



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia – Campus Pampulha
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Natália Fonseca Taveira

**PROPOSIÇÃO DE MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DA
EXALAÇÃO DE RADÔNIO EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE
AFLORAMENTOS ROCHOSOS GRANÍTICOS-GNÁISSICOS DE BELO
HORIZONTE – MINAS GERAIS**

Belo Horizonte

2025

Natália Fonseca Taveira

**PROPOSIÇÃO DE MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DA
EXALAÇÃO DE RADÔNIO EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE
AFLORENTOS ROCHOSOS GRANÍTICOS-GNÁISSICOS DE BELO
HORIZONTE – MINAS GERAIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciências e Técnicas Nucleares.

Orientador: Arno Heeren de Oliveira
Coorientadora: Talita de Oliveira Santos

Belo Horizonte

2025

T232p

Taveira, Natália Fonseca.

Proposição de métodos experimentais para determinação da exalação de radônio em diferentes granulometrias de afloramentos rochosos graníticos-gnáissicos de Belo Horizonte – Minas Gerais [recurso eletrônico] / Natália Fonseca Taveira. - 2025.

1 recurso online (116 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Arno Heeren de Oliveira.

Coorientadora: Talita de Oliveira Santos.

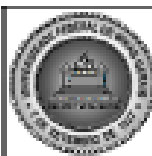
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Radon - Teses. 3. Materiais granulados - Teses. 4. Granito - Teses. I. Oliveira, Arno H. II. Santos, Talita de Oliveira. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES



ATA DA DEFESA DE TESE DA ALUNA NATÁLIA FONSECA TAVEIRA

Realizou-se, no dia 27 de fevereiro de 2025, às 14:00 horas, de forma online, <https://conferenciaweb.mp.br/ufmg/programa-de-pos-graduacao-em-ciencias-e-tecnicas-nucleares>, a 101ª defesa de tese, intitulada *Proposição de métodos experimentais para determinação da exalação de radônio em diferentes granulometrias de afloramentos rochosos graníticos-gnáissicos de Belo Horizonte - MG*, apresentada por NATÁLIA FONSECA TAVEIRA, número de registro 2020674615, graduada no curso de RADIOLOGIA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, à seguinte Comissão Examinadora: Prof. Arno Heeren de Oliveira - Orientador (Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG), Profa. Adriana de Souza Medeiros Batista (Departamento de Anatomia e Imagem/PCTN - UFMG), Profa. Talita de Oliveira Santos (Departamento de Anatomia e Imagem/PCTN - UFMG), Profa. Crissia Carem Paiva Fontainha (Departamento de Anatomia e Imagem - UFMG), Dr. Cláudio José Chagas (CDTN/CNEN), Dra. Evelise Gomes Lara (Universidade Católica de Petrópolis).

A Comissão considerou a tese:

Aprovada () Reprovada

De acordo com o Art.67 do Regulamento do PCTN e Art.82 das NGPG da UFMG, o candidato somente obterá o Diploma de Doutor após apresentar ao Colegiado do PCTN a versão final da tese em conformidade com as indicações da Comissão Examinadora. Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gouvbr ARNO HEEREN DE OLIVEIRA
Data: 11/02/2025 11:21:01-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Arno Heeren de Oliveira – Orientador (Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG)

Documento assinado digitalmente
gouvbr ADRIANA DE SOUZA MEDEIROS BATISTA
Data: 11/02/2025 20:17:04-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Profa. Adriana de Souza Medeiros Batista (Departamento de Anatomia e Imagem/PCTN - UFMG)

Documento assinado digitalmente
gouvbr TALITA DE OLIVEIRA SANTOS
Data: 11/02/2025 15:00:05-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Profa. Talita de Oliveira Santos (Departamento de Anatomia e Imagem/PCTN - UFMG)

Assinado de forma digital por Crissia
Carem Paiva Fontainha (CPF:0800208)
Crissia Carem Paiva
Fontainha:04598883669 Data: 2025.02.27 13:47:04 -0300

Profa. Crissia Carem Paiva Fontainha (Departamento de Anatomia e Imagem - UFMG)

Documento assinado digitalmente
gouvbr CLAUDIO JOSÉ CHAGAS
Data: 11/02/2025 14:03:29-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Dr. Cláudio José Chagas (CDTN/CNEN)

Documento assinado digitalmente
gouvbr EVELISE GOMES LARA
Data: 11/02/2025 15:24:04-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Ao professor, mestre e grande amigo Zildete, mais uma tese para e por você.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial Roberta e Rubens, por enviar todas as energias positivas durante todo o percurso acadêmico.

Às minhas avós por toda oração;

À minha irmã, Letícia, por ser a pessoa que me faz levantar da cama e lutar todos os dias;

À Lourdes por ser meus braços direito e esquerdo.

Às minhas primas e tias por todo carinho de sempre.

À Laura e Carolina pelo dia a dia, nas partes boas e as nem tão boas assim;

Às minhas amigas-irmãs, Naíma e Ana Clara pelo suporte emocional.

Ao Evaristo, Rose, Dovenir e toda equipe técnica e de transporte por ser parte essencial do trabalho.

À Talita, mais uma vez, por tantos anos de orientação.

Ao Ricardo por assumir a coordenação do laboratório e fazer todo o processo pesado do doutorado ser mais leve e engraçado, mas ao mesmo tempo crítico e desafiador.

"Você não pode esperar construir um mundo melhor sem melhorar os indivíduos. Para esse fim, cada um de nós deve trabalhar para o seu próprio aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, compartilhar uma responsabilidade geral por toda a humanidade."

Marie Curie

RESUMO

A radioatividade natural é responsável por cerca de 80% da dose média anual de radiação recebida pelos seres humanos, principalmente devido aos radionuclídeos primordiais presentes na crosta terrestre. A maioria das pessoas recebe doses anuais entre 1 e 3 mSv. A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda programas nacionais de mapeamento de exposição ao radônio com base em estudos geológicos, devido à significativa contribuição do gás radônio para as doses anuais de radiação. O radônio é gerado no solo e migra através de seus poros, entrando nos edifícios por meio de rachaduras e aberturas. Os programas nacionais de mapeamento geogênico devem envolver a colaboração entre órgãos governamentais, instituições de pesquisa e a mídia para identificar áreas de alto risco e prevenir a exposição elevada ao radônio. O transporte de radônio é influenciado por fatores como geologia local, umidade e temperatura. A umidade e a temperatura afetam significativamente as taxas de exalação de radônio. Neste contexto, o presente trabalho se trata do estudo da exalação do radônio em granitos de Belo Horizonte e proposição de métodos de medição dessa variável. Para tanto, foram extraídos cinco grupos de amostras de cinco rochas aflorantes, nas quais quatro foram retiradas de locais utilizados como pedreiras e que, hoje, já se encontram desativadas: Engenho Nogueira, Lagoinha, Pompeia, Pedreira Prado Lopes e da rua da Bahia, no centro da cidade de Belo Horizonte-MG. As amostras foram analisadas quanto à concentração de urânio (^{238}U) e seus elementos filhos (^{214}Pb e ^{214}Bi), além de tório (^{232}Th) e seus elementos filhos (^{228}Ac e ^{212}Pb), para uma avaliação das amostras de rochas graníticas e suas relações com os teores de radônio exalado. Utilizou-se de medidores AlphaGuard (AG) e CR-39. Considerou-se a aplicabilidade do uso de métodos passivos e ativos no estudo da exalação, propondo uma metodologia para estudo da exalação de radônio em diferentes granulometrias para rochas graníticas. Realizou-se imagens via microscópio eletrônico de varredura (MEV) associado ao EDS, para avaliação elementar, além de Difração de Raios X (DRX) para análises cristalográficas. Por último, uma simulação computacional CFD foi realizada para comparar com os resultados experimentais. As concentrações de Rn obtidas pelo AG variaram de 171 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a 8608 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Os valores dos teores de U e Th variaram entre 3 e 4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Já os resultados da concentração de Rn no CR-39 indicaram a mesma tendência apresentada pelo AG. Os resultados obtidos com as amostras sólidas e nas granulometrias até 16# apresentaram uma tendência, teoricamente esperada: quanto menor a granulometria, maior área de superfície possível de exalação. A metodologia desenvolvida pode ser utilizada em aplicações acadêmicas e sugerir processos de controle de qualidade para o comércio de, por exemplo, materiais de construção. Os objetivos do estudo foram alcançados e novos desafios para estudos futuros foram traçados. Desta forma, espera-se poder dar continuidade e aprimorar os métodos para o estudo das diferentes granulometrias de diferentes rochas.

Palavras-chave: radônio; transporte de radônio; granulometria; granito Belo Horizonte.

ABSTRACT

Natural radioactivity accounts for about 80% of the average annual radiation dose received by humans, mainly due to primordial radionuclides in the Earth's crust. Most people receive annual doses between 1 and 3 mSv. The World Health Organization (WHO) recommends national programs to map radon exposure based on geological studies, as radon gas significantly contributes to annual radiation doses. Radon is generated in soil, migrates through its pores, and enters buildings via cracks and openings. National geogenic mapping programs should involve collaboration between government agencies, research institutions, and the media to identify high-risk areas and prevent elevated radon exposure. Factors like local geology, humidity, and temperature influence radon transport, with humidity and temperature significantly affecting radon exhalation rates.

This study focuses on radon exhalation in granites from Belo Horizonte and proposes methods for measuring this variable. Samples were collected from five outcropping rocks, four from decommissioned quarry sites (Engenho Nogueira, Lagoinha, Pompeia, Pedreira Prado Lopes) and one from Rua da Bahia in Belo Horizonte, MG. The samples were analyzed for uranium (^{238}U) and its decay products (^{214}Pb and ^{214}Bi), as well as thorium (^{232}Th) and its decay products (^{228}Ac and ^{212}Pb), to assess the relationship between granite samples and radon exhalation levels. AlphaGuard (AG) and CR-39 detectors were employed. The study proposed a methodology for examining radon exhalation across different granulometries in granite rocks, using passive and active methods.

Additional analyses included scanning electron microscopy (SEM) with EDS for elemental evaluation and X-ray diffraction (XRD) for crystallographic studies. A computational fluid dynamics (CFD) simulation was conducted to compare with experimental results. Radon concentrations measured with AG ranged from 171 Bq/m³ to 8608 Bq/m³, while uranium and thorium concentrations ranged between 3 and 4 µg/g. CR-39 results showed trends similar to AG. Results confirmed a theoretically expected trend: smaller granulometry correlates with a larger surface area for radon exhalation. The methodology can be applied in academic contexts and quality control processes for building materials. The study met its objectives and outlined challenges for future research, aiming to refine methods for studying granulometric variations in different rocks.

Keywords: radon; radon transport; granulometry; gnaiss Belo Horizonte.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2 – Esquema representando o decaimento do ^{238}U , incluindo as indicações de tempo de meia-vida e tipos de decaimentos principais.....	22
Figura 1: Exposição do ser humano às diferentes fontes de radiação	25
Figura 3 - Formas de entrada do gás radônio em ambientes fechados	31
Figura 4 - Posições de recuo do radônio na matriz	33
Figura 5 - Cálculo de fração de emanção de radônio no modelo de grão único.....	35
Figura 6 - Fração relativa de radônio emanado em função da umidade.....	36
Figura 7 - Mapa planejamento de Belo Horizonte	46
Figura 8 - Mapa geológico de BH.....	48
Figura 9 - Composição do Gnaisse Belo Horizonte	50
Figura 10 - Setup do sistema de calibração dos instrumentos utilizados	52
Figura 11 - Rochas aflorantes (corpos gnáissicos) da Pedreira Engenho Nogueira.....	53
Figura 12 - Rochas aflorantes (corpos gnáissicos) da Pedreira Engenho Nogueira.....	53
Figura 13 - Localização das Pedreiras de Belo Horizonte em mapa geológico	54
Figura 14 - Mapeamento gama cidade de Belo Horizonte.....	55
Figura 15 - Perfil gamaespectrométrico da cidade de Belo Horizonte.....	56
Figura 16 - Corpo de prova para experimento de exalação de Rn em circuito fechado.....	57
Figura 17 - Separação das amostras em granulometrias	57
Figura 18 - Programa Quantikov.....	59
Figura 19 - Vaso porta amostras sólidas	62
Figura 20 – Circuito de exalação.....	62
Figura 21 - Porta amostras em detalhe.....	63
Figura 22 – Detector <i>AlphaGUARD</i> ® em detalhe.....	63
Figura 23 - Detector de Germânio do Laboratório de Trítio do CDTN	65
Figura 24 - Setup do sistema de análise de Rn por CR-39.....	67
Figura 25 - Imagem MEV da amostra de granito da Rua da Bahia, na região central de Belo Horizonte.	72
Figura 26 - Espectro EDS para amostra de granito da Rua da Bahia, na região central de Belo Horizonte.....	73
Figura 27 - Imagem MEV para amostra de granito da Rua da Bahia spot 3.....	74
Figura 28 - Espectro EDS para amostra de granito da Rua da Bahia spot 3	74
Figura 29 - Imagem de MEV da amostra da amostra de granito da Rua da Bahia, na região central de Belo Horizonte	75
Figura 30 - Espectro EDS para a amostra de granito da Rua da Bahia spot 4	75
Figura 31 - Resultados de DRX da amostra de granito da Rua da Bahia.....	76
Figura 32 - Imagem de MEV para a amostra de granito da P. Prado Lopes	77
Figura 33 - Imagem de MEV para a amostra de granito da P. Prado Lopes spot 1	77
Figura 34 - Espectro EDS para a amostra de granito da P. Prado Lopes spot 1.....	78
Figura 35 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Prado Lopes.....	79
Figura 36 - Imagem de MEV para a amostra de granito da P. Lagoinha spot 1	80
Figura 37 – Espectro EDS para amostra de granito da P. Lagoinha spot 1.....	81
Figura 38 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Lagoinha	81
Figura 39 – Espectro EDS da amostra de granito da P. Lagoinha spot 2.....	82
Figura 40 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Prado Lopes.....	83
Figura 41 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Pompéia spot 1	84

Figura 42 -Espectro EDS da amostra de granito da P. Pompéia spot 1.....	84
Figura 43 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Pompéia spot 3.....	85
Figura 44 - Espectro EDS da amostra de granito da P. Pompéia spot 3.....	86
Figura 45 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Pompéia.....	86
Figura 46 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Engenho Nogueira spot 1.....	87
Figura 47 - Espectro EDS da amostra de granito da P. Engenho Nogueira spot 1.....	88
Figura 48 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Engenho Nogueira.....	88
Figura 49 - Resultados analíticos de U-Pb para o Gnaisse Belo Horizonte.....	89
Figura 50 - Resultados das concentrações de Rn pelo Circuito de Exalação.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Solubilidade do radônio na água em função da temperatura.	28
Tabela 2 - Alcance recuo alfa em diferentes matrizes.....	33
Tabela 3 - Coeficientes de emanção determinados em tamanhos de grão de 125 a 250 µm e em diferentes temperaturas	38
Tabela 4 - Instrumentos e objetivos	51
Tabela 5 - Informações das amostras	58
Tabela 6 - Características físicas das amostras	70
Tabela 7 - Resultados difração de raios x	71
Tabela 8 - Resultados da ativação neutrônica	89
Tabela 9 - Resultado da concentração de Rn nas amostras por granulometria	90
Tabela 10 - Comparação de resultados de concentração de Rn e conteúdo de U	94
Tabela 11 -Resultados da espectrometria gama	97
Tabela 12 - Escalas e médias de concentrações de ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th em solos e rochas típicos.....	98
Tabela 13 - Resultados da Concentração média de Rn por CR-39	99
Tabela 14 - Atividade e atividade específica dos resultados do CR-39	101
Tabela 15 - Resultados da concentração do CR39 por área superficial	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG – AlphaGUARD

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CER - Coeficientes de emissão de radônio

CFD – Computational Fluid Dynamics

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

CR-39 – Columbine Resin

EEC – Equilibrium Equivalent Concentration

E-PERM – Electret Passive Environmental Radon Monitor

IARC – International Agency for Research on Cancer

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICRP – Comissão Internacional de Proteção Radiológica

INB – Indústrias Nucleares do Brasil

IOE – Indivíduos Ocupacionalmente Expostos

IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria

IUPAC – União Internacional da Química Pura e Aplicada

LET – Transferência Linear de Energia

LRN – Laboratório de Radioatividade Natural

ONU – Organização das Nações Unidas

PAEC – Potential Alpha Energy Concentration

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

US EPA – United States Environmental Protection Agency

WHO – World Health Organization

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	JUSTIFICATIVA	17
3.	OBJETIVOS	19
3.1.	OBJETIVO GERAL.....	19
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1.	MATERIAIS NORM E TENORM	20
4.2.	URÂNIO	21
4.2.1.	Séries de decaimento do urânio.....	21
4.2.2.	Geoquímica do urânio	22
4.3.	RADÔNIO.....	24
4.3.1.	Características gerais do radônio	24
4.3.2.	Geoquímica e características físico-químicas do radônio	27
4.3.3.	Fração anexada e desanexada do radônio	29
4.4.	TRANSPORTE DE RADÔNIO.....	30
4.4.1.	Difusão	32
4.4.2.	Emanação	32
4.4.3.	Coeficiente de emanção	37
4.4.4.	Exalação	38
4.4.5.	Taxa de exalação.....	39
4.4.6.	Indicadores de risco de radônio	40
4.4.7.	Recomendações nacionais e internacionais para a exposição ao radônio.....	41
4.4.8.	Medidas de radônio.....	42
4.4.9.	Métodos matemáticos para estudo do transporte do radônio	43
5.	ÁREA ESTUDADA	45
5.1.	HISTÓRIA DE BELO HORIZONTE	45
5.2.	BELO HORIZONTE E SEU CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	46
5.3.	PEDREIRAS DE BELO HORIZONTE.....	50
6.	METODOLOGIA.....	51
6.1.	AMOSTRAGEM.....	52
6.2.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	59
6.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	60
6.4.	ANÁLISE DE URÂNIO E TÓRIO VIA ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA E ESECTROMETRIA GAMA.....	60
6.5.	ESTUDO DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO VIA CIRCUITO FECHADO.....	61

6.6.	ESPECTROMETRIA GAMA COM DETECTOR DE GERMÂNIO HIPERPURO (HPGE)	64
6.7.	CR-39.....	66
6.8.	CFD (<i>COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS</i>) NO TRANSPORTE DO RADÔNIO	68
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
7.1.	AMOSTRAGEM.....	69
7.2.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X(DRX)	71
7.3.	RESULTADOS COMPARATIVOS ENTREMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV-EDS) E DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	72
7.3.1.	Análise das amostras da Rua da Bahia.....	72
7.3.2.	Análise das amostras da Pedreira Prado Lopes	76
7.3.3.	Análise das amostras da Pedreira Lagoinha	79
7.3.4.	Análise das amostras da Pedreira Pompéia.....	83
7.3.5.	Análise das amostras da Pedreira Engenho Nogueira	87
7.4.	ATIVACÃO NEUTRÔNICA.....	89
7.5.	CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO VIA CIRCUITO DE EXALAÇÃO	90
7.6.	ESPECTROMETRIA GAMA	96
7.7.	CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO VIA CR-39	98
7.8.	EXALAÇÃO DE RADÔNIO VIA CFD (<i>COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC</i>).....	102
8.	CONCLUSÕES.....	105
	REFERÊNCIAS	107

1. INTRODUÇÃO

O elemento mais importante da série radioativa natural é o urânio-238 (^{238}U). A cadeia de ^{238}U inclui os isótopos de rádio e radônio de vida mais longa, ^{226}Ra e ^{222}Rn , respectivamente. O radônio é um elemento radioativo natural que pertence à família dos gases nobres (UNSCEAR, 2000). O ^{222}Rn é o isótopo de radônio mais abundante e de maior duração, com meia-vida de 3,8 dias. Os elementos filhos do ^{222}Rn - ^{214}Po , ^{214}Bi e ^{214}Pb - são sólidos e radioativos.

Apesar de ser menos conhecido que o radônio, o torônio (^{220}Rn) também apresenta características importantes que influenciam a exposição humana à radiação. O ^{220}Rn é um isótopo do radônio que pertence à família dos gases nobres. É um elemento radioativo natural derivado do decaimento do tório-232 (^{232}Th), com uma meia-vida de aproximadamente 55,6 segundos. Para efeitos de leitura do presente estudo, entende-se radônio (Rn) como sendo o isótopo de massa igual a 222 g/mol.

O radônio e os seus elementos derivados são reconhecidos pela Organização Mundial de Saúde e pelas agências nacionais de saúde como a segunda principal causa de câncer do pulmão no mundo, depois do tabagismo (WHO, 2009). A *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 2000) estima que a dose efetiva média anual recebida pela população mundial é de 2,40 mSv, sendo o Rn e seus produtos de decaimento os elementos radioativos mais importantes relacionados à exposição humana a fontes naturais. Espera-se que cerca de 65% da população receba doses anuais entre 1 e 3 mSv, 25% menos de 1 mSv e 10% maiores que 3 mSv (Peake, R.T., Schumann, R.R, 1993).

Altas concentrações de U e Th podem ocorrer em variedades de rochas ígneas graníticas e alcalinas, areias monazíticas, xistos, calcários, depósitos de urânio, carvão, minerais metálicos e outros. Valores equivalentes podem ser encontrados em solos derivados dessas rochas. Assim, ambientes geológicos que contenham U, Th e Ra formarão substratos importantes para a emissão de Rn. Peake e Schumann (1993) afirmam que as fontes mais comuns de radônio nos gases do solo são rochas graníticas e rochas metamórficas, xistos negros, rochas fosfáticas e algumas rochas carbonáticas. Segundo os autores, as rochas graníticas comumente concentram urânio em minerais específicos durante sua fase inicial de cristalização. No entanto, o urânio nas rochas metamórficas é remobilizado e concentrado em função da temperatura, pressão e migração de fluidos durante o metamorfismo.

Áreas cuja base rochosa predominante corresponde a rochas vulcânicas e plutônicas como basaltos, gabros, peridotitos, anfíbolitos e carbonatos são classificadas como “baixo potencial de radônio”; rochas sedimentares e metassedimentares como xistos e gnaisses são classificadas como “baixas a moderadas”. No entanto, áreas onde predominam alguns tipos de depósitos geológicos de granito e urânio são classificadas como potencial de radônio “alto a muito alto” (Ielsch, 2010).

Dada a importância do gás Rn para a dose efetiva anual recebida pelo ser humano e a contribuição dos fatores geológicos na emanção e exalação do Rn, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que os países membros implementem programas nacionais de mapeamento para determinar o risco crescente de exposição ao Rn com base em estudos geológicos e geográficos (WHO, 2009).

Os programas nacionais de mapeamento geogênico devem envolver interação entre diferentes órgãos e áreas do conhecimento, incluindo organizações governamentais, autoridades políticas, instituições de pesquisa, laboratórios e mídia. O objetivo fundamental do mapeamento do Rn é evitar que a população fique exposta a elevados valores de concentração de gases. Portanto, organizações governamentais e centros de pesquisa têm identificado áreas de maior risco através da elaboração de mapas geogênicos indicativos de risco de radônio, funcionando como uma ferramenta de gestão para as autoridades e ajudando-as a tomar decisões em áreas prioritárias (Ielsch, 2010).

O interesse científico pelo Rn nas residências aumentou em meados da década de 1970, quando a instrumentação nuclear adequada para as medições se tornou disponível. Desde então, a investigação intensificou-se e revelou que os níveis de Rn são muito variáveis, atingindo mais de 300 Bq.m^{-3} em alguns casos.

Estudos recentes sobre o Rn e os seus efeitos colaboram como entendimento dos processos ambientais que afetam a exposição a este elemento. Porém, ainda existem muitas questões associadas à avaliação precisa das exposições e suas doses, como por exemplo o transporte do gás radônio do substrato geológico até a superfície, além da presença de urânio, tório e rádio nas rochas utilizadas como matéria prima de materiais de construção. Explorar essas lacunas se faz necessário, porque, em média, cerca de 90% do Rn presente numa habitação provém do subsolo e 5% dos materiais de construção (Nevese Pereira, 2004).

2. JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, muitos artigos sobre vários métodos e instalações experimentais para a determinação do coeficiente de difusão de radônio em solo, concreto e membranas à prova de radônio foram publicados. Por enquanto, tanto a teoria quanto as técnicas de medição do coeficiente de difusão do radônio em diferentes materiais estão em desenvolvimento e podem ser aprimoradas.

A reprodutibilidade dos resultados experimentais e a avaliação da incerteza de medição não têm recebido a devida atenção na literatura. Há uma razão para acreditar que a incerteza de medição aumenta significativamente em materiais menos permeáveis. Esta questão é especialmente importante para testar materiais usados na proteção “anti-radônio”.

Os comitês reguladores internacionais recomendam que os países identifiquem as áreas mais suscetíveis ao Rn e investiguem as características geológicas e de construção que podem contribuir para aumentar a exposição da população. Estudos sobre a exalação do Rn e sua contribuição para a dose em ambientes internos têm sido desenvolvidos mundialmente para criar um banco de dados a fim de compor um mapeamento geogênico dos países e identificar áreas de maior risco relacionado a esse gás.

Em virtude do supracitado, muitos países introduziram seus requisitos para mitigação de radônio em edifícios. Algumas dessas diretrizes e normas exigem o projeto e a implementação de uma proteção especial de radônio para a construção de novos edifícios, que leve em consideração o potencial de radônio do solo no local de construção e a capacidade do gás radônio de penetrar no edifício através do subsolo/infraestrutura. O grau de resistência à permeação de radônio no edifício é caracterizado pela construção da fundação, bem como o coeficiente de difusão de radônio nos materiais do porão - concreto e revestimentos isolantes.

Tendo em vista toda a problemática envolvida à exposição do radônio, a região central da cidade de Belo Horizonte se destacou por apresentar valores de radiação gama maiores do que outros locais da cidade. Em estudos desenvolvidos no Laboratório de Radioatividade Natural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LRN/CDTN) utilizando um espectrômetro auto portado, pôde-se avaliar espacialmente a distribuição da radiação gama na cidade. Motivada por estes estudos, onde a maior contagem foi detectada na Rua da Bahia (região central), decidiu-se explorar sobre a origem dessa anomalia, sendo esta causada pela geologia local, ou por ação antropogênica, com o enfoque no transporte de radônio e em seu comportamento nessas amostras de rocha, principalmente quando se faz sua segmentação e pulverização.

O presente trabalho, portanto, trata-se do estudo da exalação do radônio em granitos de Belo Horizonte e proposição de métodos de medição dessa variável e se justifica pela importância de se compreender mais esse fenômeno e desenvolver metodologias para sua medição.

Para entender como essas rochas permitem a permeabilidade e exalação do radônio, que, reconhecidamente, impacta consideravelmente na saúde do ser humano. Os resultados comparativos podem ser utilizados para desenhar os desafios e indicar novas perspectivas experimentais e de simulação computacional, sugerindo novos mecanismos e *setups* para o ensaio da exalação de radônio para diferentes granulometrias.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Estudar a exalação de radônio para diferentes granulometrias de afloramentos rochosos graníticos de Belo Horizonte – MG e propor métodos experimentais para sua determinação.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar amostra da Rua da Bahia e determinar suas concentrações de urânio (^{238}U) e elementos filhos (^{214}Pb e ^{214}Bi) e tório (^{232}Th) e elementos filhos (^{228}Ac e ^{212}Pb) nas amostras de rochas graníticas e suas relações com os teores de radônio exalado;
- Obter a concentração de radônio em diferentes granulometrias de rochas graníticas amostradas nas principais pedreiras de Belo Horizonte- MG por métodos passivos e ativos de detecção;
- Determinar as concentrações de ^{238}U , ^{214}Pb e ^{214}Bi , ^{232}Th , ^{228}Ac e ^{212}Pb nas amostras de rochas graníticas das pedreiras e suas relações com os teores de radônio exalado;
- Avaliar a aplicabilidade do uso de métodos passivos e ativos no estudo da exalação;
- Elaborar um modelo computacional para estudo da exalação do gás radônio em diferentes granulometrias de rochas fonte e comparar com os ensaios laboratoriais;
- Propor uma metodologia para estudo da exalação de radônio em diferentes granulometrias para rochas graníticas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo aborda uma revisão sistemática das principais fontes de exalação de radônio, seus elementos formadores e sua progênie. O texto se inicia com a apresentação dos conceitos de

NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*) e TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*), e prossegue com o estudo de urânio e suas diversas características físico-químicas e geológicas. Em seguida, são apresentados conceitos mais aprofundados acerca do radônio e seus mecanismos de transporte, sendo este o tema central, incluindo, por fim, algumas informações relevantes a respeito da mitigação do gás publicadas por organismos internacionais.

4.1. MATERIAIS NORM E TENORM

NORM é o termo usado para descrever minerais e outros materiais contendo radionuclídeos de origem natural, que causam um aumento significativo na exposição de trabalhadores ou público e que não podem ser desconsiderados do ponto de vista da proteção contra radiação. O processamento de alguns recursos naturais concentra-se em radionuclídeos de ocorrência natural a um grau que eles podem representar riscos para os humanos e o meio ambiente (Egidi e Hull, 1999).

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA, 2003), os materiais contendo NORM normalmente são gerados em grande volume apesar da sua baixa atividade, o que se põe como um desafio extra ao seu gerenciamento. No caso das rochas graníticas, a presença do U, Th e K pode resultar em uma exposição à radiação para os trabalhadores que as manipulam e para o meio ambiente. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) regula e fiscaliza, no Brasil, o manuseio desses materiais para garantir a proteção da saúde humana e do meio ambiente. De acordo com Alves (2012), controles insuficientes em etapas como manuseio, armazenamento e transporte podem levar ao espalhamento do material, resultando em uma contaminação ambiental e exposição potencial do público à radiação.

TENORM é uma sigla que indica materiais radioativos naturais tecnicamente aprimorados para resíduos de grande volume com baixa atividade específica liberados por meio de diversas atividades industriais, tais como, mineração de minerais, beneficiamento e processamento químico de minérios, produção de fertilizantes de fosfato, extração e purificação de oligoelementos, dentre outros (Egidi e Hull, 1999).

O impacto radiológico ambiental das indústrias NORM, pode ser avaliado através da quantificação do material radioativo liberado na forma de efluentes líquidos e gasosos e estudar como este material se dispersa no meio ambiente até atingir o homem. O comportamento dos radionuclídeos no meio ambiente é governado por uma série de fatores físicos, químicos e biológicos (Reis, 2016). Como o Rn é um gás radioativo natural, compreender seus mecanismos

de transporte pode ser de suma importância para controle radiológico de indústrias que liberam NORM na atmosfera, como indústrias de petróleo e gás, mineração de carvão, alumínio, ferro, dentre outras.

4.2. URÂNIO

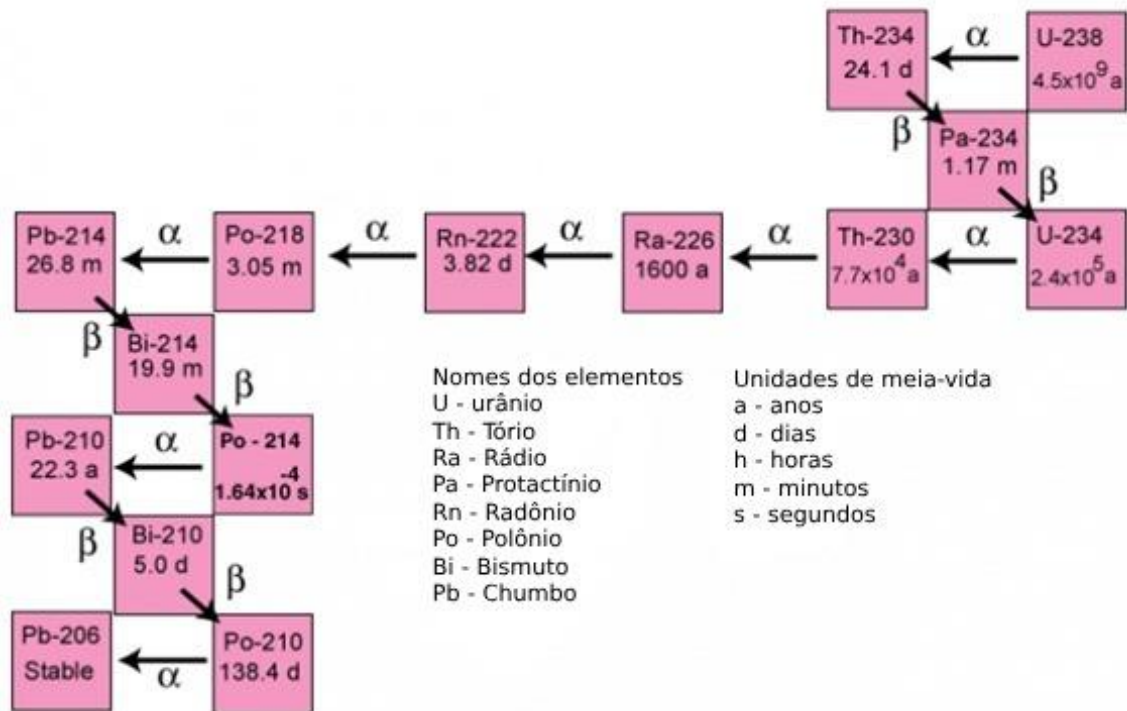
4.2.1. Séries de decaimento do urânio

O urânio é considerado o precursor da série dos actínídeos, que inclui elementos com números atômicos de 90 a 103, sendo todos eles radioativos. O urânio natural é composto principalmente por três isótopos: ^{238}U , ^{235}U e ^{234}U , com abundâncias de 99,274%, 0,720% e 0,0057%, respectivamente. Ele é encontrado na crosta terrestre em concentrações que variam de 0,008 a 8,2 ppm (Tanner, 1980).

