








Caracterização Tecnológica e Taxa de Exalação de Radônio de um Olivina Diabásio Porfirítico da Região de Apuiarés – CE

Technological Characterization and Radon Exhalation Rate of an Olivine Diabase Porphyritic of the Apuiarés Region – CE

Francisco Diones Oliveira Silva¹ , Antônio Leal Neto² , Wollker Cunha Soares³ ,
José de Araújo Nogueira Neto⁴ , Antônio Carlos Artur⁵ , Irani Clezar Mattos² 
& Igor Magalhães Clemente⁶ 

¹Universidade Federal do Ceará, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, CE, Brasil

²Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Laboratório de Microscopia Eletrônica, Fortaleza, CE, Brasil

³Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil

⁴Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Aparecida de Goiânia, GO, Brasil

⁵Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia, Rio Claro, SP, Brasil

⁶Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, Brasil

E-mails: franciscodiones@crateus.ufc.br; antoniolealneto1970@gmail.com; wollkercunhasoares@gmail.com;

nogueiraneto.josedearaujo@gmail.com; ac.artur@unesp.br; irani.mattos@ufc.br; igorclemente@unipampa.edu.br

Autor correspondente: Antonio Leal Neto; antoniolealneto1970@gmail.com

Resumo

O gás radônio (^{222}Rn), após o cigarro, tem sido considerado a maior causa de câncer pulmonar nos Estados Unidos, pois, segundo estudos, 21 mil pessoas morrem por ano devido a inalação do gás. Assim, é muito importante que as concentrações de radônio sejam conhecidas em ambientes fechados: residências, minas, galerias, dentre outros. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de estudos sobre as características mineralógicas e tecnológicas de um dique de diabásio, com o intuito de obter características voltadas à aplicação como rocha ornamental e para revestimentos, seguindo as normas da ABNT e avaliar a taxa de exalação de radônio, através da aplicação de métodos de detecção ativa do gás radônio. O dique está localizado no município de Apuiarés-CE, geologicamente situada na Província Borborema, NE do Brasil, a NE do Domínio Ceará Central, relacionados a fenômenos magmáticos intrusivos e efusivos meso-cenozóicos. Foram coletados dois blocos de diabásio com dimensões de 30x40x30 cm, e enviados ao laboratório, onde foram feitos os corpos-de-prova para os ensaios tecnológicos e radiométricos. O dique é petrograficamente caracterizado com Olivina Diabásio Porfirítico correspondendo a uma rocha de cor cinza escuro com variações para preto, estrutura isotrópica e textura porfirítica, não exibindo manchamentos ou irregularidades na textura que venham a comprometer o padrão estético para uso como rocha ornamental. O ensaio de exalação de radônio teve como resultado médio 1 ± 3 Bq m⁻³ e em taxa de exalação de radônio por unidade de área (E), de 0,001 Bq m⁻² h⁻¹. Portanto, em termos de caracterização tecnologia e de taxa de exalação de radônio ^{222}Rn , o Olivina Diabásio Porfirítico apresenta os requisitos de uso como rocha ornamental.

Palavras-chave: Radônio; Rocha ornamental; Olivina diabásio porfirítico

Abstract

Radon gas (^{222}Rn) after cigarette smoking, has been considered the leading cause of lung cancer in the United States, according to studies, 21,000 people die each year from gas inhalation. Thus, it is very important that radon concentrations be known indoors: residences, mines, galleries, among others. The objective of this paper is to present the results of studies on the mineralogical and technological characteristics of a diabase dyke, with the purpose of obtaining characteristics oriented to the application as ornamental rock and for coatings, following the norms of the ABNT and to evaluate the exhalation rate of radon, through the application of methods active detection of radon gas. The dike is located in the municipality of Apuiarés-CE, geologically located in the Borborema Province, NE of Brazil, NE of the Central Ceará Domain, related to meso-cenozoic intrusive and effusive magmatic phenomena. Two blocks of diabase with dimensions of 30x40x30 cm were collected and sent to the laboratory, where the specimens were made for the technological and radiometric tests. The dike is petrographically characterized with Porphyritic Olivine Diabase it corresponds to a rock of dark gray color with variations for black, isotropic structure and porphyritic texture, showing no stains or irregularities in the texture that would compromise the aesthetic standard for use as ornamental rock. The radon exhalation test resulted in 1 ± 3 Bq m⁻³ and at exhalation rate of radon per unit area (E), 0.001 Bq m⁻² h⁻¹. Therefore, in terms of technology characterization and radon exhalation rate ^{222}Rn , the Porphyritic Olivine Diabase presents the requirements of use as dimension stones.

Keywords: Radon; Dimension stones; Porphyritic olivine diabase

1 Introdução

O gás radônio (^{222}Rn), após o cigarro, tem sido considerado a maior causa de câncer pulmonar nos Estados Unidos, pois, segundo estudo realizado pela Environmental Protection Agency (2003) 21 mil pessoas morrem por ano devido a inalação do gás. Com a descoberta de altos níveis do gás radônio no interior de residências norte-americanas, estão sendo conduzidas várias investigações de materiais utilizados nas obras civis e dos processos naturais que controlam a sua presença.

O ^{222}Rn , é um gás nobre radioativo de ocorrência natural, produto do decaimento da série ^{238}U , que vem sendo estudado mundialmente após órgãos norte-americanos destacarem que o seu acúmulo em ambientes fechados com pouca ou nenhuma circulação de ar pode se tornar um risco para a saúde de quem reside e/ou trabalha nestes locais. Apesar do gás radônio não ficar retido nas vias respiratórias, os seus descendentes de meia vida curta ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po , dentre eles o ^{218}Po e ^{214}Po como emissores alfa são elementos metálicos mais prejudiciais por causarem patologias importantes na área respiratória e aumento da incidência de câncer de pulmão (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000).

O uso de rocha faz parte da história da civilização abrangendo obras antigas, em pedra. Atualmente, vem sendo cada vez mais difundido à medida que a modernização da produção promove a redução de custos e oferece melhoria na qualidade dos produtos brutos a acabados. Apesar das rochas apresentarem baixa atividade radiométrica, a crescente utilização de rochas como materiais de revestimento em ambientes de interiores, onde muitas vezes devido a uma baixa ventilação podem favorecer um efeito acumulativo do gás radônio, tem despertado a preocupação do setor para a quantificação e o conhecimento dos mecanismos de sua transferência para o ar (Anjos et al. 2005; Moura, Artur & Guedes 2004; Moura, Artur & Bonotto 2005; Moura et al. 2005; Moura et al. 2006 a, b).

Assim, é muito importante que as concentrações de radônio sejam conhecidas em ambientes fechados: residências, minas, galerias dentre outros. Como tais concentrações estão sendo emanadas de rochas e outros materiais, estas se difundem com a probabilidade de causar sérios riscos às pessoas que vivem dentro desses ambientes ou transitam pelos mesmos (Binns 1995).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar características importantes voltadas à aplicação como rocha ornamental e para revestimentos de um dique de diabásio, denominado petrograficamente de Olivina Diabásio Porfírico. Descrevendo a quantificação de

características mineralógicas e tecnológicas, seguindo as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e a exalação do gás radônio através da aplicação de método de detecção ativa.

2 Contexto Geológico

O dique de diabásio, estudado neste trabalho, está localizado no município de Apuiarés, na porção centro-norte do Estado do Ceará, mais especificamente no distrito de Canafistula, acerca de 25 km da sede municipal. Em um contexto geral, o dique apresenta dimensões de aproximadamente 1 km de comprimento por 80 metros de largura, com direção de NE-SW, ocorrendo na forma de pequenos afloramentos rasos ao logo de sua extensão total.

