



## Correlação entre emissão de gás radônio e porosidade de rochas ornamentais do Estado do Ceará, Brasil.

Leiliane Rufina Pereira de Azevedo<sup>1</sup>, Antonio Carlos Artur<sup>2</sup>,  
 Daniel Marcos Bonotto<sup>2</sup>, José de Araújo Nogueira Neto<sup>3</sup>

Recebido 18 de fevereiro de 2014/ Aceito em 15 de maio de 2014

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Av. 24-A Nº 1515, C.P. 178, CEP 13506-900. Rio Claro, São Paulo, Brasil. Endereço eletrônico: leili\_ane@hotmail.com; <sup>2</sup> Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Av. 24-A Nº 1515, C.P. 178, CEP 13506-900. Rio Claro, São Paulo, Brasil. Endereços eletrônicos: acartur@rc.unesp.br; dbonotto@rc.unesp.br; <sup>3</sup> Departamento de Geologia, Centro de Ciências e Ciências Exatas, Universidade Federal do Ceará (UFC), Av. Humberto Monte, s/n, CEP 60455-790, Campus do Pici, Blocos 912/913. Fortaleza, Ceará, Brasil. Endereço eletrônico: nogueira@ufc.br

### Resumo

O presente artigo efetua correlações entre teores de emissão de gás  $^{222}\text{Rn}$  e correspondentes índices de porosidade para treze amostras de rochas ornamentais graníticas do Estado do Ceará. Para tanto, são efetuadas determinações dos índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água), dos teores de U, do monitoramento de emissão do gás radônio por período de 25 dias em condições de confinamento, das amostras sob vácuo e estudos das características petrográficas das rochas, com ênfase para o estado microfissural. As rochas pesquisadas forneceram baixos valores de emissão de gás radônio, entre 11,3 Bq/m<sup>3</sup> e 715,3 Bq/m<sup>3</sup> (equivalentes a 0,09 Bq/kg e 6,04 Bq/kg), para teores de U entre 0,2 ppm e 13,6 ppm. As correlações entre os diversos resultados mostram que a rede microporosa da rocha é determinante na taxa de emissão do gás radônio, sobrepondo-se, inclusive, à influência dos próprios teores de U presente nas rochas. Os resultados também revelam que a quantidade de gás radônio emanado pelas rochas é bastante pequena quando comparada com a quantidade originada pelo decaimento do  $^{238}\text{U}$ . A percentagem de gás emanado em relação ao total gerado pelas rochas oscila entre 0,4% e um máximo de 4,2%.

Palavras chave: Rochas ornamentais, Índices físicos, Porosidade, Emissão, Gás radônio.

### Abstract

*This article makes correlations between levels of gas  $^{222}\text{Rn}$  emanation rates and corresponding porosity for thirteen samples of granitic rocks ornamental State of Ceará. For both determinations of physical*

*indexes (bulk density, apparent porosity and water absorption), the levels of U, monitoring emanation of radon gas are made for a period of 25 days in confinement conditions of the samples under vacuum and petrographic studies of the characteristics rocks, with emphasis on the microfissural state. The sampled rocks provided low values of radon gas emanation between 11.3 Bq/m<sup>3</sup> and 715.3 Bq/m<sup>3</sup> (equivalent to 0.09 Bq/kg and 6.04 Bq/kg) amounts to between U 0.2 ppm and 13.6 ppm. The correlations between the various results show that the microporous network of the rock is determinant in the rate of emanation of radon gas, overlapping, including the influence of own levels of U present in the rocks. The results also show that the amount of radon gas emanating from the rock is small enough compared to the decay caused by the amount of <sup>238</sup>U. The proportion of gas emanating relative to the total generated by rocks ranging between 0.4% and a maximum of 4.2%.*

*Keywords: dimension stone, physical indexes, porosity, emanation, radon gas.*

## INTRODUÇÃO

O radônio, descoberto em 1899 por Robert B. Owens e Ernest Rutherford, é um gás inodoro, incolor e insípido que pertence à família dos gases nobres, proveniente do decaimento do rádio. Apresenta três isótopos: o <sup>219</sup>Rn, o <sup>220</sup>Rn e o <sup>222</sup>Rn, respectivamente produtos da série de decaimento radioativo do <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th e <sup>238</sup>U. Dentre estes isótopos, o <sup>222</sup>Rn é o mais estável e o que apresenta a maior meia-vida dentre os três, 3,85 dias, permitindo que o mesmo migre por distâncias maiores a partir da sua origem.

Aproximadamente 55% da radiação incidente sobre o ser humano é proveniente do gás radônio e seus produtos de decaimento, segundo a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP). Por ser um gás, o radônio migra através dos poros, falhas e fissuras das rochas e solos, como também por dissolução nas águas subterrâneas e superficiais, verificando-se sua incorporação na fase líquida quando ele percola a fase sólida portadora de <sup>226</sup>Ra, com ou sem a presença de <sup>238</sup>U, e também quando a fase líquida localiza-se numa distância correspondente à do alcance de difusão do gás emanado (BOWIE e PLANT, 1983 *apud* BONOTTO, 1986).

A concentração de gás radônio no ar é inconstante, variando muito de lugar para lugar,

principalmente devido à variabilidade da composição do solo e das rochas. Sua transferência para o meio atmosférico depende de alguns fatores, dentre eles a rede porosa das rochas como fraturas, microfissuras, poros, tipos de contatos minerais que desempenham um papel fundamental na maior ou menor difusão do referido gás.

Além disso, fatores ligados aos diferentes tipos de rochas e suas distintas naturezas geológicas com variações composicionais, texturais e estruturais, assim como os diferentes padrões de micro-descontinuidades internas de cada rocha, podem influenciar na dinâmica de escape do gás radônio para a atmosfera.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente trabalho foram selecionadas treze rochas ornamentais e para revestimento com diferentes aspectos composicionais, texturais e estruturais exploradas no Estado do Ceará. Os materiais selecionados correspondem a rochas magmáticas representadas essencialmente por sienogranitos, comercialmente designadas como de Juparaná Gold, Verde Ceará, Verde Light, Vermelho Filomena, Red Dragon, Yellow Tropical, Branco Cristal Quartzo e Rosa

Iracema, além de dois ákali-feldspatos granitos conhecidos como Branco Ceará e Branco São Paulo, um granodiorito comercializado como Cinza Prata, um monzogranito com a denominação de Cinza Ouro Branco e o pegmatito Infinity Gold. Todos os materiais apresentam padrões estéticos valorizados e com grande aceitação pelos mercados nacional e internacional.

As atividades laboratoriais envolveram a análise petrográfica, a determinação dos índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água), o monitoramento da emissão do  $^{222}\text{Rn}$  e a determinação dos teores de urânio das referidas rochas ornamentais com o intuito de se avaliar a influência dos aspectos petrográficos, e consequente porosidade destes materiais, na difusão e escape do gás radônio das rochas para a atmosfera. Os teores de U foram obtidos por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) na Acme Analytical Laboratories Ltd., do Canadá, e as demais análises e ensaios foram realizados no Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE/UNESP.

A análise petrográfica foi realizada de acordo com as diretrizes da norma da ABNT NBR 15845 - anexo A (ABNT, 2010a) acatando, também, recomendações apresentadas por Rodrigues *et al.* (1997) e Navarro (1998) na caracterização petrográfica para rochas ornamentais e de revestimento, com ênfase nos aspectos texturais (dimensões; formas; distribuição e arranjo dos minerais), estado de alteração dos minerais (inalterados/alterados e, se alterados, tipos e intensidade de alteração), estrutura (anisotropia ao nível macro e microscópico), bem como o tipo e intensidade de microfissuramentos (intragrãos; intergrãos; transgranulares; fissuras abertas ou preenchidas e tipos de preenchimentos).

Os índices físicos foram obtidos em consonância com os procedimentos da norma ABNT NBR 15845 - anexo B (ABNT 2010b). A determinação dos índices físicos, especialmente a porosidade aparente, fornece informações sobre a rede porosa da rocha. Estas propriedades refletem a sanidade e a presença de micro-descontinuidades nas rochas como, por exemplo, vazios que podem ser correlacionados com poros ou fraturas, os quais facilitam a difusão do referido gás.

