



**Parâmetros Normativos das Rochas Ornamentais
Pegmatíticas do Seridó Oriental Paraibano - Pedra Lavrada/PB**
Normative Parameters of the Pegmatite Ornamental
Stones of the Eastern Seridó Paraibano - Pedra Lavrada/PB

Antonio Leal Neto¹; Irani Clezar Mattos¹;
Francisco Diones Oliveira Silva¹; Igor Magalhães Clemente² & José de Araújo Nogueira Neto³

¹Universidade Federal do Ceará. Departamento de Geologia Campus do Pici - Blocos 912/913. 60440-554 - Fortaleza-CE-Brasil

²Universidade Federal do Pampa. Curso de Geologia, Av. Pedro Anunciação, 111 - Bairro Vila Batista - Caçapava do Sul-RS-Brasil

³Universidade Federal de Goiás. Faculdade de Ciências e Tecnologia

Campus de Aparecida de Goiânia. Rua Mucuri, S/N, Setor Conde dos Arcos. 74968755 - Aparecida de Goiânia-GO-Brasil

Emails: antoniolealneto1970@gmail.com; irani.mattos@gmail.com;

francisco.diones.geologia@gmail.com; igor.clemente@unipampa.edu.br; nogueiraneto.josedearaujo@gmail.com

Recebido em: 09/11/2018 Aprovado em: 21/01/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_41_52

Resumo

As rochas estudadas no presente trabalho são conhecidas comercialmente como *Branco Fuji*, *Capuccino Fuji* e *Golden Fuji*. São oriundas de uma mesma frente de lavra localizada no município de Pedra Lavrada/PB. Possuem composição mineralógica semelhante sendo formadas essencialmente por quartzo, plagioclásio, muscovita, microclina e granada com composição modal entre 5% e 34% e minerais acessórios, com composição modal inferior a 5%, com destaque para sericita, biotita e opacos. Petrograficamente correspondem a pegmatitos com estrutura isotrópica, granulação mineral variando de média a muito grossa, elevado grau de microfissuramento mineral, alteração mineral de incipiente a moderada e contatos minerais predominantes do tipo côncavo-convexo. Os valores obtidos para as propriedades físico-mecânicas indicam que os pegmatitos investigados podem ser utilizados como rocha ornamental e de revestimento, porém, são necessárias ressalvas quanto ao uso do pegmatito Branco Fuji, em função de seu desempenho nos ensaios relativos a porosidade, absorção de água, resistência à compressão uniaxial e resistência à flexão exibirem valores inferiores ao limite estabelecidos pelas normas vigentes. Os resultados verificados na exalação de radônio das rochas pesquisadas são considerados elevados: pegmatito Branco (215,0 Bq/m³), Capuccino (176,3 Bq/m³) e Golden (156,0 Bq/m³). Os resultados para a eficiência de exalação do gás radônio demonstram que a quantidade do gás ²²²Rn efetivamente emanado nas rochas é pequena em relação a quantidade total de ²²²Rn gerada. A simulação para ambientes fechados mostra que os valores dosimétricos obtidos para o pegmatito Branco foi de 0,88 pCi/L; 0,73 pCi/L para o pegmatito Capuccino e de 0,64 pCi/L para o pegmatito Golden revelando valores inferiores ao limite dosimétrico sugerido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

Palavras-chave: Rocha Ornamental; Pegmatito; Propriedades Físico-Mecânicas; Exalação de Radônio

Abstract

The rocks studied in the present work are known commercially as White Fuji, Capuccino Fuji and Golden Fuji. They come from the same mining front located in the municipality of Pedra Lavrada/PB. They have a similar mineral composition, consisting mainly of quartz, plagioclase, muscovite, microcline and garnet with modal composition between 5% and 34% and accessory minerals, with a modal composition of less than 5%, especially sericite, biotite and opaque. Petrographically correspond to pegmatites with isotropic structure, mineral granulation ranging from medium to very coarse, high degree of mineral microcracking, incipient to moderate mineral alteration and predominant concave-convex mineral contacts. The values obtained for the physical-mechanical properties indicate that the pegmatites investigated can be used as ornamental and coating rock, however, reservations regarding the use of the White Fuji pegmatite are required, as a function of their performance in the porosity, water absorption, uniaxial compressive strength and flexural strength exhibit values lower than the limits established by current standards. The results obtained in the radon exhalation of the studied rocks are considered high: White pegmatite (215,0 Bq/m³), Capuccino (176,3 Bq/m³) and Golden (156,0 Bq/m³). The results for radon gas exhalation efficiency demonstrate that the amount of ²²²Rn effectively emanated in the rocks is small relative to the total amount of ²²²Rn generated. The simulation for indoor environments shows that the dosimetric values obtained for White pegmatite were 0,88 pCi/L; 0,73 pCi/L for Cappuccino pegmatite and 0,64 pCi/L for Golden pegmatite revealing values below the dosimetric limit suggested by the United States Environmental Protection Agency.

Keywords: Ornamental Rock; Pegmatite; Physical-Mechanical Properties; Radon Exhalation

1 Introdução

A região do Seridó Oriental Paraibano possui extensas áreas de exposição de rochas cristalinas que têm potencial para serem exploradas como rochas ornamentais e de revestimento. O surgimento deste setor produtivo potencializa o desenvolvimento socioeconômico da região, através da instalação de empresas mineradoras e, conseqüentemente, melhora a oferta de empregos diretos e indiretos distribuídos em toda cadeia produtiva (mapeamento geológico, pesquisa mineral, lavra, transporte, beneficiamento, comercialização) relacionados ao mercado de rochas ornamentais.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a conformidade normativa das rochas pegmatíticas oriundas do município de Pedra Lavrada/PB (Figura 1) às exigências do mercado interno e externo. São considerados estudos petrográficos, mensuração das propriedades físico-mecânicas, quantificação da exalação de gás radônio e simulação deste em ambientes fechados. Através do conhecimento destes parâmetros tecnológicos poder-se-á indicar se tais

rochas pegmatíticas atendem de forma satisfatória às demandas do mercado, cada vez mais exigente, em relação as suas aplicações, sejam elas de caráter estrutural, funcional ou estético nas obras de construção civil.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

As rochas pegmatíticas selecionadas para estudo são comercialmente denominadas Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji (Figura 2). São rochas de três fácies pegmatíticas explotadas na localidade de Sítio Serra Verde a 12 km a sudeste da sede do município de Pedra Lavrada-PB.

