

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

**Avaliação de Emissões Radioativas em Rochas
Ornamentais**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Dilma Vana Rousseff

Presidente

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Clelio Campolina Diniz

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

Alvaro Toubes Prata

Secretário-Executivo

Kayo Julio Cesar Pereira

Coordenação-Geral das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processos Minerais

Cosme Antônio de Moraes Regly

Coordenador de Administração

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

Jackson de Figueiredo Neto

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN 978-85-8261-024-4

STA - 71

Avaliação de Emissões Radioativas em Rochas Ornamentais

Yasmin Soares Gavioli

Bolsista de Iniciação Científica, Engenharia Química – UFRJ.

Julio Cesar Guedes Correia

Químico Industrial, D.Sc., Pesquisador Sênior do CETEM/MCTI.

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

Engenheiro Químico, D. Sc., Pesquisador Adjunto do CETEM/MCTI.

CETEM/MCTI

2014

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Luis Gonzaga Santos Sobral

Editor

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Mariza Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos A. da Costa (UERJ), Fátima Maria Z. Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (PETROBRÁS), Luis Enrique Sánches (EPUSP) e Virginia S. Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minerometalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Valéria Cristina de Souza

Editoração Eletrônica

Andreza Milheiro

Revisão

Gavioli, Yasmin Soares

Avaliação de emissões radioativas em rochas ornamentais/
Gavioli, Yasmin Soares [et al.]. — Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

50p. (Série Tecnologia Ambiental, 71)

1. Rochas ornamentais. 2. Emissões radioativas. 3. Radônio. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Correia, Julio Cesar Guedes. III. Ribeiro, Roberto C. da Conceição. IV. Título. V. Série.

CDD – 553.5

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Países Produtores e Exportadores	11
1.2 Caracterização Tecnológica	12
1.3 Radioatividade em Materiais de Construção	14
1.4 Radônio em Residências	15
1.5 Testes de Emissão de Gás Radônio	17
1.6 Limites Aceitáveis de Gás Radônio	18
1.7 Radiação	20
1.8 Atividade de uma Amostra	28
1.9 Desintegração ou Tramutação Radioativa	29
1.10 Radônio	30
2 OBJETIVO	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Rochas no Estado Natural	35
3.2 Rochas Moídas	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 Avaliação da Taxa de Emissão de Gás ²²² Rn	41
4.2 Análise Radiométrica/Radioquímica	41
4.3 Análise Granulométrica por Peneiramento	43
5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

RESUMO

As organizações representativas das empresas do setor de rochas ornamentais procuraram a Comissão de Energia Nuclear através do seu Instituto de Radioproteção e Dosimetria e o CETEM-ES (Centro de Tecnologia Mineral de Cachoeiro do Itapemirim) para pedir auxílio quanto à avaliação de níveis de radiação em rochas ornamentais brasileiras, exportadas para os Estados Unidos da América e utilizadas como material de revestimento nas residências. Tais exposições indevidas estariam supostamente sendo provocadas pela exalação de Radônio (^{222}Rn) proveniente de granitos “exóticos” que estariam, segundo jornais americanos e informações na internet, aumentando o risco de câncer de pulmão. Os principais isótopos ou nuclídeos radioativos presentes são relacionados às séries naturais do ^{238}U (99,3 %), do ^{235}U (0,7 %), do ^{232}Th e ao ^{40}K . Um dos elementos da série do U é o ^{222}Rn , gás-nobre com 3,8 dias de meia-vida, cujo decaimento produz vários nuclídeos “filhos” de meia-vida curta e média, chegando finalmente ao chumbo estável. Baseado nisto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o risco, associado à exalação de radônio, de placas de revestimento em ambientes *indoor*, que possam estar causando exposições indevidas do público, através de técnicas nucleares consagradas internacionalmente e uso de modelos de cálculo de dose adotados nos EUA. Para tanto, foram realizadas a caracterização radiométrica e mineralógica de três tipos de rochas silicáticas utilizadas para revestimento, determinando as taxas de exalação e concentração de atividade do radônio nos materiais escolhidos. Resultados preliminares indicaram que as rochas em questão não apresentaram exalações de materiais radioativos que fossem responsáveis por problemas à saúde.

Palavras-chave

Rochas ornamentais, emissões radioativas, radônio.

ABSTRACT

The representative organizations of companies from the ornamental rocks sector had recently consulted the Nuclear Energy Commission through its Institute of Radioprotection and Dosimetry and CETEM-ES (Center for Mineral Technology, based in Cachoeiro do Itapemirim) to request aid concerning the assessment of radiation levels in Brazilian ornamental rocks, exported to the U.S.A., and used as covering material in residences. Such improper expositions would be supposedly being provoked by Radon (^{222}Rn) exhalation out of "exotic" granites that would be, according to American periodicals and information on the Internet, increasing the risk of lung cancer. The main isotopes or radioactive nuclides are related to the natural series of ^{238}U (99.3%), of ^{235}U (0.7%), ^{232}Th and to ^{40}K . One of the elements of U series is the ^{222}Rn , noble-gas with 3.8 days of half-life, whose decline produces some nuclides of short and average half-life, reaching finally to stable Pb. Based on this, the objective of this work was to evaluate the risk associated with the exhalation of radon out of covering plates in indoor environments that may be causing improper expositions of the public, through nuclear techniques granted internationally and using models adopted to dose calculation in U.S.A. For such purpose, the radiometric and mineralogical characterization of three types of silicatics rocks used for covering were accomplished for determining the exhalation rates and radon activity of those chosen materials.

The preliminary results indicated that the rocks in question had no radioactive materials emissions that were responsible for health problems.

Keywords

Ornamental rocks, radioactive emissions, radon.

1 | INTRODUÇÃO

O setor industrial de rochas ornamentais do Brasil produz uma grande variedade de granitos, mármore, quartzitos etc., atingindo, ao todo, cerca de 500 litotipos diferentes de rochas.

As rochas são classificadas por nomes comerciais, pelo estado produtor, origens geológicas, composição mineralógica; entretanto, não são classificadas quanto à concentração de substâncias radioativas.

O estudo das concentrações de radioelementos em rochas graníticas é importante por dois motivos. O primeiro, por se tratar de uma importante ferramenta técnica, visto que estas concentrações podem ser usadas para a classificação petrográfica de granitos. O segundo, por se tratar de problemas radiológicos, uma vez que a presença de elementos radioativos proporciona um aumento nos níveis de radiação presente na construção civil.

Segundo o setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento (Abirochas, 2004), o termo granito designa um amplo conjunto de rochas silicáticas, abrangendo monzogranitos, granodioritos, charnockitos, sienitos, dioritos, basaltos e os próprios granitos. A composição mineralógica dos granitos é definida por associações muito variáveis de quartzo, feldspato, mica (biotita e muscovita), anfibólios, piroxênios e olivinas. Entretanto, o quartzo, os feldspatos e as micas são minerais dominantes nessas rochas.

Diferentes tipos de solos e rochas apresentam diferentes níveis de atividade e concentrações dos elementos ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th . De acordo com uma pesquisa feita na China, as quantidades de potássio, urânio e tório são, geralmente, bem

correlacionadas entre si. Sendo assim, com qualquer aumento da concentração de tório é observado um similar aumento da concentração de urânio e potássio.

As presenças do urânio e tório têm uma tendência a aumentar nas rochas com maior teor de sílica (Wedepohl, 1978), indicando que estes elementos aumentam seus teores em rochas que se cristalizam mais tarde na evolução petrológica geral, sendo que o tório apresenta-se, comumente, em teores três vezes maiores que aqueles de urânio. O maior teor de urânio-tório encontra-se nos granitos de áreas cratônicas que representam, aproximadamente, a metade do volume da massa continental, posto que o restante contém menos radioatividade.