Geologicamente, a região de Apuiarés está situada na Província Borborema, nordeste do Brasil, mais precisamente no Domínio Ceará Central (Figura 1).

A Província Borborema (PB) é composta por rochas de idade que variam do Arqueano ao Neoproterozóico, cuja estruturação atual foi desenvolvida no final do Neoproterozóico (ca. 600 Ma), durante a orogenia Pan-africano/Brasiliana, marcada por intenso magmatismo granítico e pela formação de extensas zonas de cisalhamento (ZC) transcorrentes (Arthaud et al. 2014).

O Domínio Ceará Central (DCC) é a unidade geotectônica mais extensa da porção setentrional da PB e abrange quase a totalidade do estado do Ceará. É limitado à noroeste pela ZC Sobral Pedro II, que corresponde ao lineamento Transbrasiliano e à sudeste pela ZC Orós, sendo encoberta pelos sedimentos da Bacia do Parnaíba na porção sudoeste e oeste (Arthaud et al. 2014).

Almeida et al. (1988) comenta sobre evolução tectônica no nordeste oriental, a partir do jurássico, de fenômenos magmáticos intrusivos e efusivos que deram origem a vários tipos litológicos, sendo os mais antigos basaltos toleíticos geralmente não olivínicos à litologias que derivam de magma olivina basálticos alcalino.

Vários estudos (Rao & Sial 1972; Bacchiesa 1976; Braga 1981; Nascimento et al. 1981) descrevem a existência de expressivo vulcanismo alcalino oligocênico na província vulcânica de messejana, constituída de diversos necks e diques de rochas alcalinas encaixados em rochas do embasamento cristalino.

Braga (1981) indica diversas ocorrências e variedades petrográficas, como fonólitos em necks de destaque topográfico, traquitos em diques espessos, pequena área de essexito pórfiro em forma de dique e a presença em algumas áreas de tufos alcalinos associados a necks fonolíticos, além de analcítico e analcita traquibasalto sob a forma de blocos soltos.

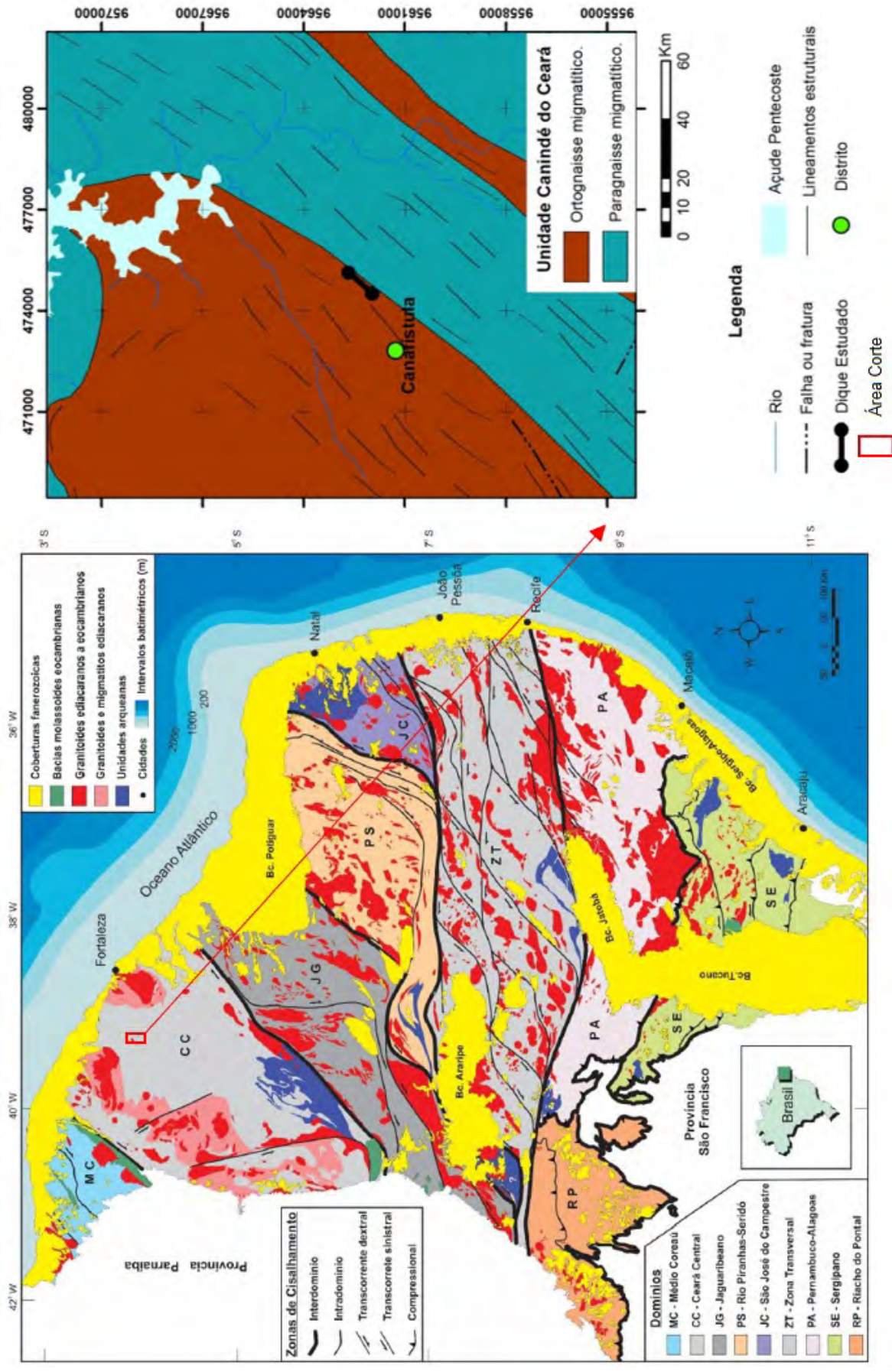


Figura 1 Mapa exibindo a localização do dique estudado no contexto do DCC – Domínio Ceará Central.

Fonte: Adaptado de Medeiros et al. (2017) e Pinéo et al. (2020).

3 Materiais e Métodos

Após a seleção do material de estudo, coletaram-se dois blocos do dique de diabásio com dimensões de 30x40x30 cm, que foram enviados para o Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (DPM/IGCE) – UNESP/Rio Claro, onde foram confeccionados os corpos-de-prova (CP) para os ensaios tecnológicos e radiométricos.

A realização dos ensaios tecnológicos iniciou-se com estudo petrográfico no Laboratório de Microscopia Óptica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará/UFC. A descrição das lâminas teve por base a norma NBR 15.845 – Anexo A (ABNT 2010b) e as orientações de Navarro (1998, 2002); Rodrigues et al. (1996, 1997) e Artur et al. (2001), com inclusão dos seguintes tipos de dados: granulação dos minerais da rocha, tamanho relativo dos minerais, relação de contatos, grau de alteração mineral e densidade de microfissuras.

Posteriormente, no Laboratório de Rochas Ornamentais do DPM/IGCE da UNESP/Rio Claro, foi executada uma bateria de ensaios físico-mecânicos que incluíram os índices físicos (densidade aparente seca e saturada; porosidade aparente e absorção de água), resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão por carregamento em 3 pontos, resistência ao desgaste abrasivo Amsler e propagação de ondas ultrassônicas longitudinais. Tais ensaios foram realizados de acordo com as normas: NBR 15845 – Anexos B, E e F (ABNT 2010c, 2010d, 2010e), NBR 12042 (ABNT 1992) e D 2845 (ASTM 2008).

