

CARACTERIZACIÓN DE ROCAS GRANÍTICAS ORNAMENTALES Y LA MANIFESTACIÓN DE LAS DOSIS RADIOACTIVAS

Humberto Terrazas Salas ^a, Hermínio Arias Nalini ^b y Júlio César Mendes ^b

^aCentro de desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN/MG, Caixa Postal 941-Campus da UFMG-Pampulha, 30161-970, Belo Horizonte, MG., Brasil, (31)3499-3191, salasht@cdtn.br

^bDepartamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, CEP; 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil, (31)3559.1605, nalini @degeo.ufop.br y julio@degeo.ufop.br

RESUMEN

El estudio de las rocas graníticas (*latu sensu*) y la determinación de las dosis radioactivas, es un parámetro a más en la cualidad tecnológica y ambiental para su uso comercial. Los testes de la auto-radiografía auxiliaron con los estudios de la microscopia, la microsonda electrónica y los análisis químicos. Los minerales radioactivos son, principalmente, la monazita, circón y allanita, también otros menos frecuentes, como ser la pechblenda/uraninita y la “gummita”, así como la apatita, titanita, fluorita y otros minerales. Las muestras pertenecen, principalmente, al grupo de los granitos alcalinos, con 30 ppm de uranio y 130 ppm de torio, son asociados a las tierras raras leves y al abundante potásio. En las muestras con mayores concentraciones de radioactividad, utilizandose la activación neutrónica paramétrica, fueron determinados ²³²Th, ⁴⁰K y ²²⁶Ra. Para calcularse las dosis radioactivas fue simulada la utilización de un piso de roca granítica, haciendo parte de un cómodo padrón. La radioactividad se encuentra entre 0,11 a 0,34 mSv/año, donde existe una renovación del aire con aproximadamente 17,5 m³ por hora, para cada persona, considerados no dañosos al público, comparados a los padrones internacionales dentro de los límites de exposición a la población, o sea 1,0 mSv/año.

Palabras claves

Granito Ornamental, Minerales Radioactivos en Granitos, Dosis Radioactivas en Granito

INTRODUCCION

Las rocas ornamentales y de revestimiento, en la construcción civil, constituyen una actividad económica de nivel nacional y internacional, tienen un mayor crecimiento en su exploración y beneficiamiento. El conocimiento de la radioactividad en las rocas ornamentales son cada vez de mayor necesidad, para que sea incluido como un parámetro a más dentro del control de la cualidad.

Los estudios sobre las rocas ornamentales, en su mayor parte, se encuentran direccionados para las técnicas de extracción, la resistencia física y de forma muy amplia para la parte comercial, donde son insuficientes las informaciones sobre su radioactividad.

El presente trabajo tiene el objetivo de demostrar el estudio de una centena de muestras de rocas graníticas silicatadas colectadas en marmorarias de Belo Horizonte – MG (Salas *et al.* 2000 y Salas *et al.* 2002), local donde, de una manera general, son

beneficiados y comercializados estos materiales. En las muestras estudiadas fueron identificados los minerales radioactivos (Salas 2003), la forma de la presentación de los litotipos, su composición química y el posible impacto ambiental. Utilizándose los resultados de la radioactividad también fueron estimadas las dosis, expresadas en mSv/año, de la exposición a estos materiales, para avaliarse los posibles daños biológicos y efectuarse la comparación con normas internacionales ya establecidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras “graníticas” estudiadas, tienen diferentes procedencias, pero si en su mayor parte tienen un origen predominante el Estado de Minas Gerais y Espirito Santo. Las muestras fueron obtenidas de los recortes o restos de materiales, con aproximadamente 2 kg cada una, son provenientes de placas pulidas que tenían un peso aproximado de 300 kg. La cantidad de la muestra fue suficiente para realizarse los testes y análisis, como ser: los estudios macroscópicos, petrográficos/mineralógicos, la determinación de los litotipos, la composición mineralógica esencial y de sus accesorios (radioactivos y no radioactivos).

Los principales óxidos fueron determinados por la fluorescencia de rayos X, gravimetría, volumetría, absorción atómica y también por la fotometría de llama. Las tierras raras fueron determinadas usándose la espectrometría de energía de rayos X, por otro lado los análisis de torio, radio y potasio fueron realizados por la activación neutrónica paramétrica. Para la localización de los minerales radioactivos fueron utilizados los testes de la auto-radiografía, siendo que para los estudios mineralógicos, en lámina delgada y sección pulida, fue aplicada la microscopía óptica y la microsonda electrónica.

Los estudios fueron detallados en las muestras con presencia de uranio y torio, igual o superior a 60 ppm, donde también fueron realizados otros análisis, tales como los de microanálisis y para la determinación de la concentración de la radioactividad.

CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y AUTO-RADIOGRÁFICA

Por las observaciones macroscópicas de las muestras de rocas graníticas ornamentales, demuestran que, normalmente, tienen colores claros, con una tendencia a ser predominantemente amarillas, cenizas y rojizas, donde también existen de forma escasa rosadas, esblanquizadas, moradas y castañas. El tamaño de sus granos es de medio a grueso y también de coloración clara, contituyendo texturas principalmente homogéneas (granitos, granulitos y charnoquitos), sin orientación y algunas orientadas (gnais y migmatitos), que fueron denominadas de rocas con “movimiento”.

La composición mineralógica esencial y la coloración clara de estas muestras, estudiadas al microscopio petrográfico, se encuentran, en la mayor parte, determinando proporciones mayores que 80 % del total de cada muestra, constituidas de cuarzo (9,7 – 33,4 %), feldespato potásico (24,3 – 51,3 %) y plagioclasa sódica (24,8 – 41,4 %). Ocurre rara muestra con predominante feldespato potásico (73,4 %), donde son poco comunes el cuarzo y la plagioclasa, pero si contienen frecuente augita, hornblenda y biotita. Las micas también son comunes en las rocas graníticas, en mayor parte la biotita y siendo menor la moscovita. Los minerales secundarios demuestran diferentes grados de alteraciones, representados, principalmente, por los minerales de arcilla (caolín y montmorillonita), sericita, carbonato, “óxidos de hierro” y clorita.

Los minerales accesorios, menores que 1 % y ocasionalmente superiores, son constituidos, preferencialmente, por el circón, monazita, apatita, mineral opaco (magnetita-martita, ilmenita, pirita, pirrotita, goetita y calcopirita), titanita, rutilo, allanita, fluorita, epidoto, xenotima, bastnäsita y gummita (Figura 1).

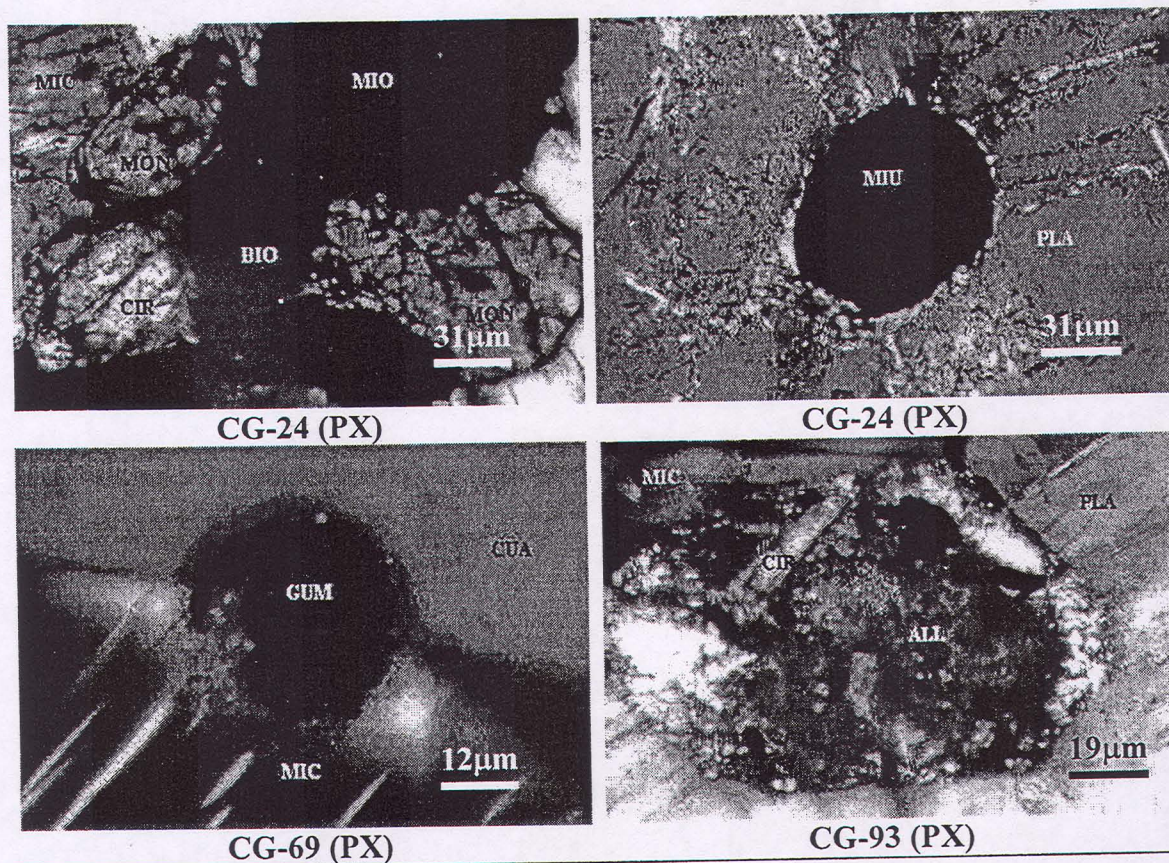


Figura 1 – Aspectos microscópicos de los minerales responsables por la radioactividad (MON – monazita, CIR – circon, MIU – óxido de uranio, GUM – gummita, ALL – allanita y MIO – mineral opaco) y minerales hospederos (MIC – microclina, PLA - plagioclasa y CUA – cuarzo)