O monitoramento da emissão de gás radônio das rochas foi realizado utilizando a técnica de detecção ativa acondicionando as amostras das rochas em garrações do tipo Pirex® de 19 litros, em condição de vácuo, lacrados com rolhas de borracha acopladas a um sistema de válvulas para permitir a retirada de ar interno do garrafão e de impedir a sua entrada e de conectar o sistema ao detector. No presente trabalho, o monitoramento do gás  $^{222}\text{Rn}$  foi efetuado por meio de ciclos pré-definidos de 5, 10, 15, 20 e 25 dias de confinamento para cada variedade das rochas ornamentais estudadas. Após cada período de confinamento, o garrafão contendo a amostra foi conectado ao aparelho de medição da emissão de radônio, AlphaGUARD (Professional Radon Monitor) da Empresa Saphymo GmbH, através de tubos plásticos flexíveis e a uma bomba para fazer circular o ar de dentro do garrafão para o aparelho. Descrição detalhada dos procedimentos para o monitoramento do gás radônio, fases de confinamento das amostras e respectivas leituras da emissão do  $^{222}\text{Rn}$ , incluindo equipamentos utilizados, constam nos trabalhos de Amaral (2011), Amaral *et al.* (2012) e Artur *et al.* (2013).

## **ANÁLISE PETROGRÁFICA**

A análise petrográfica é de fundamental importância no reconhecimento e classificação

do material pétreo a ser utilizado como rocha ornamental e para revestimento e, conseqüentemente, para a avaliação dos respectivos comportamentos tecnológicos, de alterabilidade e radiométricos.

No caso dos estudos radiométricos, objeto do presente trabalho, as principais propriedades petrográficas se relacionam à presença de minerais detentores de elementos radioativos como U e Th, responsáveis pela geração do radônio, e aos aspectos estruturais e texturais que interferem no desenvolvimento da rede porosa da rocha de forma a dificultar ou facilitar a difusão do gás radônio com conseqüente escape para o meio exterior. Neste último caso se incluem descontinuidades físicas caracterizadas por planos de foliação, efeitos de brechação e cataclase, microfissuramentos, planos de clivagens relacionados à megacristais com baixa energia de crescimento, interfícies minerais em rochas de granulação grossa a pegmatóide, bem como de processos de transformações minerais, os quais no conjunto acabam por facilitarem a difusão e escape do gás radônio. A seguir é fornecida uma breve caracterização petrográfica das rochas estudadas, cujas fotografias das placas polidas são expostas na Prancha 1.

As rochas ornamentais Juparaná Gold, Verde Ceará, Verde Light, Vermelho Filomena, Red Dragon e Yellow Tropical pertencem ao batólito Granítico Meruoca, situado a noroeste da cidade de Sobral.

A variedade **Juparaná Gold** (ortoclásio sienogranito - Prancha 1-JG) apresenta estrutura isotrópica e textura inequigranular hipidiomórfica de granulação média a média-grossa, entre 0,3 mm até 15,0 mm, com predomínio entre 1,0 e 10,0 mm. Como minerais acessórios ocorrem biotita (5,9%), fluorita (0,5%), opacos (0,4%), zircão (0,2%) e traços de apatita. Exibe 0,68 microfissuras/mm<sup>2</sup>, com 80,4% do

tipo intragrãos, 19,6% intergrãos e/ou transgranulares. Cerca de 49,2% são intragranulares preenchidas e apenas 7% das intergrãos apresentam preenchimentos. As dimensões das microfissuras oscilam de 0,5 mm e 5,0 mm, com predominância de 1,0 mm a 2,0 mm. No geral se trata de rocha medianamente alterada, argilizada e de aspecto intempérico.

O **Verde Ceará** (ortoclásio sienogranito com hornblenda e fayalita - Prancha 1-VC) apresenta estrutura isotrópica e granulação média a média-grossa, de aspecto estético bastante homogêneo. A textura é fanerítica inequigranular, hipidiomórfica, com granulação oscilando de 3,0 mm a 25,0 mm e predominância entre 4,0 mm e 10,0 mm. Os minerais acessórios são anfíblio (3%), biotita (1,5%), zircão (0,4%), fluorita (0,4%), fayalita (0,4%), titanita (0,2%) e traços de opacos, allanita e apatita. Os minerais secundários chegam a cerca de 2,5%, sendo 0,7% de iddingsita, além de epidoto, clorita, sericita/muscovita, óxidos e hidróxidos de ferro e efeitos de argilização sobre feldspatos. O grau de microfissuramento é médio, 0,55 microfissuras/mm<sup>2</sup>, apresentando 77% do tipo intragrãos e 23% intergrãos e/ou transgranulares, sendo 55,3% das intragrãos preenchidas e 11% intergrãos com algum preenchimento. As microfissuras apresentam dimensões variando de 0,3 mm a 5,0 mm, com predomínio de 1,0 mm a 2,0 mm. O grau de alteração mineral é fraco a moderado.

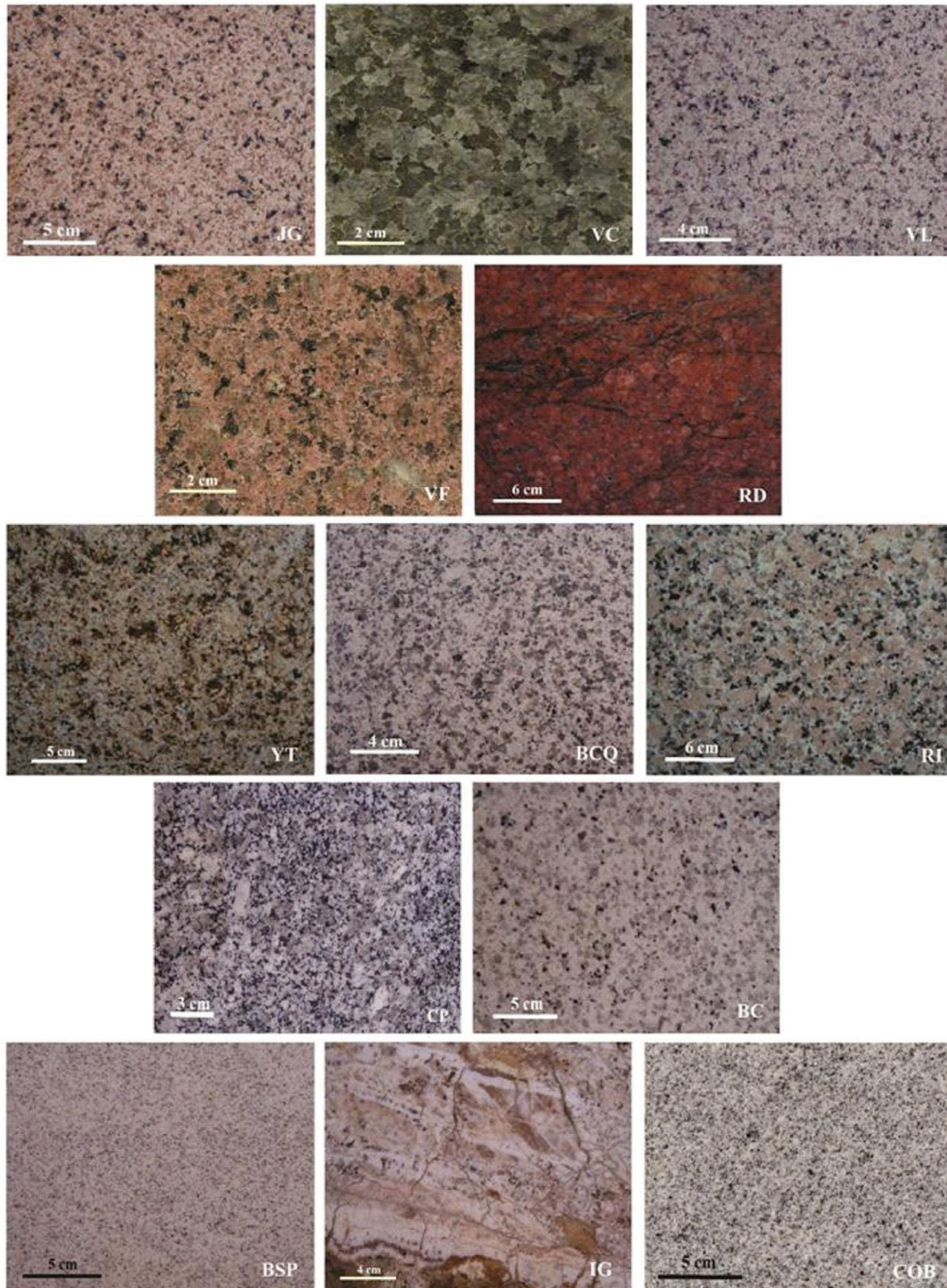
O **Verde Light** (ortoclásio sienogranito com hornblenda - Prancha 1-VL) apresenta estrutura isotrópica com textura ligeiramente equigranular, hipidiomórfica, média a média-grossa com granulação oscilando de 0,2 mm a cerca de 25,0 mm, com predominância entre 3,0 mm e 6,0 mm. Como minerais essenciais ocorrem biotita (3,5%), hornblenda (2,0%), opacos (0,6%), zircão (0,2%), fluorita (0,5%) e traços de allanita, titanita e apatita. O grau de