A detecção de exalação do gás radônio foi realizado no Laboratório de Rochas Ornamentais do DPM/IGCE – UNESP/Rio Claro e utilizados em Silva (2011) e Artur et al. (2013). Para a realização do ensaio, foram cortados 4 filetes da amostra com formato prismático, apresentando cada um deles dimensões de 25 x 4,5 x 2cm. Após os cortes, as amostras foram levadas a estufa por um período 24 horas, a temperatura de 70°C, para a retirada de umidade das amostras. Depois da retirada e resfriamento a temperatura ambiente, as amostras foram colocadas em garrações de vidro com capacidade de 19 litros.

As amostras foram condicionadas nesse garrafão, lacrados com rolhas de borracha apresentando válvulas de saída e entrada de ar. A partir daí, as amostras foram submetidas ao vácuo a pressão de 400 mmHg, logo após fechando as válvulas para que obtivesse o fechamento do sistema e armazenamento por um período de 27 dias.

Após este período foi realizado o monitoramento da emanação de radônio da amostra utilizando o detector AlphaGUARD, da empresa Genitron Instruments, que realizam a medida da concentração de radônio dentro garrafão de vidro. Para isso, utilizaram-se mangueiras que foram acopladas as válvulas das rolhas do garrafão a uma bomba de sucção e, posteriormente, ao detector AlphaGUARD, procedimento esse necessário para que o sistema garrafão – bomba – detector esteja fechado sem a presença do ar externo.

A concentração de radônio emanado nas amostras foram calculadas pela acumulação no período de 27 dias em circuito hermeticamente fechado, mensurados através da média de 3 leituras de ciclos de 10 minutos. Após o período de aquisição de dados, foram calculadas as quantidades de gás radônio exalado das amostras com base em:

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

Onde λ é a constante de decaimento do nuclídeo em questão e A_0 é o valor final de atividade em $t \sim 7T_{1/2}$, que é de aproximadamente 27 dias para o radônio.

A taxa de exalação de radônio por unidade de área do diabásio (E) é definida como o fluxo de radônio liberado na superfície do material. Essa taxa foi calculada usando a fórmula proposta por (Barton & Ziemer 1986) e (Al-Jarallah 2001):

$$E = A_0 \lambda (V/F)$$

Onde λ é a constante de decaimento do radônio ($7,567 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$), V é o volume do contêiner de emanação (19 l ou $19 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) e F é a área da superfície total das amostras. A unidade da taxa de exalação de radônio (E) é em $\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Os dados obtidos foram comparados aos limites aceitáveis de exposição do gás radônio em ambientes internos, indicados pelas agências de risco EPA (Environmental Protection Agency) nos Estados Unidos e EC (European Commission) na União Européia.

4 Resultados

4.1 Análise Petrográfica

O Olivina Diabásio Porfirítico corresponde a uma rocha de cor cinza escuro com variações para preto, estrutura isotrópica e textura porfirítica, com fenocristais de titanaugita (~40% modal), e matriz composta de cristais de plagioclásio, olivina, augita e opacos.

Em seção delgada, a rocha é constituída por titanaugita (38%), plagioclásio (32%), olivina (18%), opacos (7%), apatita (3%) e minerais secundários (2%), se destacando a iddingsita, a clorofeita e a biotita (Tabela 1).

Tabela 1 Síntese das características petrográficas do Olivina Diabásio Porfíritico.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS O.D.P		
Classificação Petrográfica	Olivina Diabásio Porfíritico	
Coloração	cinza escuro a preto	
Estrutura	isotrópica	
Textura	porfíritica	
Matriz	fina	
Mineralogia (%)	Titanaugita	38
	Plagioclásio	32
	Olivina	18
	Opacos	7
	Apatita	3
	Iddingsita, Clorofeita, Biotita	2
	Total máficos (%)	68
Granulação (mm)	Variação	0,1 a 8
	Predominância	2 a 5
	Matriz	0,1 a 1
	Fenocristal	1 a 8
Microfissuras	Total/mm ²	3,65
	Intragrão (%)	97,9
	Intergrão (%)	2,1
	Comunicabilidade	baixa
Contato Mineral (%)	Côncavo/Convexo	37,9
	Denteado	28,4
	Plano	33,7
Alteração Mineral	Titanaugita	fraco/incipiente
	Plagioclásio	fraco
	Olivina	fraco/incipiente

Exibe textura porfíritica caracterizada por megacristais idiomórficos a subidiomórfico de titanaugita (~20%), medindo de 2 a 8 mm, com predominância de cristais de 3 a 5 mm, de forma hexagonal nas seções basais ao prisma (Figura 2A). Por vezes alguns destes fenocristais são constituídos por maclas com 2 ou mais elementos, alguns desses com zoneamento oscilatório (Figura 2B).

Os cristais de titanaugita também se distribuem numa matriz fina, entre 0,3 a 0,5 mm, composta por

plagioclásio, olivina e óxidos de ferro. Os contatos entre os grãos minerais, geralmente, são planos (Figura 2C e 2D) e côncavo-convexos com engrenamento marcante.

A olivina ocorre em grãos com dimensões de 0,5 a 2 mm, subidiomórficos a xenomórficos quando constituídos de cristais isolados na matriz. A olivina pode ocorrer inclusa e/ou parcialmente inclusa nas bordas de titanaugita e, neste caso, geralmente apresentam contatos do tipo côncavo-convexo. O tipo serrilhado é mais frequente em grãos subidiomórficos de olivina e titanaugita quando estão em contato com o plagioclásio da matriz.

Os cristais de plagioclásios são os principais constituintes da matriz da rocha, com dimensões entre 0,3 a 0,7 mm, dispostos irregularmente na rocha, com um bom engrenamento entre os seus contatos.

Os opacos são identificados como magnetita são xenomórficos e aparecem dispersos pela rocha, tanto na matriz em conjunto com o plagioclásio e a olivina, como nas bordas e algumas fraturas mais externas de titanaugita. Possuem dimensões inferiores a 0,4 mm e geralmente formam aglutinações de grãos menores (Figura 2C). Provavelmente foram gerados a partir da alteração da olivina.

A apatita encontra-se dispersa na matriz, sendo incolor, acicular muito fina, quando observada na seção basal exibe geometria hexagonal, possui dimensões máximas de 0,7 mm.

A iddingsita e a clorofeita resultam da alteração da olivina e da titanaugita. A iddingsita ocorre na matriz, nas bordas e/ou dentro de cristais de titanaugita, é xenomórfica, de cor vermelho-sangue a vermelho claro, cujos grãos variam de 0,1 a 1 mm de comprimento (Figura 2A).

A rocha apresenta uma média de densidade em microfissuras de 3,65/mm², classificada como alto grau, principalmente devido aos cristais de titanaugita, sendo que 97,9% das fissuras são intragrão, cuja presença em maior frequência está restrita aos cristais de olivina e titanaugita (Figura 2A, 2C e 2E). Apenas 2,1% destas microfissuras são do tipo intergrão, e geralmente limitadas ao contato entre a titanaugita e a matriz. Cerca de 70% das microfissuras intragrão são registradas nos grãos de olivinas (comprimentos entre 0,2 a 0,8 mm) e 30% nos grãos de titanaugita (variando de 0,5 a 3,5 mm).