A série de decaimento do ^{235}U envolve onze etapas de desintegração, começando com o isótopo de meia-vida longa ^{235}U e terminando no ^{207}Pb , estável. Todos os produtos de decaimento são sólidos, exceto o ^{219}Rn . O ^{235}U é principalmente utilizado como combustível nuclear em usinas nucleares devido à sua capacidade de fissão (Tanner, 1980). Para ser utilizado, ele precisa ser enriquecido e então inserido nos elementos combustíveis das usinas.

Por outro lado, o ^{238}U passa por quatorze etapas de desintegração (Fig.1), começando com o isótopo de meia-vida muito longa ^{238}U e terminando no ^{206}Pb estável. Similarmente ao ^{235}U , a maioria dos produtos de decaimento são sólidos, com a exceção do ^{222}Rn , um gás radioativo, que é o foco principal deste estudo. A Figura 1 apresenta a série de decaimento do ^{238}U , com os tempos de meia-vida, dos elementos indicados, dentro dos quadrados e os tipos de decaimento (alfa e beta) indicado nas setas.

Figura 1 – Esquema representando o decaimento do ^{238}U , incluindo as indicações de tempo de meia-vida e tipos de decaimentos principais.



Fonte: Adaptado de US Geological Survey, 2004.

4.2.2. Geoquímica do urânio

O urânio (U) apresenta diversos estados de valência ($2+$, $3+$, $4+$, $5+$ e $6+$), sendo as formas $4+$ e $6+$ as mais comuns na natureza. Seu transporte e mobilidade dependem de quatro fatores principais: potencial de oxirredução, pH, agentes complexantes e materiais adsorventes presentes na água (Camargo, 1994).

O íon uranoso (U^{4+}) possui raio iônico de $1,05 \text{ \AA}$, semelhante ao do cálcio e dos elementos terras raras (ETR) trivalentes. Em condições altamente ácidas, pode existir isoladamente em solução ou combinado com complexos de íons fluoretados. É a forma mais estável em ambientes redutores, mas devido à tendência dos íons de urânio de se ligarem ao oxigênio, mesmo os minerais reduzidos de urânio $4+$ contêm oxigênio (Nashet *al.*, 1981). O mineral mais comum de U^{4+} , encontrado em rochas ígneas primárias, é a uraninita (UO_2), que é muito estável e insolúvel em condições redutoras. No entanto, sob condições de intemperismo, o urânio se oxida para o estado $6+$, formando o íon uranila $[(\text{UO}_2)^{2+}]$ (Bonotto, 2004).

O $(\text{UO}_2)^{2+}$, em condições ambientais, é facilmente complexado não apenas com o ânion carbonato, mas também com os ânions hidróxido, fosfato e/ou fluoreto. A formação desses complexos de uranila aumenta significativamente a solubilidade dos minerais de U e a mobilidade do U em águas superficiais e subterrâneas.

Para que o urânio em solução precipite, os complexos aniônicos de uranila e os cátions disponíveis no ambiente precisam encontrar condições físico-químicas adequadas em termos de Eh e pH. Um material capaz de reduzir o U^{6+} a U^{4+} ; ou um material capaz de adsorver ou adsorver esses íons. Os principais íons redutores são íon do enxofre (S^{2-}), ânion hidrossulfeto (HS^-) e íon do ferro (Fe^{2+}). Onde o U^{6+} encontra condições muito redutoras e sílica disponível, o U pode ser reduzido para formar coffinita (silicato de U^{4+}). Na ausência de sílica, pode formar uraninita ou brannerita (óxido duplo de U e Fe ou Ti) (Bonotto, 2004).

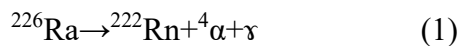
A forte associação entre o urânio e certos tipos de materiais orgânicos é bem conhecida. Os materiais orgânicos naturais pelos quais o urânio é atraído sempre contêm oxigênio. Dessa forma, os complexos inorgânicos de urânio são semelhantes: as coordenações dos íons de urânio ou uranila estão tipicamente ligadas aos átomos de oxigênio nos vários ligantes (Langmuir, 1978).

As jazidas de urânio se formam pela interação de processos orogênicos, estruturais, geomorfológicos e geoquímicos, que distribuem e concentram esse elemento em depósitos economicamente viáveis (Villaça, 1976). Cada tipo de depósito possui suas próprias associações minerais e características geoquímicas (Cuney, 2009; Cuney; Kyser, 2009). Os depósitos de urânio ocorrem em quase todos os tipos litológicos, sendo os mais antigos conhecidos os conglomerados de seixos de quartzo, originados ao final do período Arqueano e início do Proterozóico.

Essas rochas são pouco metamorfizadas e caracterizam-se pela presença de pirita ou matéria carbonosa, típicas de ambientes redutores. Segundo Geisel (1981), os conglomerados uraníferos são restritos a um período geológico que vai do desenvolvimento de uma extensa crosta ácida ao surgimento de uma atmosfera oxidante, entre 2,7 e 2,2 bilhões de anos. No entanto, os conglomerados de interesse econômico datam de 2,8 a 2 bilhões de anos. Esse período corresponde a uma fase singular na evolução crustal, marcada por intensa e extensa erosão da parte superior da litosfera, rica em urânio, resultando na deposição de sedimentos uraníferos em bacias fechadas, sob condições atmosféricas semelhantes às atuais (Alves, 1988).

Em rochas cristalinas, a maior parte do urânio está incorporada em minerais acessórios como monazita, allanita e zircão, o que impede sua rápida liberação para solução e disponibilidade para mineralização secundária (Gabelman, 1977; Larsen e Phair, 1954).

Os granitos, em geral, apresentam teores relativamente altos de rádio. Já as rochas sedimentares e metamórficas possuem concentrações intermediárias, enquanto basaltos e rochas calcárias geralmente apresentam teores mais baixos, embora haja exceções (Dyck; Jonasson, 2000). A importância de compreender o rádio reside no fato de que ele decai diretamente para o radônio, objeto deste estudo, conforme mostrado na Equação 1 a seguir:



4.3. RADÔNIO

4.3.1. Características gerais do radônio

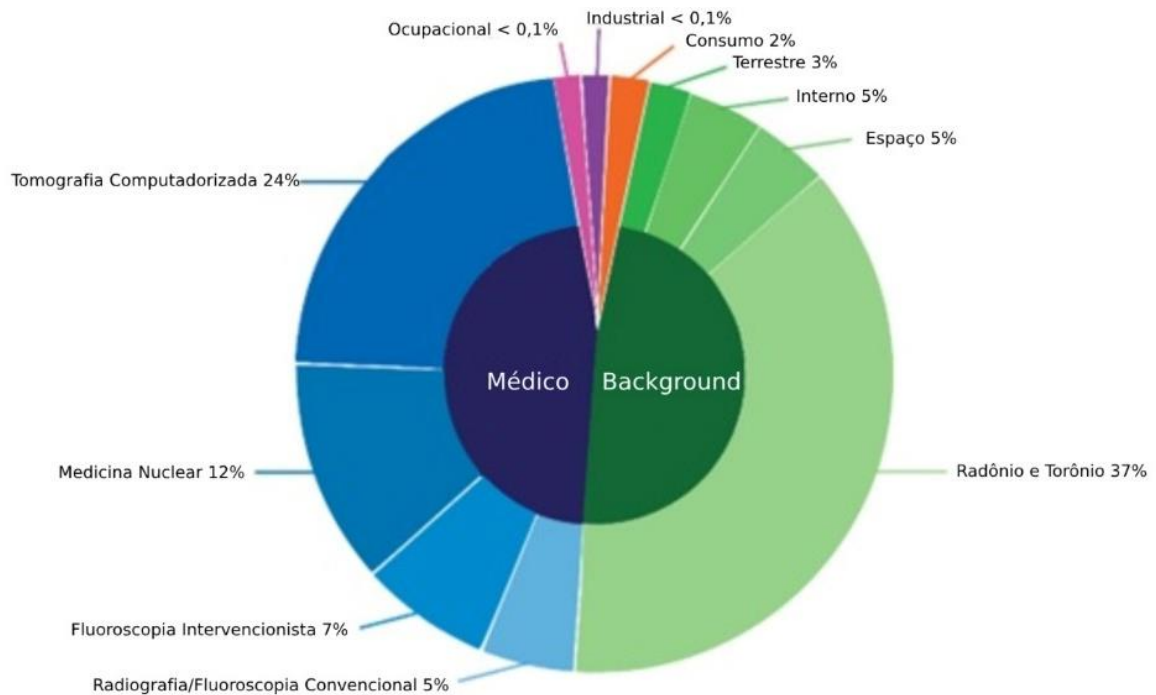
Alguns autores defendem que o radônio foi possivelmente descoberto em 1899 pelo casal Curie quando estudavam sais de rádio e perceberam que o ar estava radioativo. Outros, que Rutherford foi responsável pelo descobrimento do gás em 1900 (Rayner-Canham e Rayner-Canham, 2004). William Ramsay, em 1904, verificou que as linhas espectrais do elemento que o casal Curie tinha descoberto eram similares às aquelas apresentadas pelos elementos Argônio, Criptônio e Xenônio (Afonso, 2009). Desta forma, Ramsay deduziu que se tratava de um elemento pertencente, também, a família de gases nobres da tabela periódica.

O gás radônio é insípido, inodoro e incolor à temperatura ambiente, sua densidade é aproximadamente $1,217 \text{ g.L}^{-1}$, nas condições normais de temperatura e pressão, sendo o gás mais denso conhecido atualmente. O radônio apresenta pontos de fusão e ebulição muito baixos quando comparados a compostos de similar massa molar e é o gás nobre mais solúvel em água (Afonso, 2009).

O radônio possui diversos radioisótopos, porém, apenas três são de ocorrência natural: radônio (${}^{222}\text{Rn}$), actinônio (${}^{219}\text{Rn}$) e o torônio (${}^{220}\text{Rn}$). Cada isótopo citado provém de uma cadeia de decaimento. O ${}^{222}\text{Rn}$ é proveniente da carta de desintegração do ${}^{238}\text{U}$, já o ${}^{219}\text{Rn}$ e o ${}^{220}\text{Rn}$ são produzidos, respectivamente, nas séries do ${}^{235}\text{U}$ e ${}^{232}\text{Th}$. O ${}^{222}\text{Rn}$ é um gás nobre produzido pelo decaimento do ${}^{226}\text{Ra}$, membro da série do ${}^{238}\text{U}$, o qual ocorre em concentrações variadas nos sistemas geológicos, especialmente rochas e solos. O radônio ocorre naturalmente em solos na faixa típica de $4,0$ a 40 kBq.m^{-3} e na atmosfera na faixa típica de $4,0$ a 19 Bq.m^{-3} (Eisenbud; Gessel, 1997).

O ^{222}Rn tem tempo de meia-vida de 3,8 dias, é emissor alfa com energia de 5,49 MeV. Este decai para ^{218}Po (alfa- 6,00 MeV) e o ^{214}Po (alfa- 7,69 MeV) sendo a dose mais significativa em termos de proteção radiológica (ICRP, 1993). A Figura 2 ilustra qualitativamente a divisão das exposições do homem às fontes radioativas naturais (*background*) e médicas, segundo a *National Council on Radiation Protection & Measurements* (NCRP), N° 160 (NCRP, 2006).

Figura 2: Exposição do ser humano às diferentes fontes de radiação



Fonte: NCRP, 2006.

A entrada dos aerossóis no trato respiratório depende do tamanho das partículas: partículas maiores ficam retidas na cavidade nasal, enquanto partículas menores alcançam os pulmões. A energia das partículas alfa emitidas por esses radionuclídeos é totalmente absorvida pelos tecidos pulmonares (Planinié, 1999).

Takahashi (2020), realizou um modelo computacional que permitiu quantificar quantas partículas são depositadas nas vias áreas durante a inalação das partículas não anexadas e anexadas da progênie do radônio. Isso porque, o cálculo de dose do radônio depende da quantidade de partículas que são depositadas nas vias áreas. Uma das formas de obter essa informação é através da simulação com *Computational Fluid Dynamics* (CFD) (Takahashi, 2020).

A progênie do radônio tende a aderir às partículas de aerossóis dispersas no ar, formando a chamada “fração anexada”, que possui o mesmo tamanho que a distribuição dos aerossóis no

ambiente (20 a 500 nm de diâmetro) (IAEA, 2003). A progênie do radônio que não se adere às partículas de aerossóis forma a fração desanexada, cujo tamanho varia aproximadamente de 0,5 a 5 nm. Esta fração pode se depositar nas superfícies ou permanecer no ar como íons livres ou aglomerados moleculares.

Segundo a IAEA (2003), no modelo dosimétrico do pulmão, a fração desanexada representa um risco maior por unidade de material radioativo inalado do que a fração anexada. Quando o radônio e sua progênie estão em equilíbrio e são inalados, apenas o radônio é exalado imediatamente, devido ao fato de ser um gás nobre e não reagir quimicamente com outros elementos. No entanto, as frações anexadas e desanexadas podem se depositar nos pulmões, especialmente no trato respiratório superior, e irradiar o tecido pulmonar ao decair (Santos, 2008).

A energia total dissipada pelos produtos de decaimento do radônio nos pulmões é 500 vezes maior que a dissipada pelo próprio radônio (Eisenbud; Gessel, 1997). De acordo com a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP, 1993), a energia alfa potencial (ϵ_p) de um átomo na cadeia de decaimento do radônio é a energia alfa total emitida durante o decaimento desse átomo para ^{210}Pb . A energia alfa por unidade de atividade (Bq) do radionuclídeo considerado é dada por (Eq. 2):

$$\epsilon_p = \sum C_i (\epsilon_p / \lambda T) \quad (2)$$

Onde λ é a constante de decaimento e C_i é a concentração do produto.

A Concentração da Energia Alfa Potencial (C_p) é definida como a soma das energias alfa potenciais emitidas pelos átomos por volume de ar. Assim, a concentração de energia alfa potencial para qualquer mistura da progênie do radônio pode ser calculada pela equação 3 (ICRP, 1993):

$$C_p = \sum C_i \left(\frac{\epsilon_{p_i}}{\lambda T_i} \right) \quad (3)$$

Onde C_i é a concentração do produto de decaimento i .

A concentração da energia alfa potencial pode ser expressa em termos da Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC), que corresponde à concentração de radônio em equilíbrio radioativo com sua progênie de meia-vida curta, que liberaria a mesma energia alfa potencial por unidade de volume que a concentração de radônio e seus descendentes em desequilíbrio. A EEC (Bq.m^{-3}) é dada pela equação 4 (IAEA, 2003):

$$EEC = 0,104C(^{218}Po) + 0,514C(^{214}Pb) + 0,382C(^{214}Bi) \quad (4)$$

Onde C é a concentração do radionuclídeo entre parênteses.

A razão entre a EEC e a concentração de radônio (CRn) é chamada de fator de equilíbrio (F), mostrada na equação 5 (ICRP, 1993):

$$F = \frac{EEC}{C_{Rn}} \quad (5)$$

Este fator é igual a um se o radônio e seus produtos de meia-vida curta estiverem em equilíbrio secular. Normalmente, para a maioria dos ambientes internos, o fator varia entre 0,2 e 0,6 (Turner, 1995). De acordo com a ICRP (1993), o fator de equilíbrio caracteriza o desequilíbrio entre o radônio e sua progênie em termos da energia alfa potencial.

4.3.2. Geoquímica e características físico-químicas do radônio

A emissão de radiação ionizante por rochas e solos depende do seu conteúdo de urânio (U), tório (Th) e potássio (K), sendo que os níveis de radônio dependem principalmente da concentração de urânio (Santos, 2010). Assim, solos, rochas e soluções enriquecidos, principalmente com urânio, são potenciais fontes de exalação de radônio. A presença de urânio em diferentes litologias pode variar conforme suas características químicas, físicas, geológicas e geoquímicas, entre outras (Ielsch, 2010).

A presença de rádio no material mineral permite a constante produção de radônio em todo o solo ou matriz de aquíferos. Portanto, o radônio pode ser encontrado em todos os tipos de terrenos. Os átomos de radônio são liberados da matriz sólida dos materiais para o espaço intersticial por recuo quando o rádio decai (UNSCEAR, 2000).

Por difusão e convecção, esses átomos são transportados através dos poros até a atmosfera, onde se diluem (EPA, 1992). Uma fração dos átomos de radônio emana do local de sua produção para o espaço poroso preenchido com ar do solo ou da rocha (geralmente por difusão ou convecção), de onde alguns chegam à superfície e escapam para a atmosfera (exalação) (Ielsch, 2010).

Assim, o fluxo de átomos de radônio proveniente do solo depende: (I) da distribuição de urânio (U) e rádio (Ra) no substrato geológico; (II) das propriedades do solo (e.g., permeabilidade e porosidade); e (III) de parâmetros meteorológicos (e.g., temperatura, umidade

e pressão atmosférica) (Verdeloccoet *al.*, 2001). Em geral, áreas graníticas contêm altas concentrações de urânio e, conseqüentemente, um elevado coeficiente de emanação de radônio (UNSCEAR, 2000).

O radônio é solúvel em água e essa solubilidade é sensível à temperatura. Solubilidades para a faixa de temperatura de 0 a 100 °C são apresentadas na Tabela 1, onde a solubilidade é dada em moles por litro de radônio, estando o radônio a uma pressão parcial de 1 atm. A 10 °C, a solubilidade do radônio é aproximadamente 61 vezes a do oxigênio em massa (Lowry; Brandow, 1985).

Tabela 1 - Solubilidade do radônio na água em função da temperatura.

TEMPERATURA °C	SOLUBILIDADE RADÔNIO (mol.L ⁻¹)
0	0,51
5	0,42
10	0,35
20	0,25
30	0,20
40	0,16
50	0,14
60	0,12
70	0,11
80	0,11
90	0,10
100	0,10

Fonte: Adaptado de Weigel, 1978.

É possível observar que a solubilidade do radônio na água diminui com o aumento da temperatura. De acordo com a *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*(UNSCEAR), este fenômeno pode ser calculado e é controlado pelo coeficiente de partição K_T , que representa a razão entre a concentração de radônio na água e no ar (UNSCEAR, 2000). O valor de K_T varia de 0,53 em 0°C a 0,23 em 25°C, com valor típico de 0,30 em 15°C. Portanto, o radônio se desloca mais facilmente em moléculas de ar.

A solubilidade aumenta com a diminuição do tamanho e o aumento da desordem das partículas sólidas associadas, bem como com o pH e a presença de agentes complexantes, o que pode causar uma influência significativa na solubilidade (Bhattacharyya, 1998).

A pressão parcial de radônio no ar é baixa. Sendo assim, quando a água contendo o radônio é exposta ao ar e o gás é liberado/removido da água. Assim, as concentrações de radônio encontradas em águas superficiais são em geral inferiores às das águas subterrâneas. Uma revisão completa da química do radônio é fornecida por Weigel (1978).

4.3.3. Fração anexada e desanexada do radônio

Como mencionado anteriormente, o radônio possui como produtos de decaimento isótopos de polônio, bismuto e chumbo. A sequência desses radionuclídeos é denominada progênie do radônio. A progênie do radônio pode estar anexada a partículas de aerossóis presentes no ar, sendo referida como fração anexada, ou pode não estar anexada, formando íons livres que podem aderir às superfícies, conhecida como fração não anexada (Hofmann, 2015). A progênie do radônio anexada está adsorvida nos aerossóis presentes no ar, como as partículas de poeira (Turner, 1995).

Grande parte dos radionuclídeos inalados pelos seres humanos são naturalmente exalados e, portanto, não interagem com o organismo. No entanto, quando ocorre o decaimento dentro do corpo, a energia proveniente do decaimento do radônio e sua progênie entrega dose às células das vias aéreas superiores e interage com as células do parênquima pulmonar. Esse processo pode danificar o DNA e, como consequência, originar tumores malignos no pulmão, de acordo com a *American Cancer Society* (ACS, 2019).

O local de deposição nas vias aéreas depende do tamanho da partícula. Estima-se que aproximadamente 60% da fração não anexada inalada se deposita na região extratorácica e 40% na árvore bronquial (Hofmann, 2015). Por isso, o tamanho da partícula é um fator crucial para a determinação da dose.

A fração da progênie do radônio não anexada é de grande importância para a dosimetria do pulmão (Hofmann, 2012). A distribuição do tamanho dessa fração dependerá da distribuição do tamanho das partículas dos aerossóis, do gás ambiente e do coeficiente de fixação (Hofmann, 2012).

Existem duas grandezas que caracterizam a progênie do radônio: a Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) e a Concentração de Energia Alfa Potencial (PAEC). O EEC é a concentração de radônio em equilíbrio radioativo com sua progênie de meia-vida curta, representando a mesma energia alfa potencial por unidade de volume que a concentração de radônio e seus descendentes em equilíbrio (IAEA, 2003).

O PAEC é a soma de toda a energia alfa dentro de um volume definido que será emitida por todos os produtos de decaimento de meia-vida curta da série de decaimento do ^{222}Rn até o

^{210}Pb . Além disso, está fortemente relacionado com o potencial de danos à saúde ocasionado pelo radônio (SARAD GmbH, 2009; Turner, 1995).

O fator de equilíbrio, calculado pela razão entre o EEC e a concentração de atividade de radônio, é igual a um se o radônio e sua progênie estiverem em equilíbrio secular (Turner, 1995). A progênie do radônio pode estar em diferentes níveis de equilíbrio secular entre si e em relação ao radônio presente na atmosfera, dependendo das condições locais. O PAEC permite caracterizar radiologicamente uma atmosfera por meio de uma quantidade coletiva, sem a necessidade de determinar as concentrações de cada progênie individualmente (Turner, 1995).

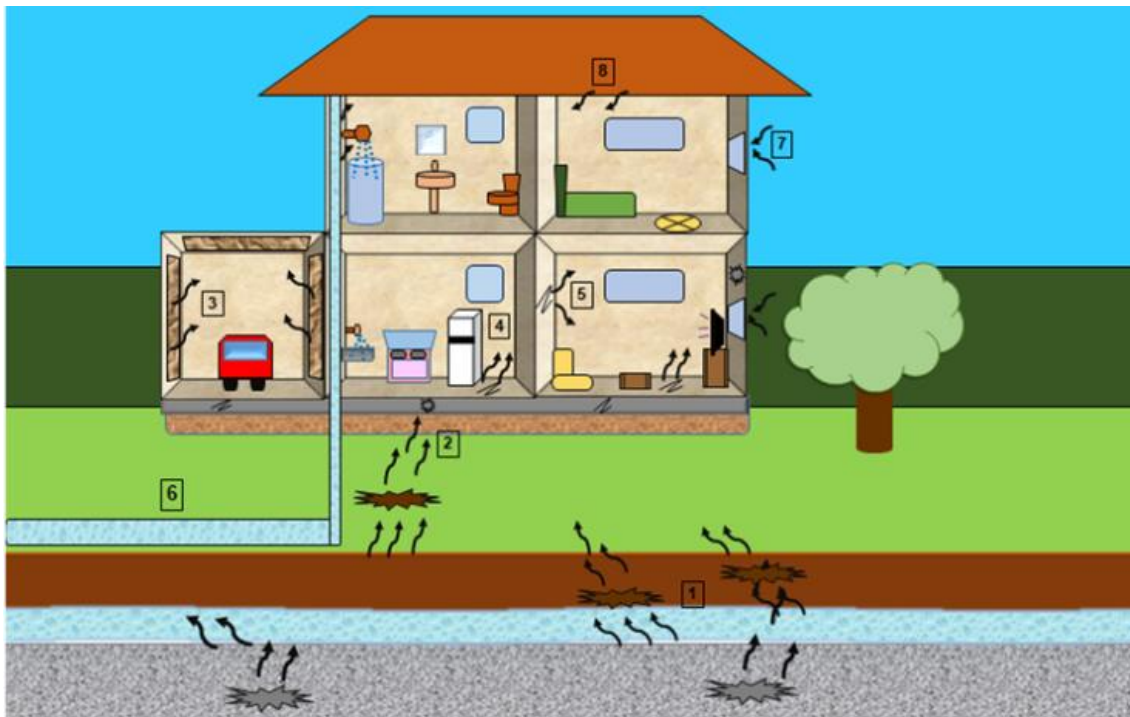
4.4. TRANSPORTE DE RADÔNIO

A liberação dos radionuclídeos no meio ambiente pode ser chamada, também, como “termofonte”. Essa descrição considera o tipo de radionuclídeo, sua forma físico-química, quantidade liberada por unidade de tempo e geometria da descarga. Os radionuclídeos liberados no ambiente percorrem diversos caminhos, por vias preferenciais de transporte até entrar em contato com o homem. O estudo destes movimentos pode ser realizado matematicamente por meio de modelos de compartimento. Ao chegarem nos compartimentos ambientais, os radionuclídeos podem se acumular em diferentes concentrações.

As concentrações de radônio em ambientes internos e suas doses correspondentes são, em geral, calculadas considerando as mudanças físicas na matriz das paredes, do piso ou do telhado das construções. Em geral, podemos distinguir os três principais mecanismos de transporte de radônio e entrada em um edifício (Fig.3):

- Convecção através de fissuras e aberturas;
- Difusão do solo através dos poros dos materiais de construção;
- Emissão do solo e materiais de construção.

Figura 1 - Formas de entrada do gás radônio em ambientes fechados



Meios de entrada do Radônio nas residências

- 1 – Rachaduras nos solos 2 – Rachaduras nos pisos 3 – Cavidades dentro das paredes 4 – Rachaduras nos pisos suspensos
 5 – Rachaduras nas paredes 6 – Água presente nos encanamentos 7 – Ar atmosférico 8 – Materiais de construção

A exalação do radônio das paredes, por exemplo, varia de acordo com o comprimento de difusão, espessura e dimensão dos materiais de construção (Sahoo, *et al.*, 2010). Para um estudo aprofundado da exalação de radônio, é necessário estudar as concentrações obtidas em detecções dentro de ambientes internos e utilizando modelos matemáticos computacionais. O cálculo do fluxo de radônio deve considerar a presença de rádio, coeficiente de emanação e comprimento de difusão do radônio em materiais de construção (Nazaroff e Nero, 1988). Somado aos fatores citados, Sahoo (2010) sugere um modelo semiempírico para prever a taxa de radônio exalado. Outros autores sugerem acrescentar informações como a fração de material de construção utilizado no revestimento e a taxa de troca de ar no cômodo, de acordo com Stoulos *et al.* (2003).

A liberação do radônio do material para a atmosfera ocorre seguindo três séries de processo: (i) Emissão que consiste no processo de movimentação dos átomos de radônio dos grãos do material sólido para o espaço intersticial entre os grãos; (ii) Transporte que ocorre através da difusão e advecção dos átomos de Rn emanados que são encaminhados para a superfície do material; (iii) Exalação, que consiste no processo de movimentação dos átomos de Rn da superfície para a atmosfera (Nazaroff, 1988).

4.4.1. Difusão

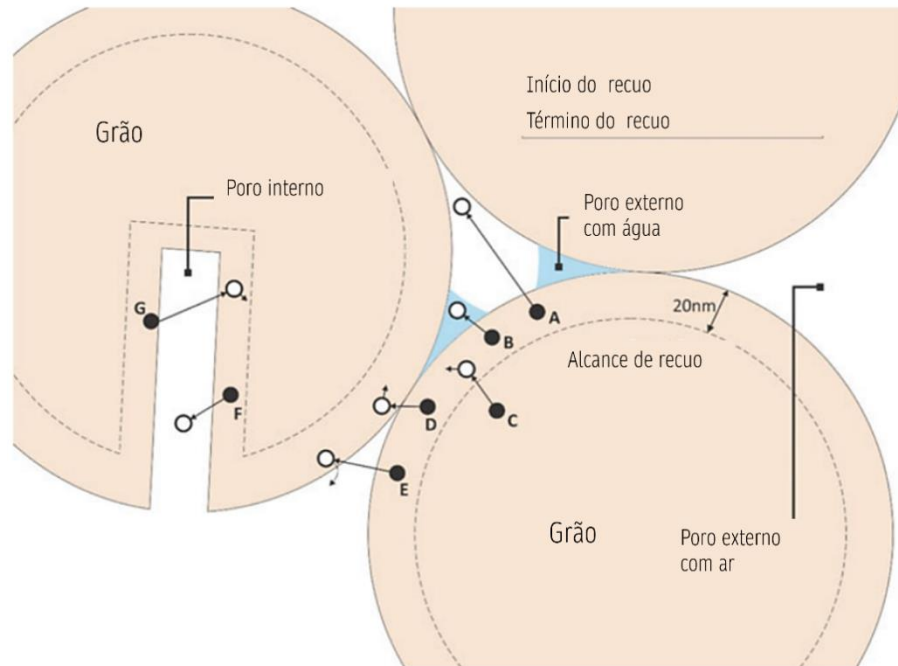
Diferenças no tamanho das partículas na amostra têm grande influência no coeficiente de difusão do radônio e taxa de produção de radônio livre, bem como permeabilidade ao meio e porosidade; portanto, é importante medir com precisão esses parâmetros (Yeet *al.*, 2014). Em geral, modelos de difusão e convecção de radônio em meios porosos são os mais conhecidos, descritos em termos de radônio coeficiente de difusão e taxa de produção de radônio livre (Zhang, 2010). Para determinação da taxa de produção de radônio livre, outros parâmetros, como conteúdo de rádio, coeficiente de emanação e densidade do meio, devem ser conhecidos, o que torna os processos de medição mais complexos, como por exemplo, a obtenção do coeficiente efetivo de difusão do radônio em meios porosos.

4.4.2. Emanação

O processo pelo qual o radônio escapa do material sólido para o espaço poroso   chamado de emana o. A emana o do radônio leva em considera o dois fatores, o recuo alfa e a difusão. No entanto o coeficiente de difusão do radônio no sólido   muito baixo e, dessa forma, o principal fator considerado   o recuo da partícula alfa (Sakodaet *al.*, 2011). O rádio ao decair emite duas partículas: o átomo de radônio e uma partícula alfa, e entre estas duas há um recuo que permite que o Rn se desloque. O átomo de Rn pode recuar para diferentes posi es dentro da matriz sólida (Fig. 4).

Muitos fatores afetam a taxa emana o do radônio, incluindo tamanho e forma da partícula, porosidade interna, a extensão do dano provocado pela radia o dentro da estrutura cristalina, o tipo de distribui o de impurezas e imperfei es e a concentra o e distribui o do rádio (Tanner, 1980). Alguns destes aspectos serão discutidos neste t pico.

Figura 2 - Posições de recuo do radônio na matriz



Fonte: Adaptado de Sakoda, 2011, *in* Bonfim, 2018.

Para um átomo de radônio escapar do grão mineral para o espaço poroso, o decaimento deve ocorrer dentro da distância de recuo da superfície dos grãos. A distância de recuo percorrida pelos átomos de radônio recém-formados é explicada como a distância entre o ponto de geração e o ponto onde a energia cinética é transferida (Baskaran, 2016). A comparação do alcance de recuo do Rn no ar, na água e no quartzo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Alcance recuo alfa em diferentes matrizes.

Meio	Densidade (g.cm ⁻³)	Alcance (nm) ²²² Rn
Ar	1,58 x 10 ⁻³	53
Água	1	77
Quartzo	2,65	38

Fonte: Adaptado de IAEA, 2013.

Além da distância exata de recuo do grão, a partícula alfa emitida deve estar voltada para dentro do grão, favorecendo a liberação do radônio no poro. Cerca de 30% dos átomos de radônio gerados na faixa de recuo da superfície de uma partícula esférica escapa para os interstícios dos grãos (Bossus, 1984).

Várias hipóteses foram propostas para explicar a grande discrepância entre os coeficientes de emanção medidos e os previstos pela teoria (Tanner, 1980). As principais hipóteses são: (i) distribuição não homogênea de grãos minerais, principalmente da incorporação de ^{226}Ra em minerais acessórios (Krishnaswami; Seidemann, 1988); (ii) danos causados pela energia emitida nos decaimentos alfa, causando danos na rede cristalina do mineral (esses danos na estrutura facilita a lixiviação do mineral na zona danificada, aumentando assim o coeficiente de emanção); e (iii) a existência de poros no mineral, que resulta na formação de uma rede de canais através da qual átomos de radônio podem ser emanados (Rama; Moore, 1990).