Desta forma, a presença de substâncias radioativas nas rochas graníticas provoca alterações nos níveis de radiação nos ambientes urbanos e do trabalho, quando são utilizados como materiais para interiores, sendo de fundamental importância conhecer as características minerais destes materiais e estimar qual seria sua taxa de radiação para a exposição humana.

Nas áreas de geologia e de proteção radiológica ambiental, os granitos são exemplos importantes de rochas que apresentam em sua constituição um enriquecimento natural de ^{238}U ; ^{232}Th e ^{40}K , quando comparadas com outros tipos de rochas, de tal forma que os teores destes elementos radioativos estão intimamente correlacionados com suas respectivas composições minerais e características petrológicas gerais (Whitfiel *et al.*, 1959).

Em termos de mobilidade, o urânio tende a ser altamente móvel perto da superfície da rocha, ao passo que o tório é um elemento inerte. Assim, o urânio pode ser facilmente oxidado na forma de solução aquosa e ser removido dos granitos e

pegmatitos através do processo de lixiviação e redepositado em sedimentos longe da rocha de origem. Por outro lado, o tório, que é relativamente estável e bem menos solúvel que o urânio e o potássio, não representa uma fácil mobilidade, a não ser por meios mecânicos, como o vento ou pelo processo de erosão.

Assim, estas características petrológicas de rochas graníticas, associadas aos efeitos do tempo e do metamorfismo, produzem alterações expressivas nos diagramas de concentrações dos radionuclídeos naturais: Th, U, K, Th/U e Th/K. Consequentemente, as concentrações de tório, urânio e potássio, em diferentes amostras de granito, resultam em sequências individuais de diferenciação deste tipo de rocha (Anjos, 2004).

1.1 | Países Produtores e Exportadores

Dentro do panorama que trata do mercado nacional e internacional, Chiodi e Rodrigues (1996) apresentam as formas físicas e o tipo de beneficiamento outorgado a estes materiais, assim como demonstram a importância do crescimento de 6% a.a., nos últimos cinco anos, de sua comercialização em nível nacional e internacional. Foi considerada a década de 1990 a nova idade da pedra, com a indicação de um movimento de US\$ 6 bilhões/ano no mercado internacional. No tocante à classificação comercial, as rochas ornamentais e de revestimento foram basicamente subdivididas em granitos e mármore. Foi também indicado o grupo dos dez principais consumidores em 1993, integrado pela Itália, Espanha, Alemanha, Grécia, França, EUA, Coreia do Sul, Taiwan, Japão e China, responsáveis por 63 % do

consumo no período. Dentre os dez principais produtores (Itália, Espanha, Grécia, França, EUA, Coreia do Sul, China, Portugal, Brasil e Índia), 7 pertencem ao grupo dos principais consumidores, atestando-se, assim, a ligação direta entre consumo e produção.

Com referência à oferta mundial de rocha ornamental em 1999, foi estimado um crescimento de 9,8% em relação ao período anterior, indicando que o Brasil situa-se entre os cinco países produtores. Encontra-se, também, apresentada neste sumário mineral a posição brasileira em relação à exportação mundial, bem como a dos demais países produtores exportadores (Nery e Silva, 2001).

1.2 | Caracterização Tecnológica

A caracterização tecnológica de rochas de revestimento (Frazão, 1992) é executada, no mundo todo, utilizando-se os procedimentos padronizados por instituições normalizadoras. Neste sentido, destaca-se a “American Society for Testing and Material-ASTM”, a “Association Française de Normalization – AFNOR”, o “Deustches Institut for Normung–DIN”, entre outras. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT vem estabelecendo normas sobre rochas de revestimento com a criação da comissão denominada “Revestimento com Pedras” (CE:2.02), junto ao Comitê Brasileiro da Construção Civil – COBRACON. Os principais ensaios executados no Brasil para caracterização tecnológica de rochas para revestimento visam a determinar as seguintes propriedades:

- petrografia;
- índices físicos (massa específica);
- porosidade e absorção da água;
- desgaste Amsler;
- compressão uniaxial (ao natural), e/ou após congelamento e degelo;
- módulo de deformabilidade;
- flexão;
- dilatação térmica linear;
- impacto;
- alterabilidade.

No caso de estudos sobre os aspectos petrográficos de deterioração das rochas ornamentais utilizadas em revestimento (Frasca *et al.*, 1998), estes materiais rochosos podem apresentar alterações após o uso, que por sua vez, podem estar relacionados à atuação de agentes diversos ligados a variações climáticas e à interferência humana. Tais interferências vão desde os processos inadequados de beneficiamento até a utilização de produtos de limpeza inadequados, poluição ambiental etc. A alteração apresentada pelas rochas está condicionada a dois fatores: a) suas características intrínsecas, propriedades físicas e químicas, como mineralogia, microfissurações e alterações pré-existentes e b) aos defeitos gerados no processo de beneficiamento – corte (desdobramento dos blocos em placas) e polimento. No entanto, não são observados estudos específicos para caracterização da emissão radioativa das rochas.

1.3 | Radioatividade em Materiais de Construção

Sobre a presença de radionuclídeos nos materiais de construção, Sala (2001) determinou que as doses de radiação em interiores, em especial as devidas à inalação e, posteriormente, deposição dos descendentes do radônio no trato respiratório, representam uma contribuição muito importante – não reconhecida até aquela época – às doses totais atribuídas de fundo natural.

Para determinar esta contaminação radioativa natural, foram determinadas as concentrações de ^{226}Ra , ^{40}K e ^{232}Th , em diversos materiais de construção, utilizando-se a espectrometria gama com detector na NaI(Tl). Pelos resultados obtidos, no que se refere ao conteúdo de ^{226}Ra , os granitos ocupam o primeiro lugar, seguidos pelos cimentos, azulejos, telhas e tijolos, ocupando os gessos os valores mais baixos. Quanto ao ^{232}Th , a ordem de abundância é iniciada pelos granitos, seguidas pelos tijolos, azulejos, telhas, tintas e cimento.

Pode-se afirmar que o campo de radiação gama existente no interior de uma residência, proveniente dos materiais de construção, é originado, principalmente, pelo decaimento dos radionuclídeos pertencentes às cadeias do ^{238}U e do ^{232}Th além do ^{40}K . Nas cadeias de ^{238}U e do ^{232}Th existem 16 emissores de radiação gama que emitem radiações com taxa de emissão maiores que 10^{-3} fótons por desintegração, com energia entre 0,011 MeV e 2,45 MeV e 0,01 MeV e 2,1615 MeV, respectivamente (Rosa, 1997).

A radiação gama, que decorre do decaimento dos radionuclídeos naturais que estão presentes nos materiais utilizados em construção é gerada de forma isotrópica e,

consequentemente, com isso, apenas uma fração das emissões originais provavelmente devem atingir o indivíduo exposto no interior da construção. Não só a exposição aos raios gama, mas também existe outra forma significativa de exposição dos indivíduos, no interior das residências, que é o caso da inalação dos isótopos do radônio e de seus produtos de decaimento de meia-vida curta. Pode-se afirmar que altas concentrações de radônio no interior de construções estão relacionadas à sua entrada no ambiente, por convecção, a partir do solo (Fernandes *et al.*, 2004).



Figura 1. Exemplo de radônio em materiais de construção.