Para a execução da pesquisa foram coletados nove blocos rochosos, sendo três de cada tipo pegmatítico, extraídos de uma mesma frente de lavra, medindo 30cm x 30cm x 15cm, a partir dos quais, foram confeccionados 115 corpos de prova necessários para a realização dos ensaios aqui abordados (Figura 3).

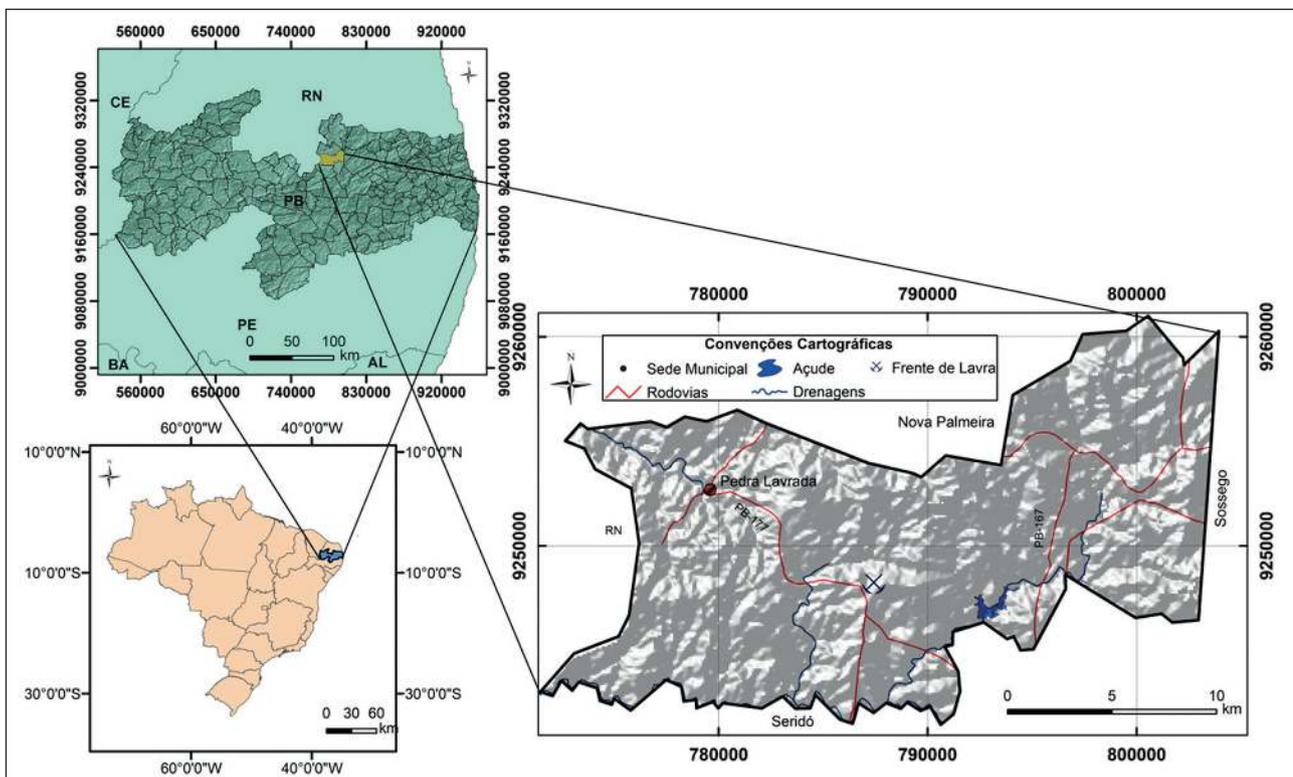


Figura 1 Localização do município de Pedra Lavrada/PB e frente de lavra dos pegmatitos.

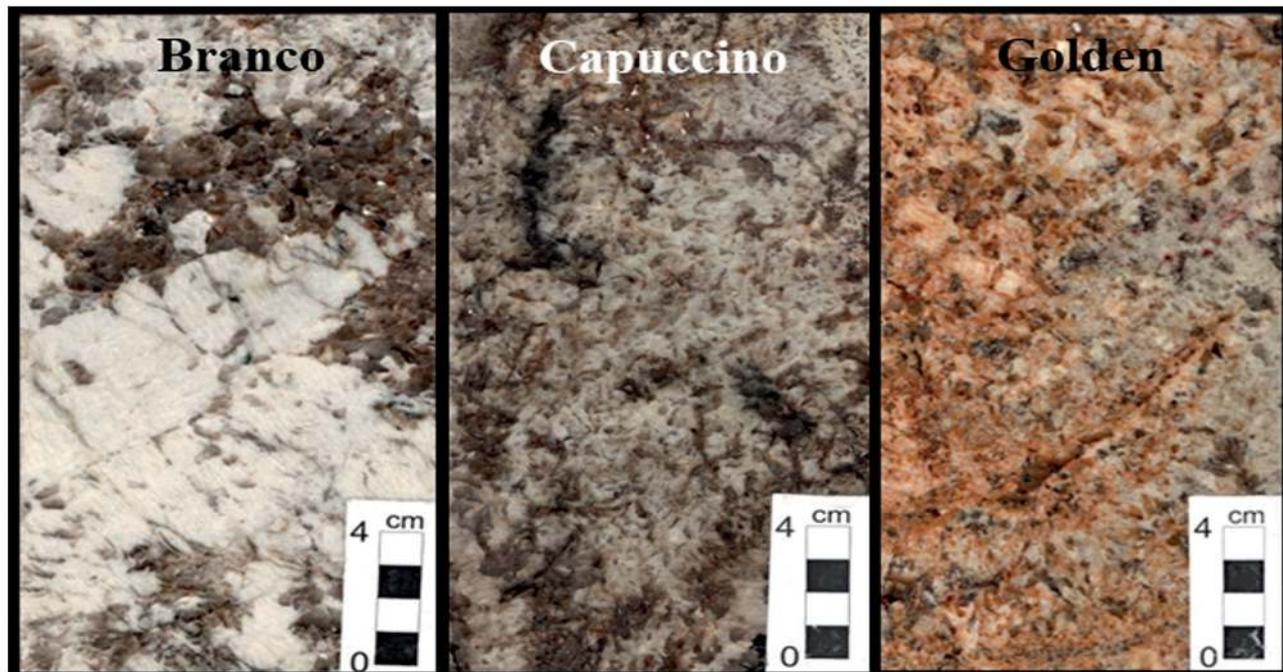


Figura 2 Placas polidas (20cm x 10cm x 2cm) das rochas estudadas e seus respectivos nomes comerciais (Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji).