Nas amostras analisadas a alteração restringe-se a pequenas porções da lâmina, de forma incipiente como a turvação nos grãos de plagioclásio da matriz. Verifica-se alguma alteração nas olivinas, com geração de iddingsita, clorofeita, óxidos de ferro e biotita, não comprometendo a durabilidade e a resistência da rocha, como demonstram os ensaios de caracterização tecnológica.

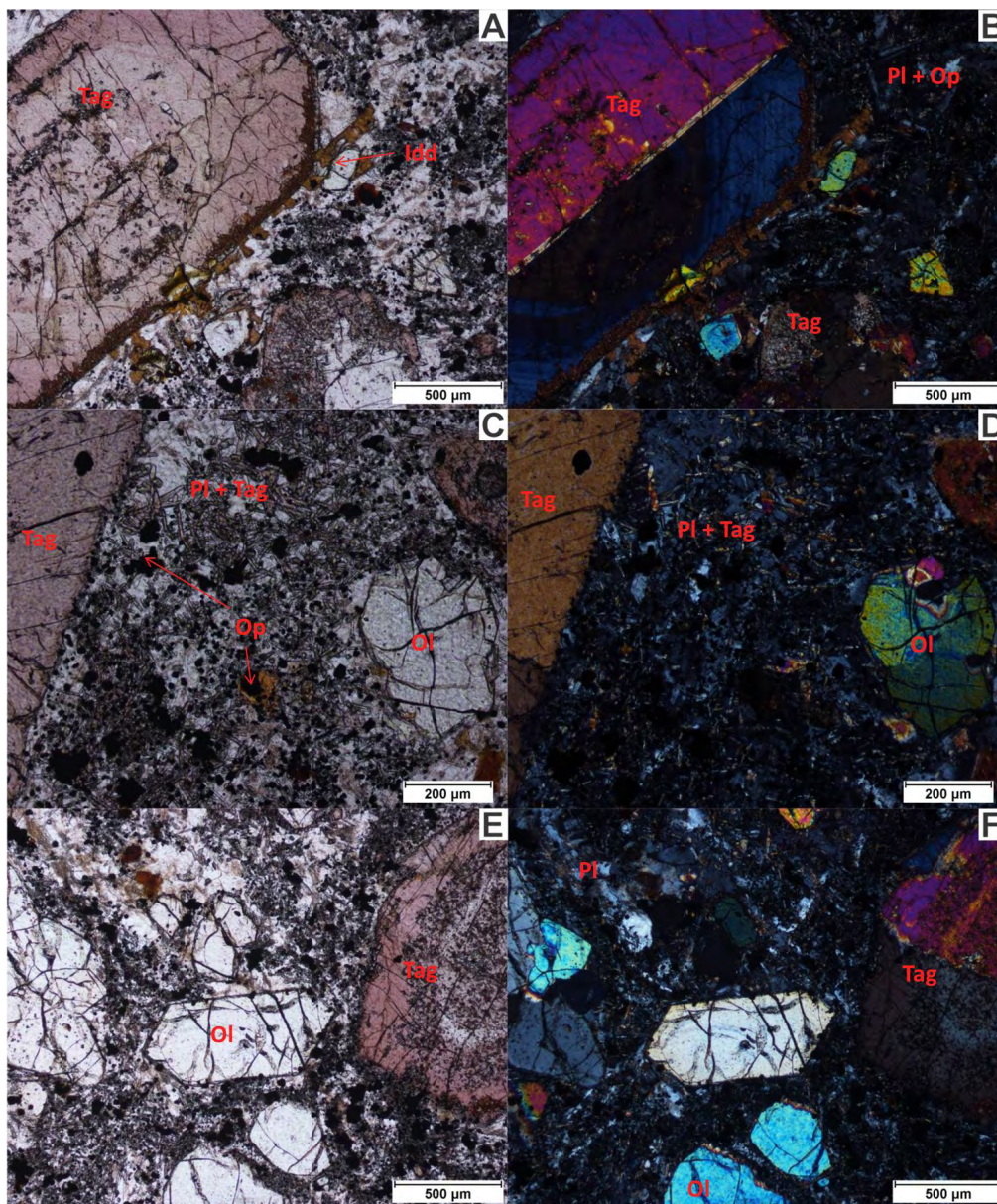


Figura 2 Fotomicrografias do Olivina Diabásio Porfírico; A. Fenocristal de titanaugita (Tag) com iddingsita (Idd); B. Cristal de e titanaugita (Tag) apresentando geminação e zoneamento matriz composta de olivina (Ol), plagioclásio (Pl) e opacos (Op); C e D. Matriz exibindo pequenos cristais prismáticos de titanaugita (Tag), junto com plagioclásio (Pl) e opacos (Op); E e F. Cristais idiomórficos de augita e subidiomórficos de olivina. Objetivas utilizadas: 5x (500 μm) e 10x (200 μm). Fotomicrografias A, C e E a luz natural polarizada e B, D e F a luz ortoscópica.

4.2 Propriedades Físico-Mecânicas

A rocha analisada apresenta densidade aparente seca de 3113 kg/m^3 , densidade aparente saturada de 3115 kg/m^3 , porosidade aparente de 0,17% e absorção de água de 0,06%. Para o ensaio de resistência à compressão uniaxial o diabásio revelou o valor de 192,0 MPa e para a flexão

por carregamento em 3 pontos uma tensão de resistência de 20,4 MPa. O diabásio apresentou desgaste abrasivo de 0,66 mm, ao final do percurso de 1000 m. Em relação ao ensaio de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais, a rocha analisada possui valores médios de 6605 m/s para os corpos-de-prova da compressão uniaxial simples e 6793 m/s para os corpos-de-prova da flexão 3 pontos (Tabela 2).

4.3 Exalação de Radônio ^{222}Rn

Os resultados para a concentração de radônio da amostra (C_{Rn}) foram medidos em Bq m^{-3} e posteriormente transformados em taxa de exalação de radônio por unidade de área (E), em $\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Em seguida, os valores foram comparados com os indicados pelas agências Americana e Europeia que estabelece o máximo recomendado de 148 Bq m^{-3} e 300 Bq m^{-3} , respectivamente.

Os valores obtidos neste trabalho foram medidos em ciclos de 10 minutos no equipamento AlphaGUARD, e foram transformados em C_{Rn} e E, e estão dispostos na Tabela 3 e 4, respectivamente.

O ensaio de exalação de radônio ^{222}Rn teve como resultado médio 1 ± 3 (Bq m^{-3}), com uma taxa de exalação de radônio por unidade de área (E) de $0,001 \text{ Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$.

Tabela 2 Resultados médios dos ensaios tecnológicos para o Olivina Diabásio Porfírico.

ENSAIOS TECNOLÓGICOS		RESULTADOS
Classificação Petrográfica da Rocha		Olivina Diabásio Porfírico
Densidade aparente (kg/m^3)	Massa Seca	3113
	Massa Saturada	3115
Porosidade Aparente (%)		0,17
Absorção de água (%)		0,06
Compressão Uniaxial (MPa)		192,0
Flexão 3 Pontos (MPa)		20,4
Desgaste Abrasivo p/ 1000 m (mm)		0,66
Compressão Uniaxial: propagação ultrassom em corpos-de prova (m/s)		6605
Flexão 3 pontos: propagação ultrassom em corpos-de-prova (m/s)		6793

Tabela 3 Valores obtidos do Olivina Diabásio Porfírico, em ciclos de 10 minutos no detector AlphaGUARD, medidos em Bq m^{-3} .