1.4 | Radônio em Residências

Os átomos de radônio têm uma vida relativamente curta. Ele é um gás que consegue penetrar pelo solo e se misturar ao ar de uma casa. Uma das principais maneiras para o radônio entrar em uma casa é por meio do alicerce (espaços entre o solo e o assoalho), mas também ocorre por vários caminhos diferentes, tais como: rachaduras no assoalho de porões; drenos; bombas de esgoto; solo exposto; pontos de ligação da construção (argamassa, rochas, ligação entre o chão e a parede); canos frouxos ou soltos.

O radônio também pode entrar em uma casa pelo poço de água, mas é uma fonte de infiltração muito pequena se comparada com os demais.

Como o gás radônio não tem cheiro ou cor, torna-se obrigatória a realização de testes para sua detecção. O *Office of the Surgeon General* dos EUA (órgão correspondente ao Ministério da Saúde do Brasil), recomenda que se façam testes em todas as casas para detectar a presença de radônio, especialmente na hora de comprar, vender ou construir uma residência.

A ingestão de água, bem como a inalação de ar com altos níveis do gás radônio, pode representar um risco direto à saúde da população, uma vez que expõe à radiação ionizante células sensíveis dos aparelhos respiratório e gastrointestinal, possibilitando, assim, o adoecimento em virtude da ocorrência de alguns tipos de câncer nesses órgãos. Acredita-se que o radônio é um importante causador de câncer de pulmão, matando cerca de 10.000 americanos por ano. Somente o fumo de cigarros é que causa mais mortes por câncer de pulmão por ano (HyperPhysics, 2009).

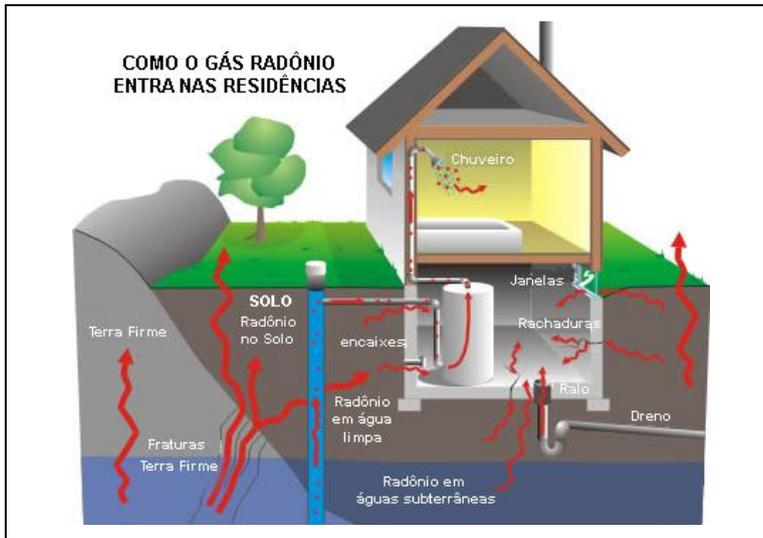


Figura 2. Radônio em residências.

1.5 | Testes de Emissão de Gás Radônio

Como os níveis de radônio podem variar de um dia para o outro e de uma estação para outra, os testes podem ser feitos durante períodos curtos (de dois a 90 dias) ou períodos longos (maiores que três meses).

Para realizar esses testes, colocam-se dispositivos de teste no nível habitado mais baixo da casa.

Os testes de radônio detectam o gás diretamente ou os núcleos filhos do decaimento radioativo dele. Há duas categorias de dispositivos para testar o radônio: passivo e ativo. Os dispositivos passivos não precisam de energia elétrica, costumam aprisionar o radônio ou seus núcleos filhos para análise posterior em um laboratório. Entre esses

dispositivos passivos estão as latas de carvão, detectores de cintilação líquida de carvão e detectores de trajetórias de partículas alfa.

A lata de carvão e os dispositivos de cintilação líquida de carvão absorvem o radônio ou seus núcleos filhos no carvão. No laboratório, as partículas radioativas emitidas do carvão são contadas, diretamente, por meio de um contador de iodeto de sódio ou convertidas em luz dentro de um meio de cintilação líquida, para depois serem contadas em um detector de cintilação.

Os detectores de trajetória de partículas alfa têm um filme plástico que fica marcado pelas partículas alfa que o atingem. No laboratório, o plástico é tratado quimicamente para deixar as trajetórias visíveis, o que possibilita a contagem delas.

1.6 | Limites Aceitáveis de Gás Radônio

A exposição ao gás Radônio ocorre por inalação, que causa contaminação interna pela deposição de sua energia de decaimento e dos “filhos” na massa dos tecidos e órgãos (dose). Entretanto, de acordo com os padrões básicos vigentes de proteção contra as radiações ionizantes e a segurança de fontes de radiação (SAFETY SERIES n° 115), qualquer exposição cuja magnitude ou probabilidade seja essencialmente de natureza tal que o estabelecimento de controles é considerado impraticável deve ser excluída de regulação. O valor de concentração de atividade usado como limite de exclusão é, de acordo com o guia de segurança da Agência Internacional de Energia Atômica (SAFETY STANDARDS SERIES No. RS-G-1.7), de 1 Bq/g para as séries do ^{238}U e ^{232}Th , sendo o valor referido ao precursor

("pai") de cada série e de 4 Bq/g para o ^{40}K . Esse valor foi determinado com base na distribuição global das concentrações de atividade desses radioisótopos em solos. (*) Bequerel.

Se esse valor de referência for observado, não é necessária nenhuma ação adicional para reduzir exposições de matérias contendo radioisótopos em teores abaixo do mesmo. Segundo a norma citada acima, o comércio nacional e internacional de *commodities* contendo ^{238}U e ^{232}Th com concentrações inferiores a 1 Bq/g não deverá ser sujeito ao controle regulatório para propósitos ligados a radioproteção. Para atividades que excedam o valor de referência por grande diferença (até 10 vezes maior), a autoridade regulatória poderá ou não exercer controle de acordo com uma avaliação caso a caso. Se couber, a severidade das medidas que poderão ser aplicadas dependerá do nível do risco associado ao material.

No caso específico da exposição ao radônio em residências, são previstas, de acordo com o *Safety Series* 115, ações em relação à exposição crônica quando os níveis de concentração média anual estiverem entre 200 e 600 Bq/m³. Normalmente, nesses casos inicia-se uma investigação sobre a origem do mesmo, o qual pode estar relacionado desde os diversos materiais de construção até as características do solo e histórico do sítio. Ações de remediação só são justificáveis em níveis superiores a 600 Bq/m³ de acordo com uma análise de custo-benefício, em que fatores socioeconômicos devem ser considerados. Por outro lado, não existe qualquer referência ou limite adotado quanto às taxas de exalação de matérias específicas, uma vez que a exportação dependerá das condições de utilização de cada material, além de vários outros parâmetros.

1.7 | Radiação

1.7.1 | Histórico

O elemento urânio foi descoberto em 1789 pelo químico e mineralogista alemão M. H. Klaproth enquanto preparava óxido amarelo (UO_3) de pecheblenda da Mina Georg Wagsfort de Johanngeorgenstadt, em Erzgebirge, na Saxônia – Alemanha. A radiatividade do urânio foi descoberta por Henri Becquerel, em 1896, e o elemento rádio foi isolado pelo casal P. Curie e M. Curie. O elemento tório foi descoberto em 1828, pelo químico suíço J.J. Berzelius. O tório foi isolado do mineral silicatado (ThSiO_4), com o nome de torita, encontrado em pegmatito na Noruega. A radioatividade de tório foi descoberta por Madame Curie e C. G. Schmidt, em 1898 (Frondele, 1958).

