phi'(\mathbf{r}) = 0 \quad \text{dentro de } V \quad (10)$$

estableciendo que $\Phi'(\mathbf{r}) = \Phi(\mathbf{r}) + \delta\Phi(\mathbf{r})$, obtenemos que de las ecuaciones (7 y 8) y las ecuaciones (9 y 10)

$$\Delta\delta\Phi(\mathbf{r}) - 1/L^2 \delta\Phi(\mathbf{r}) = 0 \quad \text{fuera de } V \quad (11)$$

$$\Delta\delta\Phi(\mathbf{r}) - 1/L^2 \delta\Phi(\mathbf{r}) = -(1/L^2 - 1/L'^2) (\Phi(\mathbf{r}) + \delta\Phi(\mathbf{r})) \text{ dentro de } V \quad (12)$$

en el lado derecho de la ecuación (12) se mantiene las fuentes características de la perturbación $\delta\Phi(\mathbf{r})$, el cual existe debido a las diferencias en L y L' . Cuando L y L' difieren poco, $\delta\Phi(\mathbf{r}) \ll \Phi(\mathbf{r})$ y podemos despreciar $\delta\Phi(\mathbf{r})$ comparado con $\Phi(\mathbf{r})$ en el lado derecho de la ecuación (12). Además podemos combinar las ecuaciones 11 y 12 en

$$\Delta\delta\Phi(\mathbf{r}) - 1/L^2 \delta\Phi(\mathbf{r}) = -(1/L^2 - 1/L'^2) \Phi(\mathbf{r}) \delta(V) \quad (13)$$

donde $\delta(V) = 1$ dentro de V y 0 si no lo está. la solución de la ecuación (13) es

$$\delta\Phi(\mathbf{r}) = D(1/L^2 - 1/L'^2) \int_V \Phi(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}', \mathbf{r}) d\mathbf{r}' \quad (14)$$

$G(\mathbf{r}', \mathbf{r})$ es otra vez el kernel de difusión de para la pila; la fuente puntual $\mathbf{r}'$ ahora descansa dentro del volumen V . De la ecuación (11) se obtiene que

$$\frac{Z' - Z}{Z} = \frac{\delta\Phi(\mathbf{r}_1)}{\Phi(\mathbf{r}_1)} = \left(\frac{L^2}{L'^2} - 1 \right) \frac{D}{L'^2} \int_V \frac{G(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}') \cdot G(\mathbf{r}', \mathbf{r}_1)}{G(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1)} d\mathbf{r}' \quad (15)$$

Por tanto la ecuación (1) ha sido obtenida y la constante A determinada. Con el fin de llevar a cabo la integración se tiene que conocer el kernel de difusión de la pila. En un cálculo exacto tenemos que tener en cuenta el hecho de que la fuente emite neutrones no térmicos. Sin embargo, si la distancia entre la fuente y la muestra es suficientemente grande comparada con la longitud de moderación, obtendremos el mismo resultado que para una fuente de neutrones térmicos. La figura 2 muestra A para volúmenes V de varios tamaños en la pila mostrada en la figura (1). Vemos que aún para pequeñas muestras se puede obtener una buena sensibilidad (por ejemplo $A = 0.1$ para $V \approx 130$ litros).

Metodología empleada para la medición.

Para desarrollar el método propuesto por nosotros se empleo un prisma de grafito de alta pureza de 180 cm de arista. (Figura 1) La muestra de roca triturada con grano de hasta 1 mm es colocada en un volumen de 130 ml. Se emplea un contenedor de polietileno. La muestra se sitúa en el centro del prisma, en el canal de medición a 65 cm de la fuente que está ubicada a 20 cm de una de las caras del prisma en el propio canal de medición. El detector es de BF_3 (trifloruro de boro) se coloca cerca de la muestra a 20 cm. La fuente de Pu-Be es de salida neutrónica de 10^6 n/s.

Todo el sistema es calibrado empleando varias muestras artificiales con diferentes soluciones de ácido bórico con el propósito de calibración ya que son sustancias con secciones de absorción conocidas. Los puntos de calibración ajustan una línea recta: intensidad relativa de conteo contra sección eficaz de absorción. Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 1. y en la Figura 3.