Figura 3 Blocos rochosos a partir dos quais foram confeccionados os corpos de prova necessários aos ensaios realizados na pesquisa.

2.2 Métodos

Os métodos utilizados nesta pesquisa foram análise petrográfica, determinação das propriedades físico-mecânicas (densidade, porosidade, absorção de água, resistência à compressão uniaxial e resistência à flexão - três pontos) e monitoramento da exalação do gás radônio.

2.2.1 Análise Petrográfica

A análise petrográfica foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica/LME do Departamento de Geologia/UFC (Fortaleza/CE), utilizando-se microscópio petrográfico Nikon, e baseou-se na observação de lâminas petrográficas que permitiram identificar e detalhar feições como: textura (dimensão, forma, distribuição e arranjo mineral), composição mineral (minerais essenciais e acessórios e suas quantidades modais), grau de alteração mineral (intenso, moderado, incipiente, muito incipiente, ausente), grau e tipo de microfissuramento mineral (intragrão preenchido, intragrão não preenchido, intergrão preenchido e intergrão não preenchido) e tipos de contatos minerais (plano, serrilhado e côncavo-convexo). Os critérios para as análises petrográficas seguiram as determinações contidas na norma NBR 15.845-1 (ABNT, 2015) e as recomendações sugeridas por Rodrigues *et al.* (1997), Navarro (1998) e Meyer (2003).

2.2.2 Propriedades Físico-Mecânicas

As determinações relativas as propriedades físico-mecânicas das rochas investigadas foram obtidas no Laboratório de Rochas Ornamentais/UNESP (Rio Claro/SP), de acordo com os procedimentos da norma NBR 15.845/2, 5 e 6 (ABNT, 2015). Cabe salientar que as propriedades físico-mecânicas fornecem informações importantes sobre a sanidade da rocha, bem como, a existência de micro-descontinuidades às quais podem influenciar diretamente na maior difusão do gás radônio.

2.2.3 Exalação de Radônio

O radônio é um gás insípido, inodoro e incolor à temperatura ambiente, que exibe uma fosforescência brilhante que se torna avermelhada a cerca de

-180°C. Sua densidade é oito vezes maior que a do ar (1,217 g/L a 1 atm a 0°C), sendo assim é o gás mais denso conhecido de acordo com Azevedo (2013). O radônio (^{222}Rn) tem uma meia-vida de 3,83 dias, o que lhe permite mobilidade significativa para escapar da rocha na qual foi gerado e, no caso de inalação, frações deste gás radioativo poderão, devido a sua curta meia-vida, sofrer decaimentos para ^{218}Po e ^{214}Pb antes de serem totalmente removidos pelo metabolismo humano e, por serem sólidos, ficam retidos no tecido pulmonar onde poderão causar lesões e até mesmo originar neoplasias segundo Stewart & Kleihues (2003).

Teores de Urânio

As concentrações de U foram obtidas por espectrometria gama e a quantificação da exalação de gás radônio das rochas estudadas foram determinadas no Laboratório de Rochas Ornamentais/UNESP (Rio Claro/SP), através do monitoramento temporal, em sistema fechado à vácuo, num ciclo pré-fixado de 25 dias, conforme a metodologia descrita em Artur *et al.* (2013). A quantidade de gás radônio existente na rocha tem relação direta com o teor de U presente na mesma, que é reflexo direto de sua própria petrogênese.

Quantificação da Exalação de Gás Radônio

Para proceder a quantificação da exalação de gás radônio utilizou-se a técnica de detecção ativa, onde cinco amostras polidas e resinadas de cada tipo pegmatítico com dimensões de 20,0cm x 4,0cm x 2,0cm foram acondicionadas dentro de garrafas de vidro Pirex[®] com vácuo de 400 mm Hg por um período de 25 dias. Após o período de confinamento, o garrafão contendo as amostras é conectado ao aparelho AlphaGUARD para realização da medida da taxa de exalação de gás radônio. Este aparelho quantifica dados importantes tais como temperatura, umidade relativa do ar, pressão e emanação de radônio em Bq/m³, simultaneamente, com atualizações programadas a cada minuto.

Determinação da Eficiência de Emanação de Gás Radônio

Bonotto (1996) utilizou o fator E definido por Wanty *et al.* (1992) para determinar a eficiência

da emanção do ^{222}Rn da rocha e sua transferência para a água subterrânea. Amaral (2011) adaptou o mesmo princípio para efetuar os cálculos para determinação da transferência do gás radônio exalado da rocha para o ar do meio ambiente, utilizando a seguinte fórmula:

$$E = \frac{(^{222}\text{Rn})_{\text{ar}}}{(^{222}\text{Rn})_{\text{ar}} + (^{222}\text{Rn})_{\text{rocha}}}$$

O fator **E** (fator de eficiência de emanção) é quase sempre menor que 0,5 e ao atingir este nível, a rocha estaria exalando todo o gás radônio produzido. Para rochas, este fator se situa abaixo de 0,3 o que indicaria que a exalação é de quase metade do gás ^{222}Rn gerado pela rocha.