A razão entre o número de átomos de radônio emanados da matriz do mineral e o total de átomos de radônio produzidos é chamada de coeficiente de emanção ou fator de emanção (ϵ) (Schubert, 2015). Valores típicos do coeficiente de emanção para rochas e solos variam de 0,05 a 0,70. A emanção do radônio é influenciada, pela granulometria dos materiais, pela distribuição mineralógica do rádio e pelo teor de água nos interstícios dos grãos (umidade) (UNSCEAR, 2000).

Estudos mais recentes sobre minerais de zircão aquecidos indicaram que trilhas de fissão e danos por radiação exercem controle sobre as taxas de emanção de radônio, sendo o coeficiente de emanção de radônio inversamente proporcional à densidade da trilha de fissão (Eakin *et al.*, 2016).

Se o átomo de rádio estiver localizado em uma região muito interna do grão mineral, dificilmente o radônio é liberado para o espaço dos poros, ainda que a direção assumida pelo átomo seja no sentido da superfície do grão. Tal fato corresponde à autoabsorção do radônio pela própria matriz mineral (Lara, 2017). Já segundo Tanner (1978), para a maioria dos solos, cerca de 10 a 50% do radônio produzido consegue se libertar do grão mineral em que se encontra e alcançar a região dos poros.

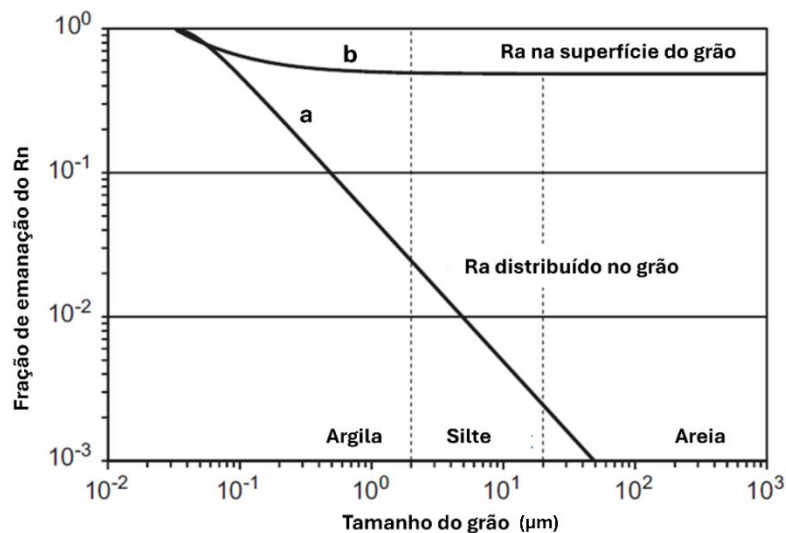
A localização do rádio no poro e a porosidade do meio também ajudam a definir um dos principais fatores para o transporte de radônio, a emanção de radônio. Apenas uma fração do Rn gerado no solo deixa os grãos sólidos e entra no volume de poros do solo. A presença de rádio em maiores concentrações na superfície dos grãos aumenta o poder de emanção em relação àquele em que o rádio é distribuído uniformemente no interior dos grãos (UNSCEAR, 2000). Andrews e Wood (1972) e Bossus (1984) calcularam a probabilidade de escape para

átomos de Rn gerados dentro da faixa de recuo da superfície de uma partícula esférica e obtiveram 23,5 e 25%, respectivamente.

O tamanho e forma do grão são fatores que determinam quanto de rádio está próximo à superfície do grão para permitir que a radiação escape em espaços porosos. Os átomos de rádio nos solos tendem a estar concentrados perto dos limites dos poros, e quando um átomo de rádio decai, o átomo de radônio resultante pode recuar para o espaço dos poros (Shumann *et al.*, 1994). Desta forma, o coeficiente de emanação aumenta quando o rádio está distribuído mineralogicamente na superfície do grão da rocha em estudo (UNSCEAR, 2000).

No gráfico da Figura 5 é possível perceber a relação da fração de radônio emanado em função do tamanho do grão (em μm) e da forma como o rádio está distribuído. A linha (a) indica que grãos maiores que $10\mu\text{m}$ emanam radônio significativamente e essa fração emanada é inversamente proporcional ao tamanho do grão. A linha (b) apresenta a fração de emanação do radônio decrescendo até atingir o valor constante de 0,5 com o crescimento do tamanho do grão (Sakoda *et al.*, 2011). Sakoda (2011) e colaboradores observaram que, com o resultado apresentado na Figura 5, mesmo grãos com formatos diferentes do esférico, a fração de emanação é saturada conforme o crescimento do grão.

Figura 3 - Cálculo de fração de emanação de radônio no modelo de grão único.

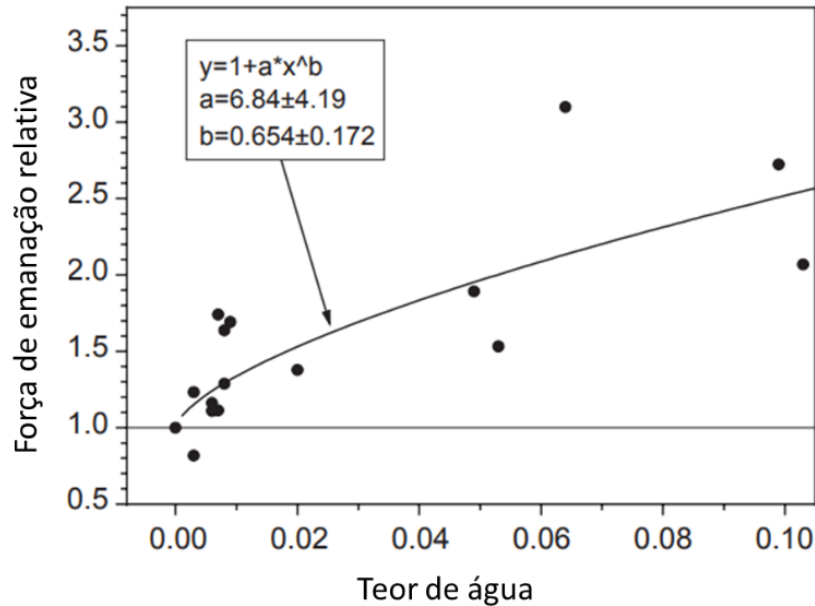


Fonte: Adaptado de SAKODA *et al.*, 2011.

A presença de água no espaço intersticial é um fator importante na compreensão da emanação. O poder de freamento da água é muito maior do que do ar, o que reduz a perda da

emanação do recuo dos átomos de radônio e resulta na entrada deste átomo no poro (Nazaroff, 1992). A Figura 6 abaixo mostra uma tendência geral da emanação do radônio em função da quantidade de água.

Figura 4 - Fração relativa de radônio emanado em função da umidade.



Fonte: Adaptado de NAZAROFF, 1992.

Um aumento no teor de umidade causa uma redução na difusão do radônio à medida que a fração dos poros através da qual o radônio difunde é preenchido com água (Shweikani *et al.*, 1995). A umidade dos solos influencia na taxa de emanação uma vez que a película de água que circunda os grãos absorve a energia cinética dos átomos de radônio recuados. Essa captura aumenta a probabilidade dos átomos de radônio de permanecer nos poros, evitando, assim, que eles entrem no espaço intergranular (Santos, 2010).

Outro fator é a co-precipitação dos radionuclídeos com óxidos metálicos e compostos orgânicos que constitui um importante processo que aumenta o coeficiente de emanação (UNSCEAR, 2000).

As permeabilidades efetivas de rochas e solos também são altamente variáveis, estando relacionadas ao grau de intemperismo, porosidade, umidade e presença de rachaduras ou fissuras. (UNSCEAR, 2000). Fraturas e fissuras microscópicas, chamadas de nanoporos ou aberturas causadas por decaimentos radioativos anteriores fornecem caminhos adicionais para a liberação de radônio. À medida que a porosidade do solo aumenta, o processo de difusão se

torna mais fácil porque mais espaços vazios se tornam disponíveis para o radônio se difundir (Shweikani *et al.*, 1995).

A eficiência de emanação do gás radônio, E , definida por Wanty *et al.* (1992), pode ser expressa pela equação 6:

$$E = \frac{({}^{222}\text{Rn})_{\text{ar}}}{({}^{222}\text{Rn})_{\text{ar}} + ({}^{222}\text{Rn})_{\text{rocha}}} \quad (6)$$

O fator de emanação E é usualmente menor do que 0,5 e neste nível o material exala todo o gás radônio produzido (Wanty *et al.*, 1992).

A concentração da atividade de ${}^{226}\text{Ra}$ (em $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) pode ser determinada multiplicando-se a concentração de U (ppm) na rocha por 12,34. Considerando-se o equilíbrio radioativo secular, ela equivale à concentração de atividade de ${}^{222}\text{Rn}$ gerado na rocha a partir de seu pai o ${}^{226}\text{Ra}$ (Wanty *et al.*, 1992).

4.4.3. Coeficiente de emanação

O fator de emanação (f), coeficiente de emanação ou poder de emanação pode ser calculado pela fração entre a atividade de radônio liberada do material e a atividade de rádio presente no mesmo (Hassan *et al.*, 2009). Ou seja, o coeficiente de emanação carrega a informação da quantidade de átomos que saem do grão e atingem o espaço poroso. A distribuição de rádio nos grãos, a quantidade de água presente no material, a temperatura, e o tamanho do grão são os fatores que influenciam veementemente no processo de emanação, logo, no coeficiente de emanação (Hassan *et al.*, 2009).

A distribuição de rádio no grão não é homogênea. Em geral, o elemento pai encontra-se distribuído mais próximo da superfície do grão do que em seu interior (Hassan *et al.*, 2009). À medida que o tamanho do grão é reduzido, a razão entre a área superficial e o volume aumenta. Assim, quanto menor o tamanho do grão, maior será o coeficiente de emanação, pois este cresce à medida que aumenta a quantidade de rádio próxima a superfície (Hassan *et al.*, 2009). Coeficientes de emanação de radônio (CER) foram encontrados em uraninitas por Krupp *et al.* (2017) e são apresentados na tabela abaixo (Tabela 3). Os autores fizeram o experimento com progressivo aumento de temperatura.

Tabela 3 - Coeficientes de emanção determinados em tamanhos de grão de 125 a 250 μm e em diferentes temperaturas

Amostra	Tamanho do grão (μm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	CER (%)
Uraninita	125-250	25	0,18 \pm 0,001
		200	0,10 \pm 0,001
		300	0,26 \pm 0,001
		400	0,09 \pm 0,001
		600	0,06 \pm 0,001
		800	0,03 \pm 0,001

Fonte: Adaptado de Kruppel *al.*, 2017.

4.4.4. Exalação

O radônio após ser emanado das rochas e grãos do solo é transportado em direção à superfície. Os dois principais métodos de transporte são: a difusão molecular e o fluxo convectivo. A difusão através do ar atmosférico acontece segundo a lei de Fick. Segundo a UNSCEAR (2000), a difusão molecular é o principal mecanismo de entrada do radônio na atmosfera, contudo o fluxo convectivo promovido por condições de ventos e alterações na pressão atmosférica também ocorre (UNSCEAR, 2000).

Assim, para concentrações diluídas de radônio no ar, a lei de Fick pode ser escrita como a Equação 7 (Nazaroff, 1992):

$$J^d = -D_0 \nabla I_a \quad (7)$$

Onde J^d é a densidade de fluxo da atividade do radônio devido à difusão ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), D_0 é a difusividade molecular ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), I_a é a concentração da atividade do radônio ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) e ∇ é o gradiente operador (m^{-1}). A lei de Fick baseia-se em observações experimentais e é consistente com a teoria cinética para um gás ideal. A difusividade do ^{222}Rn no ar é de $1,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (UNSCEAR, 1993).

A taxa de exalação do radônio representa o gás radônio que é lançado da superfície do material para o ar e pode ser calculada através da Equação 8a seguir,

$$Ex = \frac{cv\lambda}{s} \quad (8)$$

Onde Ex é a taxa de exalação por unidade de área e tempo ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), C a concentração de radônio), V_0 volume do circuito de exalação (câmara de ionização, mangueiras, bomba de ar, porta amostra) λ a constante de decaimento do radônio e S_{da} área superfície da amostra.

Diversos estudos foram realizados no intuito de compreender e medir a exalação de radônio. Saad *et al.* (2013) realizaram medidas de exalação de radônio e extrapolaram para concentração interna em ambientes internos. O processo de geração e transporte do radônio em paredes é significativamente diferente do observado em materiais de construção. Portanto, é necessário investigar essa prática de extrapolar os dados de exalação de radônio para o radônio interno por meio de uma análise sistemática, realizando medições experimentais e modelos de previsão.

O cálculo do fluxo de radônio através de paredes a partir do conhecimento do teor de rádio, coeficiente de emanação do radônio e comprimento de difusão do radônio em materiais de construção foi sugerido por Nazaroff e Nero (1988) enquanto Sahoo e Mayya (2010) sugeriram um modelo semiempírico para prever o fluxo de radônio através de paredes utilizando a taxa de exalação de radônio e o comprimento de difusão em materiais de construção.

Outro modelo sugerido por Stoulos *et al.* (2003) prevê a concentração de radônio interno contribuído pelas paredes a partir dos valores das taxas de exalação de radônio de amostras de materiais de construção, uso fracionado de superfície de materiais de construção na construção de paredes e taxa de troca de ar do ambiente. Stoulos *et al.* (2003) estudou as taxas de exalação de radônio de vários materiais de construção medidas por uma técnica ativa usando um monitor de radônio contínuo e os resultados foram extrapolados para o radônio interno para comparar com o valor medido da concentração de radônio interno em algumas residências selecionadas.

4.4.5. Taxa de exalação

A taxa de exalação de radônio é definida como o número de átomos que saem do material por unidade de área por unidade de tempo (Tuccimei *et al.*, 2009). Usualmente usa-se a unidade $\text{Bq}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$. Esta grandeza também pode ser definida como sendo o número de átomos que saem do material por unidade de massa por unidade de tempo $\text{Bq}\cdot\text{Kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Os fatores que influenciam a taxa de exalação são, principalmente: a quantidade de água presente, a porosidade, o tamanho do grão, a temperatura, a pressão e a geometria da amostra (Hassan *et al.*, 2009).

Uma das formas possíveis de medir a taxa de exalação de materiais é por meio do monitoramento do crescimento da concentração de radônio em função do tempo, de acordo com a Equação 9 (Pretopoulos et al., 2001 *apud* Tuccimei et al., 2009). Para isso, é necessário que a concentração seja monitorada em um ambiente fechado, por exemplo em uma câmara ou em um contêiner e a concentração calculada como mostrado abaixo (Eq. 9).

$$C(t) = C_i e^{-\lambda t} + E \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \lambda \cdot V \quad (9)$$

Onde C é a concentração de ^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), C_i é a concentração inicial de ^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), λ é a constante de decaimento (h^{-1}), t é o tempo (h), E é a taxa de exalação de ^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}$) e V é o volume total livre para circulação de ar. O primeiro termo da soma leva em conta o decaimento do ^{222}Rn presente inicialmente no sistema, enquanto o segundo diz respeito ao crescimento exponencial do ^{222}Rn até atingir uma situação de equilíbrio. Quanto maior for a taxa de exalação, maior será a concentração de radônio, no interior do ambiente fechado, ao se atingir o equilíbrio.

4.4.6. Indicadores de risco de radônio

Um indicador utilizado para estimar o risco potencial de uma área é o *Soil Radon Index*, ou SRI, o qual consiste em um valor numérico adimensional calculado a partir de determinações de concentração de radônio nos gases do solo, a uma profundidade de 0,7 m, e da permeabilidade deste solo. Com o indicador é possível obter um prognóstico estatístico sobre a concentração de radônio no ar a partir destas variáveis, podendo assim caracterizar uma dada região quanto ao risco do radônio no ar de acordo com a equação 10:

$$SRI = \frac{C - C_0}{-\log P + \log C_0} \quad (10)$$

Onde C corresponde à concentração de radônio nos gases do solo ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$); P corresponde à permeabilidade do solo (m^2); C_0 e P_0 são $1,0 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$, respectivamente. O SRI é, então, diretamente proporcional à concentração de radônio nos gases dos solos, tendo servido de metodologia para avaliações de risco de radônio em residências na República Tcheca (Matolín; Koudelová, 2008) e em vários outros países.

Outro indicador de risco geológico de uma área é o percentual de residências nesta área que apresentam concentrações de radônio no ar interior que excedem os níveis de ação estabelecidos pelas autoridades reguladoras (Lara, 2017). Este indicador foi estabelecido por Talbot *et al.* em 1998 ao qual denominou *Geological Radon Potential*, ou simplesmente GEORP. Sendo assim, o GEORP é dependente de um conjunto de variáveis e parâmetros

característicos do solo, como: coeficiente de emanação, concentração equivalente de urânio (eU), fatores climáticos e do tipo de construção.

4.4.7. Recomendações nacionais e internacionais para a exposição ao radônio

As recomendações internacionais para a exposição ao radônio são baseadas em estudos de saúde pública e visam reduzir os riscos associados à inalação desse gás radioativo. Aqui estão algumas das principais diretrizes:

4.4.7.1. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)

Segundo a recente atualização da Norma NN 3.01 - Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação—para radionuclídeos de origem natural, a exposição ao radônio deve ser controlada observando o valor de referência de 300 Bq/m³ para ambientes fechados e devem ser controladas separadamente da exposição aos demais radionuclídeos. (CNEN, 2024).

4.4.7.2. Organização Mundial da Saúde (OMS):

A OMS recomenda que os níveis de radônio em ambientes internos não excedam 100 Bq/m³. No entanto, reconhece que, em alguns casos, pode ser difícil atingir esse nível e sugere que ações sejam tomadas para reduzir os níveis de radônio em qualquer ambiente onde a concentração exceda 300 Bq/m³.

4.4.7.3. Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP):

A ICRP sugere um nível de referência para a concentração de radônio em residências de 300 Bq/m³. Para locais de trabalho, o nível de referência é de 1000 Bq/m³.

4.4.7.4. Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA):

A IAEA fornece orientações detalhadas sobre a medição e mitigação do radônio, enfatizando a importância de programas nacionais de mapeamento de radônio e a implementação de medidas de controle em áreas de alto risco.

4.4.7.5. União Europeia (UE):

A Diretiva 2013/59/Euratom estabelece um nível de referência de 300 Bq/m³ para radônio em ambientes internos. Os Estados-Membros são obrigados a implementar programas nacionais para gerenciar os riscos associados ao radônio.

4.4.7.6. Estados Unidos (EPA):

A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) recomenda que ações sejam tomadas para reduzir os níveis de radônio em residências onde a concentração exceda 148 Bq/m³ (4 pCi/L).

Essas recomendações são baseadas em evidências científicas que demonstram a relação entre a exposição ao radônio e o aumento do risco de câncer de pulmão. A implementação dessas diretrizes varia de acordo com as políticas nacionais e as condições geológicas locais.

A Comissão Europeia de Proteção Radiológica do Público Contra o Radônio Indoor da *International Commission on Radiological Protection* – ICRP - (Comissão Internacional de Proteção Radiológica), datada de 21 de fevereiro de 1990, já desenhava propostas de ações apropriadas para aplicação de padrões de segurança para proteção da saúde do público geral quanto aos riscos da exposição ao radônio. No mesmo relatório, médias de 20 a 50 Bq.m⁻³ são identificadas como valores típicos concentrações de radônio em ambientes internos.

A principal característica destacada pela comissão é a variabilidade de exposições em ambientes internos (ICRP, 1987). À época poderiam ser encontradas variações de 1 a 2,5 mSv entre as moradias, sendo que a população de alguns países recebia mais de 20 mSv/ano (Conselho Diretivo Europeu, 1980) valor que, hoje, é utilizado como referência para indivíduos ocupacionalmente expostos, no Brasil (CNEN, 2014).

Através dos grupos de estudo, percebeu-se que critérios de segurança radiológica eram possíveis e permitiriam o desenvolvimento de diretrizes para ações corretivas em edifícios existentes. Em construções já existente, utiliza-se o nível de referência que seja um equivalente de dose efetiva de 20 mSv por ano, que para fins práticos, pode ser tomado como equivalente a uma média anual de gás radônio na concentração de 400 Bq.m⁻³. (Conselho Diretivo Europeu, 1980).

Para futuras construções são necessárias medidas preventivas de acordo com as especificações apropriadas de projeto e construção, de forma que resulte em uma dose efetiva que não supere o equivalente a 10 mSv por ano, que para fins práticos, pode ser tomado como equivalente a uma média anual de gás radônio na concentração de 200 Bq.m⁻³ (Conselho Diretivo Europeu, 1980).

4.4.8. Medidas de radônio

A primeira medida *indoor* de radônio no ar ambiente, considerando o tamanho das partículas, foi realizado por Sinclair et al. (1977) usando uma bateria de difusão especialmente construída para a função. Outros autores como Becker et al. (1984) e Knutson et al. (1984) também estudaram a atividade ponderada por tamanho de partícula. Em todos os estudos citados, o menor tamanho de partícula passível de ser estudado foi de 5nm.

Um dos principais fatores para estudar o comportamento aerodinâmico é a dimensão do aerossol, visto que as propriedades físicas estão fortemente ligadas ao tamanho (Melo, 2018). Partículas com maior diâmetro são retidas preferencialmente nas vias aéreas superiores e as com menor diâmetro podem chegar até os alvéolos (Júnior, 1994).

Um dos problemas dos medidores utilizados é a eficiência de coleta das baterias de difusão projetadas para cobrir a faixa de tamanho de partículas de 5 a 500nm. Grupos de estudo como o Conselho Nacional de Proteção Contra Radiação do Reino Unido e o *Australasian Radioanalytical Laboratory* (Laboratório Australiano de Radiação) desenvolveram baterias de difusão de tela graduada para medidas de atividade baseado na distribuição de tamanhos. Resultados encontrados mostraram dificuldade na medida de partículas maiores do que 500 nm e menores do que 20 nm. Para as partículas menores do que 20 nm há, inclusive, fenômenos sem explicação dentre os erros de medida.

Em um estudo, Yong-Jun Ye e colaboradores (2017) com objetivos de obter os parâmetros físicos da migração de radônio em meios porosos granulados com base na teoria da migração por difusão de radônio em meios porosos e na lei da conservação da massa, propuseram um método e um dispositivo experimental para determinar os parâmetros físicos da migração de radônio em meios como areia, minério e rejeitos. O método proposto foi dividido em duas etapas, montagem de um dispositivo para estudo do comprimento de difusão do Rn e um para a medida da concentração do Rn. Contudo, não representa valores resultantes que levem em consideração parâmetros importantes como a quantidade de rádio na amostra e a densidade da amostra.

4.4.9. Métodos matemáticos para estudo do transporte do radônio

A concentração interna de ^{222}Rn e ^{220}Rn pode ser afetada por muitos fatores, incluindo principalmente mudanças climáticas de longo prazo, mudanças climáticas sazonais, cobertura do solo e vegetação, porosidade do solo e tamanho do grão, bem como o tipo de materiais de construção, estanqueidade, taxa de ventilação, tipo ventilação e idade de construção do edifício (Suzuki *et al.*, 2010; Nikolopoulos, *et al.*, 2014).

Em geral, os níveis de radônio em ambientes fechados têm sido medidos por métodos passivos e ativos, utilizando detectores, dosímetros e dispositivos eletrônicos (Chauhan, 2014). Alguns modelos matemáticos também são desenvolvidos para estimar a concentração de radônio em ambientes fechados (Jelle *et al.*, 2011, Stoulos *et al.*, 2003). Recentemente, a

Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) assumiu uma posição de destaque para simulação de problemas de radônio em ambientes internos.

O principal método para estudar o comportamento do transporte de radônio é obter indiretamente seu coeficiente de difusão em meios porosos, utilizando equipamento de teste especial baseado na teoria do transporte difusivo do radônio. A difusividade do radônio tem sido em laboratório e em campo usando modelos empíricos propostos por ajuste de dados (Klink *et al.*, 1999; Kumar e Chauhan, 2014; Mujahid *et al.*, 2005; Narula *et AL.*, 2013; Ye *et al.*, 2017).

No entanto, estas medições assumem que o transporte de radônio em meios porosos é apenas ao transporte difusivo e ignoram o transporte por advecção. Um ajuste mais fino é obtido assumindo a difusão advectiva dependente da velocidade do transporte do gás (Van der palet *al.*, 2005). A precisão das medições laboratoriais ou de campo da difusividade do radônio permanece, portanto, limitada.

A difusão do radônio em meios porosos geralmente depende do tamanho dos poros e de sua distribuição

A difusão do radônio em meios porosos geralmente depende do tamanho dos poros e de sua distribuição (Papachristodoulou *et al.*, 2007; Schumann e Gundersen, 1996). A formulação de um modelo analítico para a difusão do radônio em meios porosos é um desafio porque a microestrutura dos meios porosos naturais (por exemplo, em solos, rochas, materiais de construção) é irregular e complicada. Contudo, a maioria dos sistemas de meios porosos na natureza possuem características fractais e podem, portanto, ser caracterizados pela teoria fractal, conforme proposto por Mandelbrot (1983).

Feng e colaboradores (2019) combinaram a teoria fractal ao método de Monte Carlo com finalidade de examinar o mecanismo de transporte de gás em meios porosos. Yu *et al.* (2005) propuseram modelos de probabilidade para diâmetro de poros baseados em características fractais de distribuição de tamanho de poros e calcularam a permeabilidade de meios porosos usando o método de Monte Carlo. Aliado às simulações, os autores realizaram testes laboratoriais utilizando o método de câmara fechada (Zhanget *al.*, 2012).

O método de câmara fechada é uma abordagem cumulativa que considera tanto o vazamento da câmara de acumulação quanto as taxas de retrodifusão; portanto, é amplamente utilizado para medir as taxas de exalação de radônio em meios porosos (Zhanget *al.*, 2012). Um detector de radônio RAD-7 é usado para medir as concentrações de radônio na câmara. Como principal resultado de Zhang e colaboradores (2012), o método de Monte Carlo foi consistente

com os experimentos com erro relativo máximo de 13,4%. As diferenças entre os valores calculados e medidos diminuem com maior diâmetro.

Zheng et al.(2012) estabeleceram um modelo fractal para difusividade de gás em meios porosos usando a teoria fractal e consideraram o efeito do gás rarefeito em micro/nanocanais/capilares. Zheng e Li (2015) estudaram a difusão de gases em meios porosos adotando o método de Monte Carlo e utilizando os modelos de probabilidade para diâmetro de poros propostos por Yu *et al.* (2005). Xu *et al.* (2013) desenvolveram um modelo de probabilidade para investigação de fluxo radial em meios porosos fraturados com teoria fractal e método de Monte Carlo.

Recentemente, a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) assumiu uma posição de destaque para simulação de problemas de radônio em ambientes internos. A CFD resolve as equações de fluidos governantes e fornece solução de campo espacial e temporal de variáveis como pressão, temperatura e densidade de energia. O método também fornece campo de fluxo de velocidade e padrão de dispersão de poluentes internos.

A capacidade do software CFD comercialmente disponível para simular uma ampla gama de condições geométricas e ambientais é uma das características apreciáveis em relação às outras ferramentas existentes. Muitos estudos baseados em CFD foram realizados para desenvolver modelos de entrada de radônio em solos internos (Wange Ward, 1997, 2000, 2002).

5. ÁREA ESTUDADA

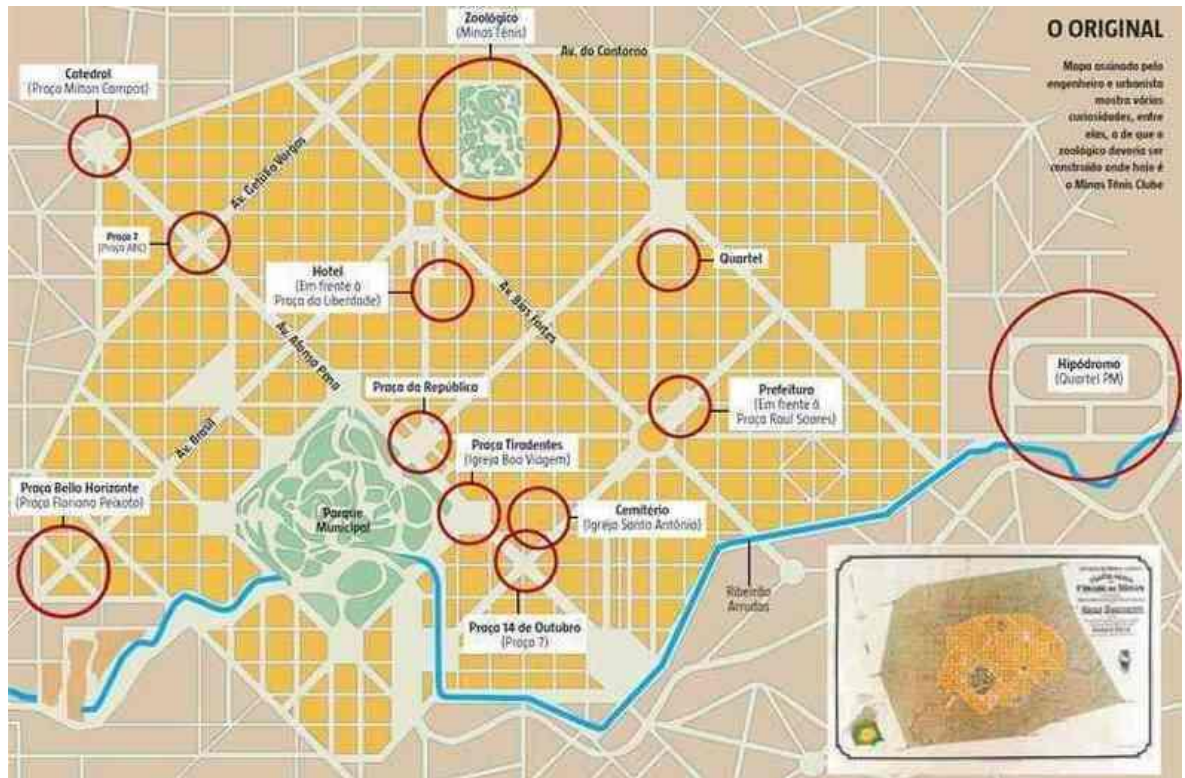
5.1. HISTÓRIA DE BELO HORIZONTE

Em 1701, o bandeirante João Leite da Silva Ortiz chegou à Serra de Congonhas em busca de ouro, mas encontrou uma paisagem propícia à agricultura e onde decidiu se estabelecer, fundando a Fazenda do Cercado. O progresso da fazenda atraiu outros colonos, formando a Vila de Curral Del Rei. Com o tempo, a vila cresceu com agricultura, criação de gado e pequenas indústrias. Em 1750, foi elevado a distrito com o nome de Nossa Senhora da Boa Viagem do Curral Del Rey.

No final do século XIX, a população diminuiu e a economia declinou. Com a Proclamação da República em 1889, surgiu a proposta de mudança do nome para Belo Horizonte. Em 1891, o presidente do Estado, Augusto de Lima, decretou a transferência da capital para um lugar que oferecesse condições precisas de higiene (Fig. 7). Após debates e

estudos, Belo Horizonte foi escolhida e, em 1893, a sede do governo foi transferida. A nova capital foi inaugurada em 1897, marcando o início de uma nova era para a região (IPHAN, 2018).

Figura 5 - Mapa planejamento de Belo Horizonte



Fonte: Estado de Minas, 2016.

5.2. BELO HORIZONTE E SEU CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O município de Belo Horizonte está inserido na grande unidade geológica conhecida como cráton do São Francisco (Almeida, 1981). O limite meridional do cráton é o Quadrilátero Ferrífero (QF). O QF apresenta seu contexto geológico caracterizado por três grandes conjuntos de rochas principais: complexos metamórficos de rochas cristalinas arqueanas; sequência do tipo *greenstone belt* arqueana representada pelo Supergrupo Rio das Velhas; sequência metassedimentar paleoproterozóica, incluindo formações ferríferas bandadas, representada pelo Supergrupo Minas (Azevedo, 2007).