*Azevedo et al. Correlação entre enanação de gás radônio e porosidade de rochas...*

microfissuramento é baixo, 0,25 microfissuras/mm<sup>2</sup>, com 79,3% do tipo intragrãos e 20,7% intergrãos, sendo 25% das intragrãos preenchidas e 8,6% das intergrãos com algum preenchimento. As dimensões da microfissuras variam de 0,4 mm

a 3,0 mm, com predominância de 1,3 mm a 2,2 mm. A alteração mineral é fraca a moderada.

O **Vermelho Filomena** (ortoclásio sienogranito com hornblenda - Prancha 1-VF) apresenta estrutura isotrópica e textura fanerítica pouco



*Prancha 1: Fotografias das placas polidas das rochas selecionadas para a pesquisa.*

inequigranular, hipidiomórfica, média a média-grossa. A granulação média oscila de 0,2 mm a 12,0 mm, com predominância de 2,0 mm a 4,5 mm. Os acessórios são biotita (2,6%), hornblenda (2,0%), fluorita (0,4%), opacos (0,3%), zircão (0,2%) e traços de apatita, allanita e titanita. A intensidade do microfissuramento é baixa, com 0,25 microfissuras/mm<sup>2</sup>, predominando tipos intragrãos (85,5%) e 14,5% intergrãos. 22,9% de microfissuras intragranulares são preenchidas e 6% intergrãos com preenchimento. As dimensões das microfissuras variam de 0,5 mm a 3,0 mm, com predominância de 0,6 mm a 1,0 mm. A alteração mineral é moderada.

O **Red Dragon** (sienogranito brechóide - Prancha 1-RD) se caracteriza pela coloração vermelho carne resultante da forte oxidação dos cristais de feldspato potássico. A intensidade de cataclase é variável, com porções praticamente preservadas constituídas por estrutura isotrópica e textura fanerítica inequigranular de granulação grossa a muito grossa e frações menores, de aspecto anastomosado, fortemente cataclásticas. Os cristais de feldspato potássico apresentam dimensões seriadas oscilando de 2,0 mm a 25,0 mm, com predominância entre 10,0 mm e 20,0 mm. São frequentes fraturas abertas preenchidas por óxidos/hidróxidos de ferro, caoticamente distribuídas, sendo que as frações mais intensamente deformadas exibem intensos microfraturamentos e micromoagem mineral de natureza protocataclástica. Nestes casos, o microfraturamento é aberto, normalmente ramificado, com preenchimentos de fina massa pulverulenta de óxidos e hidróxidos de ferro e de quartzo. Os minerais acessórios correspondem a traços de apatita, zircão, titanita e opacos na qualidade de traços. A intensidade de microfissuras é alta, na média 1,1 microfissuras/mm<sup>2</sup>. Predominam microfissuras intragranulares,

com 61%, e 39% representados por microfissuras intergranulares e/ou transgranulares, com 26% das intragrãos preenchidas e apenas 17,5% intergranulares com preenchimentos. As dimensões das microfissuras em lâmina delgada se situam entre 0,3 mm e 3,5 mm, com predominância de 0,6 mm a 1,3 mm. Ao nível macroscópico, são frequentes fraturas com dimensões de 4,0 cm a 30,0 cm, com predomínio entre 8,0 cm a 12,0 cm.

O **Yellow Tropical** (ortoclásio sienogranito com hornblenda e fayalita - Prancha 1-YT) apresenta estrutura isotrópica com textura fanerítica inequigranular a megaporfírica serial com granulação variando de poucos milímetros a 25,0 mm, com predomínio de 0,4 mm a 15,0 mm. O aspecto megaporfírico serial deve-se ao feldspato potássico, mineral dominante da rocha, imerso em matriz de grã entre 1,0 mm a 3,0 mm. Os minerais acessórios correspondem a hornblenda (2,5%), biotita (1,3%), fayalita (0,5%), opacos (0,4%), zircão (0,2%), apatita (0,2%) e traços de allanita, titanita, apatita e rutilo. O grau de microfissuramento é médio, com 0,71 microfissuras/mm<sup>2</sup>. As microfissuras são na maioria intragranulares, com 81,4%, e 18,6% do tipo intergrãos, com 30,9% das intragrãos preenchidas e apenas 6,5% intergranulares preenchidas. São classificadas como médias a curtas, com dimensões de 0,3 mm a 5,0 mm, com predominância de microfissuras curtas com dimensões de 1,0 mm a 2,5 mm. Rocha medianamente alterada, caracterizada por evidente percolação e difusão de óxidos e hidróxidos de ferro ao longo de microfissuras e interfaces minerais.

As variedades Branco Cristal Quartzo e Rosa Iracema são exploradas no *stock* granítico Serra do Barriga, localizado na porção NNW do Estado do Ceará.

O **Branco Cristal Quartzo** (sienogranito

com hornblenda - Prancha 1-BCQ) apresenta estrutura isotrópica e textura fanerítica inequigranular hipidiomórfica, granulação média a média-grossa com grãos de dimensões variando entre 0,5 mm e 35,0 mm, com predominância de 2,0 mm a 5,0 mm. Apresenta variação textural dada por porções enriquecidas ora em feldspato potássico ora em quartzo. Os minerais acessórios são biotita (5,0%), fluorita (0,4%), opacos (0,4%), zircão (0,2%) e traços de hornblenda, apatita e titanita. Apresenta 0,35 microfissuras/mm<sup>2</sup>, com cerca de 88% do tipo intragranular e 11,4% do tipo intergrãos e/ou transgranulares. Do total de microfissuras 62% são intragrãos não preenchidas e apenas 2,5% das intergranulares têm preenchimento. Apresentam dimensões variando de 0,6 mm a 2,6 mm, com predominância de 1,0 mm em média, podendo ser consideradas curtas. A alteração mineral é incipiente a moderada.

O **Rosa Iracema** (sienogranito com hornblenda - Prancha 1-RI) apresenta estrutura isotrópica com textura fanerítica inequigranular hipidiomórfica a xenomórfica, com granulação de submilimétrica a cerca de 30,0 mm e 40,0 mm e predominância entre 5,0 mm e 15,0 mm. Os acessórios são biotita (6%), hornblenda (0,5%), opacos (0,3%), zircão (0,3%), apatita (0,3%), e traços de allanita, titanita e fluorita. O grau de microfissuramento é baixo, 0,25 microfissuras/mm<sup>2</sup>, com 82,3% de microfissuras intragrãos e 17,7% de intergrãos e/ou transgranulares. Destas, 43,4% são intragrãos preenchidas e apenas 5% intergranulares são preenchidas. Apresentam dimensões médias de 0,5 mm a 3,0 mm, com predomínio de 1,0 mm a 2,0 mm. A alteração mineral é fraca a moderada.

A rocha **Cinza Prata** (granodiorito com hornblenda - Prancha 1-CP) é explorada no município de Cariré. Apresenta textura fanerítica inequigranular a porfirítica seriada e estrutura

isotrópica. Os cristais maiores, responsáveis pelo aspecto porfirítico, representam aproximadamente 15% do volume da rocha e devem-se ao feldspato potássico com dimensões máximas ao redor de 20,0 mm e pelo plagioclásio com dimensões máximas ao redor de 25,0 mm. A matriz é fanerítica inequigranular, hipidiomórfica, com granulação média a grossa, na média entre 3,0 mm e 8,0 mm. Os acessórios são biotita (8%), hornblenda (2%), apatita (0,5%), zircão (0,3%) e traços de titanita, allanita e opacos. A intensidade do microfissuramento é baixo, 0,39 microfissuras/mm<sup>2</sup>, com 77,4% do tipo intragrão e 22,6% intergranulares. Do total de microfissuras 54,7% são intragranulares preenchidas e 15,6% intergrãos com preenchimento. As dimensões variam de 0,8 mm a 6,0 mm, com predomínio de 2,0 mm a 3,0 mm. O grau de alteração mineral é fraco a moderado.