El método desarrollado fue empleado para la determinación experimental de la sección de absorción de muestras de rocas del yacimiento de Pina en la zona central de Cuba, el cual se distingue por la buena calidad del crudo y el carácter vulcano sedimentario y volcánico de los reservorios. El origen de estas rocas se atribuye a la actividad volcánica del Cretáceo del arco de las Antillas Mayores.

Muestra	Tasa de conteo	Intensidad de conteo	σ_{n-1}	Sigma mac de abs Boro	Sec. Mac de abs Oxigeno	Sec. mac. abs. Hidrog.	Sec. Mac. Abs.Total	error
	Cont/s		-	u.c.	u.c.	u.c.	u.c.	
GRAFITO	9254	1	79				2.99E-04	64.4
0.3	8897	0.9614	94	1.64E+01	6.73E-04	2.61E+00	1.91E+01	64.0
0.4	8731	0.9434	59	2.19E+01	6.73E-04	2.60E+00	2.45E+01	64.2
0.5	8642	0.9338	99	2.74E+01	6.72E-04	2.59E+00	3.00E+01	64.2
0.6	8534	0.9221	76	3.29E+01	6.70E-04	2.58E+00	3.55E+01	64.1
0.7	8441	0.9121	87	3.84E+01	6.70E-04	2.57E+00	4.09E+01	64.4
0.8	8329	0.9000	81	4.38E+01	6.70E-04	2.56E+00	4.64E+01	64.2
Rocas(Tobas)								
Pina 9011 A	8835	0.9547	91.1				20.82207	64.3
Pina 6174	8856	0.9569	89.4				19.77858	64.4

Tabla 1. Resultados obtenidos en la medición de la sección de la eficaz macroscópica de absorción.

El método desarrollado fue empleado para la determinación experimental de la sección de absorción de muestras de rocas del yacimiento de Pina en la zona central de Cuba, el cual se distingue por la buena calidad del crudo y el carácter vulcano sedimentario y volcánico de los reservorios. El origen de estas rocas se atribuye a la actividad volcánica del Cretáceo del arco de las Antillas Mayores.

La estructura básica de la mena de Pina consiste en arcillas como sello, así como tobas del Cretáceo y rocas efusivas las cuales juegan el papel de reservorios. El contenido de petróleo y la propia estructura de las capas son debido a movimientos tectónicos, que ocurren después de la erosión y la sedimentación, la cual ha transformado la y cambiado la composición de las rocas. El complejo litológico de la mena de Pina está caracterizado por sus edades de capas.

El método de envenenamiento de la muestra utilizando ácido bórico también se pudiera tomar en cuenta con el objetivo de tener una estimación más del valor de la sección eficaz de la muestra. La aplicación de este método presupone que podríamos determinar el envenenamiento muy

precisamente. El primer pre-requisito es que el material adicionado sea un fuerte absorbedor 1/v con una sección de absorción conocida muy bien precisada.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Entre todos los parámetros neutrónicos de las rocas, la sección de absorción para neutrones térmicos obtenida experimentalmente es ciertamente uno de los tipos de datos más demandados. Este conocimiento no es satisfactorio en sentido absoluto, ya que para el resto de los parámetros neutrónicos de las rocas, los datos experimentales son escasos.

Como es conocido se requiere de verificación de los métodos de estimación de la sección de absorción a partir de programas de intercomparación entre diferentes laboratorios que aplican diferentes técnicas de medición. En este sentido para la verificación de la calidad del método se deben tomar como referencias rocas standard, las cuales no disponemos en nuestro laboratorio.

El método que aun está en fase de verificación tiene la ventaja de emplear pequeñas muestras de para la medición de la sección de absorción de neutrones térmicos. Además de la instrumentación nuclear standard, solo se requiere de la instalación fundamental de base que es el prisma de grafito con su canal de medición y emplea fuentes isotópicas (estables) de neutrones en lugar de fuentes pulsadas, que son más caras, complejas e inestables. La principal desventaja es, a diferencia de los métodos que utilizan fuentes de pulsos como el método de Czubek, la dependencia de los resultados finales de la sección de transporte de la muestra.