Em 1913, os físicos F. Soddy, A. Russell e K. Fajans, em trabalhos independentes, elaboraram uma generalização sobre as emissões alfa e beta, que ficou conhecida como Lei do Deslocamento: “Quando uma partícula alfa for emitida, o novo átomo será deslocado duas casas à esquerda na tabela periódica. E quando for emitida uma partícula beta, o novo átomo estará deslocado uma casa à direita na tabela periódica. Os radioelementos que caíssem na mesma posição da tabela periódica seriam quimicamente idênticos”. Soddy propôs, para os elementos deste último caso, o nome de isótopos^{1,8}.

Em 1903, Rutherford propôs a existência do núcleo atômico e verificou-se posteriormente que a radioatividade, com suas emissões alfa, beta e gama, era um fenômeno que ocorria com os núcleos instáveis de alguns elementos químicos. Este fenômeno ficou conhecido como decaimento radioativo, no qual os átomos do elemento original eram eventualmente

transformados em novos elementos. Também foi descoberto que a velocidade do decaimento por unidade de massa é fixa para qualquer radioelemento específico, não dependendo de sua composição química ou de seu estado físico; porém, varia drasticamente de um radioelemento para outro. O decaimento poderia ser expresso em termos de meia-vidas, que é o tempo que leva para a atividade de um radioelemento decair à metade do seu valor original.

Os resultados de análises de regiões com alta radiação de fundo (Kuroda, 1991) indicam que esta é proveniente da combinação terrestre e da radiação cósmica (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra etc.). Com relação à radioatividade na natureza (Brodsky, 1978), foi definido que o planeta Terra é radioativo e tem sido desde a sua criação. Na natureza existem mais de 60 radionuclídeos, elementos estes que podem ser caracterizados em três categorias: primordiais, desde a criação da Terra; cosmogênicos, formados com a interação dos raios cósmicos e oriundos da produção humana, acrescidos ou formados devido à ação do homem. Desta forma, radionuclídeos são encontrados no ar, água e solo, sendo; assim, produtos do ambiente terrestre.

A cada dia, o ser humano ingere ou inala nuclídeos do ar quando respira, come ou bebe, e até mesmo existem em matérias dos edifícios e casas. A radioatividade está em toda parte; portanto, não há onde se possa escapar dela. Existem mais de 1500 diferentes radionuclídeos. O nível de radiação é razoavelmente constante, de 8-15 $\mu\text{rad/h}$ na superfície da terra. A radiação cósmica interfere com a atmosfera para produzir radionuclídeos cósmicos, o que também é responsável pela dose de radiação presente no corpo humano.

No caso da exposição à radiação de indivíduos no interior de residências, deve ser levada em consideração a irradiação externa, que é ocasionada pela presença de radionuclídeos nos materiais de construção, exposição esta que depende, não só da concentração dos elementos radioativos, assim como da dimensão dos cômodos e dos padrões de ocupação dos mesmos, ou seja, do tempo que o indivíduo permanece no seu interior.

1.7.2 | Radioatividade

O esquecimento de uma rocha de urânio sobre um filme fotográfico virgem levou à descoberta de um fenômeno interessante: o filme foi velado (marcado) por “alguma coisa” que saía da rocha, na época denominada raios ou radiações.

Outros elementos pesados, com massas próximas à do urânio, como o rádio e o polônio, também tinham a mesma propriedade. O fenômeno foi denominado radioatividade e os elementos que apresentavam essa propriedade foram chamados de elementos radioativos.

Comprovou-se que um núcleo muito energético, por ter excesso de partículas ou de carga, tende a estabilizar-se, emitindo algumas partículas (Cnen).

Atualmente, segundo Medeiros (2005), definem-se radiações como sendo: ondas eletromagnéticas ou partículas que se propagam com alta velocidade e energia, e que, quando interagem com a matéria, podem produzir variados efeitos sobre ela.

Geralmente, elas podem ser geradas por fontes naturais (ex.: átomos instáveis em decaimento) ou por dispositivos desenvolvidos pelo homem (rádio AM, FM e forno de microondas).

Luz, micro-ondas, ondas de rádio AM e FM, laser, raios-X e radiação gama são as formas de radiação eletromagnéticas mais conhecidas. Já feixes de elétrons, feixes de prótons, partículas beta, partículas alfa e feixes de nêutrons são exemplos de radiação de partículas, ou seja, são radiações com massa, que podem originar de átomos de elementos químicos.

As radiações nucleares podem ser de vários tipos, mas, principalmente: partículas alfa (a), partículas beta (b) e radiação gama (g). Como indicado na Figura 3.

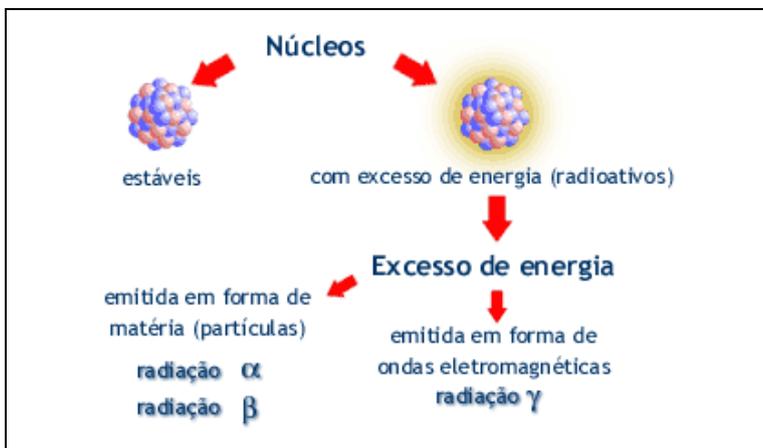


Figura 3. Tipos de radiação nucleares.

Radiação nuclear é um tipo de radiação originada no núcleo de determinados átomos de elementos químicos que não estão estáveis.

Núcleos atômicos instáveis, geralmente, de elevada massa atômica, emitem radiação alfa (Figura 4), que é constituída por dois prótons e dois nêutrons. Esta é a forma “mais rápida” de procurar a estabilidade, pois cada partícula alfa tem número de massa igual a quatro. Sendo assim, a cada partícula alfa emitida por um núcleo instável, a sua massa diminui de 4 unidades. Estas partículas liberadas possuem alta energia cinética, ou seja, alta “energia de movimento”, pois o núcleo, além de liberar os prótons e nêutrons, também libera energia, na forma de energia cinética das partículas. No entanto, essas partículas possuem baixo poder de penetração.

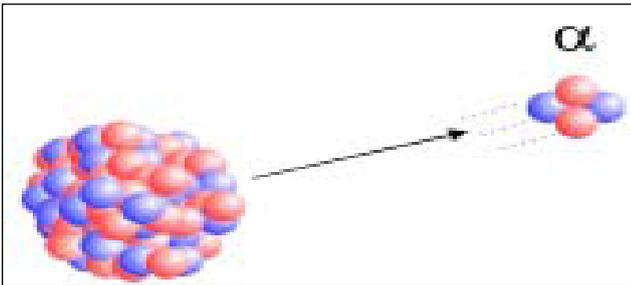


Figura 4. Formação de partículas L.

1.7.4 | Radiação Beta ou Partícula Beta

Uma outra forma de um núcleo atômico se estabilizar é quando existe um número bem maior de nêutrons do que de prótons. Nesse caso poderá ocorrer a transformação de um nêutron em um próton. Para esta transformação ocorrer, e a quantidade de

prótons aumentar em relação à de nêutrons, é necessário que ocorra a liberação de um elétron pelo núcleo atômico. Ou seja, o núcleo atômico irá emitir, liberar, um “elétron”, ou melhor, uma subpartícula carregada negativamente, também conhecida como partícula beta, ou beta menos.