Los resultados de la clasificación litológica, utilizando la caracterización mineralógica al microscopio petrográfico, fueron obtenidos en el diagrama QAP de Streckeisen (1976) y mencionado por Le Maitre (1989). En los resultados de esta clasificación litológica fueron determinados, predominantemente, los granitos monzoníticos, donde ocurren otros tipos litológicos subordinados, tales como el granito sienítico, monzonito, monzonito cuarzoso, granodiorito, monzograbro monzodiorítico, gabro cuarzoso y sienito, con presencia de gnaiss, migmatitos, charnoquitos y granulitos.

Por los resultados de la auto-radiografía, utilizando placas fotográficas capaz de detectarse 100 ppm (partes por millón = $g \cdot t^{-1} = mg \cdot kg^{-1} = 10^{-6}$), permitieron localizarse los minerales radioactivos, que demuestran las formas tamaños y intensidades de las manchas ennegrecidas, distribuidas irregularmente. Estas manchas verificadas por la microscopia y

microsonda electrónica, son constituidas, principalmente, de monazita, allanita y circón, determinando halos o fracturas radiales en los minerales donde se encuentran inclusos.

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Los principales óxidos analizados por la fluorescencia de rayos X, absorción atómica, volumetría y fotometría de llama en las 23 muestras con mayores concentraciones de uranio y torio, fueron determinados el SiO_2 (59,7 - 76,5 %), Al_2O_3 (11,7 - 15,6 %), K_2O (3,8 - 7,4 %), Na_2O (1,91 - 4,52 %) y Fe_2O_3 (1 - 8 %). Otros óxidos analizados como CaO , MgO y TiO_2 , se encuentran con concentraciones menores que 1,33 %.

De acuerdo a los resultados de U_3O_8 y ThO_2 , analizados por la activación neutrónica paramétrica en la muestra total, el uranio está variando entre 1 - 30 ppm y el torio entre 44 - 130 ppm. La presencia de estos óxidos, determinados por las análisis de microsonda electrónica, es atribuida, preferencialmente, a la monazita, allanita y circón.

Las concentraciones de uranio y torio, se encuentran, de una forma general, asociadas y con una tendencia a acompañar las mayores concentraciones de las tierras raras leves (Figura 2), determinadas por la espectrometría de energía de rayos X, representadas por el La_2O_3 (50 - 300 ppm), Ce_2O_3 (30 - 580 ppm), Pr_6O_{11} (20 - 580 ppm) y el Nd_2O_3 (30 - 200 ppm).