A cidade de Belo Horizonte e sua região metropolitana possui predominância de rochas arqueanas que compõem o Complexo Belo Horizonte e sequências supracrustiais de idade paleoproterozóica do Supergrupo Minas. Agrupam-se as rochas pré-cambrianas em dois

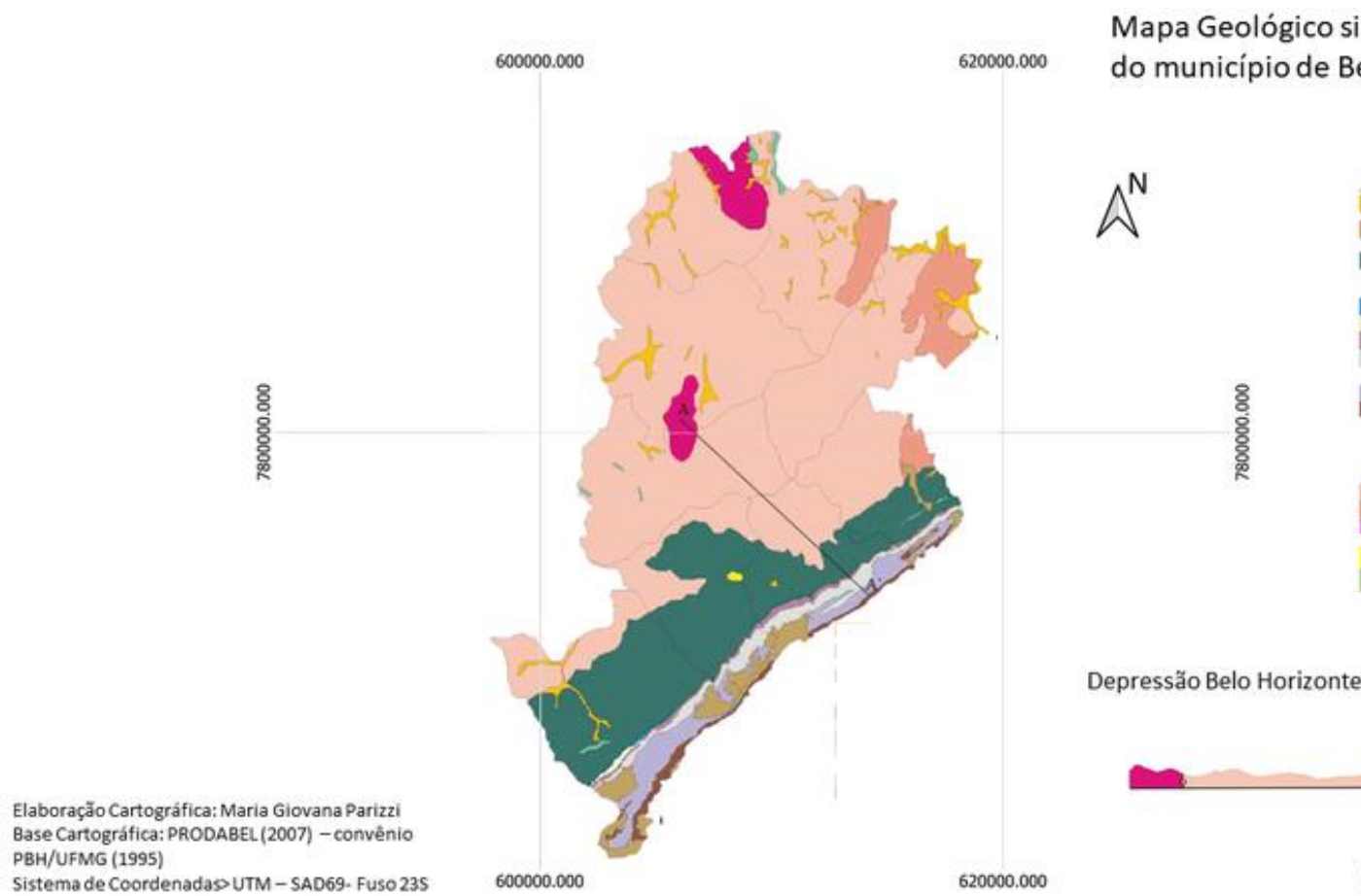
grandes domínios litoestruturais e morfológicos: o Domínio do Complexo Belo Horizonte e o Domínio das Sequências Metassedimentares. Aproximadamente 70% do seu território de Belo Horizonte (Fig. 8) está sobre o Domínio do Complexo Belo Horizonte, onde predominam as rochas gnáissico-migmatíticas. Existem nas formações superficiais um solo que apresenta espessura e evolução pedológica variadas, além de depósitos aluvionares associados aos principais cursos d'água.

O complexo granito-gnáissico é constituído de rochas arqueanas, predominantemente gnaisses. O que ocorre no município de Belo Horizonte foi designado Complexo Belo Horizonte por Noce et al. (1994) e suas rochas mais características denominadas Gnaisse Belo Horizonte. O Supergrupo Rio Das Velhas, o Grupo Caraça (pertencente ao Supergrupo Minas) e o Grupo Itacolomi não ocorrem na cidade.

Os Complexos Ortognáissicos (Belo Horizonte, Bação, Bonfim e Santa Bárbara) são compostos por terrenos granito-gnáissicos constituídos por tonalitos migmatizados a gnaisses granodioríticos com características geoquímicas das suítes tonalíticas-trondjemíticas-granodioríticas arqueanas (Noce, 1995). Intrusivos nestes gnaisses encontram-se variados corpos granitóides e rochas básicas e metabásicas provenientes de diferentes etapas de acreção mantélica ou retrabalhamento crustal (Carneiro, 1992; Noce, 1995).

Esses complexos representam porções de um antigo embasamento retrabalhado em eventos posteriores (Cordani *et al.*, 1980; Ladeira *et al.*, 1983; Carneiro, 1992; Endo, 1997). As áreas de afloramento das rochas dos complexos ortognáissicos são as seguintes: Complexo Belo Horizonte – proximidades da cidade de Ibirité; Complexo Bação – região central da APA; Complexo Bonfim – região sudoeste da APA e Complexo Santa Bárbara – região leste da APA.

Figura 6 - Mapa geológico de BH



Fonte: Parizzi, 2022.

O litotipo amplamente dominante no Complexo Belo Horizonte é um gnaiss cinza-claro, frequentemente exibindo bandamento composicional e feições de migmatização. Esta rocha é referida, por Noce (1995), como Gnaiss Belo Horizonte. O gnaiss apresenta feições bastante variáveis. O tipo mais frequente exibe fino bandamento, da ordem de milímetros a poucos centímetros, resultante da alternância de bandas leucocráticas e outras mais ricas em minerais máficos, essencialmente biotita. Localmente, as bandas atingem espessuras maiores, até 20-30 cm. O bandamento pode apresentar caráter retilíneo e mais ou menos uniforme, ou encontrar-se fortemente dobrado e rompido. Observa-se uma gradação entre porções bandadas e outras de aspecto mais homogêneo, onde a estrutura dominante é uma foliação muito bem desenvolvida (Noce, 1997).

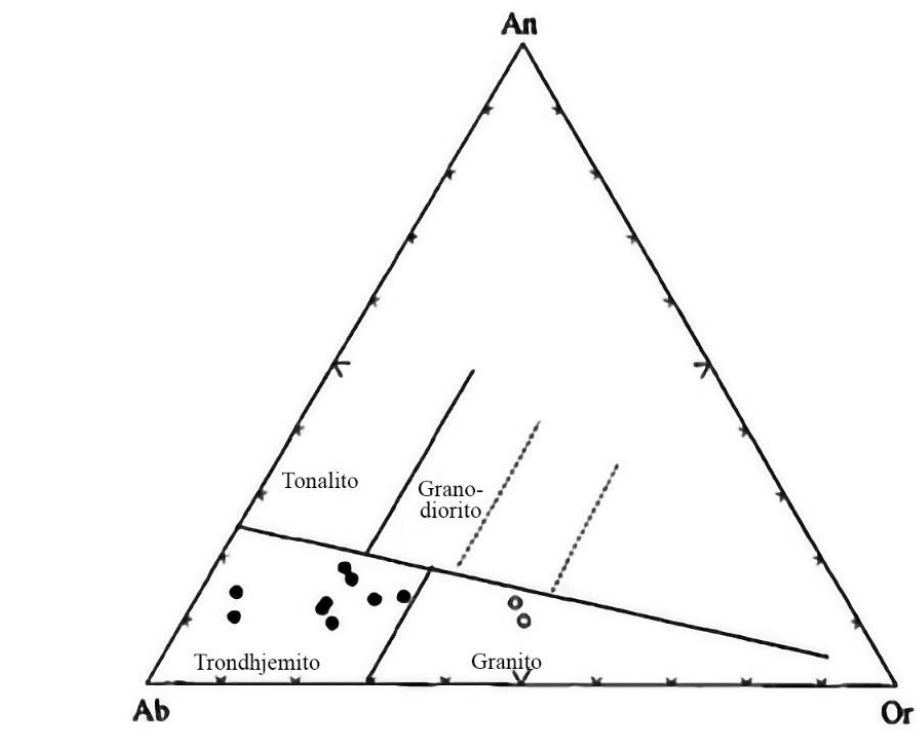
Noce (1997), interpretou como corpos intrusivos, no Complexo Belo Horizontes, de natureza félsica, assim como, na escala de afloramento, ocorrem veios granitóides, de grão fino a médio, pouco espessos, além de estreitos veios de pegmatito (Noce, 1997). Os corpos granitóides posicionaram-se após a migmatização do Gnaiss Belo Horizonte (ca. 2860 Ma), tendo sido afetados por pelo menos um evento deformacional anterior à tectônica principal do Supergrupo Minas (Evento Transamazônico). Os corpos foram identificados, por Noce (1997), como Granito Santa Luzia e Granito General Carneiro. As Idades de cristalização, por determinações U-Pb, são de $2712 \pm 5/-4$ Ma para o Granito Santa Luzia (Noce 1995) e 2698 ± 18 Ma para o Granodiorito Ibirité (Chemale Jr. *et al.* 1993).

A Serra do Curral, que limita a região sul, é constituída por um gnaiss de composição granodiorítica apresentando bandamento composicional (Herz, 1970). Estas rochas são consideradas similares ao Granito de Alberto Flores (Complexo Bonfim) e, também, correlacionáveis ao Granito-Gnaiss de Itabirito (Complexo Bação). Herz (1970) assinala, ainda, a presença de dois pequenos corpos granitóides, designados Granito Marzagão e Granito Morro da Pedra.

O estudo petrográfico realizado por Noce em 1997, no Gnaiss Belo Horizontemostra uma relação plagioclásio/ K-feldspato bastante variável, resultando na presença de termos tonalíticos até graníticos, com expressiva predominância dos primeiros. A biotita é sempre o mineral máfico principal, perfazendo em média 5 a 10% da rocha. Os acessórios mais comuns são titanita, epidoto, apatita e zircão. Allanita está presente nas rochas de composição granítica (Noce, 1997). A composição química é

trondhjêmica, enquanto os gnaisses migmatíticos apresentam composição granítica (Fig. 9). Círculos preenchidos representam o gnaisse Belo Horizonte e os círculos vazios o gnaisse migmatítico no diagrama normativo Ab-An-Or de O'Connor (1965).

Figura 7 - Composição do Gnaisse Belo Horizonte



Fonte: Adaptado de Noce, 1995.

5.3. PEDREIRAS DE BELO HORIZONTE

O desenvolvimento urbano de Belo Horizonte fez proliferar a produção de britas para construção civil. A rentabilidade deste comércio, ou qualquer outra substância mineral utilizada *in natura* fundamenta-se essencialmente na distância do centro produtor ao consumidor. Conseqüentemente, as grandes pedreiras, que nos primórdios se situavam próximo ao que hoje constitui o centro da cidade, foram se distanciando radialmente a medida que a ocupação urbana se aproximava (Silva, 1995). Desta forma, Belo Horizonte apresenta 36 cavidades de pedreiras abandonadas de diversas formas e tamanhos, distribuídas por todo o domínio do complexo Belo Horizonte. Como principais fornecedores de matéria prima para a construção da cidade, as pedreiras se tornaram foco principal deste estudo para entender como essas rochas poderiam oferecer risco a população quanto à exposição ao radônio.

6. METODOLOGIA

A Tabela 4 representa um sumário das metodologias utilizadas neste estudo juntamente aos seus objetivos. Os instrumentos RS230, AlphaGuard e CR-39, que serão citados nos próximos tópicos, foram calibrados e testados antes das medições e ensaios.

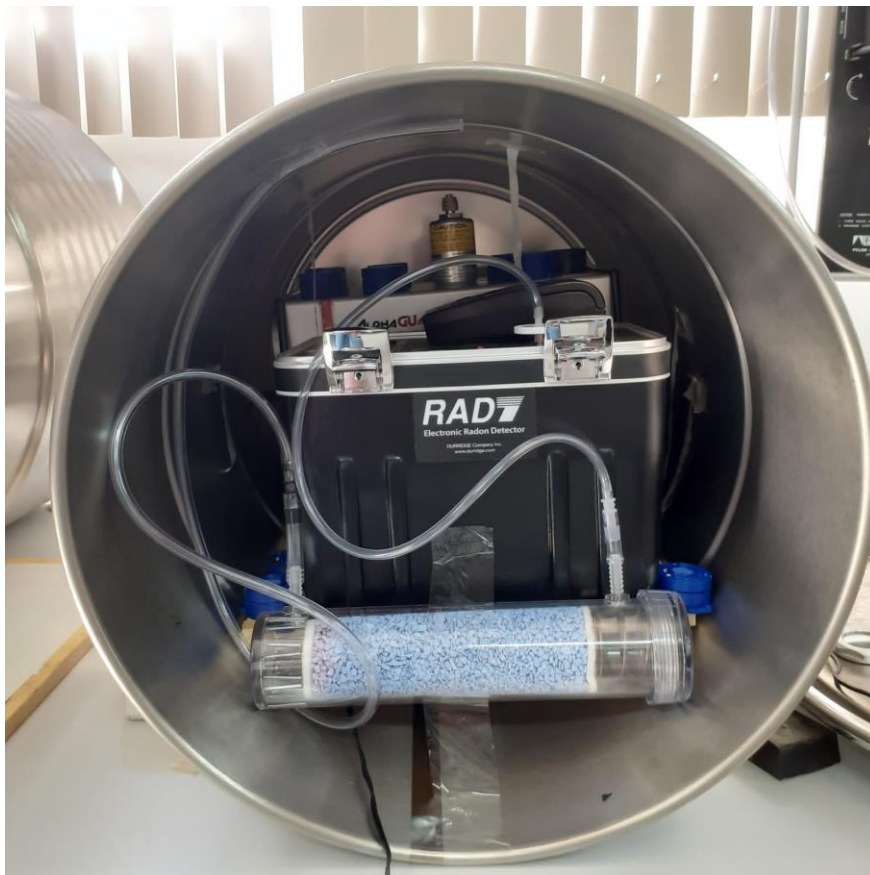
Tabela 4—Etapas, métodos de análise e respectivos objetivos

Etapa/Método de análise	Objetivo
Amostragem	Coletar material a ser utilizado em procedimentos experimentais e realizar mapeamento gama
Ativação neutrônica - INAA	Quantificar os elementos urânio-238 e tório-232
Difração de raios x	Analisar qualitativamente os minerais presentes na amostra
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Analisar quantitativamente os minerais presentes na amostra
Estudo de exalação de Rn- AlphaGuard-	Estudar a concentração de radônio-222 exalado de amostras de gnaisses de Belo Horizonte
Espectrometria gama - HGe	Quantificar o elemento rádio-226 e seus filhos
CR-39	Estudar a concentração de radônio de amostras de gnaisses de Belo Horizonte
CFD(Computational Fluid Dynamic)	Elaborar um modelo computacional e simular o experimento de exalação de Rn- AlphaGuard- em caráter comparativo

Os tópicos da metodologia são divididos em: “Amostragem”, onde são descritos os locais de retirada de amostras, como também a quantidade das amostras e sua natureza geológica e processamento; “Análise de urânio e tório via ativação neutrônica” com a explicação e especificação da metodologia; “Estudo de exalação de radônio via circuito fechado”, identificando cada componente do sistema e sua função; “Espectrometria gama” com detector de germânio hiperpuro (HGe) e suas especificações técnicas e instrumentais; “CR-39”, que diz respeito ao método de detecção passiva de Rn e sua montagem; e por fim, o tópico que aborda o modelo computacional “CFD (*computational fluid dynamics*)” para estudo do transporte do radônio nos experimentos de laboratório.

Os instrumentos CR-39 e AlphaGuard foram calibrados no LRN/CDTN. Foi utilizada uma fonte de Rádio-226, com atividade de 3,4 kBq em um container de 100 litros (Fig.10). Os instrumentos utilizados foram o AlphaGuard, que para tal ensaio foi considerado padrão, além do RAD7 com seu sistema dissecador, câmaras com CR-39 e eletretos.

Figura 8 - Setup do sistema de calibração dos instrumentos utilizados



6.1. AMOSTRAGEM

Neste trabalho, foram extraídos cinco grupos de amostras de cinco rochas aflorantes. Foram utilizados martelo estratigráfico *Estwing* e as rochas alocadas em sacos portaamostras. Das cinco amostras, quatro foram de locais utilizados como pedreiras e que, hoje, já se encontram desativadas: Engenho Nogueira (Fig. 11 e 12), Lagoinha, Pompeia, Pedreira Prado Lopes e um grupo da rua da Bahia, no centro da cidade de Belo Horizonte-MG.

Figura 9 - Rochas aflorantes (corpos gnáissicos) da Pedreira Engenho Nogueira



Fonte: Corrêa, 2019.

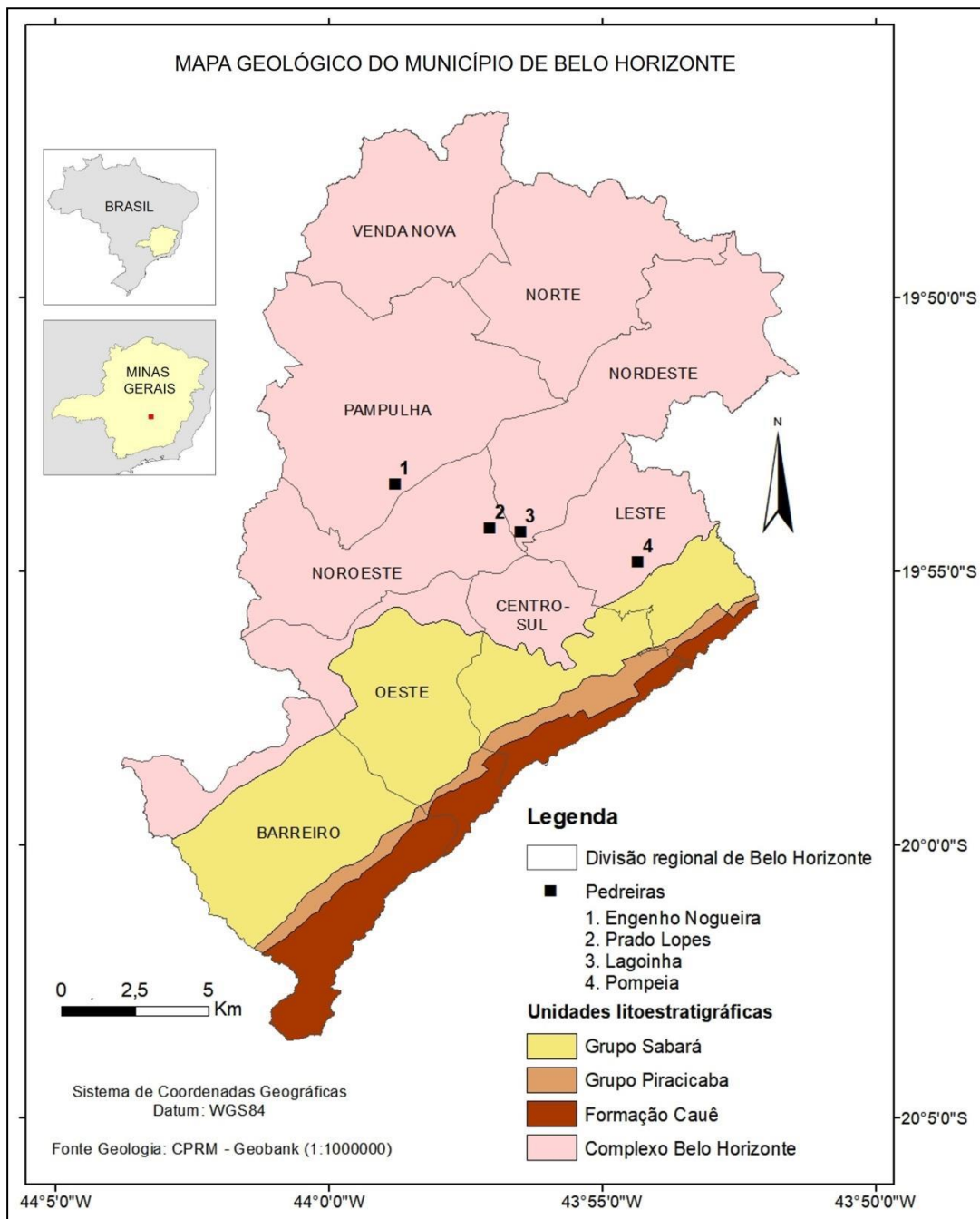
Figura 10 - Rochas aflorantes (corpos gnáissicos) da Pedreira Engenho Nogueira



Fonte: Corrêa, 2019.

As amostras foram, então, retiradas de rochas aflorantes das pedreiras nas regiões destacadas no mapa da Figura 13.

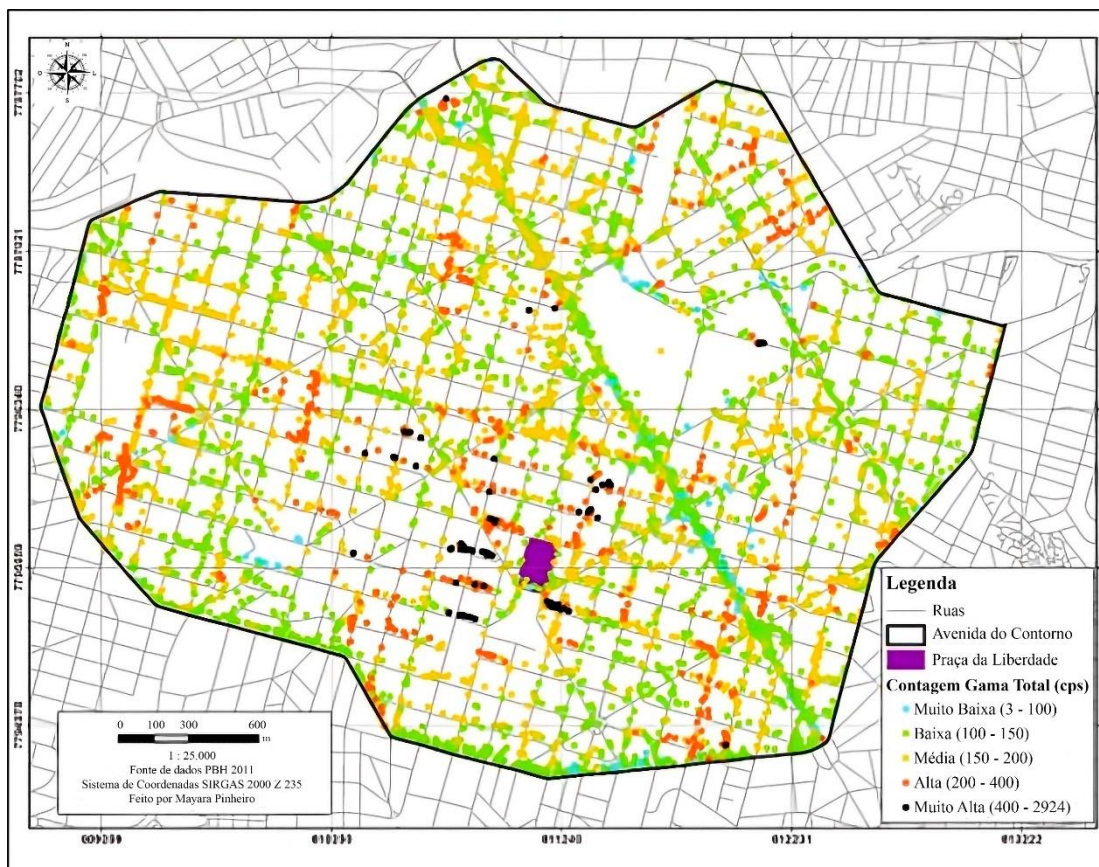
Figura 11 - Localização das Pedreiras de Belo Horizonte em mapa geológico



Fonte: Corrêa, 2019.

Como dissertado em “Justificativa”, a motivação deste trabalho começou no mapeamento gama com espectrômetro (RS230) da cidade de Belo Horizonte, nos limites da Avenida do Contorno (importante avenida que delimita a cidade de Belo Horizonte original, quando ainda denominada cidade de Aarão Reis), onde *hotspots* de contagens gama foram identificados, principalmente na região central (Fig. 14).

Figura 12 - Mapeamento gama cidade de Belo Horizonte



Fonte: Duarte, 2017.

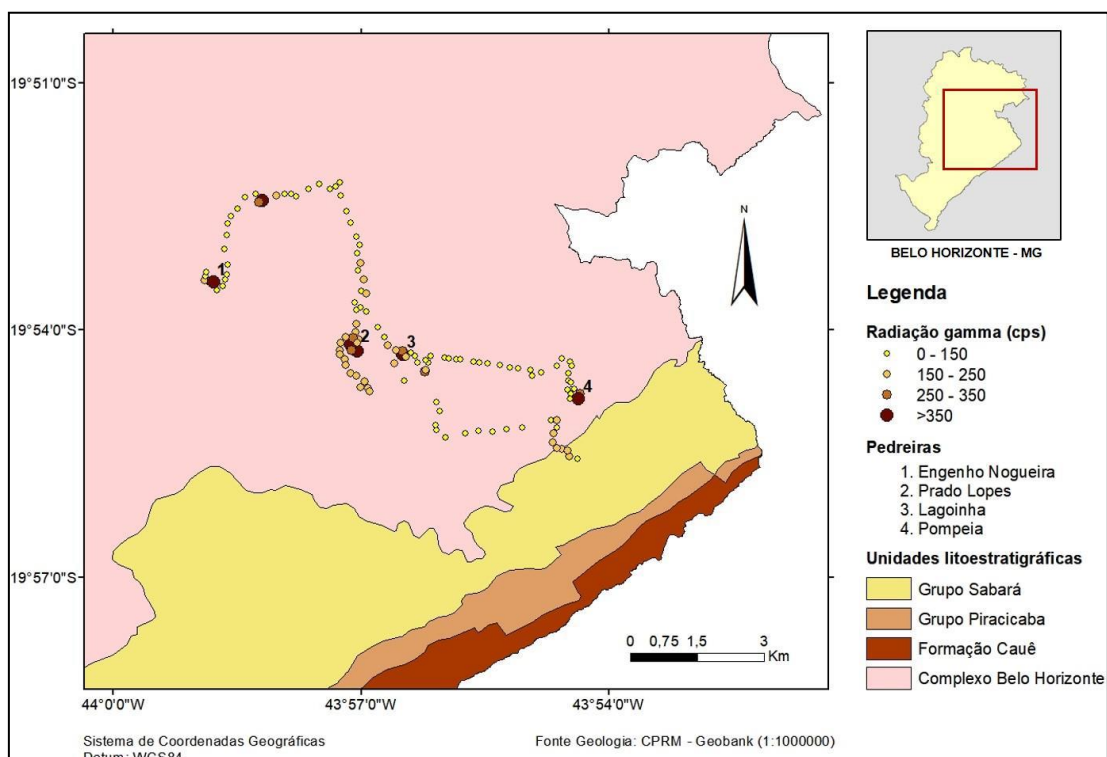
Essas anomalias radiométricas indicaram os locais de retirada das amostras. A rua da Bahia, se tornou, então, um exemplar do questionamento: *As altas contagens gama são provenientes da própria geologia local ou da ação antropogênica, durante construção da cidade no século XVI?*

Todas as amostras são constituídas por granito-gnaisses do Complexo Belo Horizonte. Portanto, apesar de serem quatro localidades diferentes, possuem a mesma litologia, sendo no total 16 alíquotas das pedreiras. O granito-gnaisse retirado da Rua da Bahia, foi utilizado como um exemplar das rochas utilizadas na pavimentação da cidade de Belo Horizonte, entre os anos de 1897 a 1950.

No mapa de Corrêa (2019) é possível localizar espacialmente, de acordo com os litotipos, as contagens gama por segundo (CPS) dos locais amostrados (Fig. 15). As pedreiras apresentaram as maiores contagens gama (>350 CPS). A partir da distribuição dos valores da varredura gama a maior parte do território se manteve de 0 a 250 CPS,

Os valores das CPS utilizados como parâmetro para a amostragem é comparativo com o restante do território ao redor dos *hotspots*, de forma que a maior parte do território manteve de 0 a 250 CPS.

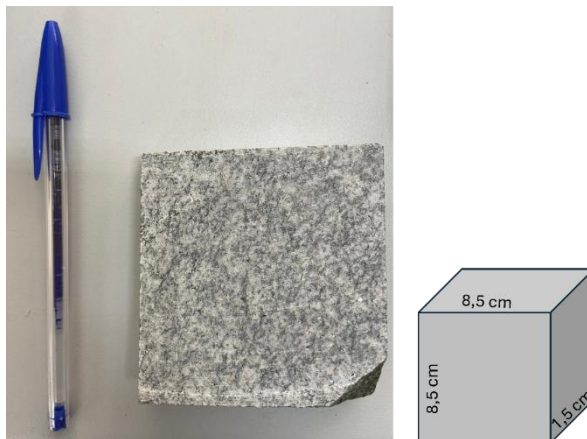
Figura 13 - Perfil gamaespectrométrico da cidade de Belo Horizonte



Fonte: Correa, 2019.

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em porta amostras de pano e encaminhadas para o LRN/CDTN, onde foram preparadas. A primeira etapa foi a realização dos cortes das pedras *in natura* para corpos de teste com tamanho padrão. Na Figura 16 vemos um exemplo e um esquema das medidas.

Figura 14 - Corpo de prova para experimento de exalação de Rn em circuito fechado



Uma alíquota de cada amostra foi retirada para seguir os processos de moagem (Fig.17) e pulverização em diferentes granulometrias, que variaram em brita, areia e argila, e posterior pesagem, como mostrado no tópico “Resultados”. Para a moagem utilizou-se um britador de mandíbula do Laboratório de Preparação de Amostras Sólidas do CDTN e posteriormente, para os diâmetros mais finos, utilizou-se um misturador/agitador mecânico. Em seguida as amostras foram acondicionadas em *marinellis* e em tubo porta amostras que será discutido mais adiante.

Figura 15 - Separação das amostras em granulometrias



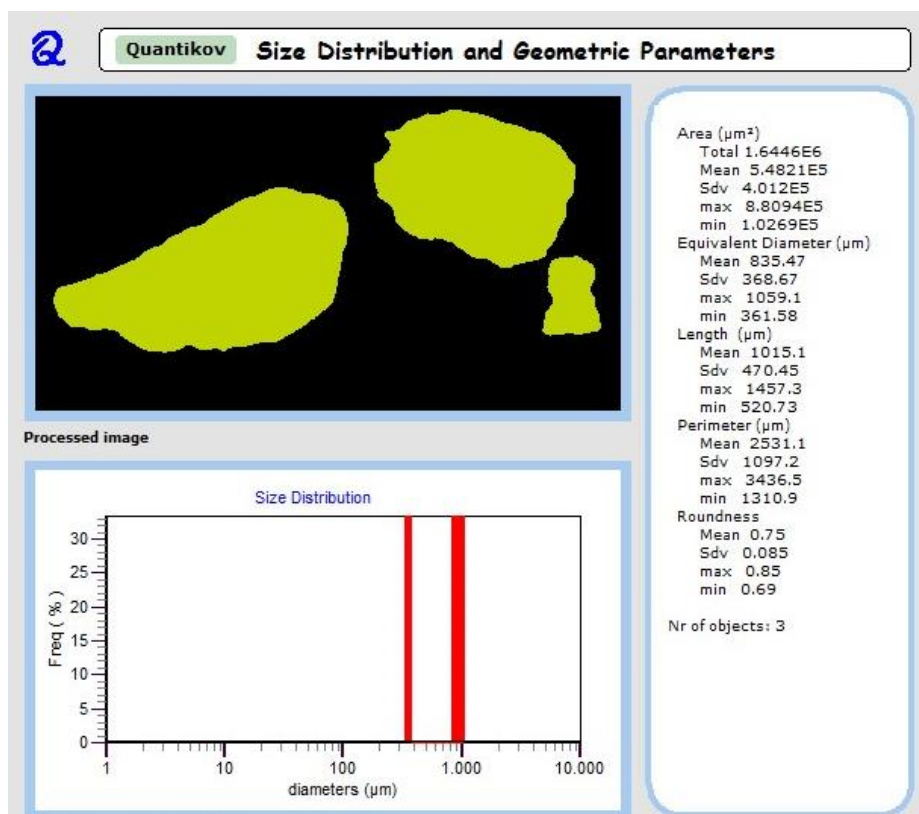
Para efeitos didáticos e de melhor compreensão da discussão do trabalho, a Tabela 5 esclarece os códigos das amostras e sua procedência.