Otro aspecto de importancia que queremos destacar es el hecho de que por primera vez se realiza la medición en Cuba de la sección de absorción a muestras de rocas del yacimiento de la mena de Pina, el que como ya mencionamos se caracteriza por arcillas como sello, así como tobas del Cretáceo y rocas efusivas las cuales juegan el papel de reservorios. Este tipo de formación es muy particular de la región.

BIBLIOGRAFÍA

- Antonov A. V. Granatkin B. V. Merkulev A. Yu. Miller V. V. and Shimelevich Yu. S. (1966) "Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics" Vol 2 p 139 IAEA, Viena.
- Czubek J. A. (1981). A method for measurement of thermal neutron absorption cross section in small samples, J. Phys. D: Appl. Phys., 14, 779-792
- Czubek J. A. et. al. (1996) Thermal Neutron Macroscopic Absorption Cross Section Measurements Applied for Geophysics. Progr. Nucl. Energy Vol 30. No 3 pp 295-303
- Dardel G. F. von and N. G. Sjostrand (1958). Diffusion Measurement with Pulsed Neutron Sources, Progr. nucl. Energy Ser I. Vol 2, p 183
- Kreft A., Bolewski A. JR, Ciechanowski M. 1989. An Isotopic Neutron Method for Measuring the Thermal Neutron Absorption Cross Section of Rocks Using Small Samples. Nucl. Geophys. Vol. 3 No. 4 pp. 367-372.
- M. E. Montero-Cabrera et al. 1994 Multielemental Characterization of Volcanic and Volcano-sedimentary Rocks from Pina Petroleum Ore, Central Cuba. Nuclear Geophysics. Vol 8 No. 4 pp. 361-371
- Miller V. V. (1967) Atomnaya Energia 22, 33
- Sjöstrand N. G. (1986) On the accuracy of a new method for measurement of thermal neutron absorption cross section. J Phys. D Appl. Phys. 19, 1373
- Tittle C. W. and Crawford G. W. (1984) Measuring the neutron cross section of rocks. Proc. SPWLA 25-th annual Logging Symp. Paper I.
- Youmans A. H. (1969) US Patent No. 3426203
- Youmans A. H. (1973) US Patent No. 27579

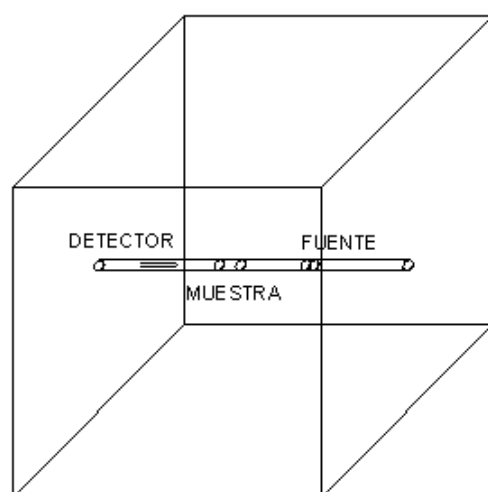


Figura 1 *Instalación experimental del prisma de grafito para la medición de la sección de absorción*

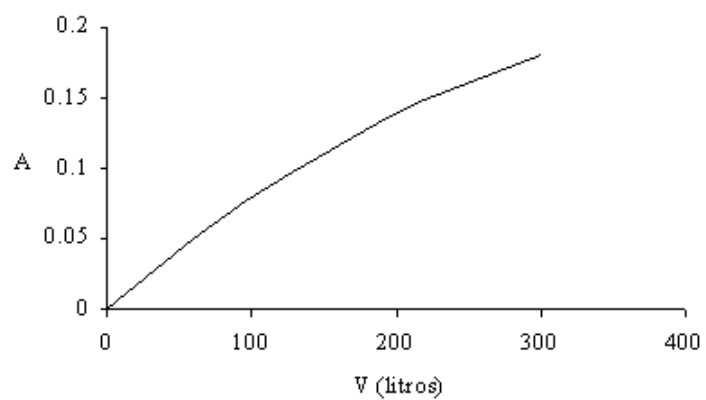


Figura 2 *Sensibilidad del prisma de grafito como función del volumen de la muestra*