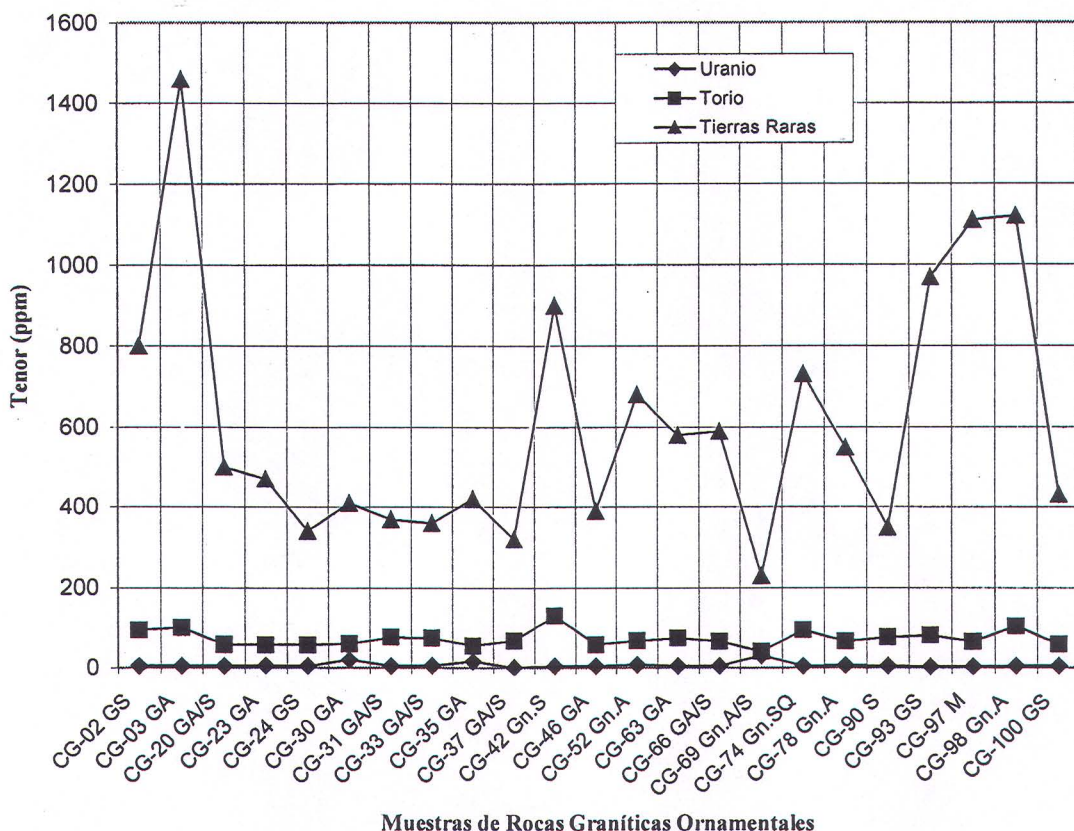


Figura 2 - Concentraciones de uranio, torio y tierras raras totales en las muestras graníticas y gnais, con tenor de elementos radioactivos totales (U_3O_8 y ThO_2) igual o superior a 60 ppm

En las 23 muestras también fueron analizados por la microsonda electrónica la plagioclasa y el feldespato potásico. En la plagioclasa las concentraciones de Ab se presentan entre 68,8 - 98,6 %; de An entre 6,2 - 30,8 % y Or menor que 2,5 %. En el feldespato potásico las concentraciones de Or ocurren entre 80,7 - 95,9 %; de Ab entre 1,5 - 16,6 % y de An menor que 0,5 %.

Los resultados de los análisis por la fluorescencia de los rayos X y de los análisis complementares, fueron utilizados para la clasificación litogeoquímica, donde fue aplicado el diagrama de La Roche *et al.* (1964), calculandose las proporciones en milicaciones de los principales óxidos y usandose los parámetros $R1 = 4 \text{ Si} - 11 (\text{Na} + \text{K}) - 2 (\text{Fe} + \text{Ti})$ y $R2 = 6 \text{ Ca} + 2 \text{ Mg} + \text{Al}$. Por este diagrama, se define una clasificación, predominantemente, como granitos sieníticos y granitos alcalinos, siendo que también ocurren muestras clasificadas de granito monzonítico, sienito cuarzoso y sienito (Tabla 1).

También se utilizaron los resultados obtenidos por los óxidos de Al_2O_3 (A), CaO (C), K_2O (K) y Na_2O (N), para determinarse los parámetros de saturación en alumina en estas rocas, definidas en el diagrama de Shand (1927), donde fue verificado que en este grupo de muestras ocurren, principalmente, las rocas peraluminosas ($A/\text{CNK} > 1$), siendo que excepcionalmente son presentes las muestras CG-63 de composición peralcalina ($A < \text{NK}$) y la muestra CG-90 de composición metaluminosa ($A > \text{NK}$), (Tabla 1).

Tabla 1 - Rocas ornamentales con tenor de U_3O_8 y ThO_2 igual o superior a 60ppm

Muestra	Clasificación		Densidad kg.m ⁻³	U_3O_8 (ppm)	ThO_2 (ppm)	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	H_{ET} mSv/año
	Streckeisen (1976) y Le Maitre (1989)	La Roche (1980)							
Cerámica			1.000			10	15	50	0,0068
CG-02	Granito Monzonítico	Granito Sienítico	2.515	4	94	380	10	1.600	0,21
CG-03	Granito Sienítico	Granito Sienítico/Alcalino	2.698	5	100	410	170	1.600	0,28
CG-20	Granito Monzonítico	Granito Alcalino/Sienítico	2.653	2	70	240	222	1.700	0,20
CG-23	Granito Monzonítico	Granito Alcalino	2.602	6	56	230	80	1.700	0,16
CG-24	Granito Monzonítico	Granito Sienítico	2.711	5	57	230	10	1.500	0,14
CG-30	Granito Monzonítico	Granito Alcalino	2.645	20	59	240	400	1.600	0,24
CG-31	Granito Monzonítico	Granito Alcalino/Sienítico	2.618	5	76	310	30	1.600	0,19
CG-33	Granito Monzonítico	Granito Alcalino/Sienítico	2.399	6	74	300	222	1.700	0,22
CG-35	Granito Monzonítico	Granito Alcalino	2.600	16	55	220	440	1.300	0,24
CG-37	Granito Sienítico	Granito Alcalino/Sienítico	2.533	1	66	270	10	1.800	0,16
CG-42	Gnais Monzonítico	Gnais Sienítico	2.936	4	130	530	140	1.600	0,34
CG-46	Granito Monzonítico	Granito Alcalino	2.595	5	58	240	210	1.600	0,19
CG-52	Gnais Monzonítico	Gnais Alcalino	2.670	8	67	270	60	1.300	0,17
CG-63	Monzonito Cuarzoso	Granito Alcalino	2.433	5	74	300	20	1.500	0,17
CG-66	Granito Monzonítico	Granito Alcalino/Sienítico	2.536	5	66	270	150	1.500	0,19
CG-69	Gnais Monzonítico	Gnais Alcalino/Sienítico	2.587	30	44	180	10	1.300	0,11
CG-74	Gnais Monzonito Cuarzoso	Gnais Sienito Cuarzoso	2.762	4	94	380	90	1.700	0,24
CG-78	Gnais Monzonito Cuarzoso	Gnais Alcalino	2.527	7	66	270	220	1.000	0,20
CG-90	Sienito	Sienito	2.521	5	76	310	600	2.300	0,33
CG-93	Granito Sienítico	Granito Sienítico	2.823	3	81	330	10	1.700	0,20
CG-97	Granito Monzonítico	Granito Monzonítico/Sienítico	2.660	3	65	270	20	1.600	0,16
CG-98	Gnais Monzonítico	Gnais Sienítico	2.691	4	105	430	10	1.800	0,25
CG-100	Granito Monzonítico	Granito Sienítico	2.715	4	58	240	10	1.500	0,15