Por outro lado, quando o número de nêutrons for insuficiente para estabilizar a quantidade de prótons presentes no núcleo atômico, poderá ocorrer a transformação de um próton em um nêutron. Para esta transformação ocorrer, será necessária a liberação de uma subpartícula positiva do núcleo atômico. Será emitida uma partícula beta positiva, também conhecida como pósitron.

As partículas beta (Figura 5) possuem alta energia cinética e poder de penetração superior ao das partículas alfa. O seu poder de penetração superior é devido ao fato da partícula beta possuir massa muito inferior à da partícula alfa. Mesmo que a aquela partícula possua carga (carga negativa, ou positiva), ela irá ter maior penetração, pois é mais leve e terá menor perda de energia. Entretanto, a sua penetração não será, ainda, muito alta. O seu poder de ionização também será considerável; no entanto, menor que o das partículas alfa, visto que a quantidade de cargas das partículas beta é inferior ao das partículas alfa.

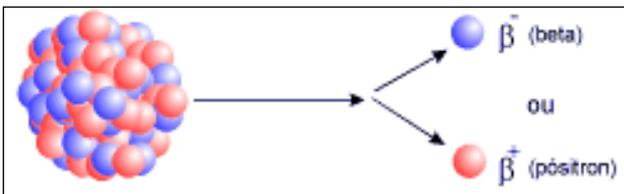


Figura 5. Formação de partículas B.

1.7.5 | Radiação gama ou raios gama

De uma forma geral, a radiação gama é emitida por um núcleo atômico, quando este emite outros tipos de radiação, seja ela alfa ou beta. A liberação de radiação gama é uma forma encontrada pelo núcleo para se “estabilizar” quando ocorre a liberação de alguma partícula nuclear, pois com esta emissão de partícula ainda resta energia em excesso no núcleo atômico, que deve ser liberada (transformação de massa em energia, segundo a equação: $E = mc^2$). A forma encontrada pelo núcleo para liberar esta energia é a partir de radiação gama, que é uma forma de energia eletromagnética.

A radiação gama (Figura 6), por ser uma onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, viaja com a mesma velocidade, ou seja, $300.000 \text{ km.s}^{-1}$.

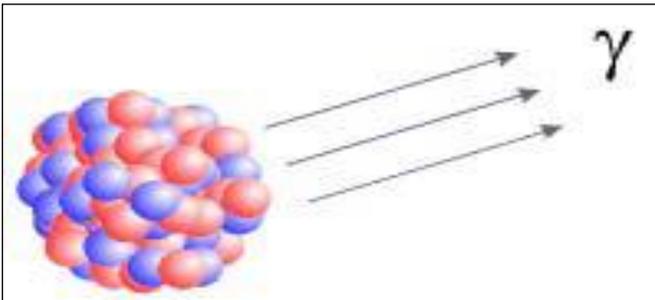


Figura 6. Formação de partículas γ .

Esta radiação é altamente penetrante, pois ela não possui massa. Isso acontece por ela não ser partícula, mas sim onda, além do fato dela não possuir carga elétrica nem positiva, nem negativa.

O poder de ionização desta radiação pode ser inferior ao das partículas beta e alfa. Isso irá depender do quão energética é a radiação gama. Por sua vez, o dano causado pela radiação gama pode, muitas vezes, ser bem maior do que os causados pelas radiações de partículas, pois, ela pode possuir alta energia, o que lhe confere alto poder de ionização. Isso é devido ao fato das moléculas e átomos possuírem elétrons, os quais podem ser retirados. No entanto, para serem retirados é necessária uma quantidade de energia tal (energia quantizada) que possibilite a ionização do composto (átomo ou molécula). É aí que a radiação gama pode agir, ou seja, ela irá quebrar a molécula, pois ela retirará os elétrons da ligação química. Logo, a sua capacidade de provocar danos é maior.

É um dos tipos de radiação que emite os núcleos dos átomos dos elementos radioativos naturais e artificiais; além disso, é uma radiação eletromagnética com um comprimento de onda extraordinariamente curto (menor que 1Å) e que, por isso, possui uma grande capacidade de penetração. Os raios gama surgem na desaceleração das partículas carregadas, na aniquilação de um par de antipartículas (eletron-pósitron, próton-antipróton etc.) na cisão espontânea ou artificial dos núcleos dos átomos de urânio e plutônio e em algumas outras reações nucleares, por exemplo.

1.7.6 | Partículas e Ondas

Conforme foi descrito, as radiações nucleares podem ser de dois tipos:

- i) partículas, possuindo massa, carga elétrica e velocidade, esta dependente do valor de sua energia;
- ii) ondas eletromagnéticas, que não possuem massa e se propagam com a velocidade de 300.000 km/s, para qualquer valor de sua energia. São da mesma natureza da luz e das ondas de transmissão de rádio e TV. A identificação desses tipos de radiação foi feita utilizando-se uma porção de material radioativo, com o feixe de radiações passando por entre duas placas polarizadas com um forte campo elétrico.

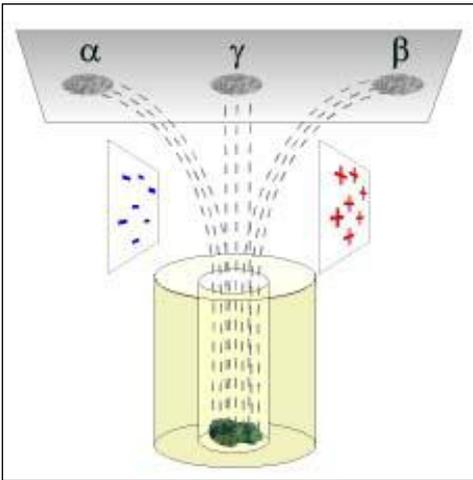


Figura 7. Partículas α , γ e β .

1.8 | Atividade de uma Amostra

Os núcleos instáveis de uma mesma espécie (mesmo elemento químico) e de massas diferentes, denominados radioisótopos, não realizam todas as mudanças ao mesmo tempo.

As emissões de radiação são feitas de modo imprevisto e não se pode adivinhar o momento em que um determinado núcleo irá emitir radiação. Entretanto, para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra é razoável esperar-se um certo número de emissões ou transformações em cada segundo. Essa “taxa” de transformações é denominada atividade da amostra.

1.8.1 | Unidade de Atividade

A atividade de uma amostra com átomos radioativos (ou fonte radioativa) é medida em:

Bq (Becquerel) = uma desintegração por segundo.

Ci (Curie) = $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

1.9 | Desintegração ou Tramutação Radioativa

Como foi visto, um núcleo com excesso de energia tende a estabilizar-se, emitindo partículas alfa ou beta.

Em cada emissão de uma dessas partículas, há uma variação do número de prótons no núcleo, isto é, o elemento se transforma ou se transmuta em outro, de comportamento químico diferente.

Essa transmutação também é conhecida como desintegração radioativa, designação não muito adequada, porque dá a ideia de desagregação total do átomo e não apenas da perda de sua integridade. Um termo mais apropriado é decaimento radioativo, que sugere a diminuição gradual de massa e atividade.

1.9.1 | Meia – Vida

Cada elemento radioativo, seja natural ou obtido artificialmente, se transmuta (se desintegra ou decai) a uma velocidade que lhe é característica.

Para se acompanhar a duração (ou a “vida”) de um elemento radioativo foi preciso estabelecer uma forma de comparação.

Meia-vida, portanto, é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzida à metade da atividade inicial.

Isso significa que, para cada meia-vida que passa, a atividade vai sendo reduzida à metade da anterior, até atingir um valor insignificante, que não permite mais distinguir suas radiações das do meio ambiente. Dependendo do valor inicial, em muitas fontes radioativas utilizadas em laboratórios de análise e pesquisa, após 10 (dez) meias-vidas, atinge-se esse nível. Entretanto, não se pode confiar totalmente nessa “receita” e sim numa medida com um detector apropriado, pois, nas fontes usadas na indústria e na medicina, mesmo após 10 meias-vidas, a atividade da fonte ainda é geralmente muito alta.