Tabela 5 - Informações das amostras

Código	Amostra	Procedência
PPDS	Paralelepípedo - Sólido	Rua da Bahia
PPDB	Paralelepípedo - Brita	Rua da Bahia
PPDA	Paralelepípedo - Areia	Rua da Bahia
PPDF	Paralelepípedo -Fino	Rua da Bahia
PPL550S	Pedreira Prado Lopes - Sólido	Pedreira Prado Rua Pedro Lessa Lopes, 550
PPL550B	Pedreira Prado Lopes - Brita	Pedreira Prado Rua Pedro Lessa Lopes, 550
PPL550A	Pedreira Prado Lopes – Areia	Pedreira Prado Lopes, 550
PPL550F	Pedreira Prado Lopes – Fino	Pedreira Prado Lopes, Rua Pedro Lessa, 550.
PLCS	Pedreira Lagoinha - Sólido	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui
PLCB	Pedreira Lagoinha – Brita	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui
PLCA	Pedreira Lagoinha – Areia	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui
PLCF	Pedreira Lagoinha – Fino	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui
PPS	Pedreira Pompéia - Sólido	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal
PPB	Pedreira Pompéia – Brita	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal
PPA	Pedreira Pompéia – Areia	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal
PPF	Pedreira Pompéia – Fino	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal
PENB	Pedreira Engenho Nogueira - Brita	Pedreira Engenho Nogueira
PENA	Pedreira Engenho Nogueira – Areia	Pedreira Engenho Nogueira
PENF	Pedreira Engenho Nogueira - Fino	Pedreira Engenho Nogueira

Após a pesagem, as amostras foram acondicionadas em porta amostras fabricados em material plástico, cujo volume aproximado de 23 cm³ para serem inseridos no circuito de exalação discutido em subtópico específico intitulado “*Estudo de exalação via circuito fechado*”. Finalmente, as amostras foram pesadas e os diâmetros equivalentes médios mensurados via microscópio ótico e programa *Quantikov*, que realiza o cálculo de diâmetros e as áreas dos grãos a partir da imagem microscópica (Fig 18).

Figura 16 - Programa Quantikov



A partir do diâmetro estimado e da massa das amostras foram calculadas as áreas superficiais dos grãos considerados como uma esfera perfeita. Ciente de que os valores podem ser subestimados, uma vez que os grãos possuem diferentes formatos.

6.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Na geologia e mineralogia, a difração de raios x (DRX) desempenha papel fundamental nos estudos de caracterização físico-química com base na identificação e correlações de fases mineralógicas constituintes. Nas atividades de caracterização de amostras ambientais, a técnica possibilita, por exemplo, o acompanhamento do perfil de emissão de particulados oriundos de indústrias, fabricas e atividades de mineração através da análise de amostras coletadas em filtros de ar (CDTN, 2022).

As análises deste trabalho foram realizadas no Laboratório de Fluorescência de Raios X (FRX) do CDTN, que destina suas atividades de pesquisa na implementação de métodos de análise que permitam determinar a constituição química elementar nos mais diversos tipos de matriz, com destaque especial para o atendimento às demandas nas áreas de geologia e desenvolvimento de materiais (CDTN, 2022).

Para a difração de raios x o Difratorômetro de Raios X, RIGAKU, modelo DMAX/ULTIMA Plus em conexão como aplicativo JADE/09 foi utilizado para a identificação de fases cristalinas e determinação de parâmetros.

6.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do CDTN, o qual é equipado com um microscópio eletrônico de varredura com emissão por efeito de campo (FEG-MEV), modelo SIGMA VP, fabricado pela *Carl Zeiss Microscopy*. O microscópio possui também um sistema de microanálise constituído por espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS), modelo XFlash 410-M, fornecido pela Bruker Nano GmbH. O sistema é controlado pelo software ESPRIT e é capaz de realizar análises pontuais, varreduras em linha e obtenção de mapas de distribuição de elementos (CDTN, 2021).

6.4. ANÁLISE DE URÂNIO E TÓRIO VIA ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA E ESPECTROMETRIA GAMA

As análises de U e Th ocorreram no Laboratório de Ativação Neutrônica do CDTN (LAN/CDTN), por meio do reator TRIGA IPR-R1. Para o urânio, utilizou-se o padrão da IAEA com 0,471% de U_3O_8 , e para o tório, o padrão de $Th(NO_3)_4 \cdot 5H_2O$.

As concentrações de urânio e tório foram determinadas através de métodos de:

- i) Nêutrons Retardados de Fissão, específico para determinação do urânio, e
- ii) Análise por Ativação Neutrônica Instrumental, para o tório.

Ambos os métodos são comparativos, ou seja, as concentrações dos elementos são determinadas comparando-se as radioatividades com padrões conhecidos.

De forma simplificada, o método de Nêutrons Retardados de Fissão (NR) para urânio envolve a irradiação da amostra com nêutrons térmicos, causando a fissão do ^{235}U , que emite nêutrons e gera outros radionuclídeos. Após um período de decaimento, esses radionuclídeos emitem nêutrons retardados, que são detectados por um detector proporcional BF_3 (Saadia, 1962; Tupynambá, 1969). A concentração é calculada comparando-se com padrões de urânio submetidos ao mesmo processo. O sistema de análise por NR do CDTN inclui um sistema pneumático de transferência de amostras do reator TRIGA MARK I IPR-R1 para o sistema de contagem.

As amostras são acondicionadas em frascos de polietileno chamados “*coelhos*”, assim como os padrões de urânio, que são materiais certificados contendo urânio. Com

os dados dos padrões – contagem e concentração – é construída uma curva que descreve a relação entre contagem e concentração. As contagens das amostras são então interpoladas nessa curva para calcular as concentrações presentes.

Para a análise de tório por ativação neutrônica instrumental, as amostras são acondicionadas em tubos de polietileno, que são lacrados e inseridos em “coelhos”, adequados para a inserção na mesa giratória do reator. A uma potência de 100 kW, o fluxo de nêutrons térmicos é de $6,6 \times 10^{11}$ nêutrons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Cada irradiação é acompanhada por padrões de tório (Menezes *et al.*, 1999).

Após a irradiação, é necessário aguardar um tempo adequado para que os radionuclídeos de meia-vida curta decaiam, evitando interferências na espectrometria gama. A espectrometria gama é realizada após um período de decaimento de 20 dias, com o objetivo de medir o ^{233}Pa . Cada amostra é contada pelo tempo necessário para garantir uma boa estatística de contagem.

O sistema de detecção gama consiste em um detector HGe, modelo GC2520, da CANBERRA, com FWHM de 1,85 keV para a energia de 1332 keV do ^{60}Co , e eletrônica associada, interligado a um microcomputador com o software Genie 2000, da CANBERRA. A geometria de contagem é mantida constante para cada esquema de irradiação. De cada espectro, é obtida a área sob o pico de energia gama de 311,8 keV, característico do ^{233}Pa .

Para calcular sua concentração, é corrigido seu tempo de decaimento para cada amostra e padrão. Com os dados dos padrões – área e concentração – é construída uma curva que descreve a relação entre área e concentração. As áreas dos picos gama das amostras são então interpoladas nessa curva para calcular as concentrações presentes. As mesmas concentrações também podem ser obtidas utilizando a equação da curva.

6.5. ESTUDO DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO VIA CIRCUITO FECHADO

A análise em circuito fechado consistiu em inserir as amostras sólidas em um vaso de dimensões: 14cm de altura, 11cm de diâmetro totalizando um volume de 1,3L (Fig.19).

Figura 17 - Vaso porta amostras sólidas



Já as amostras processadas foram inseridas em um porta amostras (Fig. 19) de dimensões: 11 cm de altura e diâmetro interno 1,4 cm (3 Fig. 20). As amostras foram então inseridas no circuito conectadas a um detector do tipo câmara de ionização e uma bomba de pressão aliada a um medidor de fluxo (Figura 20).

Figura 18 – Circuito de exalação



1: Bomba do AG; 2: detector *AlphaGUARD*®; 3: medidor de fluxo; 4: porta amostra.

A Figura 21 apresenta um porta amostras de modo a permitir a visualização de seus detalhes.

Figura 19 - Porta amostras em detalhe



O detector utilizado foi o *AlphaGUARD*®, modelo PQ2000 PRO, fabricado pela SAPHYMO GmbH, Alemanha (Fig. 22) de volume interno de 0,56 L e ao ser ligado apresenta um potencial de +750 V em seu interior. Neste trabalho foi utilizada a técnica/protocolo de 10 minutos/*flow*.

Figura 20 – Detector *AlphaGUARD*® em detalhe

A primeira etapa para o ensaio no circuito de exalação foi realizada com a amostra inteira, antes de ser processada. Os resultados da concentração de Rn nas amostras inteiras são apresentados no texto como “sólido” ou “Não aplicável (NA)” para granulometria.

Posteriormente, as amostras foram divididas por granulometrias e estudadas no circuito de exalação, montado no LRN/CDTN, separadamente. As rochas foram colocadas na porta amostra indicado pelo número 4 (Fig.20), o qual foi vedado com teflon

para evitar o escape do gás radônio. A bomba indicada pelo número 1 (Fig.20), foi acionada em 1L/min para dinamizar o circuito fazendo circular os gases. O rotâmetro ou medidor de fluxo indicado pelo 3 (Fig.20) foi usado para avaliar e garantir a vazão do fluxo de ar. Foram realizadas diversas medições e estas foram analisadas utilizando o software DATAexpert fornecido pelo fabricante do detector *AlphaGUARD*[®]. O software também realiza concomitantemente medidas de variáveis ambientais, como umidade relativa, pressão e temperatura.

6.6. ESPECTROMETRIA GAMA COM DETECTOR DE GERMÂNIO HIPERPURO (HPGE)

Radionuclídeos emissores de radiação gama apresentam espectros de energia específicos e característicos. A espectrometria gama é baseada na capacidade do detector de distinguir fótons de energias distintas. Os detectores do tipo germânio hiperpuro (HGe) possuem boa resolução e possibilitam a detecção de elementos com fotopico de energia baixa, desde raios x até alguns MeVs.

Primeiramente as amostras de rocha foram trituradas, moídas, pulverizadas e pesadas. Em seguida, foram acondicionadas em Marinellis, de 1 litro, por 30 dias para alcançar o equilíbrio radioativo secular. O tipo de recipiente escolhido é ideal, para o qual o instrumento foi calibrado.

As amostras foram analisadas no Laboratório de Trítio do CDTN, no detector de germânio hiperpuro *Canberra*, de eficiência 15%, geometria coaxial. Tal detector está localizado dentro de um laboratório com *background* reduzido, um dos menores do mundo. O aplicativo de aquisição de dados utilizado foi *Genie 2000 – Gamma Acquisition & Analysis*, da *Canberra* (Fig. 23).

Figura 21 - Detector de Germânio do Laboratório de Trítio do CDTN



Os radionuclídeos de ocorrência natural relevantes para este trabalho e determinados por espectrometria gama foram: ^{226}Ra e ^{224}Ra . A atividade específica do ^{40}K , por exemplo, pode ser medida diretamente por meio da energia de sua radiação gama 1460,8 KeV. Entretanto, a atividade específica do ^{226}Ra e ^{224}Ra deve ser calculada baseada na atividade média dos seus respectivos produtos de decaimento, ^{214}Bi e ^{212}Pb , respectivamente (El Afifiet al, 2006). Os radionuclídeos analisados foram ^{214}Pb , ^{214}Bi , da série radioativa do ^{238}U ; ^{228}Ac e ^{228}Ra , da série radioativa do ^{232}Th . Para essa consideração, a condição de equilíbrio deve ser demonstrada como será explanado adiante. A atividade $A(t)$ desse radionuclídeo nas amostras foi calculada por meio da equação 11:

$$A(t) = S_L \times 10^4 / (T \times e \times f) \quad (11)$$

Onde S_L representa a área líquida de contagens detectada para a energia do pico, e representa a eficiência, f representa a probabilidade de emissão de radiação gama para a determinada energia e T indica o tempo de contagem (172800 segundos).

Após encontrar a atividade de cada isótopo estudado, fez-se o cálculo da atividade específica. Para isso, valor da atividade radioativa foi dividido pelo peso líquido da amostra de cada uma das pedreiras.

Trzeciakiewicz *et al.* (2023), realizaram uma pesquisa no sudoeste da Polônia em dois maciços granitóides. As medições *in situ* foram realizadas sazonalmente usando o espectrômetro de raios gama *Exploranium* com detector BGO e o radiômetro RK-100; e

as medições laboratoriais foram realizadas utilizando um espectrômetro com detector HPGe Canberra-Packard. Os autores concluíram que não houve mudanças significativas nas medições em diferentes estações de chuva e seca. Além disso, os pesquisadores observaram, valores ligeiramente mais altos em estações mais quentes e mais baixos em estações mais frias, embora com algumas exceções. Neste sentido, o presente estudo não encontrou justificativas suficientes para a coleta de amostras em diferentes estações do ano.

6.7. CR-39

Traçadores nucleares de estado sólido, ou *Solid-State Nuclear Track Detectors* (SSNTDs), a exemplo do CR-39, têm sido usados para detecção de partículas ionizantes, como partículas alfa, prótons e outras partículas pesadas carregadas (Abumurad *et al.*, 2005; Somogyi *et al.*, 1976; Ball, 1971).

Quando as partículas carregadas passam pelo material do detector, elas criam zonas com “danos” espacialmente correlacionados, chamados de trilhas latentes, ou traços, que podem permanecer estáveis por muitos anos.

Os traços produzidos pela interação da radiação com a matéria do polímero utilizado como detector, no caso deste estudo o CR-39, precisam ser tratados, quimicamente, via corrosão química após a exposição à fonte radioativa. É durante este procedimento de reação química, por uma solução de NaOH, que os traços passam a ser visíveis. Isto porque a reação química é mais intensa ao longo dos traços do que no restante do material que não foi sensibilizado pelas partículas (Fleischer *et al.*, 1975, Durrani Bull, 1987).

Os tamanhos das trilhas visíveis dependem do tipo de íon incidente, ou seja, de sua massa, carga elétrica e energia (Jeon *et al.*, 2017; Malinowska *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2019), bem como das propriedades do detector.

As amostras foram divididas novamente nas diferentes granulometrias e colocadas em vasos de vidro. Para cada granulometria foram feitas triplicatas para obtenção de uma média estatisticamente confiável para o cálculo de concentração de Rn. Na tampa foi colocada uma grade de suporte e um polímero CR-39. O sistema foi, então, fechado e colocado dentro de um container durante 8 dias (Fig. 24). Após o tempo de exposição o CR-39 foi submetido ao procedimento de revelação, descrito por Takahashi e colaboradores (2021).

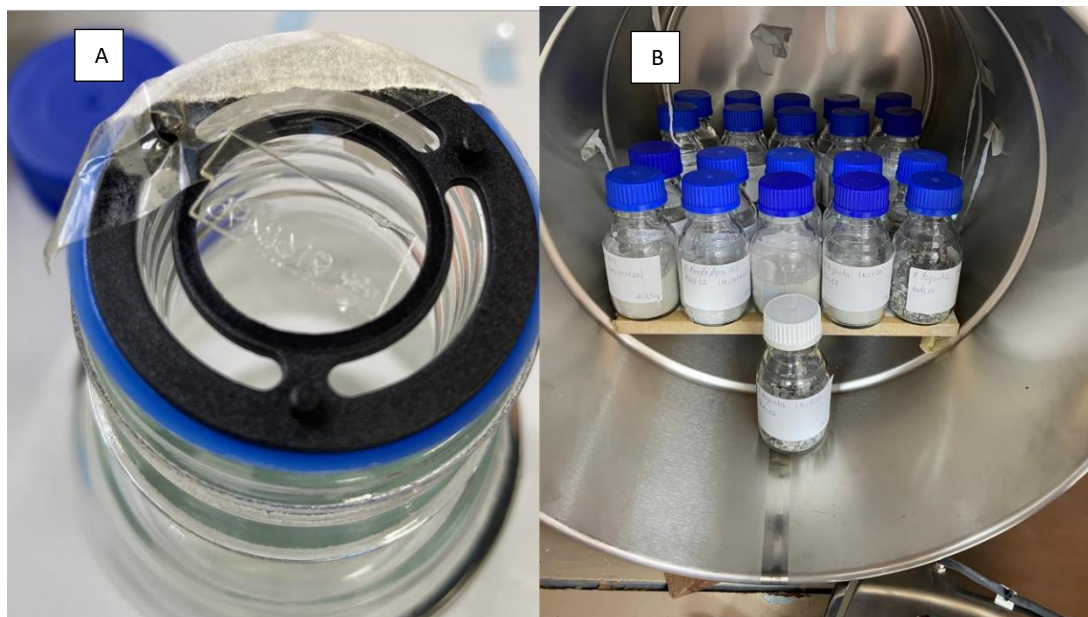
A leitura do CR-39 consistiu em adquirir imagens dos polímeros, após a exposição e revelação, via Microscópio Óptico, utilizando o software LAS-Leica. Essas imagens

foram, posteriormente, trabalhadas no software *Quantikov*(Fig. 18), onde foi possível obter informações sobre os traços impressos no CR-39. Informações como número de traços e densidade de traços foram utilizadas para a conversão final em concentração de Rn, através da equação 12:

$$C_{Rn} = \frac{Tr}{F/T} \quad (12)$$

Onde C_{Rn} é a concentração de Rn, Tr quantidade de traços por cm^2 , F o fator de calibração de 56,077 obtido por Takahashi (2021) para a calibração em um container de 100L, e T o tempo de exposição.

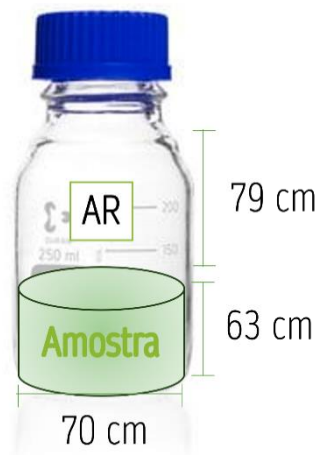
Figura 22 - *Setup* do sistema de análise de Rn por CR-39



Em (A) o detalhe do CR-39 e em (B) distribuição dentro do container.

Para melhor compreensão, a concentração de Rn foi calculada para a área superficial da amostra dentro do frasco de vidro. A imagem (Fig. 25) esquematiza as medidas, do frasco, que foram utilizadas nos cálculos.

Figura 25 - Esquema porta amostra para ensaiocom CR-39 e cálculos



6.8. CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) NO TRANSPORTE DO RADÔNIO

O modelo computacional possui como objetivo compreender o transporte de radônio e compará-lo com os resultados obtidos experimentalmente. A construção desse modelo consistiu em etapas principais que serão apresentadas a seguir:

- i. Desenhar a geometria de acordo com as informações das medidas dos instrumentos e componentes do circuito fechado de exalação de radônio;
- ii. Estabelecer as condições de contorno:
 - Faixas de velocidade.
 - Pressão 0 na saída para facilitar a análise da perda de carga.
 - Determinação do fluido (gás radônio).
 - Determinação da porosidade e do volume livre de fluido/ volume total.
 - Definição do coeficiente de perda de carga do sistema em função do comprimento.
- iii. Construir uma malha de cálculo de volumes finitos que represente os fenômenos fluidodinâmicos que ocorrem na geometria sólida de acordo com o objeto (porta-amostras). São os dados da malha:
 - 117483 nós.
 - 612725 elementos.
 - Aresta máxima (Max Size): 5×10^{-4} m
- iv. Refinamento da malha:
 - *Inflation* na parede externa pelo método *first layer thickness* com primeira linha com 5×10^{-5} m, e no máximo 5 linhas.
- v. - Taxa de crescimento de 1,2;

- vi. Simulações: foram feitas diferentes simulações com geometrias simplificadas e pequenas diferenças nas condições de contorno (velocidades e K do sistema diferentes).
- vii. Definições da simulação e condições de contorno:
 - Simulação em meio poroso, sem empuxo, domínio estacionário, com fluido contínuo gasoso em regime permanente e isotérmico.
 - Regime laminar.
 - Fluido simulado: gás radônio, criado a partir das propriedades do ar, com adaptação da massa molar, densidade e viscosidade.
 - Porosidade: de acordo com o material
 - Permeabilidade do gás no meio: equação de Kozeny
 - Perda de carga por metro linear: de acordo com o experimento
 - Condição de contorno de parede para o material do porta-amostra, sem deslizamento.
 - Fluxo mássico na entrada e saída de acordo com a vazão da bomba (AlphaGuard) e densidade do radônio, em direção normal ao plano de entrada.

Para realizar a calibração e verificar a simulação, foi necessário realizar o cálculo da permeabilidade do fluido no meio poroso (k), de acordo com a equação de Blake-Kozeny (eq. 13)

$$k = \frac{(D_p \times \phi)^2 \varepsilon^3}{36 \times \beta \times (1 - \varepsilon)^2} \quad (13)$$

Onde, ε é porosidade (0,4 no experimento), D_p o diâmetro volumétrico esférico equivalente (835 μ m, obtido no *Quantikov*), β fator de forma (2 para o tubo porta-amostra), ϕ a esfericidade (0,75, obtido no *Quantikov*).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. AMOSTRAGEM

As características como peso, diâmetro, volume e área superficial das amostras, que foram utilizadas para os cálculos da exalação do radônio, são mostradas na Tabela 6, obtidas pelo *Quantikov* e comparadas com a literatura.

Tabela 6 - Características físicas das amostras

Amostra	Procedência	Peso (g)	Diâmetro (Granulometria)	Área superficial média do grão (cm²)
PPDS	Rua da Bahia	393,0	Sólido (NA)	195,5
PPDB	Rua da Bahia	59,6	Brita (9#)	0,045
PPDA	Rua da Bahia	67,2	Areia (16#)	0,011
PPDF	Rua da Bahia	51,6	Argila (350#)	0,000015
PPL550S	Pedreira Prado Lopes, 550	201,8	NA (sólido)	195,5
PPL550B	Pedreira Prado Lopes, 550	55,0	Brita (4#)	0,045
PPL550A	Pedreira Prado Lopes, 550	68,7	Areia (16#)	0,011
PPL550F	Pedreira Prado Lopes, 550	60,8	350#	0,000015
PLCS	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui	295,3	NA	195,5
PLCB	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui	62,9	Brita (9#)	0,045
PLCA	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui	56,0	Areia (16#)	0,011
PLCF	Pedreira Lagoinha, Campo Clube Pitangui	51,1	350#	0,000015
PPS	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal	347,0	NA	195,5
PPB	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal	63,1	Brita (4#)	0,045
PPA	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal	56,8	Areia (16#)	0,011
PPF	Pedreira Pompéia Abrigo Municipal	52,7	350#	0,000015
PENS	Pedreira Engenho Nogueira	209,8	NA	195,5
PENB	Pedreira Engenho Nogueira	64,5	Brita (4#)	0,045
PENA	Pedreira Engenho Nogueira	58,3	Areia (16#)	0,011
PENF	Pedreira Engenho Nogueira	54,0	350#	0,000015

Lara (2017), ao estudar os solos de Belo Horizonte e região metropolitana, percebeu que as correlações estatísticas entre radônio, urânio e ferro estrutural indicaram coerência com a afirmação de que os óxidos de ferro presentes no solo podem estar relacionados com o urânio, dadas as condições geoquímicas e físicas ideais para tal. Estudos realizados por Sakoda *et al.* (2010) com amostras de solos também indicaram a goethita (mineral de óxido de ferro) como o principal mineral relacionado com a exalação do radônio do solo, responsável por cerca de 75% da exalação.

Desta forma, os solos dos locais amostrados, pedreiras e Rua da Bahia, podem favorecer a exalação do radônio emanado das rochas dos substratos geológicos. É importante ter em mente que nem todo Rn emanado da rocha consegue alcançar a superfície, e ser exalado para a atmosfera.

7.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS X(DRX)

Com os resultados da difração de raios x, apresentados na tabela 7, foi possível identificar algumas fases cristalinas dos minerais presentes nas amostras de gnaiss.

Tabela 7– Resultados obtidos a partir da difração de raios x

Amostras	Fases cristalinas identificadas		
	Componente Maior (> 15%)	Componente Menor (3 a 15%)	Componente Traço (<3%)
Rua da Bahia	Quartzo Albita Microclina	Clorita	Muscovita
P. Prado Lopes	Quartzo Albita Microclina	Flogopita Clinocloro	-
P. Eng.Nogueira	Albita Quartzo	Microclina	Clorita Flogopita
P. Lagoinha	Quartzo Albita Microclina	Flogopita	Clinocloro Muscovita
P. Pompéia	Albita Quartzo	Microclina Flogopita	Clorita

A maior composição das amostras foi de quartzo e albita e em três delas a presença da microclina. A albita e a microclina pertencem ao grupo dos feldspatos e ocorrem com frequência em massas graníticas e pegmatíticas, como os gnaisses. A flogopita aparece como componente menor ou traço, assim como a muscovita. Por ser uma rocha metamórfica, parte da composição do gnaiss será originária da rocha mãe.

O estudo petrográfico do Gnaiss Belo Horizonte, realizado por Noce *et al.*, (1997) mostrou uma relação plagioclásio/ K-feldspato bastante variável. Os minerais

acessórios mais comuns são titanita, epidoto, apatita e zircão. A allanita está presente nas rochas de composição granítica (Noce, Teixeira e Machado, 1997).

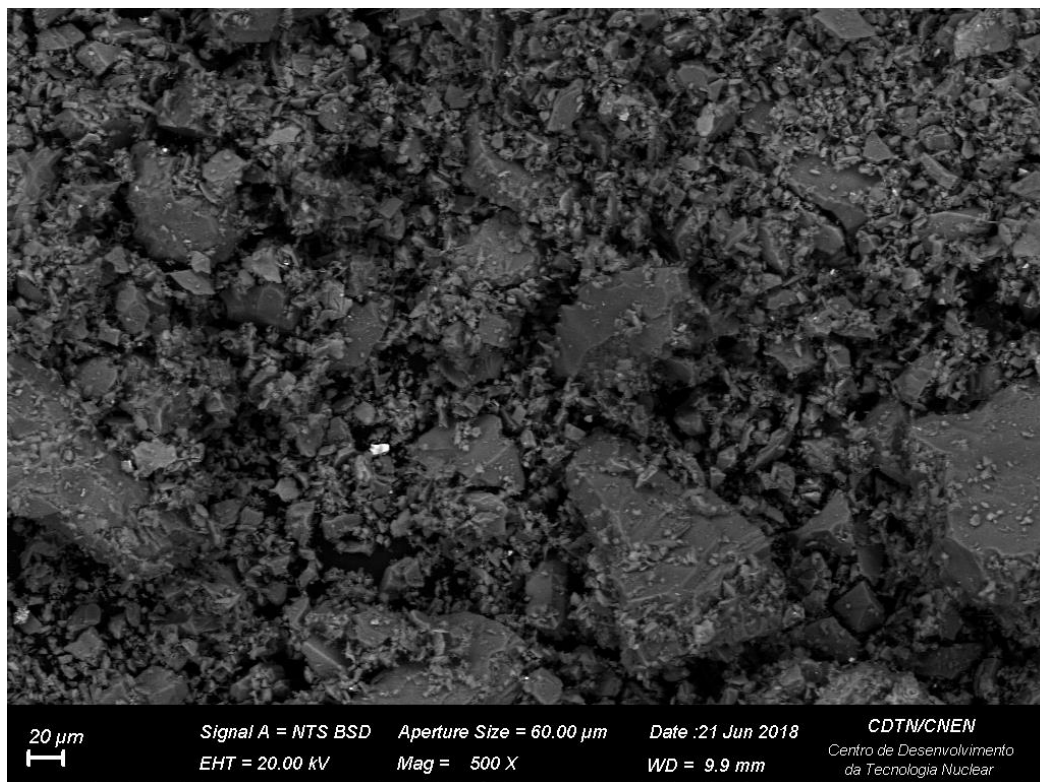
7.3. RESULTADOS COMPARATIVOS ENTREMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV-EDS) E DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

7.3.1. Análise das amostras da Rua da Bahia

Foram realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia (MEV-EDS) e Difração de Raios X (DRX) em amostras provenientes de diferentes locais estudados neste trabalho. O objetivo principal foi identificar semelhanças e diferenças entre as características morfológicas e mineralógicas, com foco na potencial presença de urânio e elementos associados.

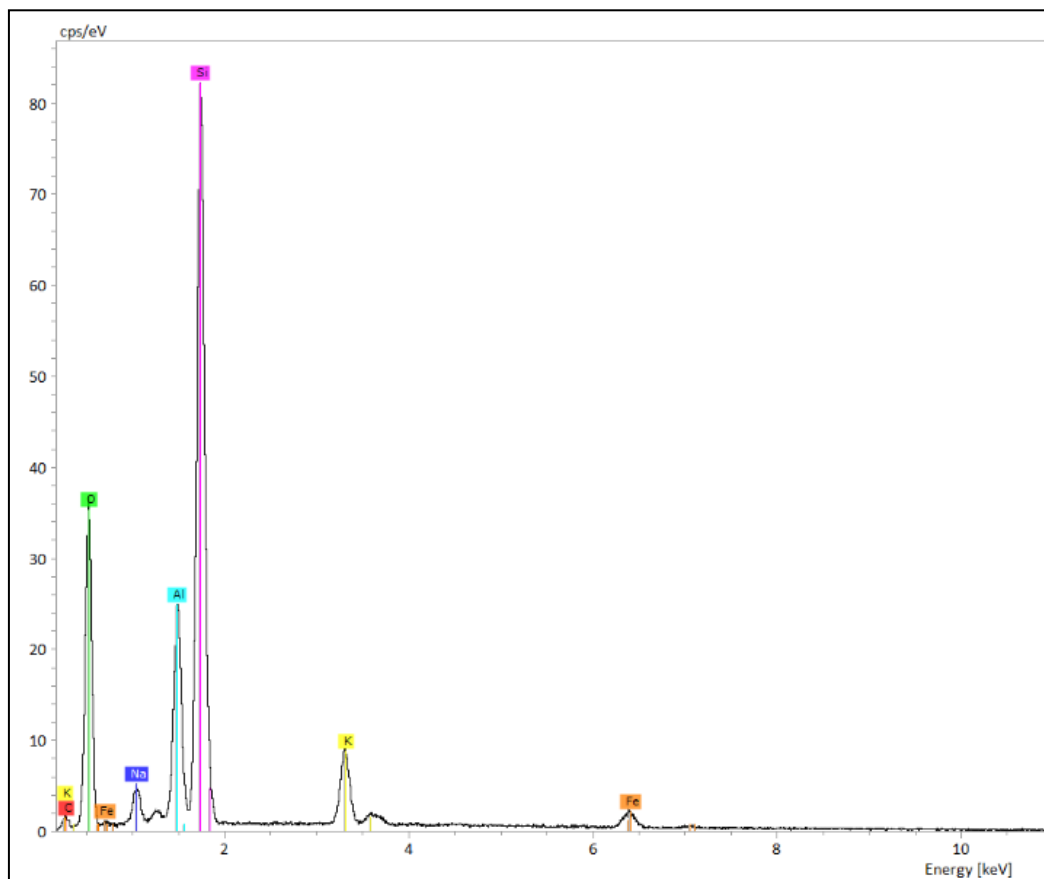
A figura 25 da amostra proveniente da Rua da Bahia, indica um material de textura heterogênea, apresentando grãos mais finos e outros mais espessos. Há, também, pontos brilhantes distribuídos, indicando a presença de elementos com números atômicos elevados. Esta aparência brilhante ocorre devido à interação da radiação com materiais densos, resultando em maior intensidade de sinal eletrônico.

Figura 23 - Imagem MEV da amostra de granito da Rua da Bahia, na região central de Belo Horizonte.