Hora da Medição	Tempo de Medida (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Umidade Relativa (%rH)	Pressão (mbar)	Exalação (Bq m^{-3})
15:38	0	25	48	944	0 ± 15
15:48	10	25	49	944	0 ± 4
15:58	20	25	49	944	0 ± 3
16:08	30	25	48	944	1 ± 3

Tabela 4 Comparação dos resultados médios do ensaio de exalação do gás radônio para Olivina Diabásio Porfírico e taxa de exalação de radônio (E).

Amostra	C_{Rn} (Bq m^{-3})	E ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
Olivina Diabásio Porfírico	1,00	0,001

5 Discussão dos Resultados

Os resultados físico-mecânicos obtidos são integrados e discutidos em função das características petrográficas da rocha estudada, podendo, por isso, explicar o comportamento tecnológico da rocha durante o uso em obras civis. Para além da análise comparativa com os

valores recomendados para rochas graníticas conforme estabelecidos pelas normas C-615 (ASTM 2005) e NBR 15844 (ABNT 2010a), entretanto, tais valores podem ser utilizados para rochas silicáticas, exceto ardósia de acordo com a NBR 15845 (ABNT 2010b, 2010c, 2010d, 2010e). Na Tabela 5 estão sumarizados os valores comparativos.

Tabela 5 Comparação dos resultados médios do Olivina Diabásio Porfírico com os valores recomendados pelas normas: C-615 (ASTM 2005) e NBR 15844 (ABNT 2010a).

ENSAIOS TECNOLÓGICOS		AMOSTRA	ASTM C-615 (2005)	NBR 15844 (ABNT 2010a)
Classificação Petrográfica		Olivina Diabásio Porfírico	-	-
Massa Específica Aparente (kg/m ³)	Massa Seca	3113	≥ 2 560	≥ 2 550
	Massa Saturada	3115	n.e.	n.e.
Porosidade Aparente (%)		0,17	n.e.	≤ 1,00
Absorção de água (%)		0,06	≤ 0,4	≤ 0,40
Compressão Uniaxial (MPa)		192,0	≥ 131	≥ 100
Flexão 3 Pontos (MPa)		20,4	≥ 10,34	≥ 10
Desgaste Abrasivo p/ 1000 m (mm)		0,66	n.e.	≤ 1
Compressão Uniaxial Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)		6605	n.e.	≥ 4000
Flexão 3 pontos Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)		6793	n.e.	≥ 4000

5.1 Propriedades Físico-Mecânicas

5.1.1. Índices Físicos

A análise conjunta dos resultados da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água indicam que o material estudado quantifica valores acima dos recomendados pelas normas C-615 (ASTM 2005) e NBR 15844 (ABNT 2010a) (Figuras 3 e 4). Verifica-se que a densidade aparente seca e saturada apresenta resultados superiores ao da norma ASTM, visto que o Olivina Diabásio Porfírico possui elevada percentagem de minerais máficos (68%).

Outra característica marcante é que a rocha apresenta massa específica seca e saturada, praticamente iguais, sendo atribuída a baixa porosidade, corroborada por sua baixa densidade de microfissuras do tipo intergrãos.

A rocha em estudo possui porosidade aparente e absorção de água baixas, inclusive bastante inferiores as que são sugeridos pela norma da ABNT (Figura 4). Este fato remete a presença de um bom engrenamento mineral do Olivina Diabásio Porfírico que, apesar do elevado grau de microfissuramento (3,65/mm²), estas fissuras possuem dimensões pequenas, e em sua grande maioria são intragãos, sem expressiva comunicabilidade entre si e os minerais, inferindo assim uma baixa absorção de água.

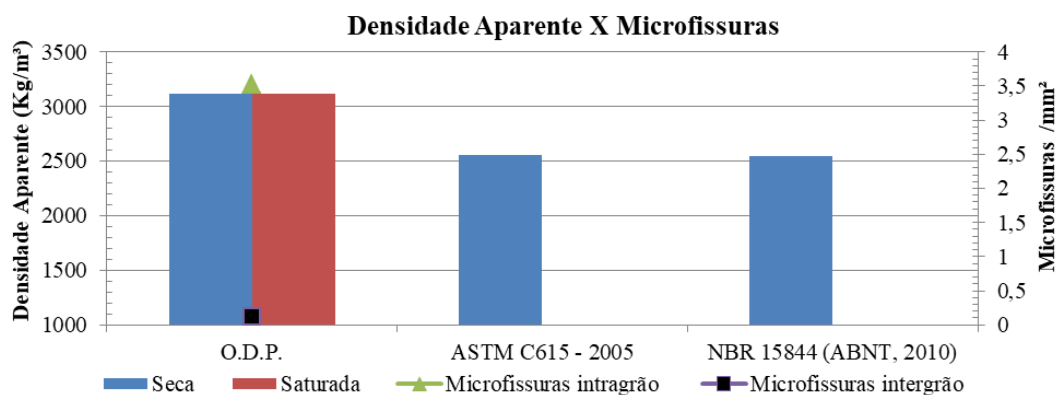


Figura 3 Valores médios da densidade aparente seca e saturada, expressos em kg/m³ para o Olivina Diabásio Porfírico. Para comparação, projetaram-se os valores recomendados pelas normas ASTM C615 (2005) e NBR 15844 (ABNT 2010a) e os dados de microfissuramento obtidos na análise petrográfica.

5.1.2. Resistência à Compressão Uniaxial

Para este ensaio o Olivina Diabásio Porfírico cumpre os requisitos mínimos sugeridos pelas normas ABNT e ASTM (Figura 5). O valor de 192 MPa reflete a ausência de anisotropias, por ter matriz fina, com bom engrenamento mineral e baixa porosidade. Tais resultados indicam que a rocha, pela grande resistência, também pode ser empregada como material estrutural, a fim de suportar cargas.

Comparativamente, os dados de velocidade do pulso ultrassônico obtidos no Olivina Diabásio Porfírico, mostraram relação de alta resistência do material, assim os elevados valores de velocidades podem ter relação com a baixa comunicabilidade de microfissuras dos minerais e a maior compactação e engrenamento dos minerais que compõem a rocha.

5.1.3. Resistência à Flexão pelo Método dos 3 Pontos

Do mesmo modo que o ensaio anterior, a resistência à flexão por 3 pontos, o Olivina Diabásio Porfírico apresenta valores elevados, aproximadamente duas vezes superiores, aos requisitos mínimos sugeridos pelas normas da ABNT e ASTM (Figura 6). O valor de 20,4 MPa deve-se às suas características isotrópicas, matriz fina e bom engrenamento mineral com baixa porosidade. A rocha também enseja característica para uso estrutural, bem como podem ser realizados cortes de placas com espessura inferior a 3,0 cm.

A resistência à flexão do Olivina Diabásio Porfírico, em comparação com a velocidade do pulso ultrassônico, indica que o litotipo possui grande compactação e engrenamento dos minerais, com baixa porosidade e ausência de comunicabilidade de microfissuras dos minerais.