Os granitos Branco Ceará, Branco São Paulo e Infinity Gold estão inseridas no Complexo Migmatítico Santa Quitéria, porção centro-norte do Estado do Ceará, que detém ampla faixa de corpos graníticos.

O **Branco Ceará** (microclínio-albita granito - Prancha 1-BC) é um granito hololeucocrático com estrutura maciça a discretamente orientada, pouco inequigranular, com granulação média a média-grossa, entre 1,0 mm e 7,0 mm, com predominância entre 3,0 mm e 5,0 mm. Como minerais acessórios, contém zinnwaldita (4%), fluorita (1,5%), muscovita (1,5%), zircão (0,5%), topázio (0,5%) e traços de apatita e opacos. Apresenta como característica marcante fenocristais de quartzo prismáticos com terminações bipiramidais, que atingem dimensões de 5,0 a 6,0 mm. A intensidade de microfissuramento é incipiente a baixa, com 0,18 microfissuras/mm<sup>2</sup>. Predominam microfissuras intragrãos (61,2%) não preenchidas. Do total de microfissuras, 22,5% são intragrãos preenchidas

e apenas 2% das intergranulares são preenchidas. São consideradas muito curtas a curtas, com dimensões médias em torno de 0,5 mm a 2,0 mm. A alteração mineral mostra-se incipiente.

O **Branco São Paulo** (microclínio-albita granito - Prancha 1-BSP) apresenta estrutura maciça e granulação fina a média-fina, entre 0,2 mm e 3,5 mm, com predominância de 0,3 mm a 0,7 mm. Imersos nesta matriz, ocorrem cristais subédricos de quartzo, prismáticos a subhexagonais, e de plagioclásio (com dimensões de 1,5 mm a 3,5 mm) e mais raramente microclínio (com dimensões de 1,0 mm a 2,5 mm). Os minerais acessórios são zinnwaldita (4,5%), muscovita (3%), fluorita (0,5%), topázio (0,4%), apatita (0,2%) e zircão e opacos como traços. O grau de microfissuramento é baixo a muito baixo, com 0,20 microfissuras/mm<sup>2</sup>. Predominam microfissuras do tipo intragranulares, perfazendo 93,6% do total, e apenas 6,4% são do tipo intergrãos. Apenas 10,6% dos tipos intragranulares são preenchidas e 2,1% das intergranulares apresentam algum tipo de preenchimento. São microfissuras muito curtas, com dimensões normalmente inferiores a 1,0 mm. A alteração mineral é incipiente.

O **Infinity Gold** (Prancha 1-IG) corresponde a um albita pegmatito granítico brechóide bastante alterado (argilizado) de coloração esbranquiçada com partes creme amarelada provocadas pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro. Apresenta poros e cavidades com dimensões variadas causadas pela desagregação da biotita e feldspatos intemperizados (argilizados). Exibe textura pegmatítica altamente heterogênea, com granulação desde gigante a localmente com porções de granulação média a média-grossa. A fração pegmatóide é dominante, com cristais de albita com dimensões que superam a 10,0 cm de extensão contendo frequentes inclusões de cristais

de quartzo com até 1,0 cm ou maiores e de pequenos agregados biotíticos. É composto por albita argilizada (60%), quartzo (35%) e biotita argilizada (5%). Apresenta fraturas de diversas dimensões, caoticamente distribuídas, preenchidas ou não por minerais de alteração, além de elevado grau de microfissuramento, superior a 1,1 microfissuras/mm<sup>2</sup>. Em placa polida apresenta fraturas com dimensões de 3,0 cm a 13,0 cm, normalmente preenchidas por óxidos e hidróxidos de ferro. Os poros apresentam dimensões da ordem de 2,0 mm x 3,0 mm até cavidades com 20,0 mm x 35,0 mm. Em lâmina delgada apresenta 52,2% de microfissuras do tipo intergranulares e 47,8% do tipo intragranulares. Do total de microfissuras intergranulares apenas 8,7% são preenchidas e 17,4% das intragranulares com algum preenchimento. As dimensões variam desde milimétricas até 7,0 mm, com predomínio de 2,5 mm a 4,0 mm. Rocha bastante alterada, argilizada e intemperizada, que apresenta muitas fraturas e poros na superfície da amostra causados pela ausência de minerais.

O **Cinza Ouro Branco** (monzogranito com muscovita e biotita - Prancha 1-COB) explorado no município de Banabuiú, apresenta estrutura isotrópica com textura hipidiomórfica equigranular de granulação fina a fina-média, entre submilimétrica a 5,0 mm, com predominância de 0,3 mm a 2,0 mm. Os minerais acessórios são biotita (4%), muscovita (3,5%), zircão, apatita e opacos como traços. A intensidade de microfissuramento é baixa, com 0,38 microfissuras/mm<sup>2</sup>, representada por 91,1% do tipo intragranulares e apenas 8,9% intergranulares. Cabe destaque para o baixo preenchimento das microfissuras presentes, caracterizada por apenas 16,6% de microfissuras intragranulares e de 4% intergranulares com algum tipo de preenchimento. As dimensões das microfissuras variam de 0,3 mm a 2,5 mm, com predominância de 0,6 mm a



1,0 mm. A alteração mineral é moderada a elevada.

## ÍNDICES FÍSICOS

Para o melhor entendimento do comportamento do gás radônio nas rochas estudadas foram efetuadas determinações dos índices físicos, compreendendo densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água, normalmente obtidos para rochas que se destinam ao uso como materiais de revestimento de edificações. Os valores dos índices físicos, especialmente a porosidade aparente, fornecem informações sobre a rede porosa da rocha. Estas propriedades influenciam de forma diferenciada as propriedades físicas e mecânicas da rocha, refletindo na sanidade e presença de micro-descontinuidades como poros, fraturas, microfissuras, tipos de contatos minerais e que influenciam na maior ou menor difusão do referido gás.

Os valores médios da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água,

fornecidos pelas rochas (Tabela 1) mostram que, com exceção do pegmatito Infinity Gold, os demais granitos superam os valores médios requeridos pela norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2010) como requisitos para granitos, ou seja, apresentam valores de porosidade aparente <1%, absorção de água <0,4% e massa específica seca >2.550kg/m<sup>3</sup> para rochas com boa sanidade. No geral, os valores dos índices físicos dos granitos estudados (Tabela 1; Figura 1) revelam boa coerência em relação aos respectivos aspectos composicionais, texturais e estruturais ostentados pelos materiais. Assim, os valores apresentados pelo pegmatito granítico Infinity Gold (IG) com sua baixa densidade (2371 kg/m<sup>3</sup>) e elevados índices de porosidade (5,68%) e absorção de água (2,46%) refletem os respectivos aspectos petrográficos, como presença de poros e cavidades causadas pela desagregação de minerais alterados, alto grau de microfissuras (1,3 microfissuras/mm<sup>2</sup>) e de fraturas com dimensões centimétricas, além da elevada argilização/intemperização dos feldspatos e de

Tabela 1: Resultados médios dos índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água).