AVALIACIÓN DE LA RADIOACTIVIDAD

En la avaliación de la radioactividad de las rocas graníticas ornamentales, con concentraciones igual o superior a 60 ppm de uranio y torio, se consideró un "cómodo padrón" con dimensiones internas de 4 x 4 x 3 m, siendo las cuatro paredes de ladrillo (dos con 10 cm y dos con 20 cm de espesura, simulándose, respectivamente, paredes internas y externas de una casa), la laja en el techo con 12 cm de espesura y el piso en roca granítica ornamental con 2 cm de espesura. Fueron considerados en los cálculos, una tasa de ventilación de 0,7 h.a⁻¹, tiempo de permanencia en este cómodo 7.008 horas por año, equivalente a 80 % de las horas en un año, y dimensiones del ladrillo de 20 x 10 x 5 cm.

En el cálculo del acréscimo de la dosis de las muestras graníticas, relativo a una cerámica utilizada como referencia (Ginjaar, 1985), fueron consideradas las densidades en kg.m⁻³ y los resultados de ²³²Th, ²²⁶Ra y ⁴⁰K (Tabla 1), obtenidos usándose los análisis por activación neutrónica, en Bq.kg⁻¹.

El modelo de cálculo para un cómodo padrón, de Castro & Senne (1995), fue aplicado en el cálculo de la dosis para la cerámica y para las muestras de granito. De esta forma fueron determinadas las tasas de dosis equivalente deste cómodo padrón, calculándose las dosis debido a la radiación gama. La dosis equivalente efectiva anual $H_{E\gamma}$, debido a la radiación gama fue calculada usándose la siguiente expresión:

$$H_{E\gamma} = T \cdot b \cdot \overset{\circ}{D} \quad (\text{Sv.a}^{-1}) \quad (1)$$

Donde:

T = tiempo de permanencia en el "cómodo padrón" [h.a⁻¹];

b = factor de conversión de la dosis absorbida en el aire para la dosis equivalente efectiva [Sv.Gy⁻¹] y

$\overset{\circ}{D}$ = tasa de dosis absorbida en el aire [Gy.h⁻¹].

La tasa de dosi absorbida en el aire, $\overset{\circ}{D}$, es expresada como siendo la suma de las contribuciones de los diferentes radionuclídeos presentes en el material de construcción:

$$\overset{\circ}{D} = \sum_i q_x \cdot C_{x,i} \cdot m_i \quad (\text{gy.h}^{-1}) \quad (2)$$

Donde:

q_x = factor para la conversión de la concentración del radionuclídeo x , presente en el material de construcción, en la tasa de dosi absorbida en el aire a 1 metro de distancia de la superficie del material [Gy.h⁻¹.Bq⁻¹.kg],

$C_{x,i}$ = concentración del radionuclídeo x en el material i [Bq.kg⁻¹] y

m_i = masa relativa del material i en el "cómodo padrón".

La dosi equivalente anual, H_{ERn} , debido al radónio, producto del decaimiento del uranio, presente en el material de construcción fue calculada utilizándose la siguiente expresión:

$$H_{ERn} = T \cdot r_{Rn} \cdot F_{Rn} \cdot C_{Rn,i} \quad (\text{mSv/año}) \quad (3)$$

Donde :

T = tiempo de permanencia en el "cómodo padrón" [h.a⁻¹]

r_{Rn} = factor para conversión del equilibrio equivalente de la concentración de los productos de decaimiento del radón, en el interior del "cómodo padrón", en la tasa de dosi equivalente [$mSv \cdot m^{-3} \cdot h^{-1} \cdot Bq^{-1}$];