1.10 | Radônio

Radônio (Rn) é um gás incolor, inodoro e sem sabor, além de ser 7,58 vezes mais pesado que o ar e mais de cem vezes mais pesado que o hidrogênio natural, se origina do rádio, um membro das séries de decaimento do urânio e tório. Está presente em praticamente todos os lugares da crosta terrestre, e por ser um gás, tem a propriedade de se acumular em ambientes fechados como residências, construções, cavernas, minas e túneis. O isótopo ^{222}Rn é um emissor alfa ($T_{1/2} = 3,82$

dias) e, juntamente com seus filhos não gasosos ^{218}Po e ^{214}Po , são responsáveis por aproximadamente 50% da dose efetiva equivalente produzida pela radiação ionizante natural. Existe também o ^{219}Rn e o ^{220}Rn , que são produtos da série de decaimento do ^{235}U e ^{232}Th , respectivamente. Eles têm o tempo de meia-vida muito pequeno quando comparado ao ^{222}Rn , sendo o do ^{219}Rn de 3,96 segundos e o do ^{220}Rn de 55,6 segundos; assim, o radônio-222 é o único capaz de migrar para dentro das casas e gerar preocupações na área da saúde (Chyi, 2008).

O gás radônio é totalmente natural e se forma durante o decaimento do urânio-238, ou seja, tudo começa com átomo de urânio-238. A Tabela 1, abaixo, ilustra o decaimento do Urânio-238 até chegar ao Chumbo-206 (Craig).

Tabela 1. Decaimento do Urânio-238.

Elemento Original	Elemento Transformado	Tempo de meia-vida	Emissão
Urânio - 238	Tório - 234	4,5 bilhões de anos	Uma partícula alfa
Tório - 234	Protactínio - 234	24,5 dias	Uma partícula beta e um raio gama
Protactínio-234	Tório - 230	269 mil anos	Uma partícula beta e um raio gama
Tório - 230	Rádio - 226	83 mil anos	Uma partícula alfa e um raio gama
Rádio - 226	Radônio - 222 *	1590 anos	Uma partícula alfa e um raio gama
Radônio - 222 *	Polônio - 218	3,925 dias	Uma partícula alfa
Polônio - 218	Chumbo - 214	3,05 minutos	Uma partícula alfa
Chumbo - 214	Bismuto - 214	26,8 minutos	Uma partícula beta e um raio gama
Bismuto - 214	Tálio-210 ou Polônio-214	19,7 minutos	Uma partícula alfa ou uma beta e um raio gama
Polônio - 214	Tálio - 210	150 microssegundos	Uma partícula alfa
Tálio - 210	Chumbo - 210	1,32 minutos	Uma partícula beta
Chumbo - 210	Bismuto - 210	22 anos	Uma partícula beta e um raio gama
Bismuto - 210	Polônio - 210	5 dias	Uma partícula alfa e um raio gama
Polônio - 210	Chumbo - 206 **	138 dias	Uma partícula alfa e um raio gama

* Esse átomo de radônio é um átomo que forma um gás e que tem meia-vida de apenas 3,825 dias. O acúmulo de átomos de radônio, resultante do decaimento espontâneo de Urânio-238, é a origem do gás radônio, o que significa que as concentrações desse gás são maiores nos locais em que o urânio é mais abundante no solo.

** É um isótopo estável do chumbo.

2 | OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi verificar o processo de emissões radioativas, especificamente o radônio, em rochas utilizadas para fins ornamentais.

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram analisados três tipos de amostras de granitos, conhecidos comercialmente como: *Crema Bordeaux*, *Mombassa* e *Golden* apresentados nas Figuras 8-10. Estes foram selecionados devido à alta taxa de exportação para a utilização desses granitos na construção civil internacional. As amostras encontravam-se na forma de placas (15 cm x 30 cm x 02 cm) polidas e sem resina. Foram feitos dois tipos de estudos para avaliar a taxa de emissão de gás ^{222}Rn nestas, sendo um necessário o preparo das amostras e outro utilizando as rochas no seu estado natural.



Figura 8. Granito Crema Bordeaux.



Figura 9. Granito Mombassa



Figura 10. Granito Golden

3.1 | Rochas no Estado Natural

O estudo onde não foi necessário qualquer tipo de preparação da amostra consiste de uma câmara de aço inox com 20L e tampas removíveis seladas para retenção do gás. As tampas foram previamente testadas para que houvesse a constatação de nenhum vazamento. Neste trabalho, foram postas, juntamente, duas placas de rochas ornamentais, com as medidas já mencionadas anteriormente, onde foram deixadas neste sistema durante 7 a 8 dias. O gás formado é injetado em um analisador de gás radônio Alpha Guard 2000 PRQ (Genitron Instruments) em ciclos de 1-2 horas. Durante o período de avaliação, há o acionamento de um micro-ventilador, que se encontra dentro da câmara, para que haja a circulação do ar interno e assim uma melhor constatação na

medida do gás pelo aparelho utilizado. O crescimento da atividade do radônio na câmara permite estimar o valor da atividade final para um período correspondente a 7 meias-vidas do radônio.

É possível saber a taxa de emissão do gás de cada amostra dentro da câmara por meio da equação 1.

$$A_t = A_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad [1]$$

onde λ é a constante de decaimento do nuclídeo em questão e A_0 é o valor final da atividade durante $t \sim 7 T_{1/2}$, aproximadamente 27 dias no caso do gás Rn. A unidade da atividade final A_0 é Bq.m^{-3} . Esse valor multiplicado pela constante de decaimento do radônio ($\lambda = 2,724 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$) e pela razão entre o volume do recipiente ($V = 20,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) e a área do granito, F , permite obter a taxa de exalação de radônio por unidade de área deste granito, que é definida como o fluxo de radônio liberado da superfície do material analisado, E , em $\text{Bq.m}^{-2}.\text{seg}^{-1}$, ou seja, Becquerel por metro quadrado por segundo, representado na equação 2.

$$E = A_0 \lambda (V / F) \quad [2]$$

Tendo em vista a comparação da emissão de gás radônio com a quantidade de rádio nas amostras, foi calculada a “taxa final de emissão de Rn por unidade de massa” com unidade em Bq.kg^{-1} , usando a equação 3.

$$C_{\text{Rn}} = (A_0 V) / m \quad [3]$$

onde m é a massa da amostra e A_0 e V já foram definidos nas Eqs. [1] e [2], respectivamente.



Figura 11. Foto da aparelhagem utilizada para a análise das amostras no Estado Natural.

3.2 | Rochas Moídas

Já para o estudo onde foi necessário o beneficiamento das amostras, se deu através de uma análise por espectro-gama. Para tal, foi feita a britagem, moagem e peneiramento a seco.



Figura 12. Britagem.



Figura 13. Moagem.



Figura 14. Peneiramento a seco – Rotap.

A britagem é um processo primário de cominuição. O número de estágios de britagem depende do tamanho da alimentação e da qualidade do produto final. O controle da granulometria e formato da brita passam a ficar mais precisos de acordo com as etapas secundária, terciária e quaternária (fabricação de areia). Neste trabalho, as placas das amostras foram britadas e levadas para a moagem, onde houve a conversão a pó ou

pulverização com o auxílio de um pulverizador (Fritsch). O pulverizador foi utilizado com cautela, pois as amostras deveriam, na sua maioria, ficar entre 0,177 mm e 0,149 mm, após o peneiramento, para se obter um melhor rendimento na análise espectro-gama. Logo, foram postas pequenas quantidades de amostra no recipiente do pulverizador (feito de titânio para evitar qualquer tipo de contaminação das amostras), em 400 r.p.m. durante 2 minutos.