Rochas	Densidade aparente seca (kg/m <sup>3</sup> ) ± s (δ)	Densidade aparente saturada (kg/m <sup>3</sup> ) ± s (δ)	Porosidade aparente (%) ± s (δ)	Absorção de água (%) ± s (δ)
Juparaná Gold (JG)	2612 ± 2 (0,1)	2618 ± 2 (0,1)	0,67 ± 0,03 (4,8)	0,26 ± 0,01 (4,8)
Verde Ceará (VC)	2624 ± 5 (0,2)	2628 ± 5 (0,2)	0,41 ± 0,03 (7,6)	0,16 ± 0,01 (7,7)
Verde Lihgt (VL)	2616 ± 2 (0,10)	2621 ± 1 (0,1)	0,50 ± 0,05 (10,1)	0,19 ± 0,02 (10,2)
Vermelho Filomena (VF)	2605 ± 2 (0,1)	2610 ± 2 (0,1)	0,51 ± 0,02 (4,3)	0,19 ± 0,01 (4,3)
Red Dragon (RD)	2610 ± 9 (0,3)	2618 ± 8 (0,3)	0,77 ± 0,15 (19,3)	0,30 ± 0,06 (19,3)
Yellow Tropical (YT)	2613 ± 6 (0,2)	2621 ± 6 (0,2)	0,79 ± 0,05 (6,0)	0,30 ± 0,02 (6,1)
Branco Cristal Quartzo (BCQ)	2613 ± 2 (0,1)	2619 ± 2 (0,1)	0,51 ± 0,02 (3,8)	0,20 ± 0,01 (3,8)
Rosa Inacema (RI)	2631 ± 4 (0,1)	2636 ± 4 (0,1)	0,48 ± 0,03 (6,7)	0,18 ± 0,01 (6,8)
Cinza Prata (CP)	2685 ± 8 (0,3)	2688 ± 8 (0,3)	0,38 ± 0,04 (9,2)	0,14 ± 0,01 (9,3)
Branco Ceará (BC)	2608 ± 2 (0,1)	2616 ± 1 (0,1)	0,78 ± 0,08 (10,8)	0,30 ± 0,03 (10,8)
Branco São Paulo (BSP)	2635 ± 7 (0,3)	2642 ± 7 (0,3)	0,74 ± 0,10 (14,0)	0,28 ± 0,04 (14,1)
Infinity Gold (IG)	2314 ± 30 (1,3)	2371 ± 22 (0,9)	5,68 ± 0,95 (16,7)	2,46 ± 0,44 (18,1)
Cinza Ouro Branco (COB)	2609 ± 1 (0,1)	2618 ± 1 (0,04)	0,89 ± 0,04 (4,2)	0,34 ± 0,01 (4,3)

agregados biotíticos. Destaca-se que para melhor visualização no gráfico, a representação dos valores de porosidade e de absorção de água do pegmatito Infinity Gold (IG) foram divididos por 4, conforme ilustração na Figura 1.

Algumas aparentes disparidades entre porosidade e grau de microfissuramento total das rochas (Figura 1) como, por exemplo, o caso das rochas Verde Light (VL) e Vermelho Filomena

(VF), que apesar de apresentarem menor grau de microfissuramento ( $0,25$  microfissuras/ $\text{mm}^2$ ) que o Verde Ceará (VC) com  $0,55$  microfissuras/ $\text{mm}^2$ , são mais porosas que esta última, o que se deve à predominância de microfissuras não preenchidas das primeiras, respectivamente  $54,3\%$  e  $62,6\%$  do total de microfissuras, contra  $21,7\%$  do Verde Ceará, conforme Tabela 2 e representado pelo diagrama da Figura 2.

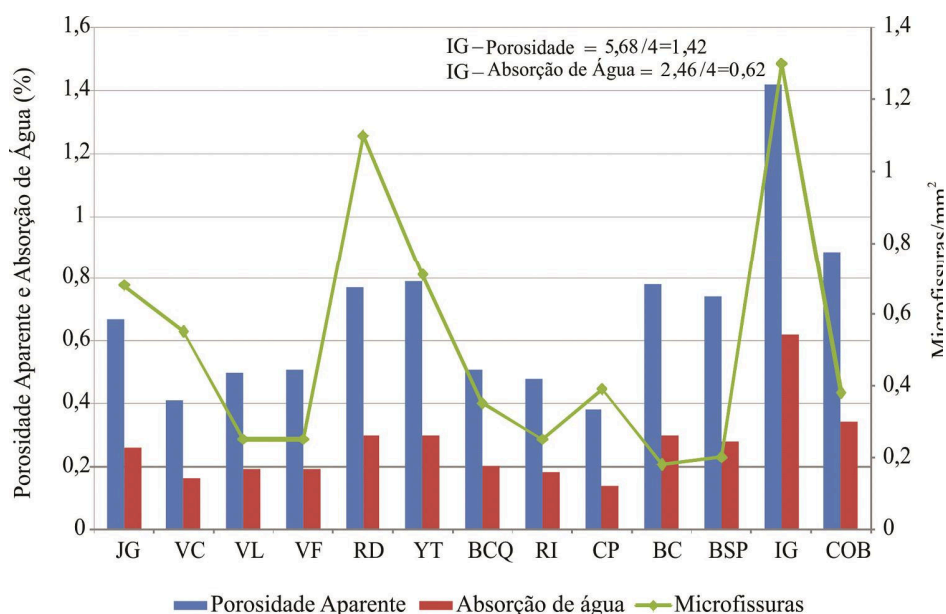


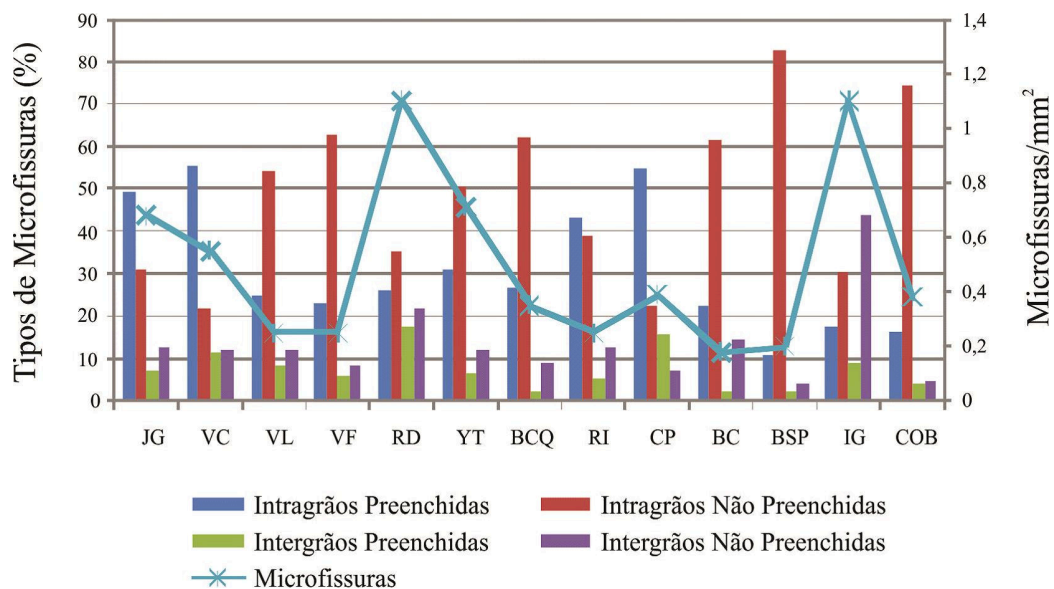
Figura 1: Porosidade Aparente e Absorção de Água vs. Microfissuras/ $\text{mm}^2$ .

Neste sentido, observa-se pela Figura 2 que a distribuição dos tipos de microfissuras é bem diversificada para as amostras estudadas, onde as microfissuras do tipo intragrãos predominam amplamente sobre as intergrãos, com exceção do pegmatito Infinity Gold (IG) com fissuras que podem atingir até  $7,0$  mm em lâmina delgada e até  $13,0$  cm nas superfícies das placas polidas, com cerca  $43,5\%$  de microfissuras intergrãos/transgranulares não preenchidas. Destaca-se, ainda, que dentre as microfissuras intragrãos há casos em que predominam os tipos sem preenchimento, como ocorre com as amostras VL, VF, RD, YT, BCQ, BC, BSP e IG, e casos que predominam os tipos com preenchimentos (JG, VC, RI e CP).

A influência da maior ou menor presença de microfissuras com ou sem preenchimentos na porosidade da rocha pode ser ilustrada pela comparação entre os granitos Branco Ceará, que apesar de pouco menos microfissurado ( $0,18$  microfissuras/ $\text{mm}^2$ ) que o Verde Ceará ( $0,25$  microfissuras/ $\text{mm}^2$ ) apresenta porosidade relativamente maior ( $0,78\%$ ) que o segundo ( $0,41\%$ ), provavelmente devido à maior percentagem de microfissuras intragrãos sem preenchimentos ( $61\%$ ) contra  $54\%$  para o Verde Ceará.

Tabela 2: Intensidade de microfissuramento e tipos de microfissuras.