Segundo Azevedo (2013) para se determinar a quantidade ^{226}Ra em Bq/kg é necessário multiplicar a concentração de U (ppm) presente na rocha pela constante 12,34, que pelas condições de equilíbrio secular radioativo é equivalente a mesma proporção de ^{222}Rn gerado na rocha a partir de seu isótopo pai ^{226}Ra . Ainda, é preciso converter a quantidade de radônio exalado pela rocha no ar em Bq/m³ (no ciclo de 25 dias) para Bq/kg, para que esses valores sejam utilizados na equação definida para o fator **E**.

A determinação do ^{222}Rn em Bq/kg é obtida pela razão entre os valores de ^{222}Rn (Bq/m³) multiplicada pelo volume do garrafão (l) e dividida pelo peso da amostra (kg) utilizada no monitoramento, a partir da seguinte equação:

$$^{222}\text{Rn} = \frac{(^{222}\text{Rn})_{\text{Bq/m}^3} \times 0,019\text{m}^3}{\text{peso da amostra (kg)}}$$

Após este procedimento inicial pode-se obter o fator de eficiência **E** que vai avaliar a eficiência de exalação de cada rocha em relação à quantidade de ^{222}Rn calculada a partir do teor de urânio da rocha, dividindo o valor de ^{222}Rn (Bq/kg) exalado da amostra pelo somatório do ^{222}Rn (Bq/kg) exalado da amostra mais ^{222}Rn (Bq/kg) gerado pela amostra, através da equação:

$$E = \frac{(^{222}\text{Rn (Bq/kg)})_{\text{exalado}}}{(^{222}\text{Rn (Bq/kg)})_{\text{exalado}} + (^{222}\text{Rn (Bq/kg)})_{\text{gerado}}}$$

Simulação do Nível de Radônio em Ambientes Fechados

Estudos epidemiológicos confirmam o efeito carcinógeno do radônio em seres humanos, quando estes permanecem por longos períodos em ambientes fechados, sem que haja uma boa circulação de ar, o que levou a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer a classificar o radionuclídeo ^{222}Rn como um carcinógeno de classe I conforme Stewart & Kleihues (2003).

A adição do nível de radônio em um ambiente, em se tratando de rochas ornamentais, está relacionada com a área de exposição da rocha utilizada, ou seja, quanto maior a área de rocha aplicada maior será a adição no nível de gás radônio no ambiente segundo Azevedo (2013).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2003) estipulou a dosimetria limite para exalação do gás ^{222}Rn em, no máximo, 148 Bq/m³ ou 4,0 pCi/L, em função do elevado nível de concentração de gás radônio em ambientes fechados.

Com base na metodologia de Chyi (2008) e adaptada por Amaral (2011), Amaral *et al.* (2012) e Artur *et al.* (2013) realizou-se a simulação da adição do gás radônio produzido pelos pegmatitos estudados em um ambiente padrão sem troca de ar com o meio externo. Para tanto, considerou-se a aplicação de cada tipo rochoso estudado como piso em um ambiente fechado com 100,00 m² de área e com altura (pé direito) de 2,80 m. A equação utilizada para esta avaliação é:

$$\text{Rn}_{\text{Amb}} = \frac{\text{Qtd Bq/m}^3 \times \text{F2}}{\text{F1}} = \text{Bq/m}^3$$

Onde:

Qtd Bq/m³ é a quantidade de ^{222}Rn exalado pela rocha;

F1 é o fator de dissipação de ar;

F2 é o fator de amplificação do material utilizado.

O fator F1 (fator de diluição no ar) corresponde ao volume de ar recorrente no interior do ambiente considerado em relação ao do volume de ar interno do garrafão, dado por:

$$F1 = \frac{V_{ar\ Amb}}{V_{ar\ Gar}}$$

Onde:

$V_{ar\ Amb}$ é o volume de ar no ambiente;

$V_{ar\ Gar}$ é o volume de ar no garrafão.

O fator F2 (fator de amplificação do material) é a razão do material aplicado (m^2) na residência pela relação da metragem das amostras utilizadas no monitoramento do ^{222}Rn , onde:

$$F2 = \frac{A_{Apl}}{A_{Mon}}$$

Onde:

A_{Apl} é a área do ambiente com rocha aplicada (m^2);

A_{Mon} é a área das amostras monitoradas (m^2).

3 Resultados e Discussões

3.1 Análise Petrográfica

Pegmatito Branco Fuji - É uma rocha pegmatítica leucocrática com coloração branca, exibindo textura holocristalina, porfirítica, com tamanho dos cristais variando entre 1,0 mm a 80,0 mm e granulação média a muito grossa. Apresenta aspecto maciço e isotrópico, com presença de fraturamentos dispersos por toda a massa rochosa. Cerca de 10% dos minerais de muscovita apresentam iridescência observáveis na superfície da placa polida. Mesmo com a aplicação da resina epóxi, observam-se cavidades (milimétricas a centimétricas) na chapa polida com evidente deslocamento lamelar, marcando os planos de clivagem da muscovita. Não há sinais de processo de alteração hidrotermal nos minerais à vista desarmada. O grau de microfissuramento mineral é elevado, predominando o tipo intergrãos não preenchidos (79%), com 0,63 microfissuras por mm^2 . A alteração mineral é incipiente, nos minerais de muscovita e granada. Os contatos entre os grãos minerais são do tipo côncavo-convexo (64%), com densidade de contatos de 2,0 por mm^2 (Tabela 1).

Pegmatito Capuccino Fuji - É uma rocha pegmatítica mesocrática com coloração cinza, com textura holocristalina, inequigranular, com tamanho

dos cristais variando de 1,0 mm a 30,00 mm, com média de 18 mm e granulação fina a grossa. A rocha apresenta aspecto maciço e isotrópico, com presença de produtos de alteração hidrotermal ferruginosa, provavelmente oriunda da granada. É possível observar a presença de cristais milimétricos de granada, de cor alaranjada, inclusa na matriz quartzofeldspática em algumas porções da placa polida. A rocha apresenta elevado grau de microfissuramento mineral, prevalecendo o tipo intergrãos não preenchidos (69%), e 1,11 microfissuras por mm^2 ; o grau de alteração mineral é considerado moderado nos plagioclásios, muscovitas e granada. Os contatos entre os minerais são, predominantemente, do tipo côncavo/convexo (72%), com densidade de contatos na ordem de 2,9 por mm^2 (Tabela 1).