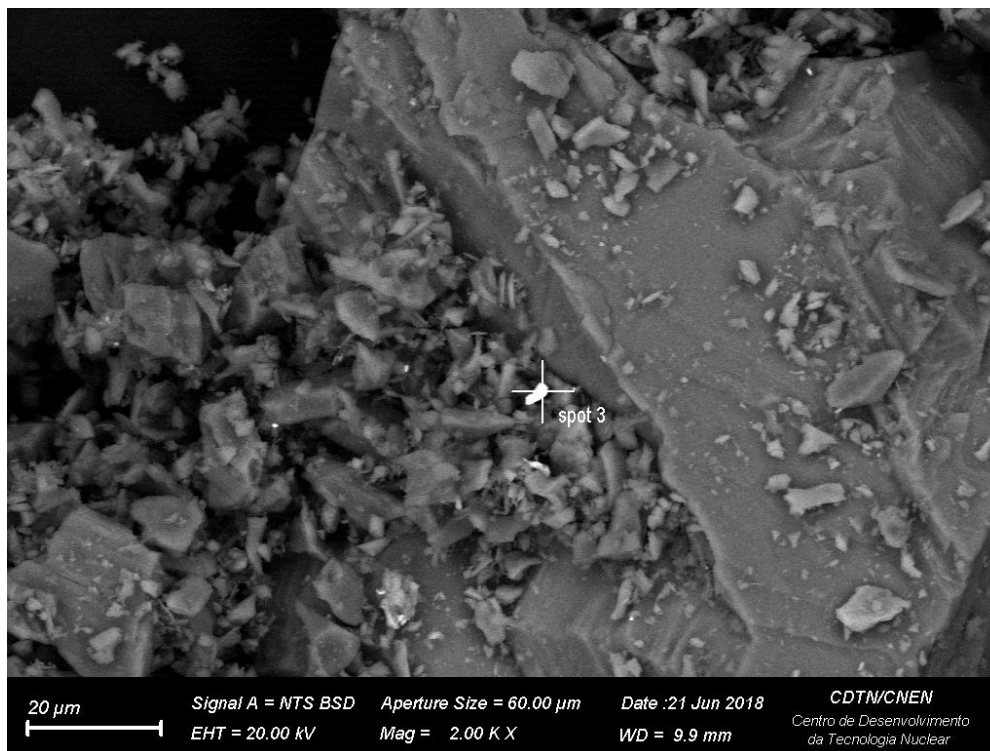
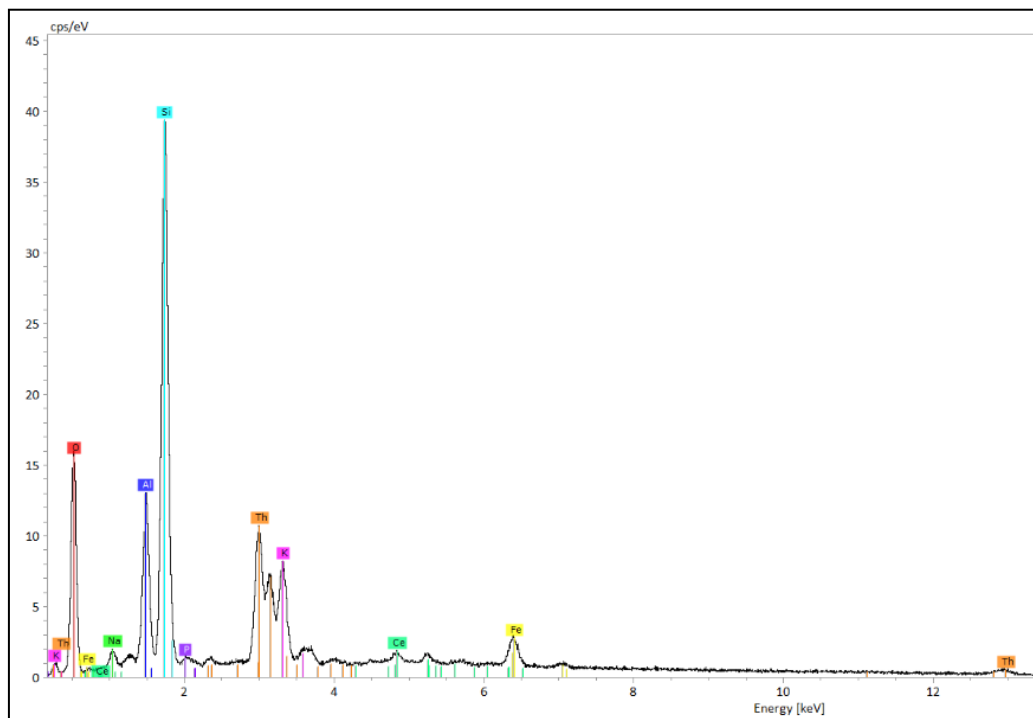


A análise elementar realizada pela EDS (Figura 26) revelou que a amostra é composta predominantemente por aluminossilicatos, com detecção adicional de ferro e potássio.

Figura 24 - Espectro EDS para amostra de granito da Rua da Bahia, na região central de Belo Horizonte.



A figura 27 identifica o *spot* 3 onde foi realizado o espectro EDS da figura 28, destacando os elementos encontrados, sendo o Th o elemento que difere das outras amostras. A presença do Tório é destacada neste estudo por ser um elemento radioativo, que contribui para o aumento dos valores de contagens gama, assim como para a contribuição da exposição do ser humano.

Figura 25 - Imagem MEV para amostra de granito da Rua da Bahia *spot 3*Figura 26 - Espectro EDS para amostra de granito da Rua da Bahia *spot 3*

No ponto identificado como *spot 4* na figura 29, realizou-se uma análise elementar de EDS, gerando o gráfico da figura 30 e os elementos alumínio, silício, cério, lantânio e neodímio identificados. Este resultado, corrobora com a hipótese de urânio na mesma matriz geológica. Regiões geológicas contendo terras raras frequentemente apresentam urânio e tório associados, conforme indicado em estudos prévios.

Figura 27 - Imagem de MEV da amostra de granito da Rua da Bahia, na região central de Belo Horizonte

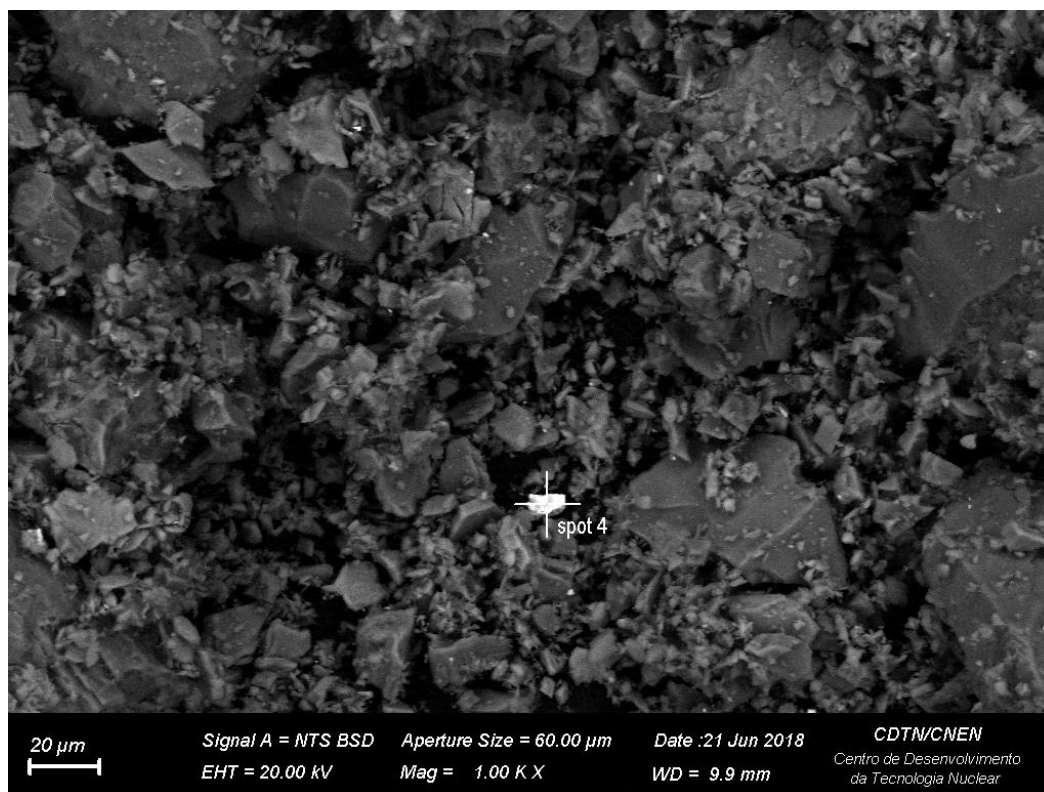
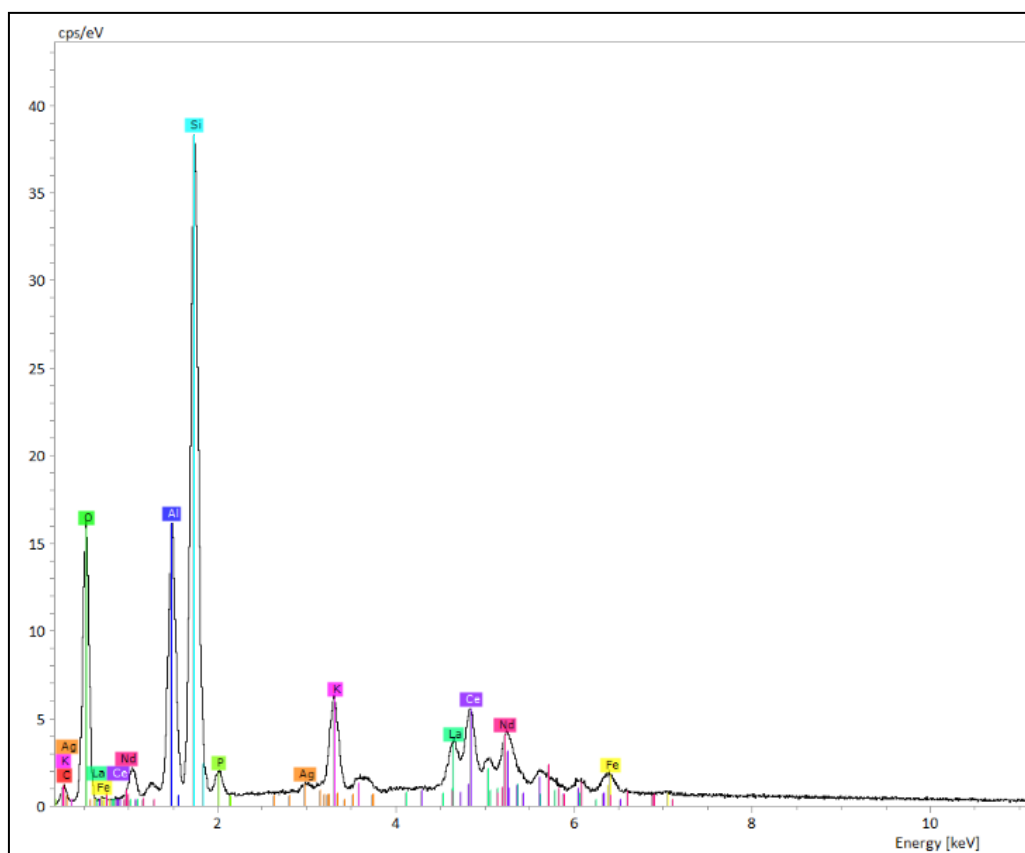
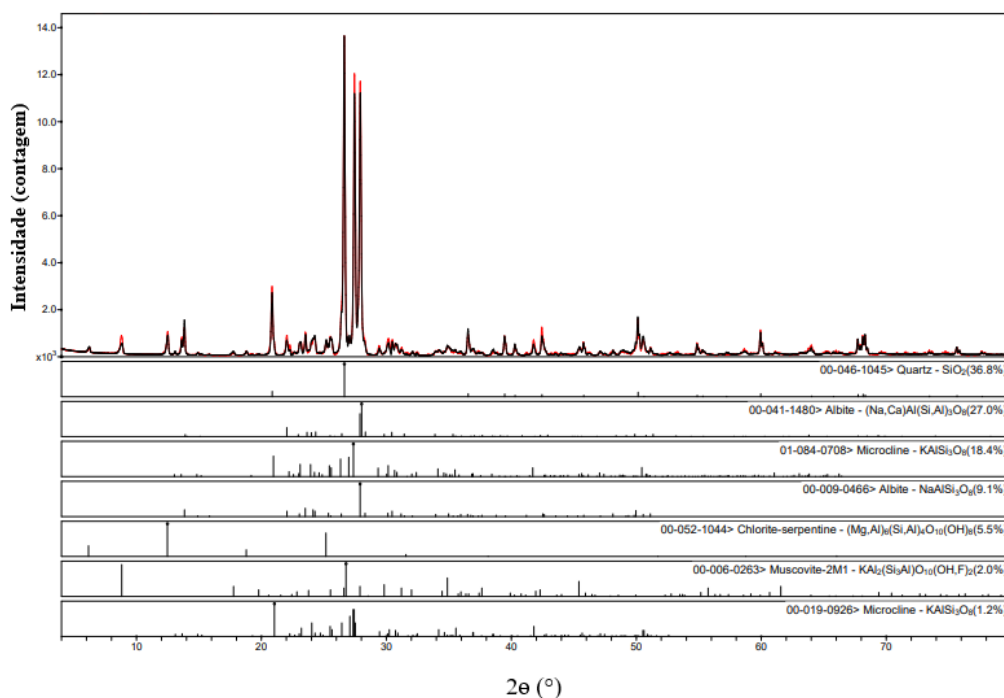


Figura 28 - Espectro EDS para a amostra de granito da Rua da Bahia *spot 4*



A análise por DRX (Figura 29) complementou os dados de MEV-EDS, permitindo uma identificação mineralógica mais detalhada. O espectro obtido da amostra foi interpretado com o auxílio de bancos de dados mineralógicos, confirmando uma matriz composta por silicatos, com destaque para a presença de albita, microclina e muscovita. Tais minerais são indicativos de ambientes graníticos ou pegmatíticos, frequentemente associados a depósitos de urânio em contextos geológicos similares.

Figura 29 - Resultados de DRX da amostra de granito da Rua da Bahia



A presença de terras raras, o tório e a composição mineralógica sugerem que a amostra da Rua da Bahia é representativa de um ambiente geológico potencialmente enriquecido em urânio. Estes resultados justificam os estudos de geoquímica isotópica, propostos neste estudo para refinar a interpretação e quantificar a presença de urânio e seus produtos de decaimento, como o radônio, proporcionando subsídios para a análise do risco radiológico associado.

7.3.2. Análise das amostras da Pedreira Prado Lopes

A figura 32 identifica na amostra da pedreira Prado Lopes uma textura heterogênea, estruturas de tamanhos variados e pontos de alta densidade. O ponto de alto contraste (*spot 1*), em destaque na figura 33, foi estudado e apresentado no gráfico da figura 34.

Figura 30 - Imagem de MEV para a amostra de granito da P. Prado Lopes

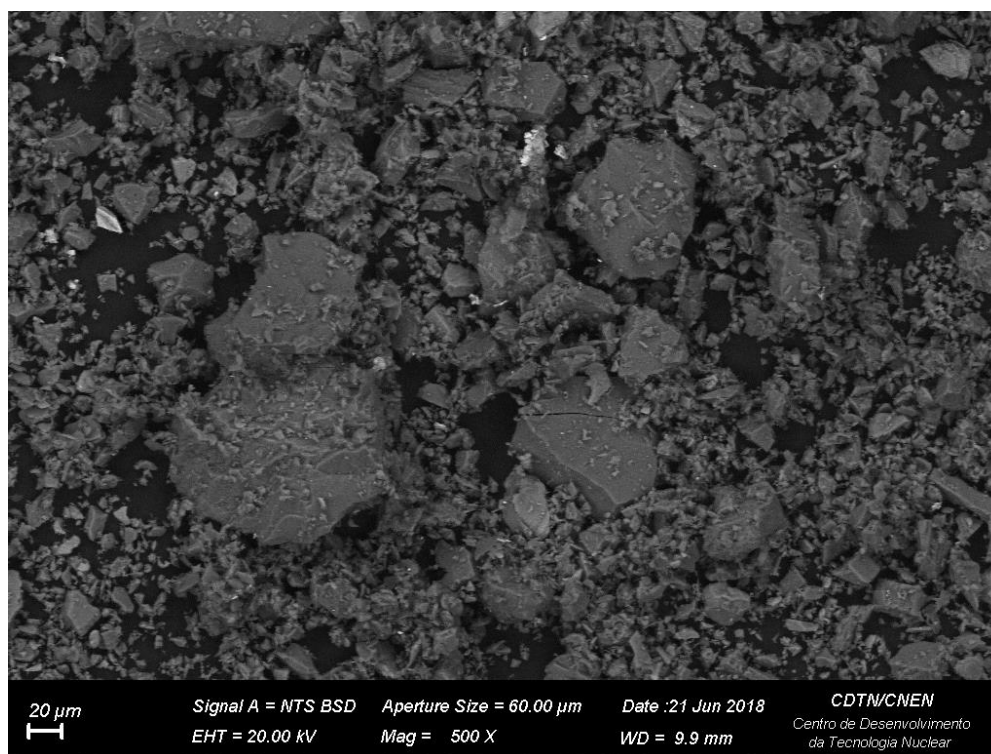
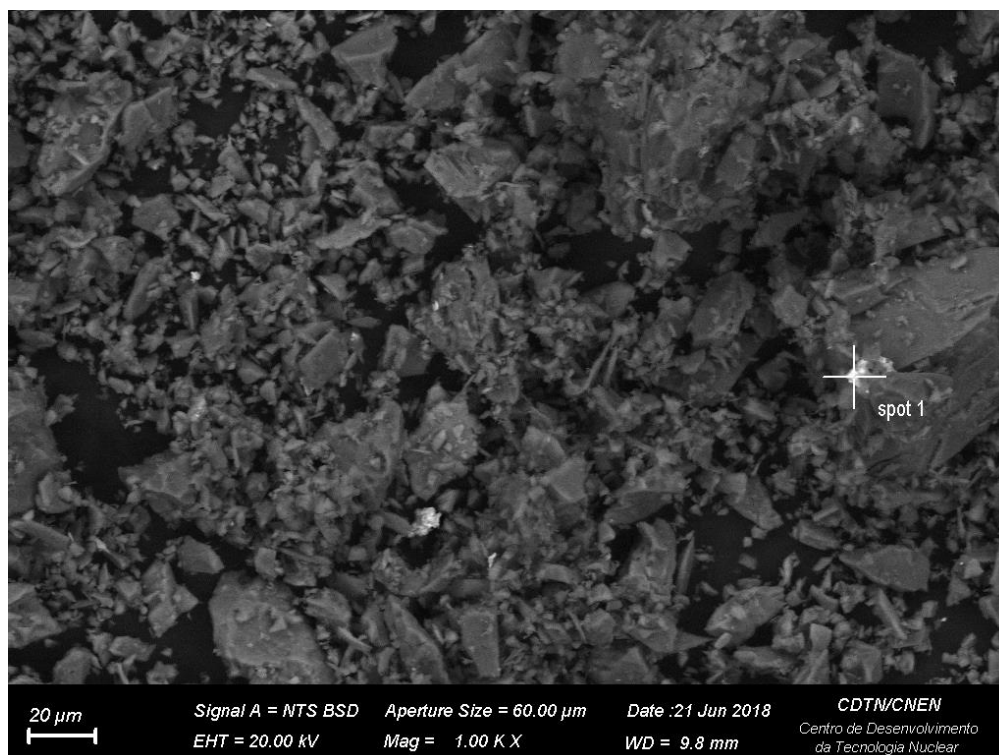
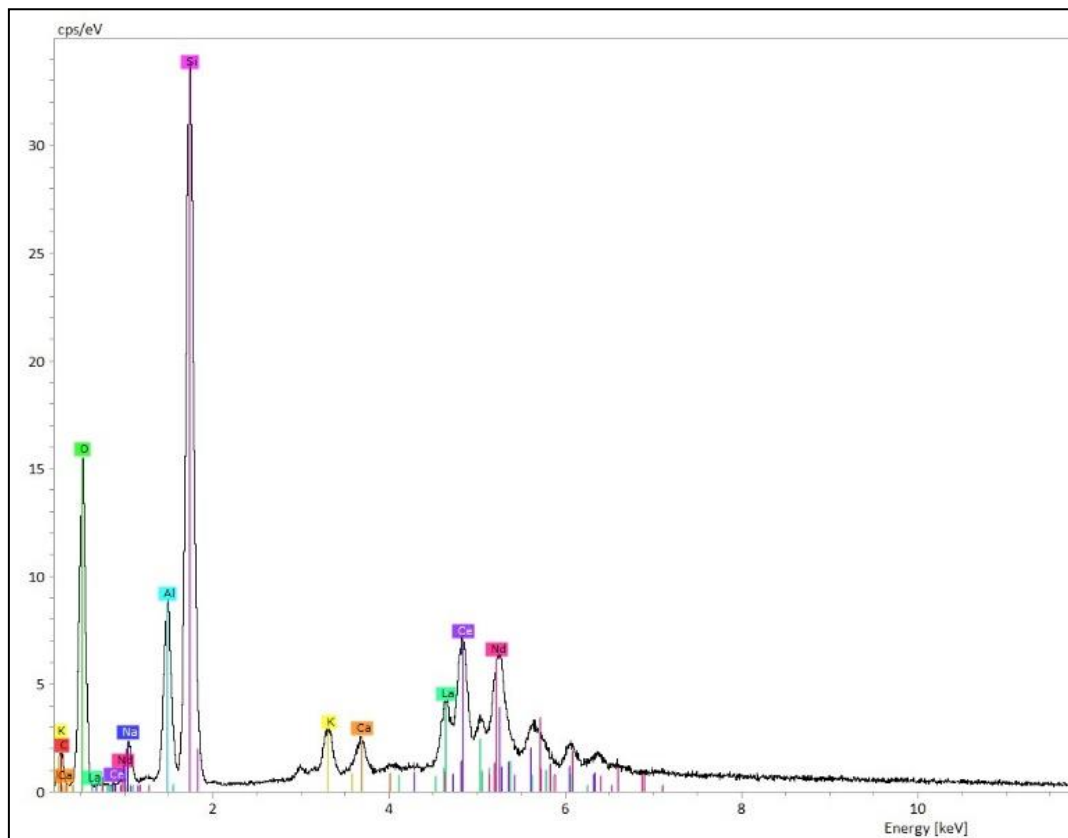
Figura 31 - Imagem de MEV para a amostra de granito da P. Prado Lopes *spot 1*

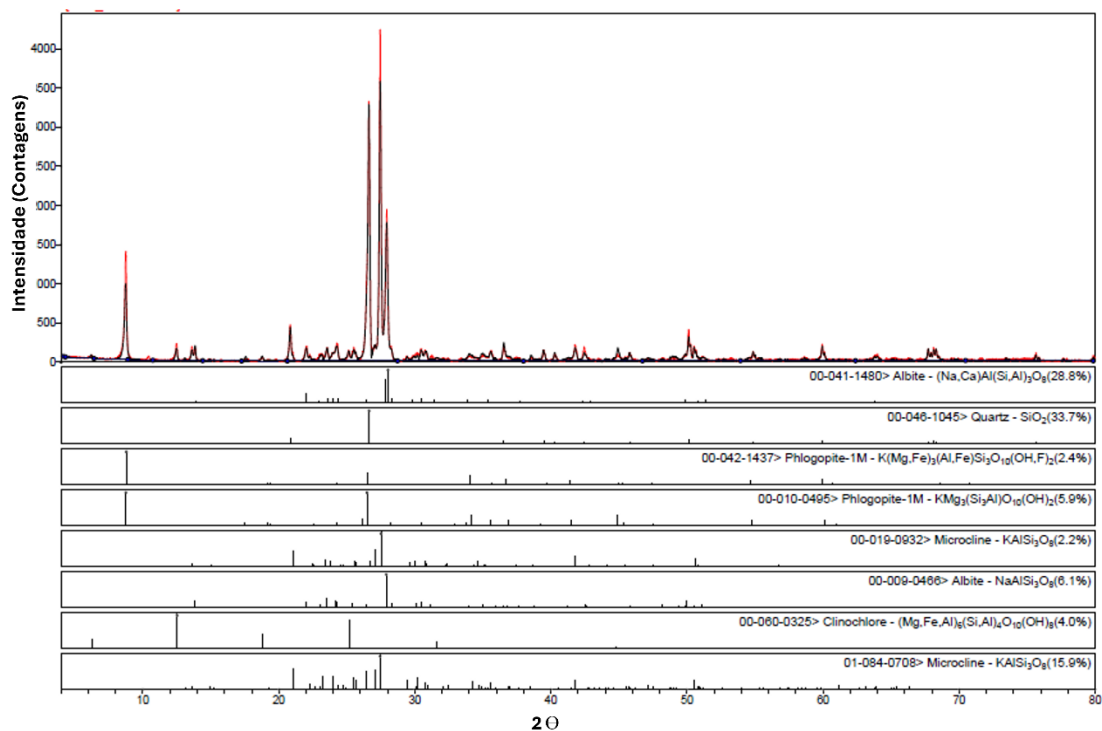
Figura 32 - Espectro EDS para a amostra de granito da P. Prado Lopes *spot 1*

A análise elementar realizada pela EDS (Figura 34) revelou que a amostra é composta predominantemente por aluminossilicatos, com picos nas energias do potássio (K), cálcio (Ca), lantânio (La), cério (Ce) e neodímio (Nd). Assim como a

amostradiscutida no item anterior, os elementos terras-raras, podem, geologicamente, agregar minerais de U e Th.

Os resultados do DRX (Figura 35) confirmou uma matriz composta por silicatos, como albita, quartzo e microclina, além de minerais que contém Fe.

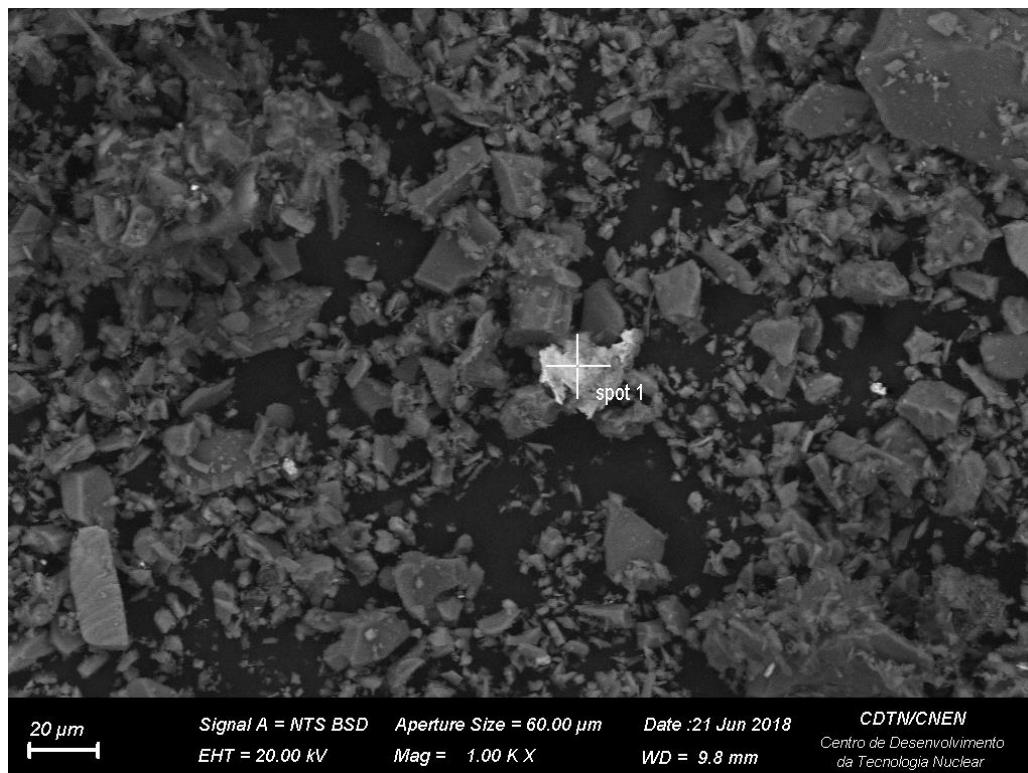
Figura 33 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Prado Lopes



7.3.3. Análise das amostras da Pedreira Lagoinha

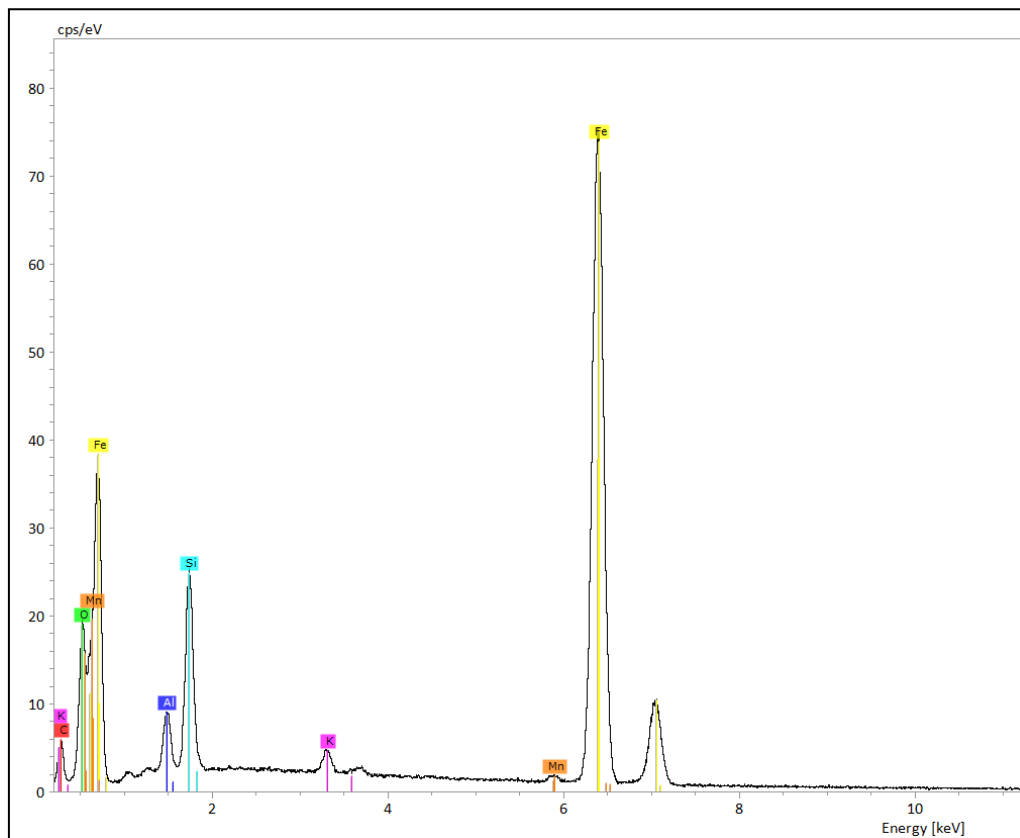
A figura 36 é uma imagem de MEV da amostra da pedra Lagoinha e mostra um material de textura mais homogênea do que as amostras já discutidas neste tópico.

Figura 34 - Imagem de MEV para a amostra de granito da P. Lagoinha spot 1



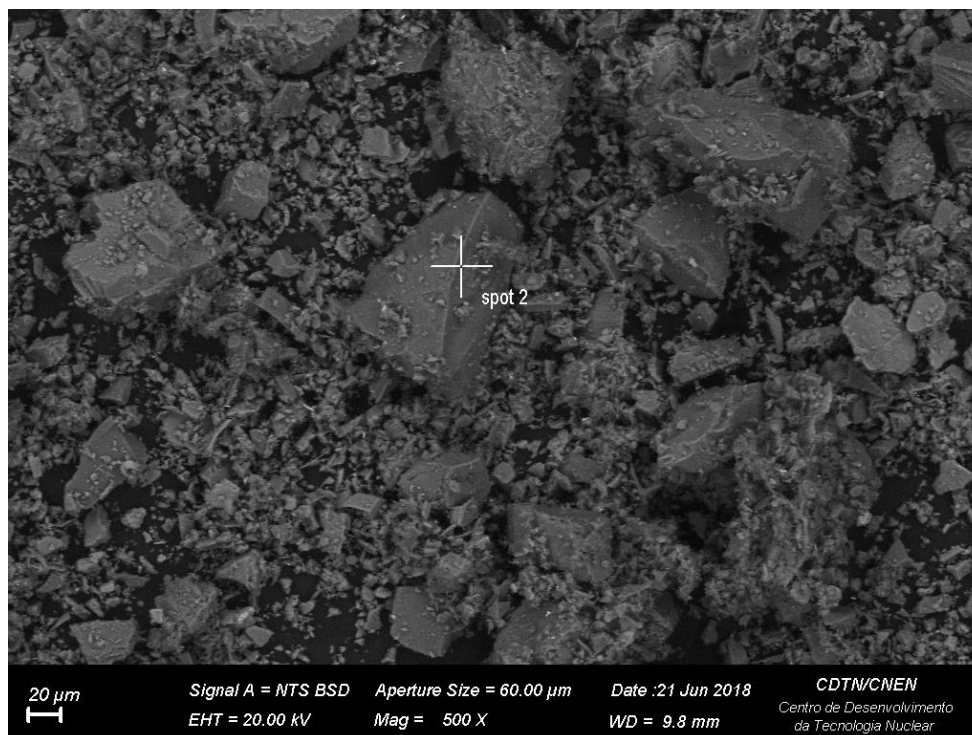
O *spot 1* foi identificado e selecionado para a realização do EDS por apresentar uma maior densidade na imagem. O espectro da figura 37 mostra o ferro (Fe) e o manganês (Mn) sendo detectados. Uma explicação para a presença desses elementos é a possível contaminação no momento da redução da granulometria das amostras nos moedores que são compostos por ligas de ferro.