Rocha	Microfissuras/mm <sup>2</sup>	Intragrãos preenchidas (%)	Intragrãos não preenchidas (%)	Intergrãos preenchidas (%)	Intergrãos não preenchidas (%)
Juparaná Gold (JG)	0,68	49,2	31,2	7,0	12,6
Verde Ceará (VC)	0,55	55,3	21,7	11,1	11,9
Verde Light (VL)	0,25	25,0	54,3	8,6	12,1
Vermelho Filomena (VF)	0,25	22,9	62,6	6,1	8,4
Red Dragon (RD)	1,10	26,0	35,0	17,5	21,5
Yellow Tropical (YT)	0,71	30,9	50,5	6,5	12,1
Branco Cristal Quartzo (BCQ)	0,35	26,6	62,0	2,5	8,9
Rosa Iracema (RI)	0,25	43,4	38,9	5,0	12,7
Cinza Prata (CP)	0,39	54,7	22,7	15,6	7,0
Branco Ceará (BC)	0,18	22,5	61,2	2,0	14,3
Branco São Paulo (BSP)	0,20	10,6	83,0	2,1	4,3
Infinity Gold (IG)	1,30	17,4	30,4	8,7	43,5
Cinza Ouro Branco (COB)	0,38	16,6	74,5	4,0	4,9

Figura 2: Tipos de microfissuras (%) vs. Microfissuras/mm<sup>2</sup>.

## TEORES DE URÂNIO E EMANAÇÃO DO GÁS RADÔNIO

A Tabela 3 trás os teores de Urânio, de <sup>222</sup>Rn teoricamente gerado a partir do decaimento do <sup>238</sup>U e a quantidade de <sup>222</sup>Rn efetivamente emanado após 25 dias de confinamento, em Bq/m<sup>3</sup> e em Bq/kg, para cada amostra estudada.

A quantidade <sup>226</sup>Ra em Bq/kg é determinada multiplicando a concentração de U (ppm) presente na rocha por 12,34, que pelas

condições de equilíbrio secular radioativo, equivale à mesma proporção de <sup>222</sup>Rn gerado na rocha a partir de seu pai <sup>226</sup>Ra.

O teor de radônio emanado no ar, [Rn] em Bq/m<sup>3</sup>, é convertido para Bq/kg através da equação [Rn] x V/m, onde V = 19 L (volume do garrafão utilizado no monitoramento do radônio) e m a massa da amostra (kg).

Tabela 3: Teores de U e de  $^{222}\text{Rn}$  gerado e efetivamente emanado pelas amostras.

Amostras	U (ppm)	Teores de $^{226}\text{Ra}$ e $^{222}\text{Rn}$ calculados a partir do Urânio		$^{222}\text{Rn}$ exalado da amostra após 25 dias de confinamento		Teor de $^{222}\text{Rn}$ efetivamente exalado (em %)
		$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{222}\text{Rn}$ gerado (Bq/kg)	$^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$^{222}\text{Rn}$ (Bq/kg)	
Juparaná Gold (JG)	4,7	58,00	58,00	321,67	2,46	4,2
Verde Ceará (VC)	3,5	43,19	43,19	52,67	0,44	1,0
Verde Lihgt (VL)	5,0	61,70	61,70	94,00	0,70	1,1
Vermelho Filomena (VF)	4,3	53,06	53,06	199,00	1,91	3,6
Red Dragon (RD)	3,1	38,25	38,25	54,33	0,40	1,0
Yellow Tropical (YT)	4,0	49,36	49,36	153,33	1,14	2,3
Branco Cristal Quartzo (BCQ)	13,6	167,82	167,82	715,33	6,04	3,6
Rosa Iracema (RI)	4,2	51,83	51,83	179,00	1,18	2,3
Cinza Prata (CP)	1,5	18,51	18,51	72,33	0,51	2,7
Branco Ceará (BC)	11,9	146,85	146,85	129,33	0,95	0,6
Branco São Paulo (BSP)	8,1	99,95	99,95	54,33	0,38	0,4
Infinity Gold (IG)	0,2	2,47	2,47	11,33	0,09	3,6
Cinza Ouro Branco (COP)	3,2	39,49	39,49	39,67	0,39	1,0

De modo geral, as rochas pesquisadas forneceram baixos valores de enanação de gás radônio (Tabela 3), entre 11,3 Bq/m<sup>3</sup> ou 0,09 Bq/kg para o pegmatito Infinity Gold e 715,3 Bq/m<sup>3</sup> ou 6,04 Bq/kg para o Branco Cristal Quartzo.

O diagrama da Figura 3 mostra que não há uma relação direta entre teores de U e a quantidade de gás radônio emanado nos diferentes materiais, ou seja, nem sempre a rocha mais enriquecida em U será a que exalará maior teor do gás radônio, como exemplificado pelas rochas Branco Ceará (BC) que apesar de ser detentora da segunda maior concentração de U (11,8 ppm) libera menos radônio (129,3 Bq/m<sup>3</sup>) que a amostra Juparaná Gold (JG) que com apenas 4,7 ppm de U libera 321,67 Bq/m<sup>3</sup>. Neste caso destaca-se ainda que o Branco Ceará, com uma geração de 146,85 Bq/kg de  $^{222}\text{Rn}$  libera, em 25 dias de monitoramento, apenas 0,95 Bq/kg de  $^{222}\text{Rn}$  e o Juparaná Gold com geração de 58 Bq/kg, portanto bem menor que a do Branco Ceará, libera 2,46 Bq/kg de  $^{222}\text{Rn}$  para a

atmosfera, o que mesmo assim equivaleria a pouco mais de 4% de todo o gás gerado.

Este fato leva a considerar que outros fatores, além dos teores de U, como diferentes aspectos texturais e estruturais das rochas exercem influência na maior ou menor difusão do gás radônio do interior da rocha para a atmosfera. Esta constatação demonstra que nem todo o gás radônio gerado na rocha consegue escapar e alcançar a superfície do material, assim, boa parte do gás gerado pela rocha fica aprisionado na rede cristalina dos minerais, o que, em parte, se deve a curta meia vida do  $^{222}\text{Rn}$ , de 3,85 dias, decompondo-se para o  $^{218}\text{Po}$ .

Neste sentido, o exame da Tabela 3 revela que a quantidade de gás radônio emanado é bastante ínfima quando comparada com a quantidade originada pelo decaimento do  $^{238}\text{U}$ . A porcentagem de gás emanado em relação ao total gerado pelas rochas oscila entre 0,4% para o caso do Branco São Paulo e um máximo de 4,2% para a rocha Juparaná Gold.

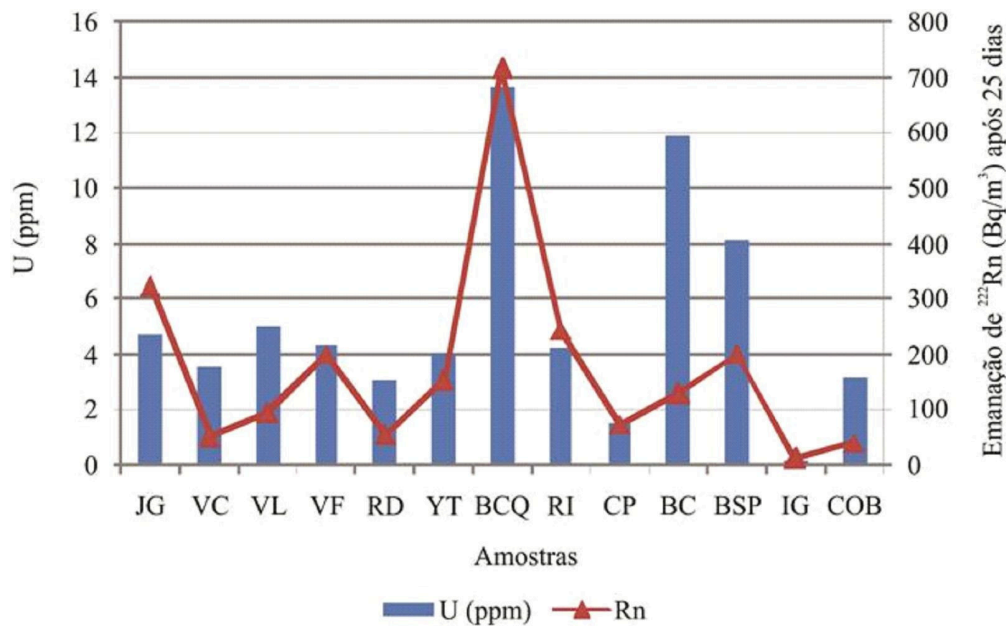


Figura. 3: Correlação entre teor de U e  $^{222}\text{Rn}$  emanado após 25 dias.