Pegmatito Golden Fuji - É um pegmatito mesocrático com coloração vermelha, exibindo textura holocristalina, inequigranular e granulação média a grossa, com cristais variando entre 1,0 mm a 20,00 mm de tamanho. Sua tonalidade avermelhada é resultado da alteração ferruginosa, provavelmente, causada por hidrotermalismo que atuou nos minerais de granada. Os contatos entre os grãos minerais são côncavo-convexos (46%), ocorrendo cerca de 3,2 por mm^2 . O grau de microfissuramento mineral é do tipo intergrãos não preenchidos (72%), com 1,06 microfissuras por mm^2 e alteração mineral é incipiente nos minerais de plagioclásio e moderada nos cristais de granada (Tabela 1).

3.2 Propriedades Físico-Mecânicas

Os resultados obtidos para os tipos pegmatíticos estudados foram comparados com os parâmetros da norma NBR 15.845/2, 5 e 6 (ABNT, 2015), que especifica as características físico-mecânicas dos granitos destinados ao revestimento de edificações.

Densidade Aparente

O pegmatito Golden apresentou a maior densidade, tanto na condição saturada (2,639 g/cm^3) quanto na condição seca (2,631 g/cm^3), em virtude de sua menor porosidade (0,81%) e, conseqüentemente, maior coesão mineral em relação aos demais

Características Petrográficas			Rochas Estudadas		
			Branco Fuji	Capuccino Fuji	Golden Fuji
Mineralogia (%)	Quartzo		29	30	26
	Plagioclásio		34	29	33
	Muscovita		14	15	11
	Microclina		15	14	19
	Granada		5	10	9
	Sericita		1	0	1
	Biotita		1	1	0
	Opacos		1	1	1
Coloração			branca	cinza	vermelha
Estrutura			isotrópica	isotrópica	isotrópica
Textura			pegmatítica	pegmatítica	pegmatítica
Granulação			média a muito grossa	média a grossa	média a grossa
			1mm - 80mm	1mm - 30mm	1mm - 20mm
Tamanho Relativo dos Grãos			porfírica	inequigranular	inequigranular
Grau de microfissuramento			Alto	alto	Alto
Tipos de Microfissuras	Intragrãos Preenchidas	%	1,71	1,94	1,48
		mm ²	0,46	0,91	0,91
	Intragrãos Não Preenchidas	%	13,67	20,29	15,13
		mm ²	2,67	4,67	4,30
	Tamanho Médio Intragrãos	Mm	0,37	0,25	0,21
	Intergrãos Preenchidas	%	5,13	8,69	10,7
		mm ²	1,37	4,11	6,63
	Intergrãos Não Preenchidas	%	79,49	69,08	72,69
mm ²		0,63	1,11	1,06	
Tamanho Médio Intergrão	Mm	1,62	1,41	1,33	
Alteração Mineral	Plagioclásio		moderada	moderada	incipiente
	Muscovita		incipiente	moderada	incipiente
	Microclina		incipiente	incipiente	incipiente
	Granada		incipiente	moderada	moderada
Tipos de Contato	Planos	%	28,57	22,22	36,67
		mm ²	0,91	0,91	2,51
	Serrilhados	%	7,14	5,56	16,66
		mm ²	0,23	0,23	1,14
	Côncavo-convexos	%	64,29	72,22	46,67
		mm ²	2,06	2,97	3,2
Classificação Petrográfica			Pegmatito Granítico		

Tabela 1 Síntese das características petrográficas das rochas pegmatíticas estudadas: Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji.

tipos pegmatíticos estudados, bem como, devido ao fato de apresentar contatos minerais predominantemente côncavo-convexos (46,67%) o que lhe confere maior resistência ao arranjo espacial de seus

grãos minerais. Outro fator que contribuiu para uma maior densidade dos pegmatitos Capuccino e Golden em relação ao pegmatito Branco é a natureza de sua composição mineralógica, visto que são mais

ricos em granada (10% e 9%, respectivamente) mineral de elevada densidade. Tal fato certamente contribuiu para o aumento da densidade final destes materiais, em relação ao pegmatito Branco que, em termos percentuais, apresenta teores de granada não superiores a 5% (Tabela 1). Constata-se que as densidades dos três tipos pegmatíticos estudados são superiores ao limite de $2,550 \text{ g/cm}^3$ estabelecido pela norma NBR 15.845/2 (ABNT, 2015), demonstrando assim que as rochas são *a priori* suficientemente coesas e poderiam suportar os esforços a que forem submetidos durante sua aplicação como rocha ornamental (Figura 4).

Porosidade Aparente

O pegmatito Branco exibiu a maior porosidade (1,45%), este valor ultrapassa consideravelmente o valor limítrofe de referência estabelecido pela norma NBR 15.845/2 (ABNT, 2015) demonstrando que este material é o mais propício à percolação e acúmulo de água em suas microfissuras, inviabilizando sua utilização em ambientes úmidos, tais como: banheiros, lavabos e pias. Este comportamento reflete suas características petrográficas, principalmente, no que se refere ao elevado percentual de microfissuras minerais intergrãos não preenchidas (79,49%), além de apresentar as microfissuras de maior tamanho médio intergrãos (1,62mm) e intragrãos (0,37mm) (Tabela 1). Os pegmatitos Capuccino e Golden, com 0,84% e 0,81%, respectivamente, apresentam porosidades dentro dos valores limítrofes de referência da norma vigente (Tabela 2). O pegmatito Golden apresenta menor porosidade, em função de suas propriedades petrográficas e mineralógicas: contatos minerais predominantemente côncavo-convexos (46,67%), alteração mineral incipiente no plagioclásio, na muscovita e na microclina, além, de apresentar as microfissuras de menor tamanho médio intergrãos (1,33mm) e intragrãos (0,21mm) (Tabela 1 e Figura 4).