F_{Rn} = factor de equilibrio y

$C_{Rn,i}$ = concentración del radón resultante de la concentración de ^{226}Ra en el material de construcción i en [$Bq \cdot m^{-3}$] dado por:

$$C_{Rn,i} = S_i \cdot \frac{A}{V} \cdot \frac{1}{\lambda_v + \lambda_{Rn}} \cdot f_{Rn} \cdot C_{Ra,i} \quad (Bq \cdot m^{-3}) \quad (4)$$

Donde :

S_i = superficie relativa del material i en el "cómodo padrón";

A = área del material i en el "cómodo padrón" [m^2];

V = volumen del "cómodo padrón" [m^3];

λ_v = tasa de ventilación en el "cómodo padrón" [h^{-1}];

λ_{Rn} = constante de decaimiento del Rn [h^{-1}];

$f_{Rn,i}$ = tasa de exhalación de radón por m^2 del material i , y por la unidad de concentración de ^{226}Ra [$kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] y

$C_{Ra,i}$ = concentración de ^{226}Ra en el material i [$Bq \cdot kg^{-1}$]

La tasa de exhalación del radón, $f_{Rn,i}$, es calculada usandose la siguiente expresión:

$$f_{Rn,i} = \lambda_{Rn} \cdot \rho_i \cdot \eta_i \cdot l_i \cdot \text{tgh} (L_i / l_i) \quad (kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}) \quad (5)$$

Donde :

λ_{Rn} = constante de decaimiento del Rn [$h \cdot a^{-1}$]

ρ_i = densidad del material de construcción i [$kg \cdot m^{-3}$];

η_i = factor de emanación del material de construcción i (indica la fracción de radón que alcanzan los poros del material);

l_i = longitud efectiva de difusión del material i [m] y

L_i = media espesura del material i utilizado [m].

El "tgh" significa la función tangente hiperbólica.

El factor de l_i es dado por:

$$l_i = \sqrt{\frac{K_i}{\lambda_{Rn} \cdot \varepsilon_i}} \quad [m] \quad (6)$$

Donde :

K_i = coeficiente de difusión del radón en el material i [$m^2 \cdot h^{-1}$] y

ε_i = porosidad del material i .

El cálculo para el torón, producto del decaimiento del torio, es análogo al cálculo para el radón, substituyéndose Rn por Tn y Ra por Th.

Finalmente, el cálculo del acréscimo de dosi debido al uso del piso de granito en lugar de la utilización del piso de cerámica es dado por:

$$H_{ET} = (H_{E\gamma} + H_{E_{Rn}} + H_{E_{Tn}}) - H_{ET \text{ cerámica}} \quad (7)$$

Tasa de Dosi y Acrécimo en mSv/año, Debido a la Utilización de las Rocas Graníticas Como Piso en el “Cómodo Padrón”

En este cálculo fueron utilizados los siguientes valores para los parámetros y constantes:

$$B = 0,7 \text{ Sv Gy}^{-12}$$

$$Q_k = 54 \times 10^{-12} \text{ Gy.h}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{kg}$$

$$Q_{\text{Th}} = 890 \times 10^{-12} \text{ Gy.h}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{kg}$$

$$Q_{\text{Ra}} = 620 \times 10^{-12} \text{ Gy.h}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{kg}$$

$$r_{Rn} = 8,7 \times 10^{-6} \text{ mSv.m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$$

$$F_{Rn} = 0,4 \text{ para una tasa de ventilación de } 0,7 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_{Rn} = 7,56 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$$

$$S_G = 0,20; A = 16 \text{ m}^2; V = 48 \text{ m}^3; \lambda_v = 0,7 \text{ h}^{-1}, M_G = 0,20;$$

$$l_G = 0,01; \frac{K_G}{\epsilon_i} = 1,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$$

Donde: el subscrito “G” se refiere al material granito.

Las tasas de dosi de estas muestras (Tabla 1 y Figura 3) se presentan entre 0,11 - 0,34 mSv/año, siendo que, la mayor parte tienen tasas inferiores a 0,20 mSv/año. En menor proporción ocurren las muestras con tasas entre 0,20 - 0,34 mSv/año. Las mayores tasas de dosis ocurren, según Streckeisen (1976), citado por Le Maitre (1989), en los granitos monzoníticos y granitos sieníticos, que corresponden, en la clasificación de La Roche (1964) a los granitos alcalinos, granitos alcalino/sieníticos y sieníticos.

La tasa de dosi de la cerámica en 0,0068 mSv/año fue obtenida de los datos de Ginjaar (1985). El acréscimo de dosi, debido al uso de las rocas graníticas en lugar del piso del material cerámico, es obtenido con la substracción del valor de 0,01 mSv/año en todas estas muestras graníticas.