Figura 35–Espectro EDS para amostra de granito da P. Lagoinhaspot 1



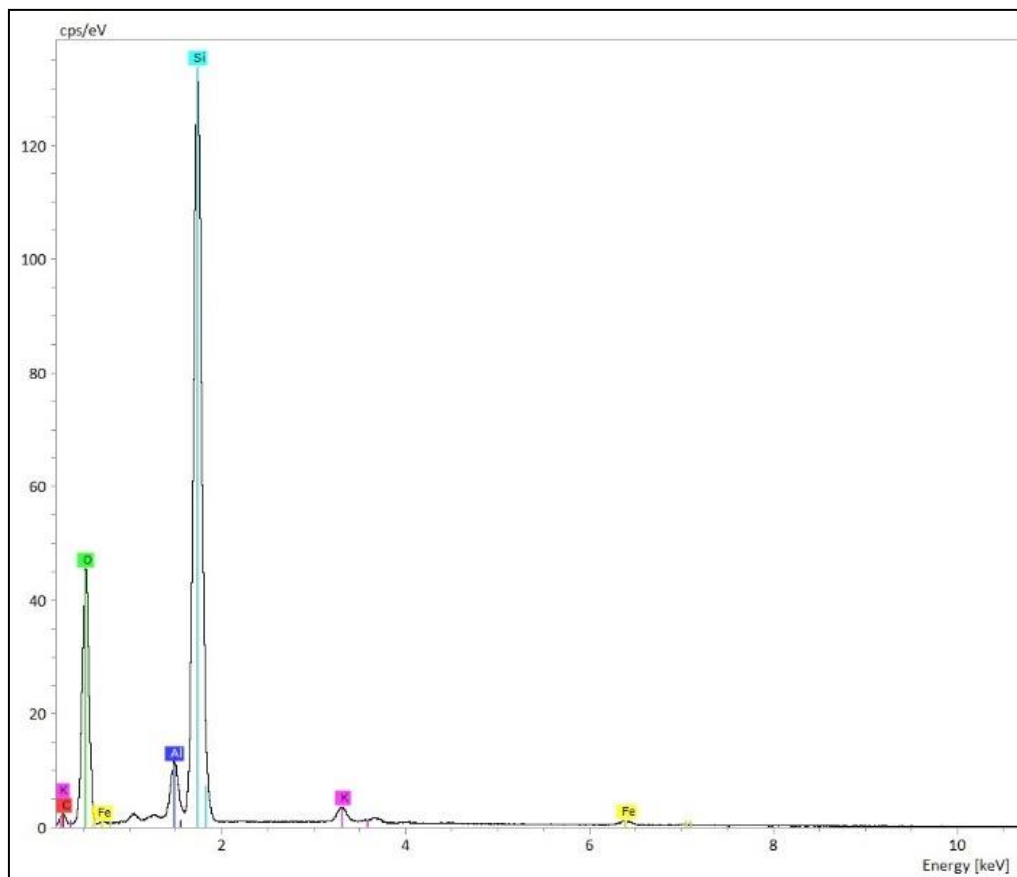
Comparativamente, foi selecionado, para o EDS, um grão da amostra com contraste cinza escuro presente em sua maior parte (Fig. 38).

Figura 36 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Lagoinha



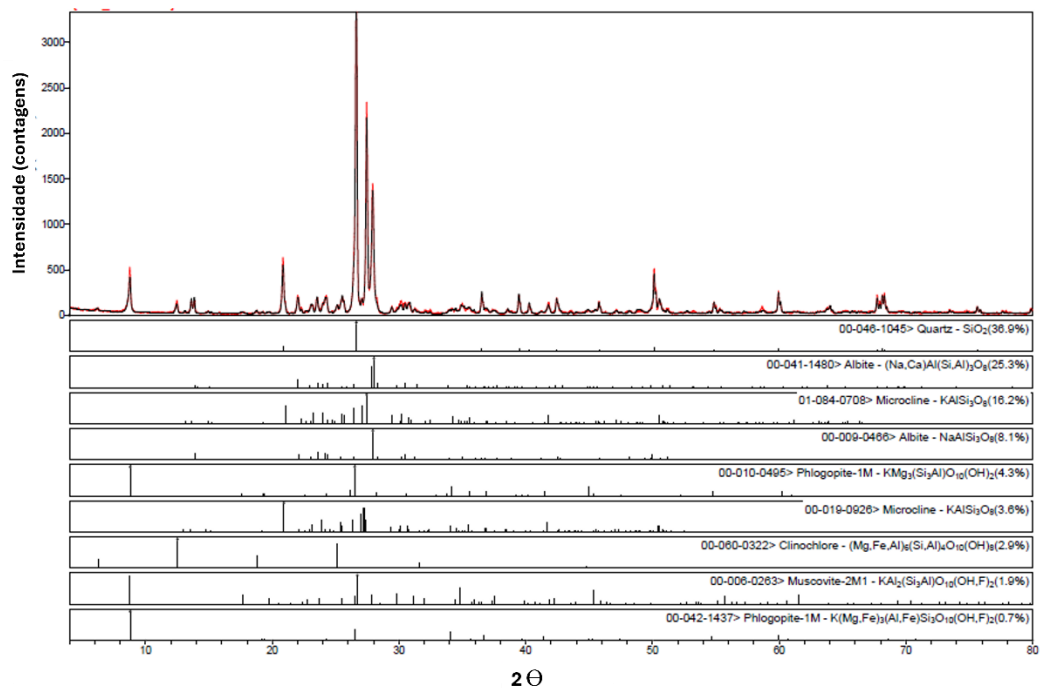
Com o espectro do EDS (Fig. 39), foi possível perceber que a amostra não é rica em ferro, e sim em silício, também indicando a presença de minerais do grupo dos silicatos na amostra.

Figura 37– Espectro EDS da amostra de granito da P. Lagoinhaspot 2



A análise por DRX (Fig. 40) destacou a presença do quartzo como mineral com maior presença na amostra, além da albita e microclina, sendo as três compostas por isótopos de Si.

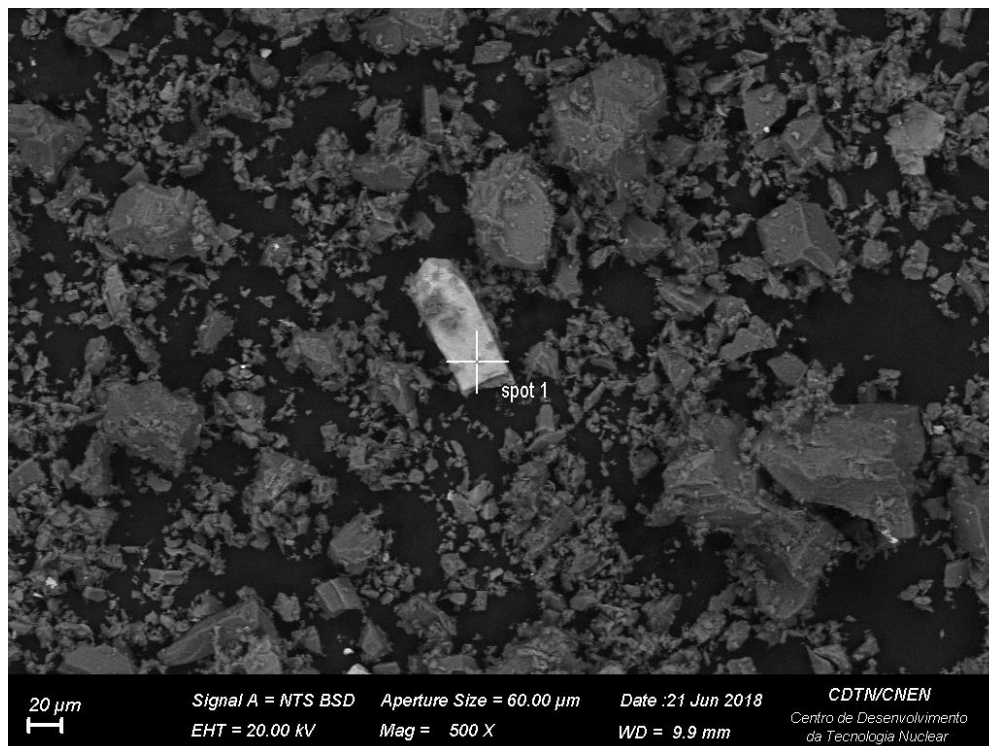
Figura 38 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Prado Lopes



7.3.4. Análise das amostras da Pedreira Pompéia

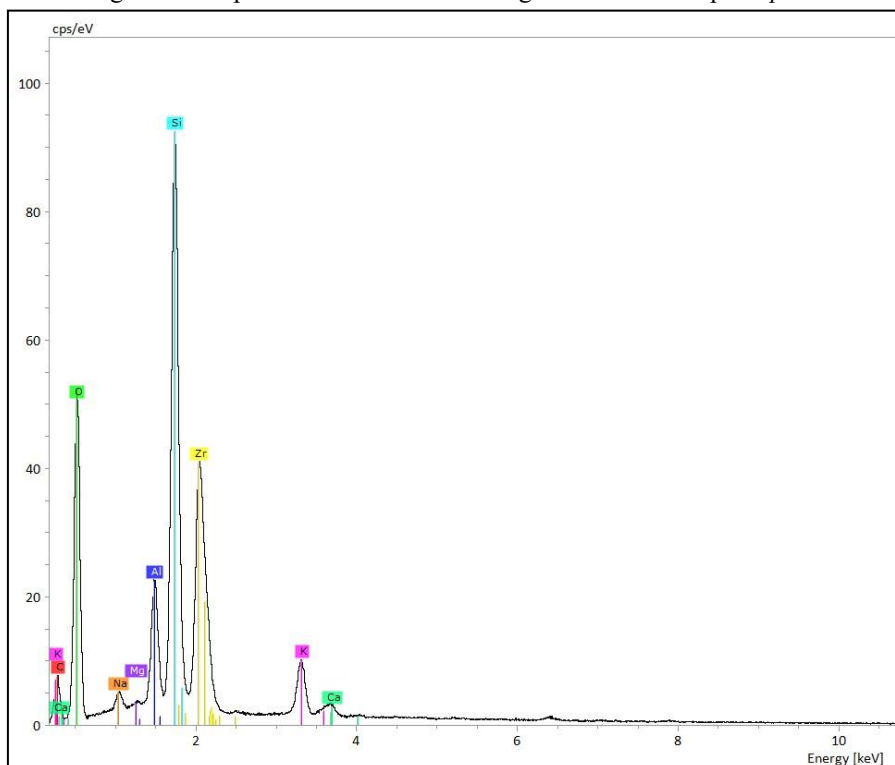
O resultado da imagem do MEV da amostra da pedra Pompéia (Fig. 41), apresenta um material de textura mais fina e grãos com bordas mais retas do que as amostras das localidades supracitadas. O *spot 1* foi escolhido por apresentar um tom de cinza diferente do restante da matriz.

Figura 39 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Pompéiaspot 1



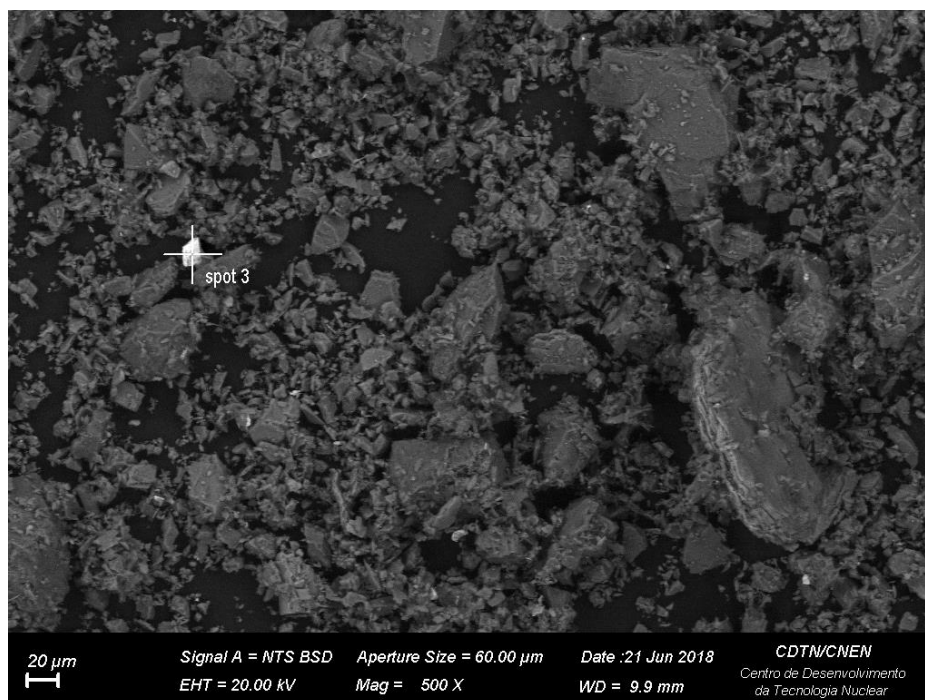
Realizou -se EDS (Fig. 42)no *spot 1*, e foram identificados os elementos Si, zircônio (Zr), K e Ca. A presença do Zr, pode indicar a presença de minerais com este elemento como, por exemplo, o Zircão ou Zirconita. Minerais esses que, podem carregar em sua composição o U e Th.

Figura 40 -Espectro EDS da amostra de granito da P. Pompéia *spot 1*



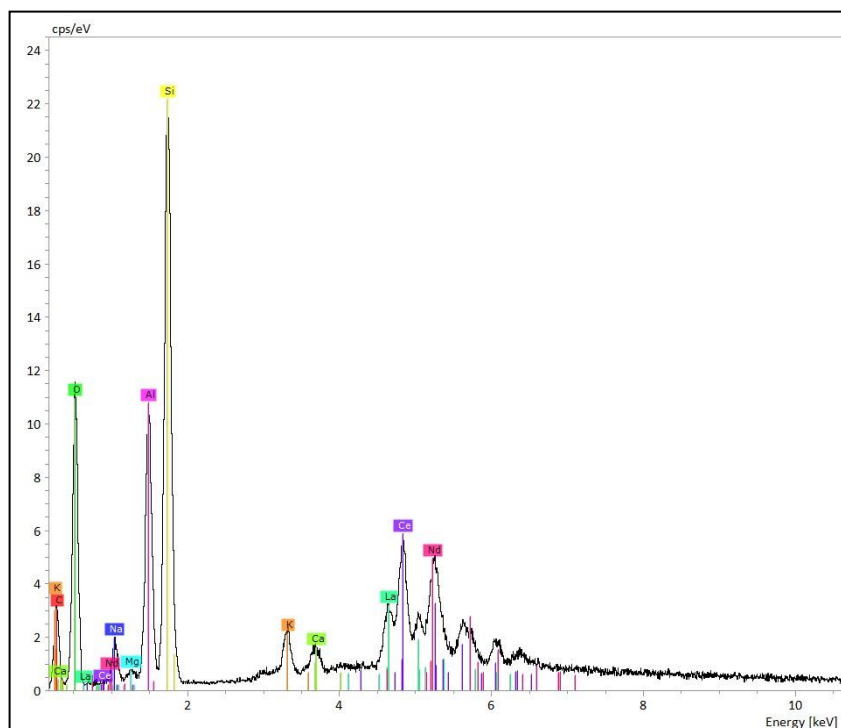
O ponto de alto contraste (*spot 3*), em destaque na figura 43, foi estudado e apresentado no gráfico da figura 44.

Figura 41 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Pompéia *spot 3*



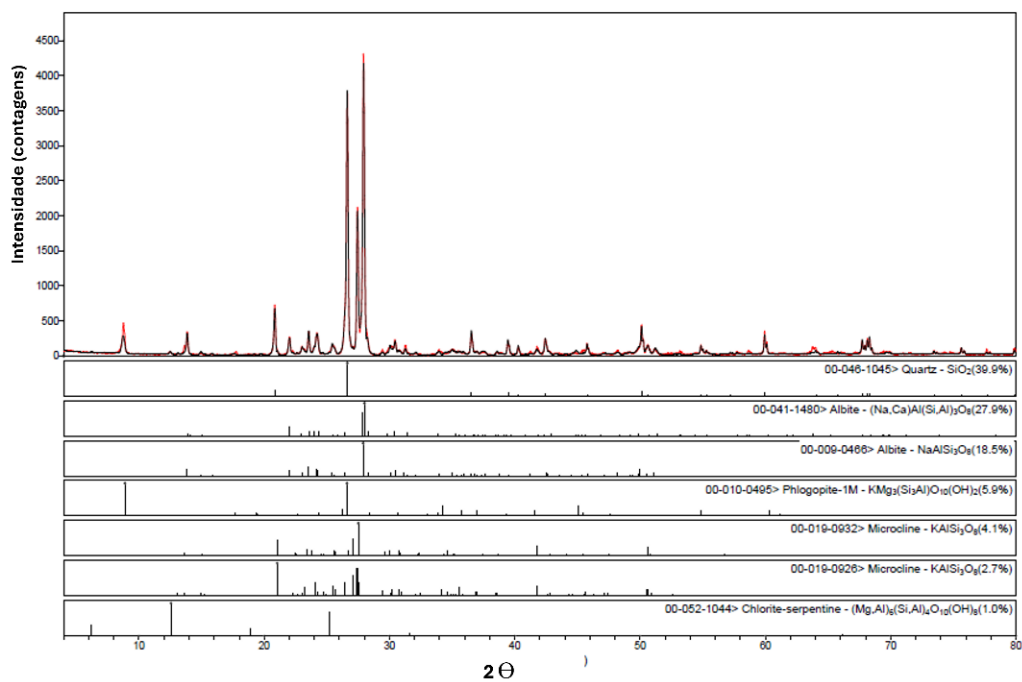
O EDS (Fig. 44) identificou os elementos K, Ca, La, Ce, Nd, além do Si, O e Al, dos aluminossilicatos. Os elementos terras-raras podem atrair quimicamente na formação dos minerais que os contém, o U e o Th, sendo estes uma possível fonte da radiação gama e exposição ao Rn.

Figura 42 - Espectro EDS da amostra de granito da P. Pompéia *spot 3*



Os resultados do DRX, também foram condizentes com os encontrados no MEV. A figura 45, identifica os principais minerais encontrados. O quartzo é o mineral mais abundante na amostra seguido pela albita, flogopita e microclina.

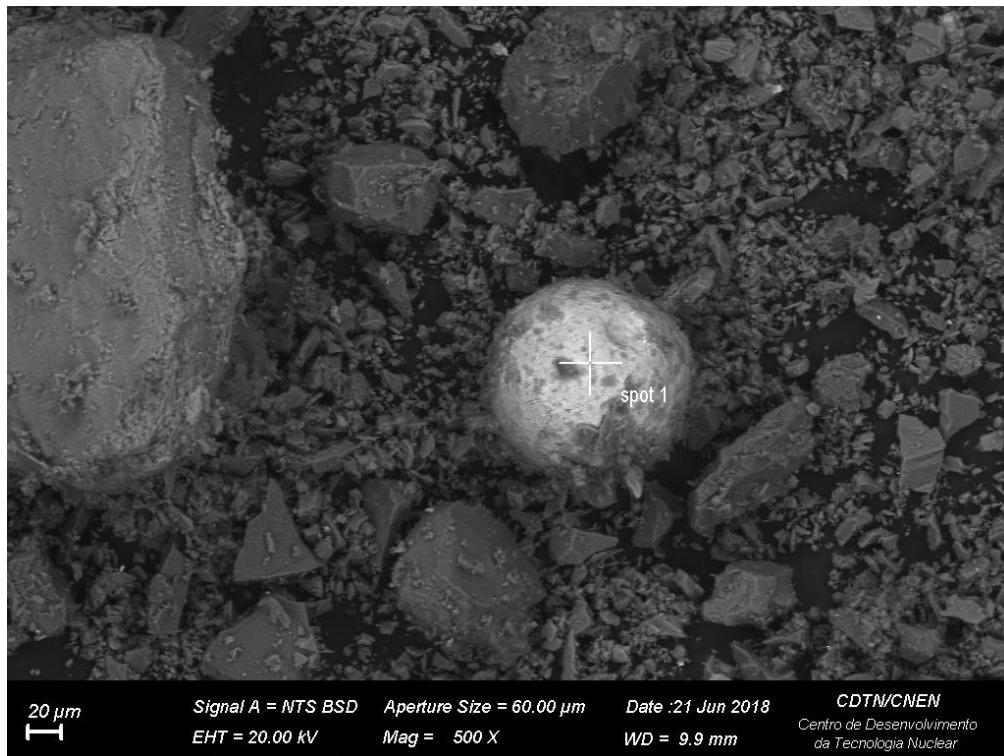
Figura 43 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Pompéia



7.3.5. Análise das amostras da Pedreira Engenho Nogueira

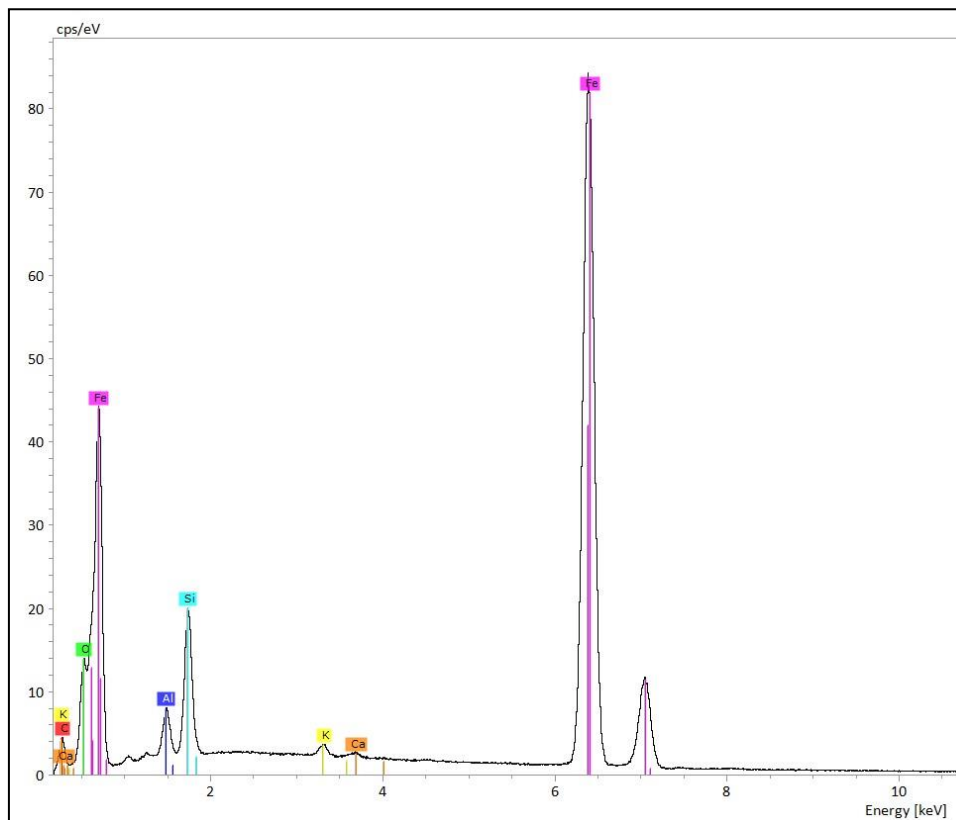
Observa-se que a amostra da pedreira Engenho Nogueira apresenta estruturas de tamanhos variados, uma matriz com textura fina e presença de elementos maiores e mais arredondados que as outras amostras estudadas. A estrutura arredondada no centro da imagem de MEV da figura 46, foi selecionada como o *spot 1* para realização do EDS.

Figura 44 - Resultados de MEV da amostra de granito da P. Engenho Nogueira *spot 1*



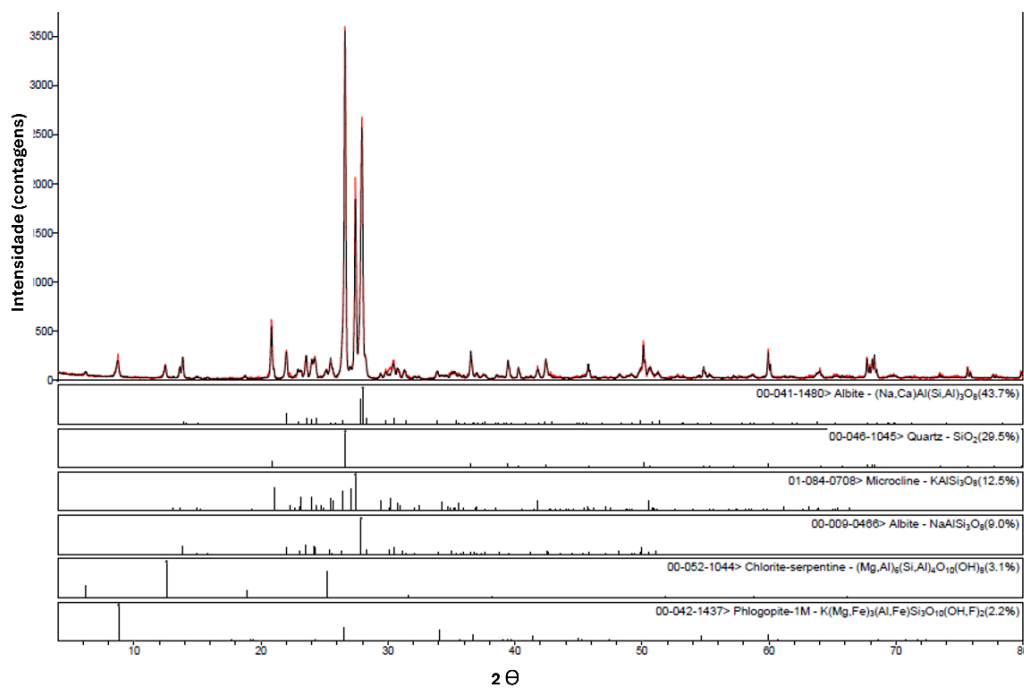
O espectro da figura 47, identifica os elementos presentes no *spot 1*, sendo eles Al, Fe, Si, K e Ca. O ferro novamente aparece em destaque e, novamente, a explicação da possível contaminação no momento da redução da granulometria das amostras nos moedores que são compostos por ligas de ferro.

Figura 45 - Espectro EDS da amostra de granito da P. Engenho Nogueira *spot 1*



Os resultados do DRX estão na figura 48, mostrando a quantidade de albita, quartzo, microclina, clorita e flogopita, minerais com composições concordantes com os resultados do EDS discutidos acima.

Figura 46 - Resultados de DRX da amostra de granito da P. Engenho Nogueira



7.4. ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA

Os resultados da ativação neutrônica realizada no reator TRIGA são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da ativação neutrônica

Amostra	Concentração mássica / Concentração de Atividade ($\mu\text{g.g}^{-1}/\text{Bq.kg}^{-1}$)			
	^{238}U		^{232}Th	
	$\mu\text{g.g}^{-1}$	Bq.kg^{-1}	$\mu\text{g.g}^{-1}$	Bq.kg^{-1}
Lagoinha	3 ± 1	$76,8 \pm 25,6$	28 ± 2	$113,8 \pm 8,1$
Pompeia	3 ± 1	$76,8 \pm 25,6$	11 ± 1	$44,7 \pm 4,1$
Prado Lopes	4 ± 1	$102,4 \pm 25,6$	37 ± 2	$150,5 \pm 8,1$
Engenho Nogueira	4 ± 1	$102,4 \pm 25,6$	15 ± 1	$61,0 \pm 4,1$
Rua da Bahia	7 ± 1	$179,2 \pm 25,6$	48 ± 2	$195,1 \pm 8,1$

Como descrito por autores como Noce e colaboradores (1997) e anteriormente por Pomerene et al. (1962) e Hertz et al. (1970), o complexo Belo Horizonte é constituído por gnaisses de composição granodiorítica. Noce (1994) encontrou valores de U total que variaram de 75 mg.g^{-1} a 187 mg.g^{-1} em amostras de Gnaiss Belo Horizonte como visto na figura 49.

Figura 47 - Resultados analíticos de U-Pb para o Gnaiss Belo Horizonte

Amostra					Concentrações		
<i>Gnaiss Belo Horizonte (amostras N-33A e N-33B)</i>							
Nº da amostra	Min *1	Prop. mag.*2	Nº de grãos	Peso (mg)	Urânio (ppm)*3	Pb rad. (ppm)*3	Pb com. (pg)*4
33B-1	Z	M5	3	0,006	103	57	36
33B-2	Z	M5	4	0,011	106	59	37
33B-3	Z	M5	15	0,009	164	108	70
33B-4	Z	NM1	1	0,005	75	47	41
33B-5	T	IF	40	0,155	185	81	592
33A-1	T	IF	42	0,184	181	109	518
33A-2	T	IF	30	0,196	187	106	751

Fonte: Noce, 1994.

Nota-se que o autor utiliza valores de urânio total, enquanto o presente estudo utilizou-se o isótopo ^{238}U . Por ser o mais abundante entre todos os isótopos do urânio,

considerou-se a comparação. Na publicação o autor utiliza a unidade ppm que é equivalente ao mg.g^{-1} .

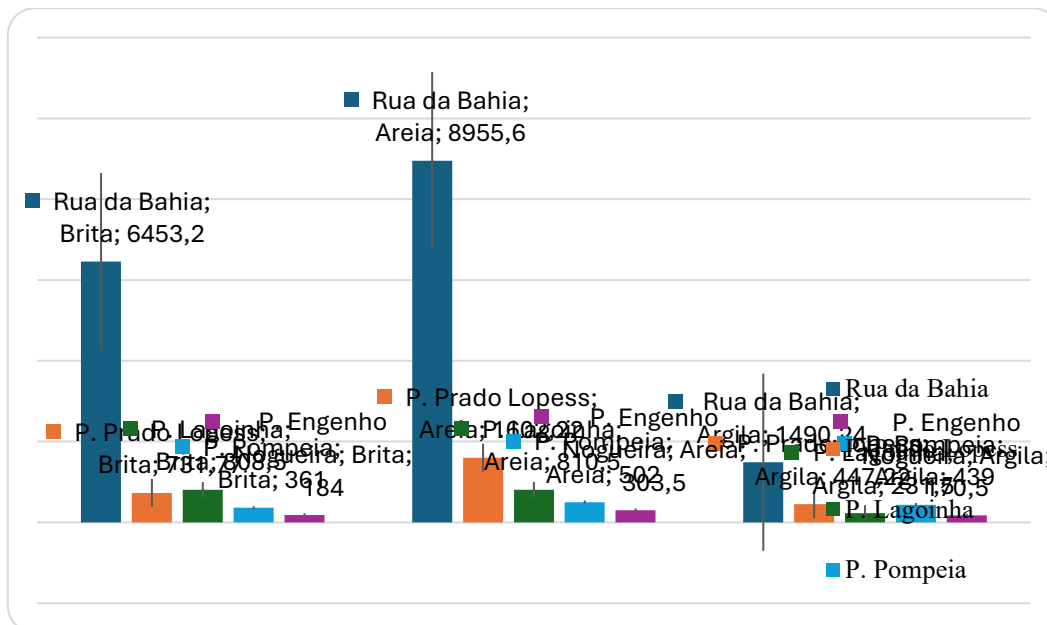
7.5. CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO VIA CIRCUITO DE EXALAÇÃO

Os valores das concentrações médias de Rn, a partir dos três ensaios feitos para cada amostra, e seus erros obtidos no AlphaGuardsão apresentados da Tabela 9. Os resultados no gráfico (Fig. 50) mostram a tendência das concentrações de Rn por granulometrias para cada localidade.

Tabela 9 - Concentração de Rn nas amostras por granulometria

Amostras	Códigos	Granulometria	Concentração de Rn (Bq.m^{-3})
Rua da Bahia	PPDS	NA (antes da moagem)	$8608,00 \pm 150$
	PPDB	9# (brita)	$6453,20 \pm 100$
	PPDA	16# (areia)	$8955,60 \pm 170$
	PPDF	350# (argila)	$1490,24 \pm 100$
Pedreira Prado Lopes	PPL550S	NA	$6207,90 \pm 120$
	PPL550B	9#	$731,77 \pm 64$
	PPL550A	16#	$1602,22 \pm 100$
	PPL550F	350#	$447,22 \pm 64$
Pedreira Lagoinha	PLCS	NA	771 ± 64
	PLCB	9#	$808,5 \pm 100$
	PLCA	16#	$810,5 \pm 100$
	PLCF	350#	$231,5 \pm 30$
Pedreira Pompéia	PPSO1	NA	361 ± 30
	PPB01	9#	502 ± 100
	PPA01	16#	439 ± 100
	PPF01	350#	$231,5 \pm 64$
Pedreira Engenho Nogueira	PENS	NA	110 ± 30
	PENA	9#	184 ± 30
	PENB	16#	$303,5 \pm 64$
	PENF	350#	$170,5 \pm 30$

Figura 48 - Resultados das concentrações de Rn pelo Circuito de Exalação



Os resultados obtidos para as amostras sólidas e nas granulometrias até 16# mostraram possuir uma tendência, que teoricamente era o esperado: quanto menor a granulometria, maior área de superfície possível de exalação, portanto maior a concentração do gás Rn. No entanto, em granulometrias muito finas, como a de 350# o fluxo de ar que passa através do tubo com o pó (argila), compacta a amostra na extremidade, impedindo que o ar exalado alcance o detector.

A partir desse primeiro desafio, as estratégias metodológicas foram sendo adaptadas em função das dificuldades experimentais. Uma das alternativas foi diminuir o fluxo de ar em todas as amostras, de forma a ficarem de acordo com a passagem de ar das amostras mais finas. Fez-se, então, a redução do fluxo de ar de 0,1L/min para 0,03L/min. Após os ajustes e realizados os cálculos de exalação conforme a Eq. 8, os gráficos a seguir foram gerados.