A partir dos dados de porosidade, dos teores de U e da emissão do gás  $^{222}\text{Rn}$  fornecidos pelas amostras estudadas, foi possível estabelecer correlações entre os referidos dados e as características petrográficas de cada material, com destaque para a rede porosa. Outro fator de influência na liberação do gás radônio, não considerado no presente trabalho, se refere à distribuição do U na rocha, se incorporado por minerais mais susceptíveis à alterações ou ainda como adsorção em determinados minerais ou precipitado em microfissuras, com consequente maior difusão do gás então gerado.

Comparando-se o comportamento das variedades Branco Cristal Quartzo (BCQ) e Branco Ceará (BC), detentoras dos dois mais elevados teores de U (13,6 ppm e 11,9 ppm), verifica-se significativo contraste nos teores de emissão do gás  $^{222}\text{Rn}$  entre elas, respectivamente de 751 Bq/m<sup>3</sup> e 129 Bq/m<sup>3</sup> (Tabela 3; Figura 3), o que refletiria diferenças mais ou menos importantes da rede porosa entre estes materiais. Neste sentido, além do Branco Cristal Quartzo ser mais microfissurado (0,35 microfissuras/

mm<sup>2</sup>) que o Branco Ceará (com 0,18 microfissuras/mm<sup>2</sup>) (Tabela 2), apresenta granulação bem mais desenvolvida (entre 0,5 mm a 35,0 mm) que o granito Branco Ceará (BC) (entre 1,0 mm e 7,0 mm), além de exibir certa heterogeneidade textural resultante de concentrações irregulares a alongadas compostas por cristais de feldspato potássico e/ou de quartzo mais desenvolvidos.

Sabe-se que rochas com granulação mais desenvolvida naturalmente tendem a apresentar contatos minerais mais frouxos, cristais de quartzo com microfissuramento mais pronunciado e de feldspato potássico exibindo planos de clivagens mais abertos e mais intensamente pertitizados, além de cristais de plagioclásio com núcleos mais intensamente saussuritizados, caso do Branco Cristal Quartzo (BCQ), que no conjunto poderiam facilitar a difusão do gás radônio em relação a rochas composicionalmente similares, mas de granulação mais fina como se verifica no caso do Branco Ceará (BC).

As demais 11 amostras estudadas apresentam teores de U bastante reduzidos, duas

entre 0,2 ppm e 1,5 ppm (CP e IG), oito com teores entre 3,1 ppm e 5,1 ppm de U (JG, VC, VL, VF, RD, YT, RI e COB), além do BSP com 8,1 ppm. Dentre elas, a variedade Juparaná Gold (JG) (com 4,7 ppm de U) correspondente a um ortoclásio sienogranito médio-grosso é a que exibe a maior emanação do gás  $^{222}\text{Rn}$  (321,67  $\text{Bq/m}^3$ ) (Tabela 3; Figura 3). Este maior valor estaria coerente com suas

características petrográficas como pela textura inequigranular de granulação média-grossa (na média entre 1,0 mm e 10,0 mm), intensidade de microfissuramento relativamente elevada, com 0,68 microfissuras/ $\text{mm}^2$ , sendo 12,6% intergrãos não preenchidas (Figura 4), e alteração mineral moderada, que no conjunto define uma porosidade mediana de 0,67% (Figura 5).

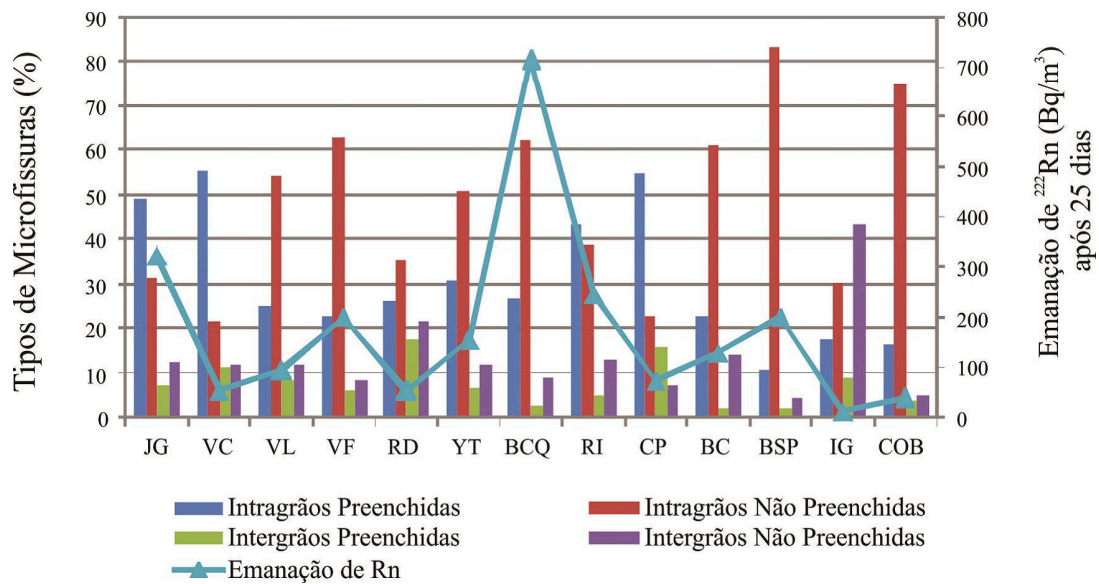


Figura 4: Correlação entre quantidade/tipo de microfissuras e emanação do gás  $^{222}\text{Rn}$ .

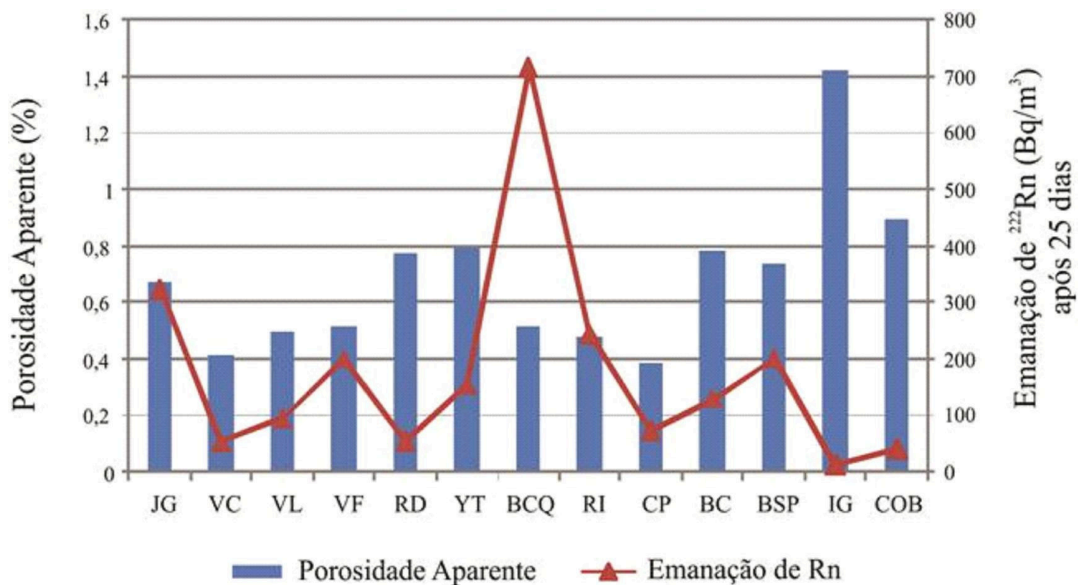


Figura 5: Correlação entre porosidade aparente e emanação do gás  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{Bq/m}^3$ ) após ciclo de 25 dias de monitoramento.

Já a variedade Verde Light (VL) com 5,0 ppm de U, portanto pouco superior ao Juparaná Gold (JG) acima comentado, apresenta uma emanação de radônio de 94,00 Bq/m<sup>3</sup>, bem inferior aos 321,67 Bq/m<sup>3</sup> fornecido por aquele material (Tabela 3; Figura 3). Este menor valor de emanação estaria coerente com seu aspecto textural mais homogêneo, equigranular, de granulação mais fina (com predominância entre 3,0 mm e 6,0 mm) e principalmente a menor intensidade de microfissuramento (0,25 microfissuras/mm<sup>2</sup>, menos da metade em relação ao Juparaná Gold) (Figura 4).