Por los radionuclídeos de ^{232}Th , ^{226}Ra y ^{40}K de la muestra CG-90, del mismo grupo de las muestras con igual o superior a 60 ppm de uranio y torio, fueron determinadas hipotéticamente 3 situaciones en el cómodo padrón, con base en la planilla de cálculo: a) cuando la utilización del granito es total ($m = 100$) como material de construcción en todo el cómodo padrón, en las mismas condiciones de los trabajos de Sharaf *et al.* (1999), Kumar *et al.* (1999), Amrani & Tahtat (2001), Rizzo *et al.* (2001) y Kovler *et al.* (2002), fue obtenido H (gama) = 3,8 mSv/año y tasa de dosi total de 9,04 mSv/año; b) sin ventilación ($\lambda_v = 0$) y el piso de granito representando 5% ($m = 5$) del total del material de construcción, fue obtenido H (gama) = 0,189 mSv/año, y tasa de la dosi total de 5,44 mSv/año, y c) con ventilación ($\lambda_v = 0,7$), todavía el granito representando 5% ($m = 5$), se obtuvo tasa de dosi anual de 0,33 mSv/año. Esta última situación fue aplicada para el cálculo de la dosis total en todas aquellas muestras con concentraciones de uranio y torio igual o superior a 60 ppm, donde fueron encontradas dosis de 0,11 - 0,34 mSv/año.

CONCLUSIONES

Las 100 muestras clasificadas en el diagrama QAP (cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa) de Streckeisen (1976), son predominantemente de granito monzonítico (73%), subordinado granodiorito (9 %), monzonito cuarzoso (6 %), monzonito (4 %), granito sienítico (3%), sienito (3 %), monzogabro monzodiorítico (1 %) y gabro cuarzoso (1 %).

La mayor parte de las muestras fueron clasificadas, según la metodología de La Roche (1964), como granito alcalino, granito alcalino/sienítico y granito sienítico, comparados con

los resultados de la clasificación del diagrama de Streckeisen (1976), corresponden, predominantemente, al granito monzonítico y en menor proporción al granito sienítico. Las demás muestras, en menor cantidad, caracterizadas por la geoquímica según La Roche (1964), como sienito y monzonito, corresponden, cuando comparadas con la caracterización mineralógica-petrográfica de Streckeisen (1976), a los granitos sieníticos y monzoníticos; y monzonito y granodiorito, respectivamente.

Estudio de los minerales al microscopio petrográfico y en la microsonda electrónica, realizados en los puntos de la radioactividad definidos por la auto-radiografía, se deben en su mayor parte a la monazita, allanita y circón. Estos minerales otorgan a sus hospederos, normalmente, halos y fracturas radiales, debido a su radioactividad.

Los análisis químicos en la muestra total y al nivel puntual, en los minerales radioactivos, demuestran una asociación de las tierras raras leves (lantano, cerio, praseodimio y neodimio) con el uranio y torio, atribuidos a la monazita, circón y allanita.

Los resultados obtenidos por el cálculo del acréscimo de dosis no alcanzan niveles dañosos para el público (Figura 3), por encontrarse en concentraciones inferiores al padrón internacional de exposición a la radioactividad, de 1,0 mSv/año, según recomendaciones de la "National Council on Radiation Protection and Measurements", (1987).