Ao retirar as amostras moídas, estas eram postas numa pilha de peneiras de 2,360 mm (para retirar as bolas de titânio do pulverizador), 0,177 mm e 0,149 mm, respectivamente, foram levadas para o Rotap, aparelho de peneiramento com agitação, onde ficaram por cerca de dez minutos, para que houvesse a total separação da amostra nas peneiras. Apesar de se querer as amostras entre 0,177 mm e 0,149 mm, também foram utilizadas as outras amostras que se encontravam abaixo de 0,149 mm. Antes de misturar e homogeneizar estas, foi feita a análise granulométrica, onde se calculou a percentagem de quanto estava acima ou abaixo de 0,149 mm.



Figura 15. Amostras pulverizadas.

Após o beneficiamento, as amostras estavam prontas para a análise espectro-gama. Estas foram acondicionadas em recipientes, onde permaneceram em repouso por 30 dias antes de serem medidas no detector (necessário para atingir o equilíbrio secular). Foram empregados detectores de espectrometria gama de alta pureza (Germânio HPGe) que permitiu a identificação da emissão gama do ^{40}K e dos filhos das séries do U e Th. O tempo de contagem para determinação da concentração de atividade desses nuclídeos, em Bq/g, varia de 8 a 16 horas, de acordo com a atividade do material. Assim, foi possível comparar os resultados obtidos com o limite de exclusão preconizado pela AIEA.



Figura 16. Aparelho de Análise Espectrogama.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 | Avaliação da Taxa de Emissão de Gás ^{222}Rn

A Figura 17 representa os resultados do teste de avaliação da taxa de emissão de gás radônio nas amostras em seu estado natural. Nela pode ser observado que essas taxas foram muito baixas: $3,10 \times 10^{-3}$ (Bq/m²/s), $1,60 \times 10^{-3}$ (Bq/m²/s), $6,84 \times 10^{-4}$ (Bq/m²/s) para as amostras do *Crema Bordeaux*, *Mombassa* e *Golden*, respectivamente.

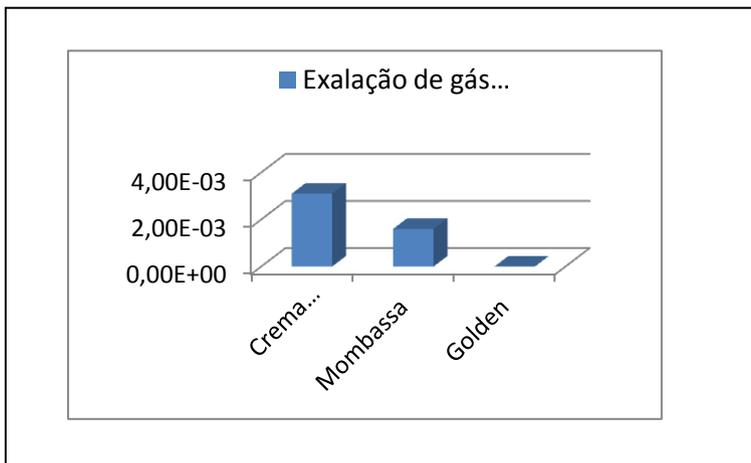


Figura 17. Taxa de emissão de radônio em cada amostra no seu estado natural.

4.2 | Análise Radiométrica/Radioquímica

A Figura 18 apresenta os resultados das análises realizadas em três amostras. As determinações de Ra, K, Th e Gama foram realizadas após o equilíbrio dos radionuclídeos (30 dias) e com um detector de germânio, conforme dito anteriormente

na metodologia. As determinações foram feitas por contagens alfa e beta, em um detector proporcional de baixo background, após separações químicas e as medidas de Tório por espectrometria com arsenazo III.

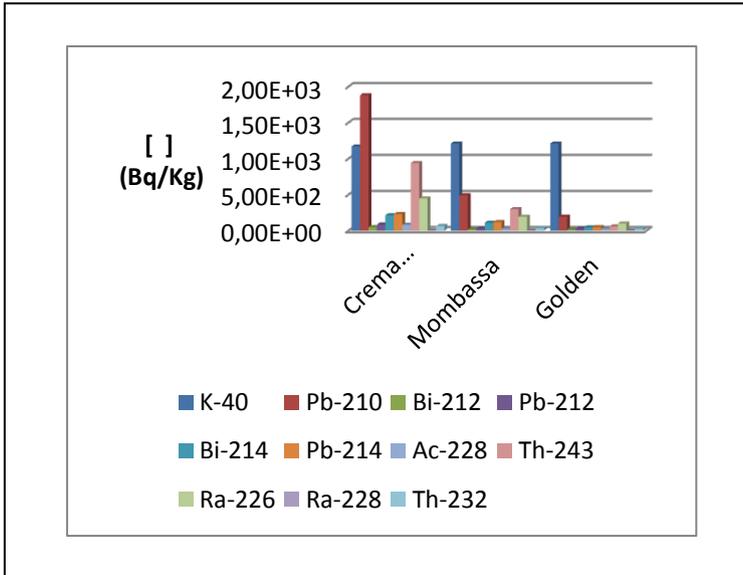


Figura 18. Distribuição dos Radionuclídeos nas Amostras.

A exposição à radiação se deve, principalmente, aos seguintes radionuclídeos determinados na Figura 19. Dos elementos de ^{40}K , ^{232}Th e ^{226}Ra são formados, por suas séries de decaimento, os gases radioativos ^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn , respectivamente.

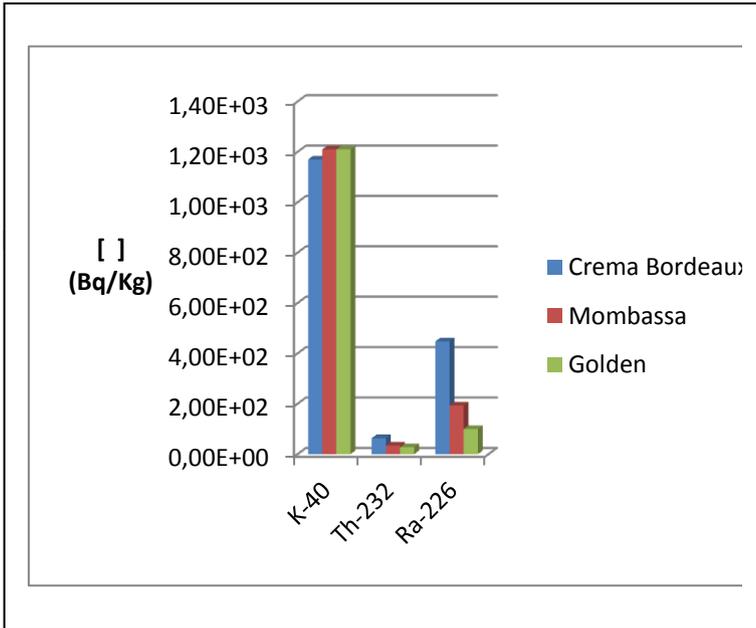


Figura 19. Principais Radionuclídeos.

4.3 | Análise Granulométrica por Peneiramento

As Tabelas 2, 3 e 4 indicam os resultados da análise granulométrica feita nas amostras de *Crema Bordeaux*, *Mombassa* e *Golden*, respectivamente. Devido à dificuldade de controle do grau de pulverização das rochas observou-se que a maior parte da fração granulométrica ficou abaixo de 0,149 mm em todas as amostras.