Absorção de Água

O pegmatito Branco apresentou absorção de água 0,56%, valor acima do referencial estabelecido na norma (0,40%) em função de suas propriedades

petrográficas, mineralógicas e texturais, enquanto os pegmatitos Capuccino (0,32%) e Golden (0,31%) enquadram-se dentro dos valores limítrofes das normas vigentes. As respostas dos materiais estudados aos ensaios relativos à densidade, porosidade e absorção de água demonstram comportamento coerente, refletindo de forma consistente a influência exercida pelas características petrográficas, texturais e mineralógicas.

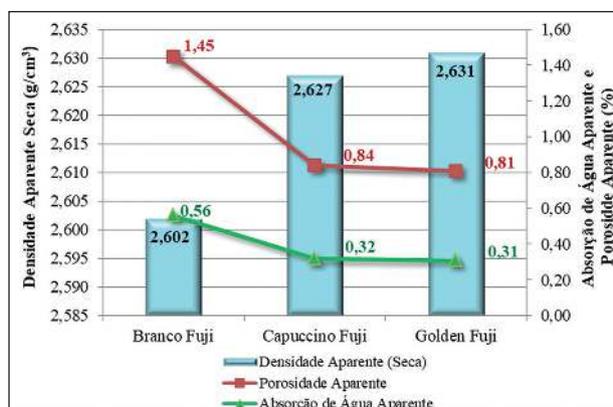


Figura 4 Densidade, porosidade e absorção de água dos pegmatitos estudados: Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji.

Resistência à Compressão Uniaxial

Os valores de ruptura de 124,8 MPa e 140,3 MPa (Tabela 2) obtidos para os pegmatitos Capuccino e Golden, respectivamente, atendem aos valores limítrofes sugeridos na norma vigente, sendo reflexo direto de seus baixos índices de porosidade e absorção de água, além da influência marcante de suas propriedades petrográficas e mineralógicas que contribuem para a obtenção de valores elevados de resistência à compressão uniaxial. De acordo com a ISRM (1979) estas rochas são classificadas como “Muito Resistentes”, uma vez que, suas resistências situam-se entre 100 e 250 MPa. O pegmatito Branco com 55,7 MPa, por sua vez, exibe valor consideravelmente inferior ao estabelecido pela norma NBR 15.845/5 (ABNT, 2015), refletindo os problemas causados por seus elevados índices de porosidade e absorção de água, agravados pelo elevado grau de microfissuramento mineral do tipo intergrãos não preenchidos (79,49%) (Tabela 1 e 2). Em função dos resultados apresentados o pegmatito Branco requer especial atenção para seu uso como elemento estru-

tural em colunas de sustentação em obras de construção. Na Figura 5, observa-se que existe uma relação inversamente proporcional entre a resistência à compressão uniaxial e a porosidade das rochas, esta relação torna-se bastante clara, por exemplo, quando analisamos os dados referentes ao pegmatito Branco, onde o valor da porosidade aparente é bastante elevada (1,45%) e o índice de compressão uniaxial é extremamente baixo (apenas 55,7 MPa). Para os pegmatitos Golden e Capuccino esta constatação também é notória, porém, bem menos intensa, apesar de que anomalias pontuais podem ser observadas nestes tipos rochosos, em função principalmente, da heterogeneidade típica das rochas pegmatíticas onde são comuns ocorrerem grandes variações granulométricas, texturais e composicionais.

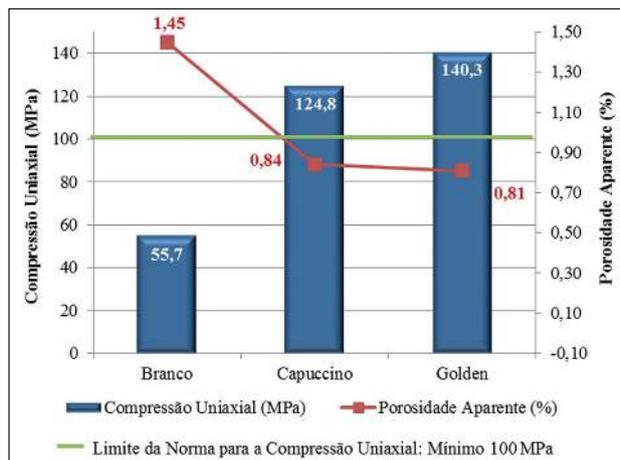


Figura 5 Compressão uniaxial e porosidade para os pegmatitos estudados: Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji.

Resistência à Flexão - Três Pontos (Módulo de Ruptura)

Sob condições secas, o pegmatito Golden com 10,8 MPa posicionou-se dentro da referência exigida pela norma vigente, entretanto, o pegmatito Capuccino (9,9 MPa) obteve valor bem próximo ao limite normativo, por sua vez, o pegmatito Branco (5,8 MPa) obteve índice consideravelmente inferior ao sugerido pela norma (Tabela 2). Estes dados mostram-se compatíveis com os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão uniaxial, demonstrando extrema coerência entre os resultados obtidos nos dois ensaios e corroborando, mais uma vez, a importância da petrografia em antever as propriedades físico-mecânicas das rochas estudadas. Na

Figura 6, verifica-se uma correlação inversamente proporcional entre a resistência à flexão e a absorção de água, esta relação torna-se evidente, por exemplo, quando analisado os resultados do pegmatito Branco, onde a absorção de água é elevada (0,56%) e o índice de resistência à flexão é consideravelmente baixo (5,8 MPa).

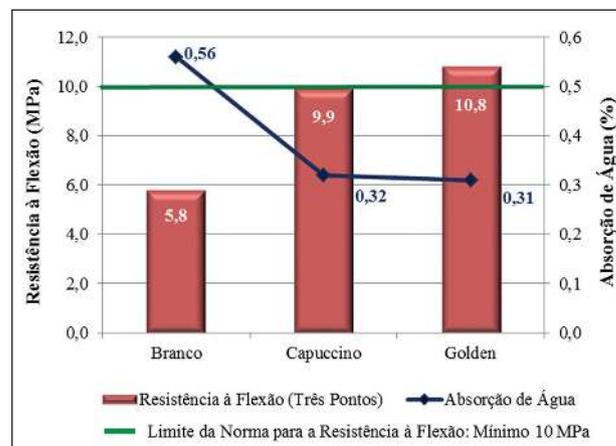


Figura 6 Resistência à flexão e absorção de água para os pegmatitos estudados: Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji.