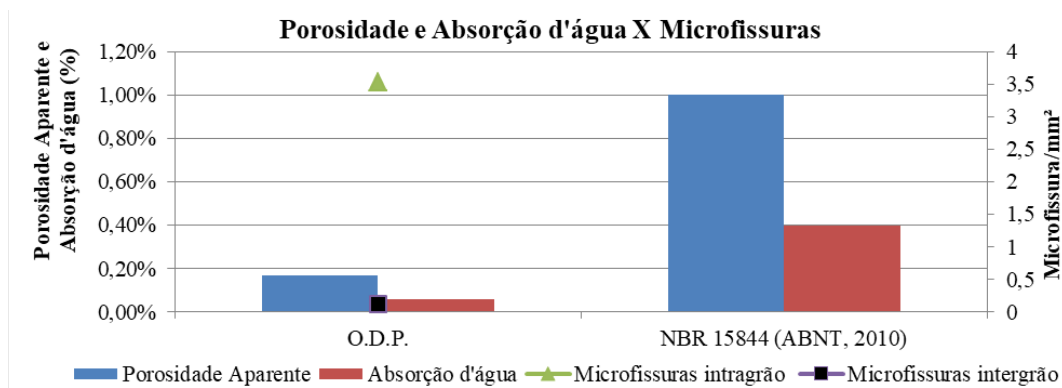


Figura 4 Valores médios da porosidade aparente (%) e da absorção de água (%) para o Olivina Diabásio Porfírico. Para comparação, projetaram-se os valores recomendados pela norma NBR 15844 (ABNT 2010a) e os dados de microfissuramento obtidos na análise petrográfica.

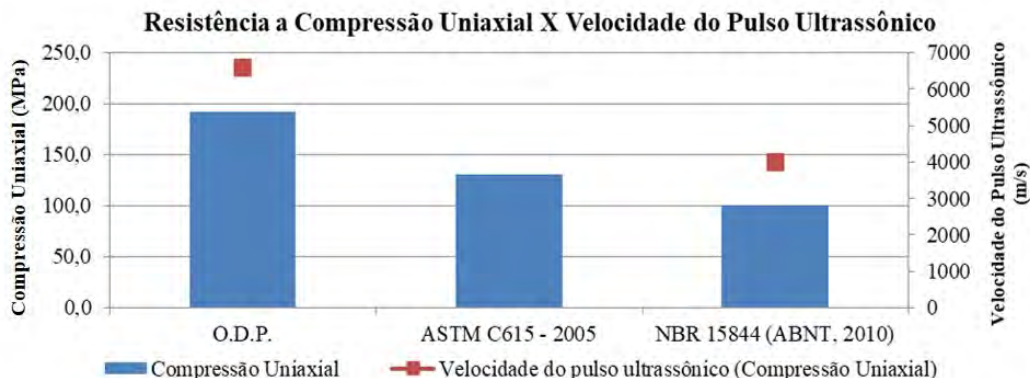


Figura 5 Resultados médios dos ensaios de compressão uniaxial simples (MPa) para o Olivina Diabásio Porfírico. Para comparação, projetaram-se o valor recomendado pelas normas ASTM C615 (2005) e NBR 15844 (ABNT 2010a) e os dados de velocidade do pulso ultrassônico.

5.1.4. Resistência ao Desgaste Abrasivo Amsler

A análise da resistência ao desgaste Amsler indicou que o Olivina Diabásio Porfíritico desgastou 0,66 mm após o percurso de 1000 m, portanto dentro dos valores limítrofes sugeridos pela norma ABNT (desgaste máximo de 1 mm) (Figura 7). Mesmo apresentando elevada porcentagem de minerais máficos e uma nula porcentagem de quartzo, os resultados apresentados foram satisfatórios, sendo atribuídos a um bom engrenamento mineral, e muito provavelmente, por possuir uma matriz fina e homogênea.

Verifica-se que o Olivina Diabásio Porfíritico em comparação com a porcentagem de plagioclásio e olivina, principais componentes da matriz, possui menor desgaste (0,66 mm), portanto relacionado ao menor tamanho dos grãos e, conseqüentemente maior imbricamento e homogeneidade.

Este resultado da análise de desgaste indica resistência da rocha ao tráfego de pessoas, porém, sugere-se que o material não seja utilizado como revestimento de piso em ambientes com grande fluxo de pessoas, dada as suas características mineralógicas, pode ocorrer perda rápida de brilho.

5.1.5. Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais

A análise conjunta dos resultados da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para o Olivina Diabásio Porfíritico, tanto para os corpos-de-prova da compressão uniaxial quanto para os corpos-de-prova da flexão por três pontos, cumprem com os valores recomendados pela norma da ABNT (Figura 8).

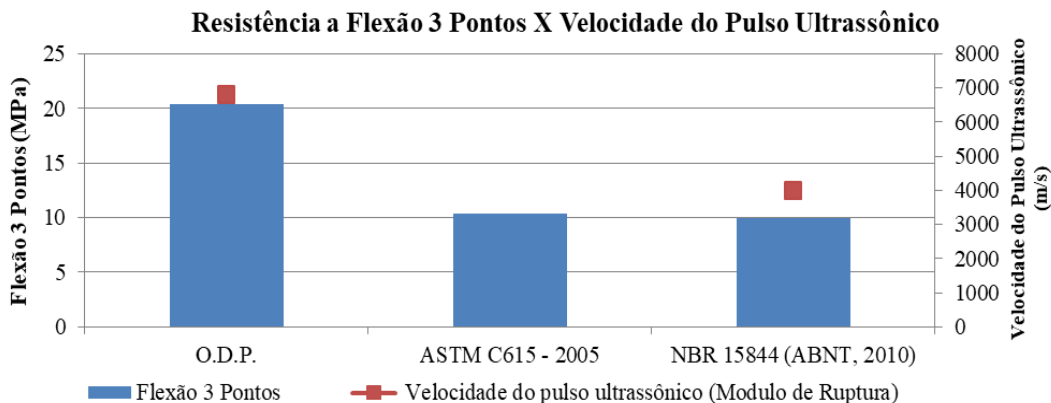


Figura 6 Resultados médios dos ensaios de flexão em três pontos (MPa) para o Olivina Diabásio Porfíritico. Para comparação, projetaram-se o valor recomendado pelas normas ASTM C615 (2005) e NBR 15844 (ABNT 2010a) e os dados de velocidade de pulso ultrassônico.

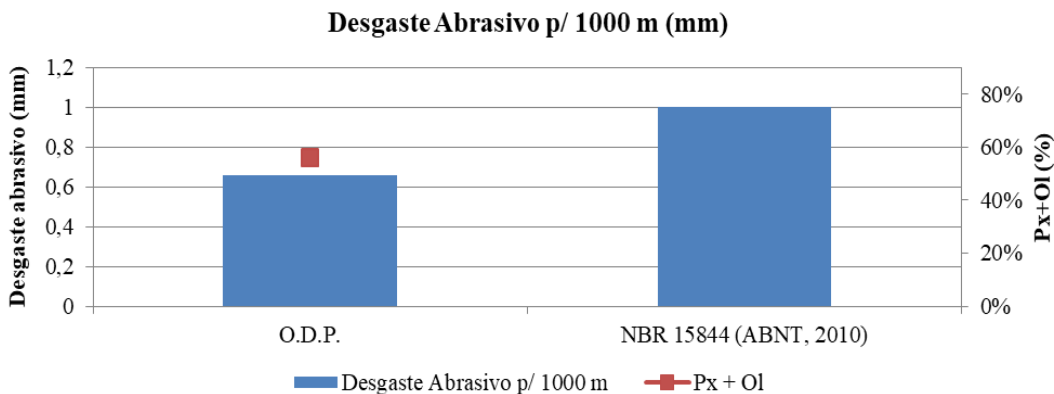


Figura 7 Resultados médios do ensaio de desgaste por abrasão de Amsler (mm) para o Olivina Diabásio Porfíritico. Para comparação, projetaram-se o valor recomendado pela norma NBR 15844 (ABNT 2010a) e o somatório dos percentuais de piroxênio (Px) e olivina (Ol) obtidos na análise petrográfica.