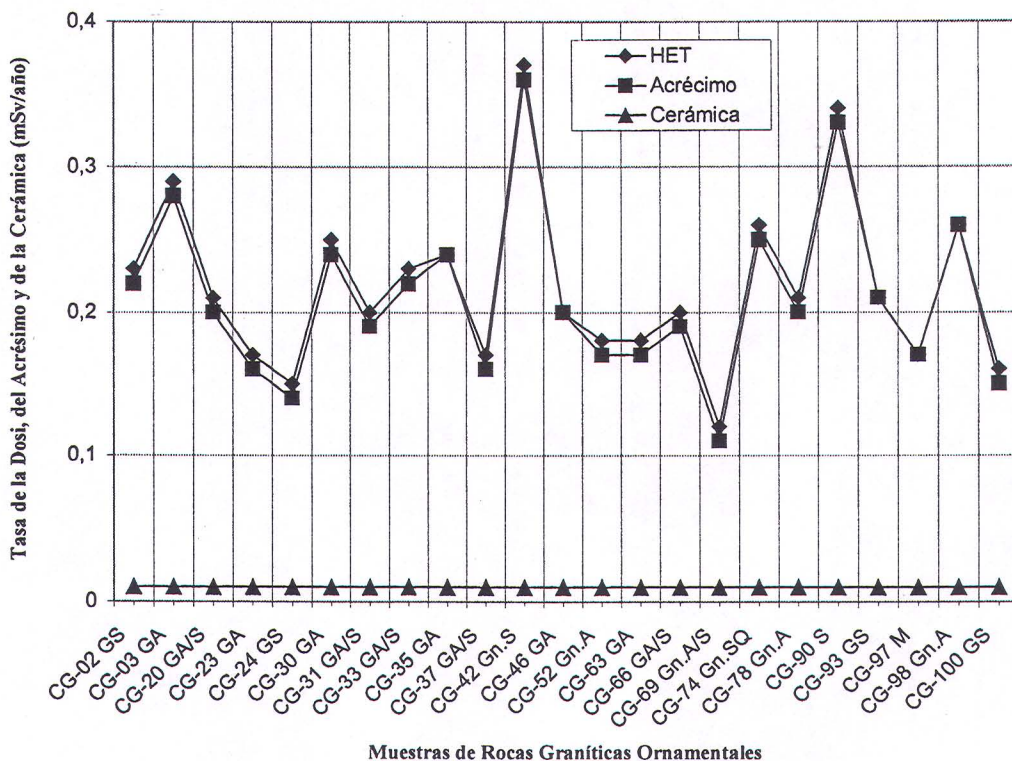


Figura 3 - Tasa de dosis de las muestras graníticas con tenor de elementos radioactivos totales (U_3O_8 y ThO_2) iguales o superiores a 60 ppm

Se observa que la tasa de dosis producida por el radón y el torón, proveniente de la utilización de la roca granítica, es considerablemente aumentada cuando la superficie relativa del material i en el "cómodo padrón" [m^2] representan mayores porcentajes y también cuando la tasa de ventilación [$h.a^{-1}$] es ausente o menor.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), que proporcionaron apoyo laboratorial y financiero.

A los colegas de trabajo por la contribución en el desenvolvimiento de esta investigación. A la Fundação de Amparo a la Pesquisa (FAPEMIG), organo financiador del Laboratório de Microanálise del Consórcio de Física - Geologia y Química de la UFMG y CDTN/CNEN.

REFERENCIAS

- AMRANI, D., TAHTAT, M., 2001. *Natural Radioactivity in Algerian Building Materials*. Applied Radiation and Isotopes 54, 687-689.
- CASTRO, J. O. N. M., SENNE, JR. M., 1995. *Uso da "Lama Vermelha" na Fabricação de Tijolos e Telhas*. Relatório Interno S/N. CDTN/CNEN.16pp.
- GINJAAR, J. O. N. M., 1985. *Radioactivity in Building Materials*. No. 1985/5, February 12. 93pp.
- KOVLER, K., HAQUIN, G., MANASHEROV V., NE'EMAN E., LAVI, N., 2002. *Natural Radionuclides in Building Materials Available in Israel*. Building and Environment 37, 531-537.
- KUMAR, V., RAMACHANDRAN, T. V., PRASAD, R., 1999. *Natural Radioactivity of Indian Building Materials and By-products*. Applied Radiation and Isotopes 51, 93-96.
- LA ROCHE, H., 1964. *Sur L'expression Graphique des Relations Entre la Composition Minéralogique Quantitative des Roches Cristallines. Présentation d' un Diagramme Destiné à l' étude Chimico-Minéralogique des Massifs Granitiques our Granodioritiques*. Sci. Terre, 9, 293-337.
- LE MAITRE, R. W., 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Osford: Blackwell Scientific Publications, 13 p.
- NCRP., 1987. *Recommendations on Limits for Exposure to Ionizing Radiation*. National Council on Radiation and Measurements.. ICPR Publication No 91, 63 pp.
- RIZZO, S., BRAI, M., BASILE, S., BELLIA, S., HAUSER, S., 2001. *Gamma Activity Geochemical Features of Building Materials: Estimation of Gamma Dose Rate and Indoor Radon Levels in Sicily*. Applied Radiation and Isotopes 55, 259-265.
- SALAS, H.T., BARBOSA, J.B.S.; MURTA, C.C.; ROCHA, F. DE A., NALINI, H.A .J; MENDES, J.C., 2000. *Determinação de Minerais Radioativos em "Granitos" como Rochas Ornamentais*. In: V ENAN – Encontro Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, CD.
- SALAS, H.T., NALINI, JR. H.A., MENDES, J.C., 2002. *Ocorrência de Minerais Radioativos em Rochas Graníticas Ornamentais*. In: VI INAC – International Nuclear Atlantic Conference, Rio de Janeiro, CD.
- SALAS, H.T., 2003. *Minerais Radioativos em Rochas Graníticas Ornamentais e de Revestimento: Aspectos Químico-Mineralógicos e Implicações Ambientais*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas – Departamento de Geologia, 193pp.
- SHARAF, M., MANSY M., SAYED A. EL, ABBAS E., 1999. *Natural Radioactivity and Radon Exhalation Rates in Building Materials Used in Egypt*. Radiation Measurements 31, 491-495.
- SHAND. SJ., 1927. *Eruptive Rocks*. Wiley & Sons, New York. 370pp.
- STRECKEISEN, A., 1976. *To each plutonic rock its proper name*. Earth Science Reviews. International Magazine for Geo-Scientists. Vol. 12, 33.