A comparação da emanação do gás radônio do conjunto de rochas com teores de U ao redor de 4,0 ppm, representadas pelos sienogranitos Yellow Tropical (4,0 ppm de U), Rosa Iracema (4,2 ppm de U) e Vermelho Filomena (4,3 ppm de U), com o conjunto igualmente pobres em U representados pelo monzogranito Cinza Ouro Branco (3,2 ppm de U) e os sienogranitos Verde Ceará (3,5 ppm de U) e Verde Light (5,0 ppm de U), verifica-se que o primeiro grupo apresenta emanações (Figura 4) mais elevadas, entre 153,33 Bq/m<sup>2</sup> e 244,33 Bq/m<sup>2</sup>, que o segundo grupo, entre 39,67 Bq/m<sup>2</sup> e 94,00 Bq/m<sup>3</sup> de emanação do <sup>222</sup>Rn. Embora coerentes entre si, em termos de teores de U, as exalações mais elevadas do primeiro grupo encontram apoio por apresentarem granulação média mais grossa e principalmente devido ao elevado estágio de oxidação das variedades Yellow Tropical e Vermelho Filomena, além da elevada porcentagem de microfissuras intragrãos não preenchidas do Vermelho Filomena (62,6%) e Yellow Tropical (50,5% das microfissuras) (Figura 4). A menor emanação (39,67 Bq/m<sup>2</sup>) do monzogranito Cinza Ouro Branco (COB) dentre as amostras dos dois conjuntos de rochas, mas com o maior índice de porosidade (0,89%) dentre elas, pode ser explicada pela sua granulação geral

fina, predominantemente entre 0,3 mm e 2,0 mm, e com 91,1% das microfissuras do tipo intragrãos.

O Cinza Prata (CP) com emanação de 72,33 Bq/m<sup>3</sup>, apesar de reduzida, apresenta padrão igualmente elevado para um baixo teor de U (1,5 ppm), o que poderia estar relacionado ao microfissuramento intergranular superior a 20% do total das microfissuras.

O Infinity Gold (IG) corresponde a um pegmatito granítico brechóide, intensamente cataclasado, em avançado estágio de intemperismo e, portanto, detentor de alta porosidade (5,68%) (Figura 1) devido à elevada intensidade de microfissuramento (tanto intra quanto intergrãos), cerca de 1,3 microfissuras/mm<sup>2</sup>, e de extensas fraturas abertas predominantemente sem preenchimentos (Figura 4). Por apresentar apenas 0,2 ppm de U, o que estaria coerente com sua composição mineralógica quartzo-albítica com cerca de 5,0% de biotita, e ausência de minerais tipicamente detentores de U, é a rocha que apresenta a menor emanação do gás radônio, com apenas 11,33 Bq/m<sup>3</sup> ao final de 25 dias de confinamento.

O sienogranito Red Dragon (RD) também corresponde a uma rocha brechóide, com intensidade variável de cataclase, de granulação desde submilimétrica (devido a efeitos cataclásticos) a muito-grossa (cerca de 25,0 mm), com microfissuras e fraturas preenchidas por fina massa pulverulenta composta por óxidos e hidróxidos de ferro e por sílica amorfa, dificultando a difusão do radônio (Figura 5). Assim, com um teor de 3,1 ppm de U, apresenta após os 25 dias de confinamento apenas 54,33 Bq/m<sup>3</sup> de emanação de radônio.

## CONCLUSÕES

Os estudos desenvolvidos revelam que as rochas analisadas apresentam baixos teores de

U, entre 0,2 ppm e 13,6 ppm, e que a quantidade de gás radônio emanada para a atmosfera é bastante restrita quando comparada à quantidade total de  $^{222}\text{Rn}$  gerado nas rochas, que se situou no intervalo de 0,4% a cerca de 4%.

Também mostram que não há uma relação direta entre os teores de U da rocha e o correspondente escape do gás radônio após os 25 dias de monitoramento, sugerindo que a difusão e consequente enanação do gás radônio estão diretamente relacionadas às propriedades texturais inerentes a cada rocha, com ênfases para a granulação e para a intensidade e natureza do microfissuramento, que conduzem ao maior ou menor desenvolvimento da rede microporosa controladora da difusão do gás radônio.

Assim, rochas como os granitos Branco Ceará e Branco São Paulo com teores relativamente elevados de U (11,9 ppm e 8,1 ppm) em relação aos demais granitos investigados, mas com baixas porosidades advindas do baixo grau de microfissuramento, da granulação mais fina e de bom engrenamento mineral são as rochas que apresentam as menores percentagens de enanação do gás  $^{222}\text{Rn}$  (o equivalente a 0,4% e 0,6% do total de Rn gerado pela rocha). Já rochas com teores de U bem mais inferiores como o Juparaná Gold (4,7 ppm) e, num caso mais extremo, o Infinity Gold (0,2 ppm), mas com grau de microfissuramento significativamente mais elevado se situam entre as rochas com as percentagens mais elevadas de enanação do gás radônio, respectivamente 4,2% e 3,6%.

Por outro lado, rocha como o Vermelho Filomena que apesar de conter baixo teor de U (4,3 ppm) e discreto microfissuramento mineral, mas com predomínio de microfissuras vazias, se situa no rol das rochas com as maiores exalações de  $^{222}\text{Rn}$ , equivalente a 3,6%. O contrário constata-se para o Red Dragon, que apesar de

ser detentor do segundo maior grau de microfissuramento mineral dentre as rochas estudadas, apresenta taxa de enanação bem menor que a anterior (o equivalente a 1% do total gerado) em virtude de um maior equilíbrio entre fissuras preenchidas e vazias.

Considera-se, com base nos resultados obtidos, que os índices físicos das rochas (densidade aparente, porosidade e absorção de água) e as informações acerca da granulação dos materiais e microdescontinuidades relacionadas à distribuição e tipos de microfissuras se referem a parâmetros importantes na quantificação ou avaliação da enanação de gás radônio em um ambiente. Microfissuras, poros, fraturas podem propiciar e facilitar a percolação de líquidos, fluidos, e conseqüentemente, a difusão do gás radônio.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro, através da concessão de Bolsa de Formação de Pesquisador Doutorado, e à Capes no âmbito do projeto PROCAD-NF 2396/2008 que tornaram possível a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010). Rochas para Revestimento - Requisitos para granitos. NBR 15844. Rio de Janeiro, p. 1-2.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010a). Análise petrográfica. NBR 15845, anexo A: Rio de Janeiro, p. 3-5.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010b). **ABNT-NBR 15845** - Rochas para Revestimento - Métodos de Ensaio, Anexo B (normativo) Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, p. 6-8.



- AMARAL, P. G. Q. (2011). **Caracterização Radiométrica e de Exalação de Radônio em Rochas Ornamentais Silicáticas Beneficiadas no Estado do Espírito Santo**. Rio Claro. 193 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- AMARAL, P. G. Q.; GALEMBECK, T. M. B.; BONOTTO, D. M.; ARTUR, A. C. (2012) Uranium distribution and radon exhalation from Brazilian dimension stones. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 70, n° 4, p. 808-817.
- ARTUR, A. C.; BONOTTO, D. M.; AMARAL, P. G. Q.; GALEMBECK, T. M. B. (2013). Metodologia para a quantificação da exalação do gás radônio em rochas ornamentais. **Geociências**, v. 32, n. 1, p. 166-180.
- BONOTTO, D. M. (1986). **Aplicações Hidrogeoquímicas dos Isótopos Naturais das séries do U (4n + 2) e Th (4n) no Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG)**. 1986. 378 f. Tese (Doutorado) – IAG, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP.
- BOWIE, S. H. U. e PLANT, J. A. (1983). Natural radioactivity in the environment. In: THORNTON, I. (Ed.) Applied environmental geochemistry. London: Academic Press, 501 p.
- NAVARRO. F. C. (1998). Granitos ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: Atas II CONGRESO URUGUAYO DE GEOLOGIA. Punta del Este, Uruguai. p. 103-107.
- RODRIGUES, E. P.; CHIODI FILHO, C.; COUTINHO, J. J. M. (1997) Importância da petrografia para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais. Lisboa: **Rochas e Equipamentos**, v. 47, 2 p.