Os valores do Olivina Diabásio Porfírico registam elevados índices de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, refletindo a sua maior densidade aparente e os seus baixos índices de porosidade aparente e absorção de água, a despeito do seu expressivo grau de microfissuramento intragrão.

5.2 Exalação de Radônio ²²²Rn

O resultado referente a exalação de radônio (1,01 Bq m⁻³) mostrou valor muito abaixo dos limites sugeridos pela Environmental Protection Agency (EPA) de 148 Bq m⁻³ e da European Commission (EC) com valor de 300 Bq m⁻³ (Figura 9).

Este valor de exalação de radônio provavelmente reflete a composição mineralógica característica de rochas básicas, as quais exibem baixas concentrações de elementos radiogênicos. Adicionalmente, a rocha estudada situa-se em um contexto geológico possivelmente relacionado ao evento

magmático Pós-Mesozóico, a exemplo do magmatismo Messejana (Braga 1981) com 30 Ma., o que corrobora no sentido do litotipo apresentar exalação de radônio pouco expressiva.

Além disso, o material rochoso apresenta porosidade, permeabilidade e quantidade de microfissuras intergrão por mm² muito baixas, todos esses fatores em conjunto contribuem para que haja uma menor comunicabilidade entre os grãos minerais constituintes da rocha, o que contribui de forma decisiva para que os valores de exalação de radônio sejam pequenos quando comparados com os das rochas que possuem alta comunicabilidade entre as suas microfissuras.

O resultado do ensaio de exalação de gás radônio (²²²Rn) indica que o material pode ser utilizado em diversos ambientes, com alta e/ou baixa ventilação, não havendo risco de alta concentração desse gás acima dos valores permitidos pelas normas das agências reguladoras norte americana e europeia.

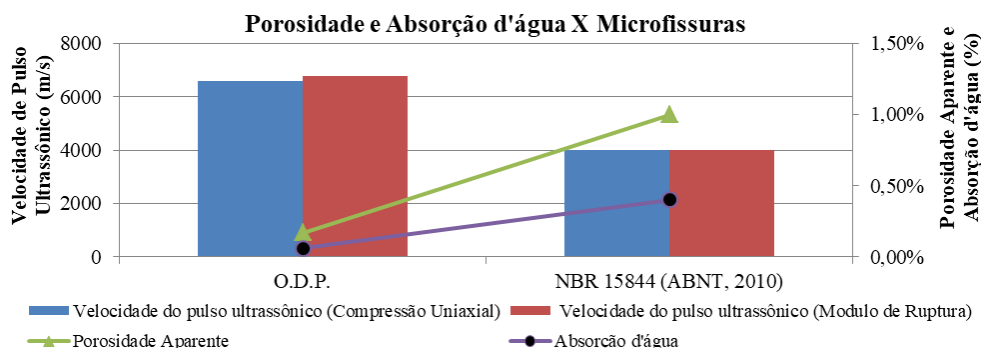


Figura 8 Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s) nos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão uniaxial simples e de resistência à flexão por três pontos do Olivina Diabásio Porfírico. Para comparação, projetaram-se o valor recomendado pela norma NBR 15844 (ABNT 2010a) e os dados da Porosidade Aparente e Absorção de Água.

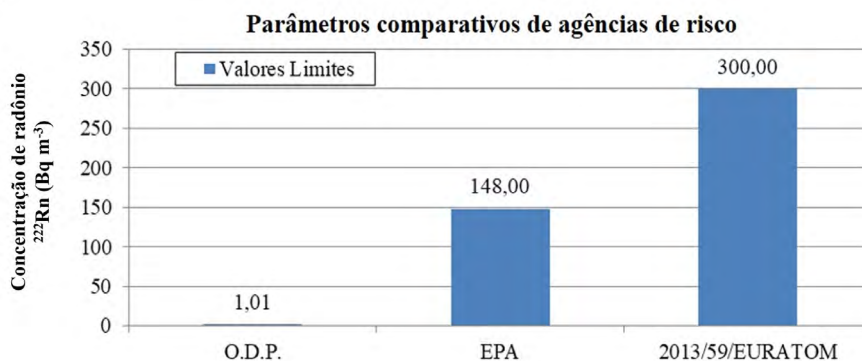


Figura 9 Valores médios da concentração da exalação de radônio do Olivina Diabásio Porfírico e para comparação, projetaram-se os valores recomendados pelas agências reguladoras de risco norte americana e europeia.

6 Conclusões

O Olivina Diabásio Porfírico apresenta parâmetros que o habilita para uso como material de revestimento em ambientes internos e externos. O litotipo classificado, petrograficamente, como um olivina diabásio porfírico, apresenta cor cinza escuro a preto com estrutura isotrópica e textura porfírica, possuindo características visuais interessantes para uso como revestimento interno.

Em consequência de todos os resultados obtidos em ensaios tecnológicos físico-mecânicos, os parâmetros analisados satisfizerem os valores recomendados pelas normas NBR 15844 (ABNT 2010a) e pela C-615 (ASTM 2005), o Olivina Diabásio Porfírico cumpre os requisitos necessários para a exploração, comercialização e aplicação como rocha ornamental.

Em termos de exalação de radônio Rn^{222} , o Olivina Diabásio Porfírico satisfaz os requisitos necessários em termos de concentrações sugeridas como limites pela EPA (Estados Unidos) e EC (União Européia), nesse sentido pode ser aplicado em ambientes internos de edificações.

7 Agradecimentos

Ao projeto PROCAD-NF nº 08/2008, por ter dado suporte financeiro ao desenvolvimento das análises tecnológicas e radiométricas na Universidade Estadual Paulista em Rio Claro-SP.

Os autores também agradecem a CAPES e a FUNCAP pelo apoio financeiro na bolsa de estudos para o desenvolvimento da pesquisa.