Propriedades Físico-Mecânicas		Rochas Estudadas			NBR 15.845/2,5 e 6 (ABNT, 2015)	
		Branco	Capuccino	Golden	Valores Limitrofes	
Densidade	Condição Seca	g/cm ³	2,602	2,627	2,631	Mín. 2,550 g/cm ³
Porosidade	%	1,45	0,84	0,81		Máx. 1,00 %
Absorção de Água	%	0,56	0,32	0,31		Máx. 0,40 %
Resistência à Compressão Uniaxial (Cond. Seca)	MPa	55,7	124,8	140,3		Mín. 100,0 MPa
Resistência à Flexão (Cond. Seca)	MPa	5,8	9,9	10,8		Mín. 10,0 MPa

Tabela 2 Resultados das propriedades físico-mecânicas para os pegmatitos estudados: Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji.

3.3 Exalação de Radônio

Concentração de Urânio

As concentrações de U nas rochas foram de 3,18ppm, 26,37ppm e 25,53ppm para os pegmatitos

Branco, Capuccino e Golden, respectivamente. Estes valores de U são considerados elevados quando comparados às concentrações médias estimadas por Dickson & Scott (1997) para rochas pegmatíticas (que variam entre 0,3 a 1,0 ppm, apenas). Os altos teores de U são reflexo da presença de minerais traços (apatita e titanita) nas rochas investigadas que são portadores destes elementos químicos em suas redes cristalinas.

Exalação de Gás Radônio

As rochas estudadas apresentam valores relativamente elevados de exalação de radônio com 215,0 Bq/m³, 176,3 Bq/m³ e 156,0 Bq/m³ para os pegmatitos Branco, Capuccino e Golden, respectivamente. A maior taxa de exalação de radônio ocorreu no pegmatito Branco o que pode ser explicado, dentre outros fatores, pelos resultados obtidos em suas propriedades físico-mecânicas e em sua análise petrográfica. O pegmatito Golden apresentou a menor taxa de exalação de radônio (156,0 Bq/m³), reflexo direto de sua baixa porosidade (0,81%), menor índice de absorção de água (0,31%) e maior densidade aparente (2,631g/cm³) na condição seca (Tabela 2), observa-se que nem sempre o teor mais elevado de U corresponde a maior exalação de gás radônio. Assim sendo, fatores relacionados aos aspectos petrográficos, texturais e estruturais da rocha como intensidade e tipo de microfissuramento, interferem na menor ou maior migração do gás radônio do interior da rocha até a atmosfera.

Eficiência de Exalação de Gás Radônio

Os resultados obtidos para eficiência de exala-

ção de gás radônio (fator E) encontram-se na Tabela 3, e demonstram que a quantidade do gás ²²²Rn efetivamente emanado das rochas pesquisadas é extremamente pequena em relação a quantidade total de ²²²Rn gerada pelas rochas. Outro aspecto a ser considerado é que não há correlação entre a quantidade de U presente na rocha e a quantidade de gás radônio efetivamente exalado da rocha para a atmosfera. O pegmatito Branco com 3,18 ppm de U resultou na maior eficiência na exalação de ²²²Rn com E = 0,0411; já os pegmatitos Capuccino com 26,37 ppm e Golden com 25,53 ppm de U apresentam coeficientes de exalação de radônio, relativamente baixas, de 0,0040 e 0,0039, respectivamente (Tabela 3

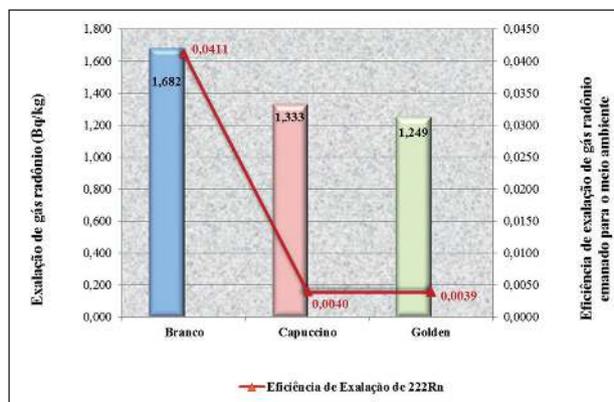


Figura 7 Quantidade de gás ²²²Rn emanado pelas pegmatitos estudadas e a eficiência de exalação para a atmosfera.

e Figura 7).

Simulação do Nível de Radônio em Ambientes Fechados

A simulação realizada demonstra que as rochas pegmatíticas estudadas estão de acordo com as recomendações dosimétricas (Tabela 4) sugeridas pela Agência de Proteção Ambiental Americana

Rochas Estudadas	U (ppm)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²²² Rn gerado (Bq/kg)	²²² Rn exalado em 25 dias (Bq/m ³)	²²² Rn exalado da amostra vs volume do garrafão (Bq)	Peso da amostra (kg)	²²² Rn exalado pela amostra (Bq/kg) (equação A)	Diferença entre Rn gerado e exalado (Bq/kg)	Eficiência de exalação de ²²² Rn (equação B)
Branco	3,18	39,24	39,24	215,0	4,085	2,428	1,682	37,558	0,0411
Capuccino	26,37	325,40	325,40	176,3	3,349	2,513	1,333	324,067	0,0040
Golden	25,53	315,04	315,04	156,0	2,964	2,373	1,249	313,791	0,0039

Tabela 3 Eficiência de exalação do ²²²Rn dos pegmatitos estudadas: Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji.