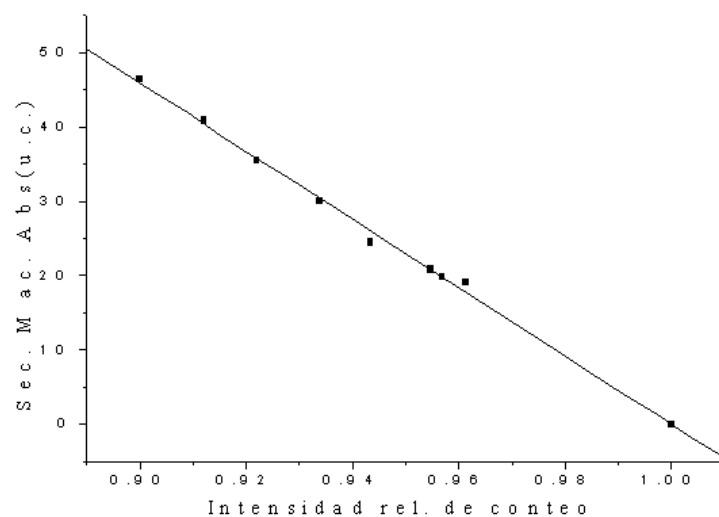


Figura 3. Relación de la sección macroscópica de absorción con la intensidad de conteo.

AUTORES

Lázaro Roger García Parra. Graduado de Ingeniería Energética Nuclear en 1981. Profesor Asistente del ISCTN. Entrenamiento para Operador de un Reactor Nuclear de Investigación en la República Checa. Entrenamiento en el tema Teoría y Cálculo de los Reactores Nucleares en el Instituto de Investigaciones Nucleares Rez y la Facultad de Ingeniería Física Nuclear de Praga. Investigaciones en Geofísica de pozos aplicando técnicas nucleares. Investigaciones sobre el Cálculo Físico-Neutrónico de Reactores Nucleares de Potencia con combustible quemado a baja potencia. Investigación sobre Geofísica de Pozo. Física experimental del reactor. Programa de desarrollo del laboratorio del Conjunto Subcrítico. Investigaciones sobre características físico-neutrónicas de la primera carga de combustible del reactor VVER-440 de la CEN de Juraguá. Investigaciones sobre las características físicas del reactor de investigaciones del tipo IRT del Centro de Investigaciones Nucleares.

Eduardo F. Herrera Peraza Graduado en la Universidad de la Habana en el año 1979 de Licenciatura en Física, ha trabajado en varios centros universitarios de Cuba y en el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares de Dubna, Rusia, donde se especializó en la aplicación de las técnicas neutrónicas. Ha dictado conferencias y cursos cortos en algunas universidades latinoamericanas en Montevideo, Chile, la UNAM de México, la universidad del Valle, la Mariano Gálvez y la San Carlos de Guatemala. Ha presentado un gran número de publicaciones en la temática en revistas de impacto internacional. En estos momentos es profesor Titular del departamento de Física Nuclear y Jefe de la cátedra de Física Nuclear Experimental del Instituto Superior de Ciencia y Tecnología Nucleares

Norma Rodríguez Martínez - Doctora en Ciencias Geológicas. Investigadora Titular y Profesora Titular Adjunta del Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares (ISCTN). Actual Vicerrectora del ISCTN que atiende las actividades de Investigación, Comercialización, Económicas y Administrativas. Dirige el proyecto del desarrollo de las especializaciones de los ingenieros petroleros del país. Autora de más de 20 papers presentados en revistas nacionales e internacionales. Ha participado en numerosos eventos nacionales e internacionales como ponente. 25 años de experiencia en la actividad petrolera.

Yaroslav Borrego Morejón. Estudiante del 5^{to} año de Lic. en Física Nuclear. Realiza su trabajo de diploma. Es alumno ayudante del Departamento de Física Nuclear del ISCTN. Ha participado en dos Forum Estudiantiles de Ciencia y Técnica en su centro de estudio.