8 Referências

- Al-Jarallah, M. 2001, 'Radon exhalation from granites used in Saudi Arabia', *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 53, no 1, pp. 91-8, viewed 12 September 2021, <[https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00110-7)>.
- Almeida, F.F.M.A., Carneiro, C.D.R., Machado Jr. D.L. & Dehira, L.K.R. 1988, 'Magmatismo Pós-paleozóico no Noroeste Oriental do Brasil', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 18, pp. 451-62.
- American Society for Testing and Materials/ASTM 2005, *Standard specification for granite dimension stone*, Standard C 615, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials/ASTM 2008, *Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock*, Standard D 2845, West Conshohocken.
- Anjos, R.M., Veiga, R., Santos, A.M.A., Aguiar, J.G., Frascá, M.H.B.O., Brage, J.A.P., Uzêda, D., Mangia, L., Fature, A., Mosquera, B., Carvalho, C. & Gomes P.R.S. 2005, 'Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites', *Radiation Measurements*, vol. 39, no 3, pp. 245-53, viewed 13 September 2021, <<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.05.002>>.
- Arthaud, M.H., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Santos, T.J.S., Caby, R. & Armstrong, R. 2014, 'The Neoproterozoic Ceará Group, Ceará Central domain, NE Brazil: Depositional age and provenance of detrital material. New insights from U-Pb and Sm-Nd geochronology' *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 58, pp. 223-37, viewed 13 September 2021, <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.007>>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 1992, *Materiais Inorgânicos - determinação do desgaste por abrasão*, NBR 12042, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2010a, *Rochas para Revestimento - requisitos para granitos*. NBR 15844, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2010b, *Análise Petrográfica - método de ensaio*, NBR 15845 (Anexo A), Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2010c, *Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água - método de ensaio*, NBR 15845 (Anexo B), Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2010d, *Resistência à compressão uniaxial - método de ensaio*, NBR 15845 (Anexo E), Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2010e, *Módulo de ruptura (flexão por carregamento em três pontos) - método de ensaio*, NBR 15845 (Anexo F), Rio de Janeiro.
- Artur, A.C.; Meyer, A.P. & Wernick, E. 2001, 'Características tecnológicas de granitos ornamentais: a influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e implicações de utilização', *Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais/Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste*, Salvador, Museu Geológico da Bahia, pp. 13-9, viewed 28 October 2021, < <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1246>>.
- Artur, A.C., Bonotto, D.M., Amaral, P.G.Q. & Galembeck T.M.B. 2013, 'Metodologia para quantificação da exalação do gás radônio em rochas ornamentais', *Revista Geociências*, vol. 32, pp. 166-80.
- Bacchiesa, I.F. 1976, *Projeto Fortaleza, relatório da etapa de campo I*, Departamento Nacional de Produção Mineral/ Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais, Recife, p. 84.
- Barton, T.P. & Ziemer, P.L. 1986, 'The effects of plastic size and moisture content on the emanation of Rn from coal', *Health Physics*, vol. 50, pp. 518-28.
- Binns, D.C.A., Gouvea, V.A. & Paula Melo, V. 1995, 'Radon concentration in Brazilian environments: preliminary data', *Encontro Nacional de Aplicações Nucleares*, Rio de Janeiro, pp. 316-9.
- Braga, A.P.G. 1981 'Geologia da região nordeste do Estado do Ceará. Projeto Fortaleza', *Departamento Nacional de Produção Mineral/Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais*, Brasília, p. 123.
- Environmental Protection Agency 2003, *Assessment of Risks from Radon in Homes*, Washington, DC.
- Medeiros, V.C., Cavalcante, R., Cunha, A.L.C., Brito, A.A., Rodrigues, J.B. & Silva, M.A. 2017, 'O furo estratigráfico de

- Riacho Fechado (Currais Novos/RN) domínio Rio Piranhas-Seridó (Província Borborema, NE Brasil): procedimentos e resultados', *Estudos Geológicos*, vol. 27, pp. 3-44, <https://dx.doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v27n3p1-40>.
- Moura, C.L.; Artur, A.C. & Guedes, S. 2004, '²²²Rn concentrations of the building stones from different magmatic series', *32nd International Geology Congress*, vol. 1, Florença, Itália, p. 286.
- Moura, C.L. 2005. 'Radioatividade Natural e Emissão de ²²²Rn em Rochas Ornamentais Provenientes de Diferentes Séries Magmáticas Utilizadas como Revestimento Interno', Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita/UNESP, Rio Claro.
- Moura, C.L., Artur, A.C. & Bonotto, D.M. 2005, 'Radioatividade natural em rochas ornamentais provenientes de diferentes séries magmáticas', *I Congresso Internacional De Rochas Ornamentais/II Simpósio Brasileiro De Rochas Ornamentais*, Centro de Tecnologia Mineral, Guarapari, Resumos expandidos, p. 6.
- Moura, C.L., Artur, A.C. & Bonotto, M.D. 2006a, 'A importância dos aspectos petrográficos no estudo da radioatividade natural e de emissão de radônio de rochas ornamentais utilizadas em revestimento', *III Congresso Brasileiro De Rochas Ornamentais/VI Simpósio De Rochas Ornamentais Do Nordeste*, Natal, Resumos expandidos, p. 21.
- Moura, C.L., Artur, A.C. & Bonotto, M.D. 2006b, 'A influência da porosidade na taxa de exalação de ²²²Rn de rochas utilizadas como ornamental e de revestimento', *X Simpósio de Geologia do Sudeste*, Diamantina, Resumos, p. 111.
- Nascimento, D.A., Gava, A., Pires, J.L. & Teixeira, W. 1981, 'Fortaleza: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Folha AS 24', *Projeto RADAMBRASIL*, Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, p. 9-212.
- Navarro, F.C. 1998, 'Granitos ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico', *II Congresso Uruguayo de Geologia*, Actas, Punta del Este, Sociedad Uruguaya de Geología, p. 103-7.
- Navarro, F.C. 2002, 'Caracterização petrográfica como técnica para a precisão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais', Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita/UNESP, Rio Claro.
- Pinéo, T.R.G., Palheta, E.S.M., Costa, F.G., Vasconcelos, A.M., Gomes, I.P., Gomes, F.E. M., Bessa, M.D.M.R., Lima, A.F.; Holanda, J.L.R. & Freire, D.P.C. 2020, *Mapa geológico do estado do Ceará. Escala - 1:500.000*, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- Rao, A.B. & Sial, A.N. 1972, 'Observations on alkaline plugs near Fortaleza city, Ceará state, Brazil', *24th International Geological Congress*, Montreal, pp. 56-61.
- Rodrigues, E.P.; Coutinho, J.M.V. & Chiodi Filho, C. 1996, 'Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental', São Paulo, *Rochas de Qualidade*, no 127, pp. 80-84.
- 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*, no. 47, pp. 1-2.
- Silva, F.D.O. 2011, 'Caracterização tecnológica e radiométrica de um diabásio da região de Apuiarés-CE', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará/UFC, viewed 10 November 2020, <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/1425>>.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation/UNSCEAR. 2000, 'Sources and effects of ionizing radiation', *Report to general assembly, with scientific annexes*, United Nations, New York, no 1, pp. 83-156.

Contribuições dos Autores

Francisco Diones Oliveira Silva: conceituação; análise formal; metodologia; validação; visualização; redação – rascunho original; redação – revisão e edição. **Antônio Leal Neto:** análise formal; redação – rascunho original; redação – revisão e edição. **Wolker Cunha Soares:** análise formal; metodologia; validação; visualização; redação – rascunho original. **José de Araújo Nogueira Neto:** Obtenção de financiamento; conceituação; análise formal; metodologia; validação; visualização; redação – rascunho original; redação – revisão e edição. **Antônio Carlos Artur:** análise formal; metodologia; validação; visualização; redação – rascunho original; redação – revisão e edição. **Irani Clezar Mattos:** análise formal; validação; visualização; redação – rascunho original; redação – revisão e edição. **Igor Magalhães Clemente:** análise formal; validação; visualização; redação – revisão e edição.

Financiamento

Projeto "Caracterização Físico-Mecânica e Radiométrica de Rochas Ornamentais Silicáticas do Ceará"; PROCAD-2417/2008 - CAPES (UFC-UNESP).

Como citar:

Silva, F.D.O., Neto, A.L., Soares, W.C., Neto, J.A.N., Artur, A.C., Mattos, I.C. & Clemente, I.M. 2022, 'Caracterização Tecnológica e Taxa de Exalação de Radônio de um Olivina Diabásio Porfírico da Região de Apuiarés – CE', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 45: 39354. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_39354

Conflito de interesse

Os autores não possuem potenciais conflitos de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Todos os dados incluídos neste estudo estão disponibilizados publicamente na literatura.

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editor Associado

Dr. Gustavo Luiz Campos Pires