Tabela 2. Análise Granulométrica do Crema Bordeaux.

Fração Granulométrica (mm)	Massa (g)	Massa (%)	Massa Ac. (%)	Massa Pass. (%)
+ 0,177	0,00	0,00	0,00	100,00
- 0,177 + 0,149	119,23	10,29	10,29	89,71
-0,149	1039,00	89,71	-	-
Total	1158,23	100,00	-	-
m. inicial	1.158,23	-	-	-

Tabela 3. Análise Granulométrica do Mombassa.

Fração Granulométrica (mm)	Massa (g)	Massa (%)	Massa Ac. (%)	Massa Pass. (%)
+ 0,177	0,00	0,00	0,00	100,00
- 0,177 + 0,149	279,00	16,52	16,52	83,48
-0,149	1410,00	83,48	-	-
Total	1689,00	100,00	-	-
m. inicial	1.689,00	-	-	-

Tabela 4. Análise Granulométrica do Golden.

Fração Granulométrica (mm)	Massa (g)	Massa (%)	Massa Ac. (%)	Massa Pass. (%)
+ 0,177	0,00	0,00	0,00	100,00
- 0,177 + 0,149	198,70	10,59	10,59	89,41
-0,149	1678,00	89,41	-	-
Total	1876,70	100,00	-	-
m. inicial	1.158,23	-	-	-

5 | CONCLUSÕES

De acordo com os resultados desse trabalho, observou-se que a taxa de exalação de gás radônio nas amostras analisadas foi muito pequena. Tendo o ^{222}Rn , radionuclídeo mais perigoso para a saúde humana, apresentado menores taxas de exalação de todos os tipos de radônio. Também pode-se observar que o parâmetro físico como porosidade não interfere significativamente na taxa de exalação entre os granitos, pois em todas as análises feitas foi vista uma boa correlação. Aparentemente, o granito Mombassa foi o que apresentou discrepância no parâmetro das correlações quando comparado com os outros estudados. Assim, pode-se concluir que os granitos analisados nesse estudo não apresentaram índices preocupantes no que tange à exalação de gás radônio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIROCHAS, 2004. Catálogo de Rochas Ornamentais do Brasil. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. [Http://www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br).
- ANJOS, R. M. *et al.*, 2004. Natural Radionuclide Distribution in Brazilian Commercial Granites, Radiation Measurements.
- ANJOS, R. M., R. Veiga, T. Soares, A. M. A. Santos, J. G. Aguiar, M. H. B .O. Frascá, J. A. P. Brage, D. Uzêda, L. Mangia, A. Facure, B. Mosquera, C. Carvalho and P. R. S. Gomes, 2004. Natural Radionuclide Distribution in Brazilian Commercial Granites, Radiation Measurements.
- BRODSKY, A., 1978. Handbook of Radiation Measument and Protection. CRP Press <http://www.physics.isu/radiumf/natural.html>.
- CHIODI Filho C., Rodrigues, E. de P., 1996. Panorama Sobre o Mercado Nacional e Internacional de Rochas Ornamentais. A terra em Revista, Revista Técnica e Informativa da CPRM, II, 1, p. 40-49.
- CHYI, L. L., 2008. Radon Testing of Varius Countertop Materials Final Report.
- Cnen. <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>, acessado em 20 de janeiro de 2009.
- COSTA, A. G., Campello, M. S., Pimenta, V. B., 2000. Rochas Ornamentais e de Revestimento de Minas Gerais: Principais Ocorrências, Caracterização e Aplicações na Indústria da Construção Civil. Geonomos, 8, 1 e 2, 9-13.
- CRAIG Freudenrich, Ph.D. e Marshall Brain, <http://ciencia.hsw.uol.com.br/radonio1.htm>, acessado em 12 de dezembro de 2008.

- FERNANDES, H.M., Rio, M. A. P., Franklin, M.R. Impactos Radiológicos da Indústria do Fosfato. Série Estudos & Documentos, nº 56, ISSN 0103-6319, CETEM, 2004.
- FRASCÁ, M. H. B. de O., Quitete E. B., Mano E. S., 1998. Aspectos Petrográficos da Deterioração de Rochas Ornamentais Utilizadas em Revestimento. In. SGB, Cong, Bras, Geol., 40, Belo Horizonte, Boletim de Resumos, 305.
- FRAZÃO, E. B., 1992. Caracterização Tecnológica de Rochas de Revestimento. Rochas de Qualidade; Granitos, Marmores e Rochas Ornamentais; Rio de Janeiro, Edição 110. p. 110-113.
- FRONDEL, C., 1958. Systematic Mineralogy of Uranium and Thorium. Washington, Geological Survey, (Bulletin 1064). 399pp.
- HyperPhysics, <http://hyperphysics.phy-astr.gu.edu/hbase/nuclear/radon.html>, acessado em 20 de janeiro de 2009.
- IARC - Agência Internacional de Pesquisa em Câncer.
- KURODA, P. K., 1991. The origin of chemical elements and the Oklo phenomenon. Berlin; New York: Springer-Verlag. Vol. 155, nº 2; p. 107-113.
- MONTANI, Carlo. STONE 2000; Repertorio Economico Mondiale.
- MEDEIROS, M. A. <http://www.quiprocura.net/radianuclear.htm>, acessado em 21 de janeiro de 2009.
- NERY, M. A. C., Silva, E. A. da., 2001. Sumário Mineral – DNPM, Rochas Ornamentais e de Revestimento. (<http://www.dnpm.gov.br/sm>).
- Office of the Surgeon General – OSG, <http://www.surgeongeneral.gov/>, acessado em 25 de fevereiro de 2009.
- OLIVEIRA, S. F., Costa, A. G., 1998. Relações Entre a Petrografia e os índices Físicos de Mãmores, Quarzitos e Granitos Ornamentais. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, Boletim de Resumos, 323.

ROSA, R., Exposição Potencial a Radiação Natural no Interior de Residências Devido ao Uso do Fosfogesso na Indústria da Construção Civil. Tese de Mestrado. Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade de Federal do Rio de Janeiro. 122p. (1997).

USEPA - United States Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/>, acessado em 21 de janeiro de 2009.

WANG, N., Xiao, L., Li, C., Huang, Y., Pel, S., Liu, S., Xie, F., Cheng, Y., 2005. Determination of Radioactivity Level of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in Surface Medium in Zhuhai City by in-situ Gamma-ray Spectrometry.

WEDEPOHL, K. H., 1978. Handbook of Geochemistry. Springer-Verlag. Berlim, Heidelberg, New York. Vol. 1/5.

WHITFIELD J. M., Rogers J. J. W. and Adams J. A. S., 1959, the relationship between the petrology and the thorium and uranium contents of some granitic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 17, 248-271.

SALA, Humberto Terrazas, 2001. Minerais radioativos em rochas graníticas ornamentais e de revestimento: aspectos químico-mineralógicos e implicações ambientais.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2010, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-70—Utilização de Resíduos Oriundos do Corte de Mármore como Carga na Indústria de Papel. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Adriano Caranassios (in memoriam) e Beatriz Martins Morani, 2014.

STA-69—(Eco)toxicologia de Metais em Solos: Conceitos, métodos e interface com a geoquímica ambiental. Ricardo Gonçalves Cesar, Zuleica Carmen Castilhos, Ana Paula de Castro Rodrigues, Edison D. Bidone, Silvia Gonçalves Egler e Helena Polivanov, 2014.

STA-68—Recuperação de Metais Contidos em Catalisadores de Craqueamento Catalítico Esgotados. Flávio de Almeida Lemos e Ivan Ondino de C. Masson, 2013.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3867-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.