Rochas Estudadas	Área Construída (m ²)	Pé Direito (m)	Volume de Ar Área Construída (m ³)	Volume de Ar do Garrafão (m ³)	Fator 1	Superfícies corpos-de-prova (m ²)	Fator 2	Exalação após 25 dias (Bq/m ³)	²²² Rn exalado no ambiente	
									Bq/m ³	pCi/L
Branco	100	2,8	280,00	0,019	14736,84	0,04499	2222,7	215,0	32,428	0,88
Capuccino	100	2,8	280,00	0,019	14736,84	0,04408	2268,6	176,3	27,140	0,73
Golden	100	2,8	280,00	0,019	14736,84	0,04479	2232,6	156,0	23,634	0,64

Tabela 4 Resultados da simulação de adição de ²²²Rn exalado em um ambiente de 100 m² revestidos com as rochas estudadas (Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji) em ambiente fechado.

(USEPA, 2003) de 148 Bq/m³ ou 4,0 pCi/L.

4 Conclusões

As rochas analisadas possuem composição mineralógica similares, sendo formados essencialmente por quartzo, plagioclásio, muscovita, microclina e granada, com teores variando entre 5% e 34%, e minerais acessórios, com teores inferiores a 5%, com destaque para sericita, biotita e opacos. Petrograficamente, as rochas estudadas classificam-se como “pegmatitos” e possuem como características principais: estrutura isotrópica; granulação mineral variando entre “muito grossa” a “grossa”; elevado grau de microfissuramento mineral; alteração mineral variando de “incipiente a moderada”, principalmente nos minerais de plagioclásio, muscovita, microclina e granada; e, contatos minerais predominantes do tipo côncavo-convexo.

Os resultados das propriedades físico-mecânicas demonstram que as rochas pegmatíticas Capuccino e Golden apresentam valores de densidade, porosidade, absorção de água, resistência à compressão uniaxial e resistência à flexão (três pontos) abaixo dos valores limítrofes sugeridos pela norma NBR 15.845/2, 5 e 6 (ABNT, 2015), enquanto o pegmatito Branco revela propriedades físico-mecânicas que não se enquadram dentro dos normativos estabelecidos. A utilização do pegmatito Branco Fuji em ambientes muito úmidos pode ser recomendado desde seja previamente impermeabilizado com resina epóxi apropriada. Os resultados obtidos estão diretamente relacionados às características petrográficas, mineralógicas, texturais e estruturais das rochas estudadas.

Os resultados para as concentrações de U nas rochas pegmatíticas analisadas são consideradas

altas quando comparadas às concentrações médias estimadas para rochas pegmatíticas e apresentam valores elevados de exalação de radônio, porém, quando é feita a simulação da adição de radônio em ambientes fechados, as rochas investigadas atendem plenamente ao valor limítrofe máximo recomendado (148 Bq/m³ ou 4,0 pCi/L) pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2003), uma vez que, as rochas exibem valores dosimétricos de 32,428; 27,140 e 23,634 Bq/m³ e 0,88; 0,73 e 0,64 pCi/L para pegmatito Branco Fuji, Capuccino Fuji e Golden Fuji, respectivamente. Portanto, podem ser utilizadas como rochas ornamentais e de revestimento sem riscos à saúde em ambientes fechados com baixa circulação de ar.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Antonio Carlos Artur, Coordenador do Laboratório de Rochas Ornamentais da UNESP (Rio Claro/SP) pelo apoio ao desenvolvimento da presente pesquisa.

6 Referências

- Amaral, P.G.Q. 2011. *Caracterização Radiométrica e de Exalação de Radônio em Rochas Ornamentais Silicáticas Beneficiadas no Estado do Espírito Santo*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 193p.
- Amaral, P.G.Q.; Galembeck, T.M.B.; Bonotto, D.M. & Artur, A.C. 2012. Uranium Distribution and Radon Exhalation from Brazilian Dimension Stones. *In: Applied Radiation and Isotopes*, São Paulo, 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. *Revista Geociências*, 32(1): 166 - 180.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas/ABNT. 2015. Ro-

- chas para Revestimento - Análise Petrográfica. *Norma NBR 15.845/1*, Rio de Janeiro, 9p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas/ABNT. 2015. Rochas para Revestimento - Determinação da Densidade Aparente, da Porosidade Aparente e da Absorção de Água. *Norma NBR 15.845/2*, Rio de Janeiro, 9p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas/ABNT. 2015. Rochas para Revestimento - Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial. *Norma NBR 15.845/5*, Rio de Janeiro, 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas/ABNT. 2015. Rochas para Revestimento - Determinação do Módulo de Ruptura (Flexão por Carregamento em Três Pontos). *Norma NBR 15.845/6*, Rio de Janeiro, 9p.
- Azevedo, L.R.P. 2013. *Emanação de Radônio em Rochas Ornamentais e para Revestimento do Estado do Ceará, Brasil*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 185p.
- Bonotto, D.M. 1996. *Comportamento Hidrogeoquímico do ²²²Rn e Isótopos de ²³⁸U e ²³⁴U sob Condições Controladas em Laboratório e em Sistemas Naturais*. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Livre Docência, 223p.
- Chyi, L.L. 2008. Randon Testing of Various Coutertop Materials. University of Akron, *Final Repor*, Akron, 15p.
- Dickson, B.L. & Scott, K.M. 1997. Interpretation of Aerial Gamma-Ray Surveys - Adding the Geochemical Factors. *Journal Australia Geology & Geophysics*, 2: 187 - 200.
- Meyer, A.P. 2003. *A Influência da Petrografia no Comportamento Tecnológico de Rochas Ornamentais do Complexo Socorro (SP) e Maciço Pedra Branca (MG)*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 130p.
- Navarro, F.C. 1998. Granitos Ornamentais: Análise Petrográfica na Previsão do Comportamento Físico e Mecânico. In: CONGRESSO URUGUAYO DE GEOLOGIA, 2, Montevideo, Anais, 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. *Revista Rochas e Equipamentos*, Lisboa, 47: 50-52.
- Stewart, B.W. & Kleihues, P. 2003. World Health Organization. World Cancer Report, *IARC Press*, Lyon, 342p.
- United States Environmental Protection Agency/USEPA. 2003. *Assessment of Risks from Radon in Homes*, Washington, 99p.
- Wanty, R.B.; Lawrence, E.P. & Gundersen, L.C.S. 1992. A Theoretical Model for the Flux of Radon from Rock to Groundwater. *Geological Society of America Special Papers*, 271: 73-78.