Figura 51 - Exalação de Rn Rua da Bahia

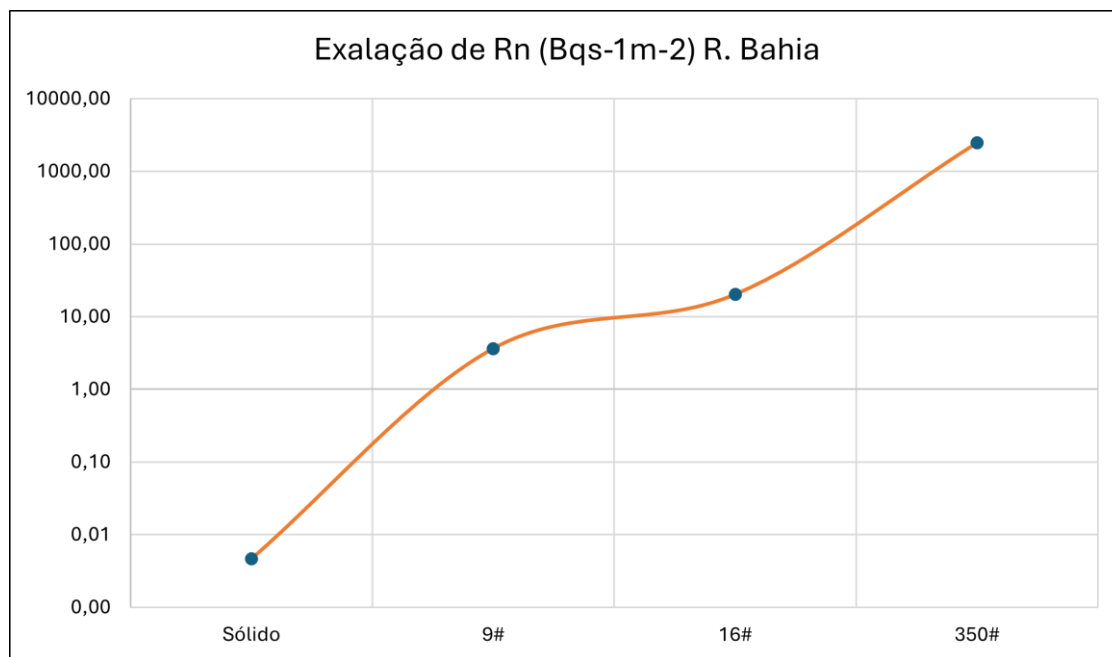
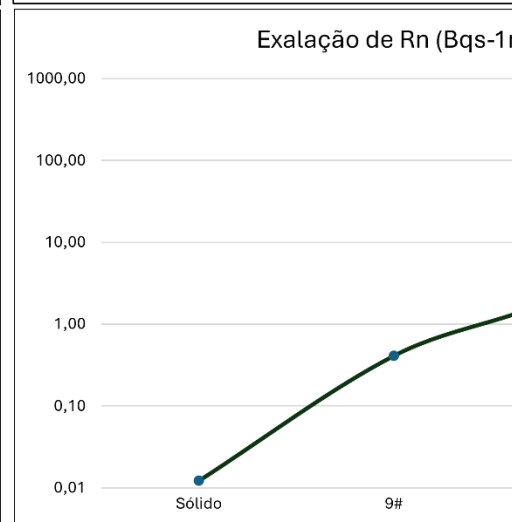
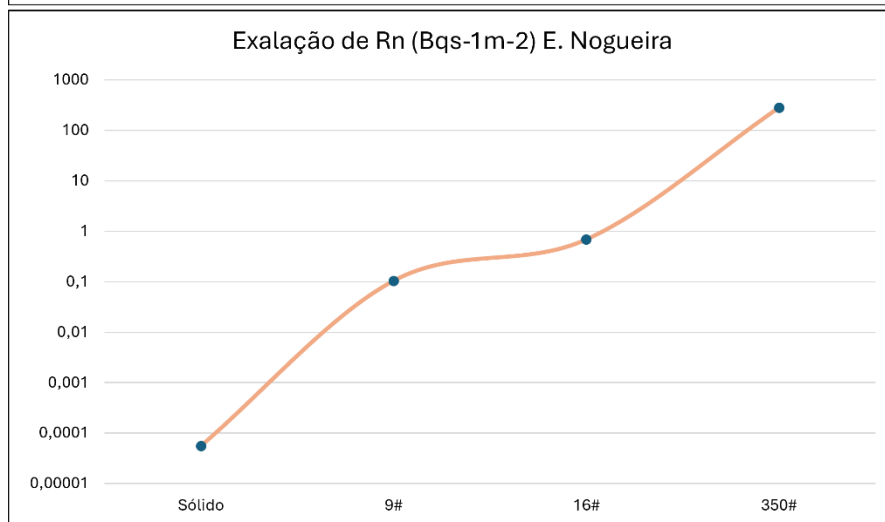
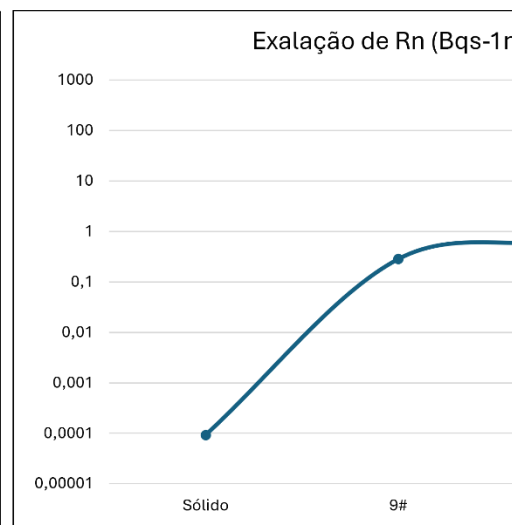
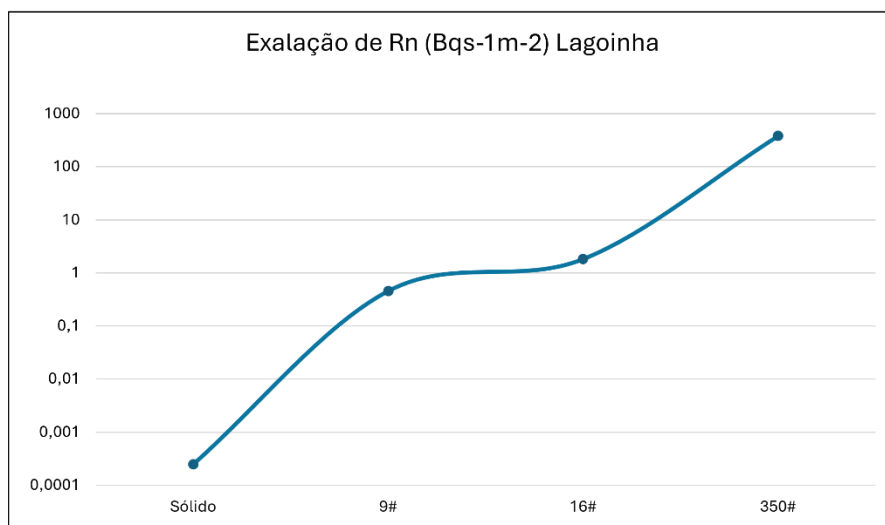


Figura 52 - Exalação de Rn das pedreiras



Taveira *et al.* (2021) utilizando o mesmo procedimento para avaliação da exalação de Rn em conglomerados uraníferos da Formação Moeda, na Serra do Gandarela, encontraram valores médios de 300 Bq.m^{-3} de concentração de Rn. Importante ressaltar que, as rochas do estudo de Taveira *et al.* (2021), foram exploradas na década de 70 a fim de serem utilizadas como material para fabricação de combustível nuclear, pela, então empresa estatal, NUCLEBRÁS. O motivo da escolha foram anomalias de urânio encontradas na região, com amostras contendo até $24 \pm 4 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$ nos conglomerados. Contudo, a pesquisa concluiu que nem sempre a presença do U é decisiva para a exalação do Rn, sendo necessário um estudo da forma como os átomos de Ra podem estar distribuídos no grão, além de umidade e outros fatores externos geológicos, por exemplo.

O mesmo pode ser discutido com os resultados encontrados nesta tese. Apesar dos valores de U nas amostras graníticas terem apresentados valores até seis vezes menores do que no trabalho de Taveira *et al.* (2021), os valores de exalação de Rn foram cerca de, no mínimo duas vezes maior. A Tabela 10a seguir foi construída para sintetizar o sintetiza o discutido.

Os resultados plotados nos gráficos (Fig. 51 e 52), representam os cálculos de exalação de Rn feitos a partir das médias das triplicadas dos ensaios para cada granulometria. Nota-se que os resultados foram mais coerentes com a expectativa teórica, indicando que, de fato, uma questão fluidodinâmica, relacionada ao fluxo do radônio na amostra, pode ser a explicação para o fenômeno, e não necessariamente a taxa de emissão/exalação nos grãos.

Tabela 10 - Comparação de resultados de concentração de Rn e conteúdo de U

Estudo	Matriz	Urânio ($\mu\text{g.g}^{-1}$)		Concentração de Rn (Bq.m^{-3})	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Presente trabalho	Granitos-gnaisses Complexo			$170,5 \pm 30$	$8955,6 \pm 150$
	Belo Horizonte	3 ± 1	7 ± 1	(Engenho Nogueira)	(Rua da Bahia)
Taveira <i>et al.</i> (2021)	Conglomerados uraníferos Formação Moeda	16 ± 1	24 ± 4	175 ± 15	300 ± 15

Uma partícula com um diâmetro menor tem uma superfície maior para sorção do que uma maior em relação à sua massa. Assim, assume-se que a mesma quantidade de partículas mais finas tenha um conteúdo de radionuclídeos mais alto do que uma partícula espessa, se a fonte do radionuclídeo adsorvido for a mesma (Biharie Dezső 2008).

Outra importante discussão realizada por autores como Sakoda *et al.* (2011), é a forma como o rádio está distribuído no grão, e como esse elemento passa a estar distribuído após o preparo da amostra. Segundo a UNSCEAR (2000), em grãos maiores, a exemplo do tamanho de areia, os nanoporos podem aumentar a área superficial específica do grão, aumentando a emissão por uma ou duas ordens de grandeza.

De acordo com Garver e Baskaran (2004), quanto maior a porosidade, mais rápido a rocha libera gás. Além disso, há uma correlação entre o conteúdo do volume do microporo e a taxa de emissão de radônio (Liet *al.*, 2021). Por outro lado, a estrutura do poro e a taxa de exalação de gás radônio estão conectadas, mas a correlação entre a porosidade total e o conteúdo absoluto do microporo e a taxa de exalação de radônio não é alta (Hu, 2023).

Em outros estudos de Li *et al.* (2022), as medições iniciais antes do fracionamento mostraram que suas taxas de exalação de radônio foram de 2,06 e 1,65 Bq m⁻².h⁻¹. Após o fracionamento por tamanho, a exalação de radônio aumentou de 3,49 e 3,61 para 4,01 e 4,18 Bq m⁻².h⁻¹ (com tamanho de grão < 74 µm) e a concentração de atividade de rádio aumentou para 6216 e 8408 Bq kg⁻¹ com o mesmo tamanho de grão. As taxas de exalação de radônio aumentaram acentuadamente com a diminuição do tamanho das partículas nas amostras investigadas (Li, 2022).

Várias medições de radiação gama de amostras de solo (Megumi E Mamuro 1977; Megumi, 1979) mostraram que a concentração de atividade dos elementos das séries do U e do Th aumenta quando o tamanho das partículas diminui (Sjölander, 2008). Portanto, o urânio foi lixiviado de partículas de grãos finos na amostra de minério mais do que em outros tamanhos de partículas. Isso explica a razão pela qual a concentração de atividade do urânio diminui quando o tamanho das partículas diminui no resíduo após o processo de lixiviação.

As curvas dos gráficos (Fig. 53 e 54) apresentados por Ibrahim e seus colaboradores no estudo da dependência do tamanho do grão na exalação do radônio, publicado em 2018, mostrou comportamento semelhante ao encontrado nos gráficos das figuras 51 e 52. Tal fato coincide, portanto, quanto ao aumento da exalação do Rn com a diminuição das partículas.

Figura 53 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de exalação de Rn – amostra 1.

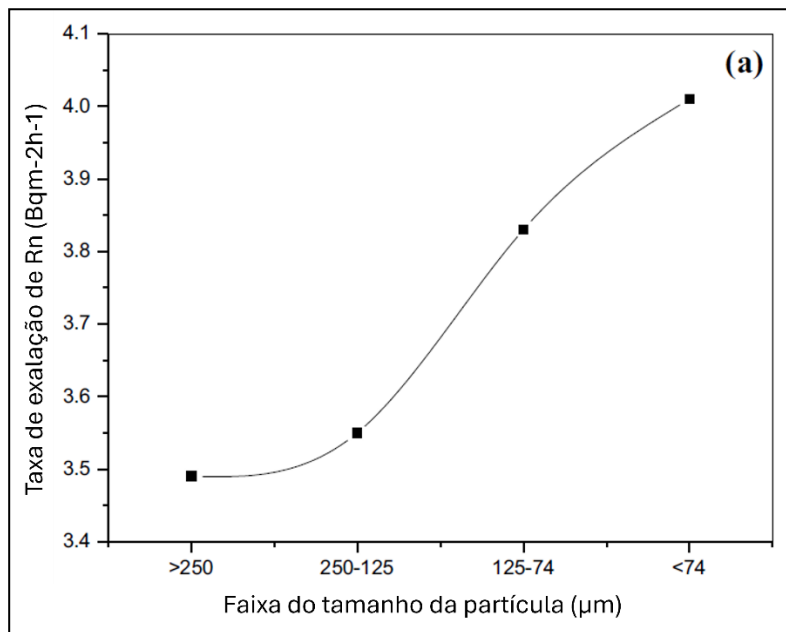
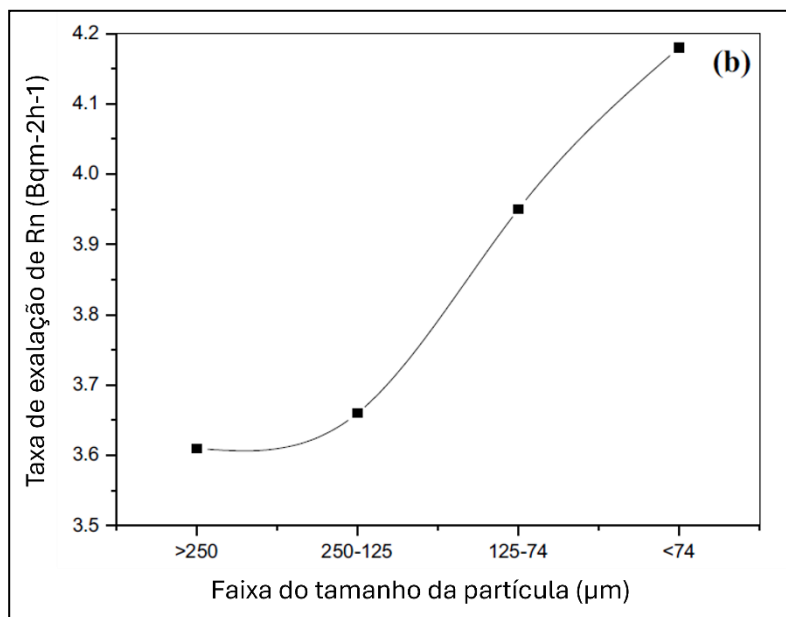
Fonte: Ibrahim *et al.*, 2018.

Figura 54 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de exalação de Rn – amostra 2

Fonte: Ibrahim *et al.*, 2018.

7.6. ESPECTROMETRIA GAMA

Os resultados obtidos pelos cálculos de atividade específica a partir das áreas líquidas do espectro gama, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 -Resultados da espectrometria gama

Amostras	Concentração de atividade (Bq.kg ⁻¹)				
	Família do urânio		Família do tório		Potássio
	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²²⁸ Ac	²¹² Pb	⁴⁰ K
Lagoinha	34,4±0,3	30,3±0,3	77,7±0,7	81,8±0,3	1166,8±4,9
Pompeia	36,6±0,3	33,3±0,3	35,9±0,5	36,9±0,2	715,4±3,8
Prado Lopes	31,6±0,3	26,9±0,3	99,1±0,7	101,4±0,3	997,4±4,4
Engenho	90,8±0,6	82,0±0,6	92,8±1,1	91,2±0,4	1400,6±7,6
Nogueira					
Rua da Bahia	90,19±0,41	85,47±0,46	328,54± ,32	325,86 ± 0,54	1491,51 ± 5,67

El Afifiet *al.* (2006), trabalhando com amostras de monazita, areia preta e zircão, encontraram concentrações de atividade de ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K nas amostras de minerais. Em amostras de monazita, as concentrações médias de atividade de ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K foram elevadas em comparação com amostras de zircão e areia preta. Os autores assumiram que existe o equilíbrio nas séries de decaimento de U e Th, e calcularam a razão entre as concentrações de Th e U. O estudo mostrou que Th foi enriquecido em amostras de monazita e areia preta, enquanto U foi enriquecido nas amostras de zircão. Esses valores são comparáveis com estudos anteriores sobre o conteúdo de Th e U em monazita no Egito usando outras técnicas radioanalíticas, como a espectrometria gama (Boraie Mady, 2002; Sroor, 2003).

A tabela 12, adaptada de Eisebund e Gessel (1997), sintetiza valores de ⁴⁰K, ²³⁸U e ²³²Th para alguns tipos de rochas e solos.

Tabela 12 - Médias de concentrações de ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th em solos e rochas típicos

Material	^{40}K		^{232}Th		^{238}U	
	% total K	Bq/kg	ppm	Bq/kg	ppm	Bq/kg
Rochas ígneas						
Basalto	0,8	300	3 - 4	10 - 15	0,5 - 1	7 - 10
Máfico	0,3 - 1,1	70 - 400	1,6 / 2,7 ^c	7 / 10 ^c	0,5 / 0,9 ^c	7 / 10 ^c
Sáfico	4,5	1100 - 1500	16 / 20 ^c	60 / 80 ^c	3,9 / 4,7 ^c	50 / 60 ^c
Granito	>4	>1000	17	70	3	40
Rochas sedimentares						
Arenito	2,7	800	12	50	3,7	40
Quartzo Limpo	<1	<300	<2	<8	<1	<10
Quartzo sujo	2	400	3 - 6	10 - 25	2 - 3	40
Arkose	2 - 3	600 - 900	2	<8	1 - 2	10 - 25
Areias de praia	<1	<300	6	25	3	40
Rochas carbonáticas	0,3	70	2	8	2	25
Todas as rochas (escala) ^a	0,3 - 4,5	70 - 1500	1,6 - 20	7 - 80	0,5 - 4,7	7 - 60
Crosta Continental	2,8	850	10,7	44	2,8	36
Solos	1,5	400	9	37	1,8	22

^aExemplos de materiais fora dessa escala podem ser encontrados, mas em quantidades relativamente pequenas.

^b1 Bq.Kg⁻¹=0,027 pCi.g⁻¹

^cMédia e mediana, respectivamente.

Comparando os valores de ^{238}U e ^{232}Th de rochas graníticas da tabela acima com os resultados de ^{238}U e ^{232}Th obtidos na espectrometria, as pedreiras Lagoinha e Pompeia tiveram valores mais próximos, enquanto a Engenho Nogueira e Prado Lopes variaram até 20 Bq.Kg⁻¹ a mais, para a família do Th, do que o estudo de Eisebund e Gessel (1997). Para a família do U apenas a Pedreira Engenho Nogueira se destacou apresentando valores de 90,8±0,6 Bq.Kg⁻¹ para ^{214}Pb e 82,0±0,6 Bq.Kg⁻¹ para ^{214}Bi , as demais apresentaram atividades de concentração menores do que a média de 40 Bq.Kg⁻¹ em granitos.

Hong Thu *et al.*, 2020, utilizaram, também, espectrometria gama com detector de germânio hiperpuro (*Canberra*), com eficiência de 35%, para determinação de ^{226}Ra em diferentes granulometrias de frações de mesma amostra. No estudo citado, os autores não encontraram diferenças significativas para a concentração de ^{226}Ra nos diferentes tamanhos de grãos. Contudo, os resultados para coeficientes de emissão, em diferentes umidades, foram variáveis. A emissão do Rn em solos secos foi relativamente menor comparada aos solos úmidos (Hong Thu *et al.*, 2020).

7.7. CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO VIA CR-39

Os resultados de CR-39 sugerem que, de forma geral, as frações areia e brita apresentaram maior taxa de exalação. A hipótese teórica de que as menores granulometrias exalam mais radônio por terem uma área superficial maior, também não foi completamente satisfeita nesse experimento, visto que, a argila, menor granulometria testada, exalou a menor concentração do gás, para todas as amostras e, mesmo nas comparações entre as frações brita e areia, a brita apresentou maior exalação nos casos das amostras da pedra da Lagoinha e da Rua da Bahia, e sendo bastante similar à areia no caso da pedra Engenho Nogueira.

O que se pode concluir, com os dois experimentos, é que a fração brita tende a apresentar exalação considerável, que pode superar ou ser similar à exalação em frações menores (areia) ou até mesmo argila (considerando a interferência de efeitos fluidodinâmicos, como suposto nesta pesquisa).

Contudo, o efeito comparativo de um método passivo (CR-39) para um método ativo, com passagem de ar forçada ainda precisa ser estudado. É importante lembrar que materiais de origem mineral nessas frações (brita e areia) são costumeiramente manipulados por trabalhadores em diversos ramos, como a construção civil.

As médias das concentrações de Rn nas diferentes granulometrias são mostradas na tabela 13. O valor de Bg foi descontado dos resultados, considerando a concentração de Rn dos CR-39 nos fracos sem amostras (“amostras branco”) em cada ensaio. O erro de 10% para os resultados das concentrações médias foi utilizado, conforme protocolos de estudos internos do LRN.

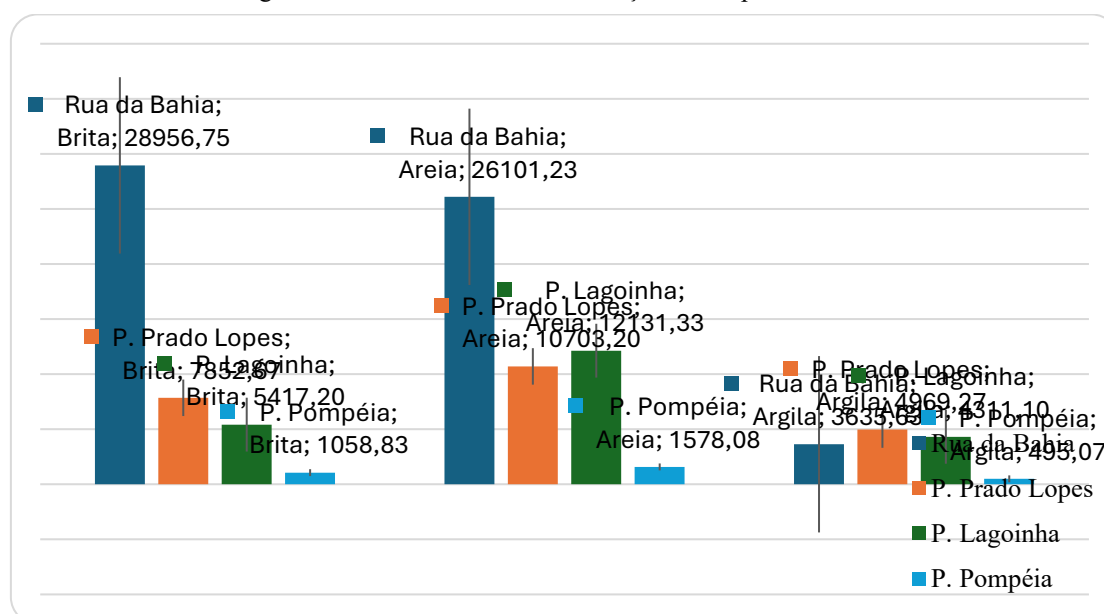
Tabela 13 - Resultados da concentração média de Rn por CR-39

Amostra	Granulometria	Concentração média de Rn (Bq.m-3)
---------	---------------	-----------------------------------

Lagoinha	brita	15917,74
	areia	10834,12
	argila	4133,17
Prado Lopes	brita	7741,38
	areia	10591,94
	argila	4857,97
Pompeia	brita	947,57
	areia	1578,08
	argila	383,88
Engenho Nogueira	brita	2833,03
	areia	2905,48
	argila	2324,39
Rua da Bahia	brita	28998,98
	areia	26227,91
	argila	3635,63

Entre as amostras testadas, por localidade, percebe-se que a Rua da Bahia apresentou as maiores concentrações médias de Rn, enquanto a Pedreira Pompéia as menores. Para comparação, o gráfico da Figura 55 mostra as tendências do comportamento das amostras. No primeiro grupo as amostras com granulometria de brita, o segundo com a granulometria de areia e o último grupo de resultados a granulometria de argila.

Figura 55 - Resultados da Concentração de Rn por localidade



Com os valores de concentração de Rn, foram calculados os valores de atividade e atividade específica para cada amostra (Tabela 13).

Tabela 14– Atividade total e atividade específica a partir das análises por meio do CR-39

Amostra	Cod./Granulometria	Média da Concentração de Rn (Bq.m ⁻³)	A (Bq)	Massa (Kg)	Atividade/massa (Bq.Kg ⁻¹)
R. Bahia	PPDB	28956,75	9,11	0,24	38,78
	PPDA	26101,23	50,83	0,24	216,30
	PPDF	3635,63	3,69	0,25	14,76
P. Prado Lopes	PPL550B	7852,67	2,47	0,22	11,21
	PPL550A	10703,20	20,84	0,22	93,80
	PPL550F	4969,27	5,04	0,21	23,71
P. Lagoinha	PLCB	5417,20	1,70	0,22	7,74
	PLCA	12131,33	23,62	0,24	100,32
	PLCF	4311,10	4,38	0,23	18,79
P. Pompéia	PPB	1058,83	0,33	0,20	1,64
	PPA	1578,08	3,07	0,24	12,55
	PPF	495,07	0,50	0,17	3,02

Todas as amostras de todas as granulometrias foram dispostas da mesma forma, como mostrado na figura 30. A tabela 15 considera, portanto, a exalação do radônio, a partir da concentração dada pelo CR-39, para a área superficial de 0,38 m².

Tabela 15 - Resultados da concentração do CR39 em função da área superficial

Amostra	Cod./Granulometria	Média	Concentração/área superficial
R. Bahia	PPDB/BRITA	28956,75	75290,55
	PPDA/AREIA	26101,23	67865,92
	PPDF/ARGILA	3635,63	9453,02
P. Prado Lopes	PPL550B/BRITA	7852,67	20417,75
	PPL550A/AREIA	10703,20	27829,43
	PPL550F/ARGILA	4969,27	12920,61
P. Lagoinha	PLCB/BRITA	5417,20	14085,28
	PLCA/AREIA	12131,33	31542,71
	PLCF/ARGILA	4311,10	11209,31
P. Pompéia	PPB/BRITA	1058,83	2753,08
	PPA/AREIA	1578,08	4103,18
	PPF/ARGILA	495,07	1287,22
Engenho Nogueira	PENB/BRITA	2833,08	7366,30
	PENA/AREIA	2905,47	7554,52
	PENF/ARGILA	2324,40	6043,68

Mujahid S.A. e colaboradores, em 2005, desenvolveram um método para determinar os meios porosos usando o processo de difusão de Rn. Neste caso, os autores

usaram traçadores nucleares de estado sólido, também do tipo CR-39, para entender a concertação de Rn no experimento (Mujahid *et al.*, 2005).

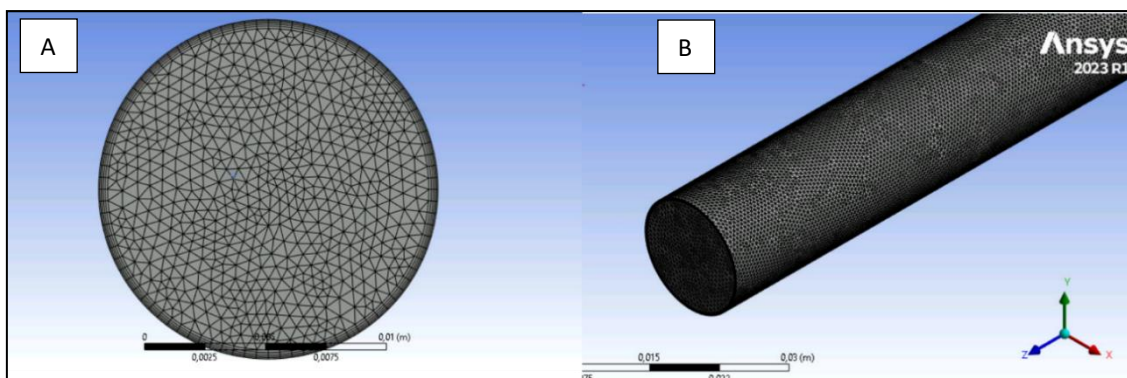
Usando o mesmo método, Ibrahim *et al.* (2018) determinaram a exalação e emanação de Rn em amostras de resíduos de mineração de urânio antes e depois do fracionamento. Esses autores, ainda estudando a dependência do tamanho do grão na exalação do Rn em resíduos sedimentares, notaram que o conteúdo de Ra no minério recém processado, estava uniformemente distribuído no grão. Após a lixiviação do urânio, via úmida, por ácido sulfúrico, concluíram que o 85% do Ra ainda permanecia nos grãos.

7.8. EXALAÇÃO DE RADÔNIO VIA CFD (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC*)

Diante dos resultados obtidos com a exalação em diferentes granulometrias em laboratório, foi aventada a realização de simulações computacionais via CFD para compreender teoricamente o experimento. Os experimentos sugeriram a hipótese de uma questão fluidodinâmica, de transporte do gás nas amostras, que poderia estar influenciando os resultados em algum grau. Assim, são apresentados aqui os principais resultados do modelo elaborado.

Os resultados, da malha que representa o domínio porosada amostra dentro do recipiente porta amostra, são mostrados na Figura 56. De acordo com a equação 13 o valor de k encontrado na calibração do experimento foi da ordem de grandeza de 10^{-10} m^{-2} , utilizando-se a vazão de 0,1 L/min nas condições de entrada nas amostras de brita e areia. Para a granulometria de argila, os valores de permeabilidade e velocidade obtidas são impraticáveis, assim como no experimento no circuito fechado de exalação.

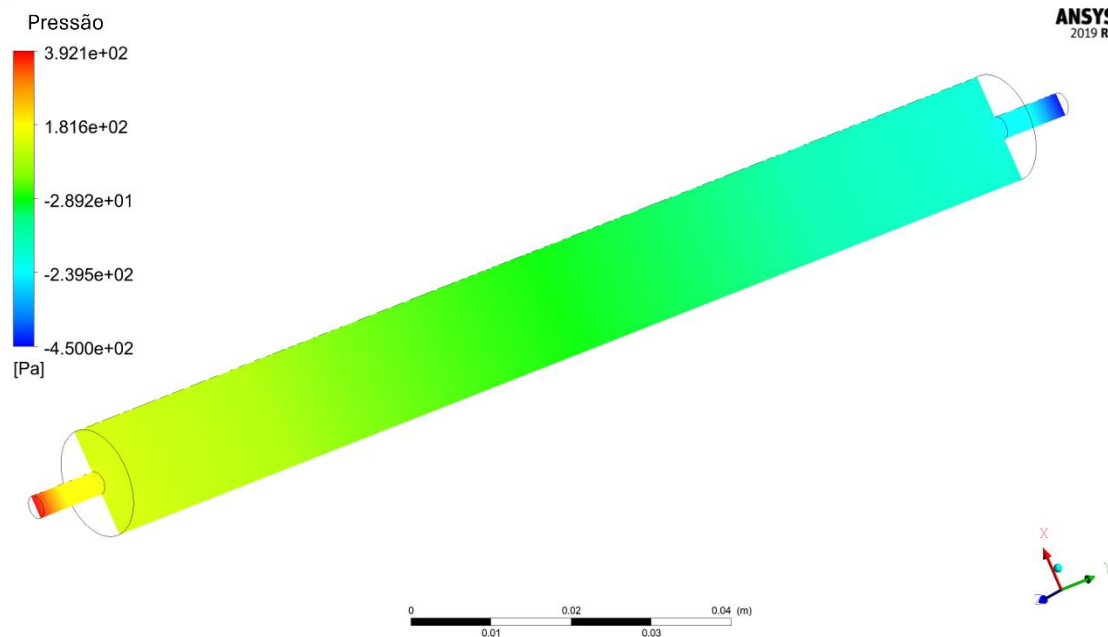
Figura 56 - Resultados preliminares da malha feita via simulação



Em A uma vista axial da malha e em B uma vista lateral da malha distribuída no tubo porta amostra.

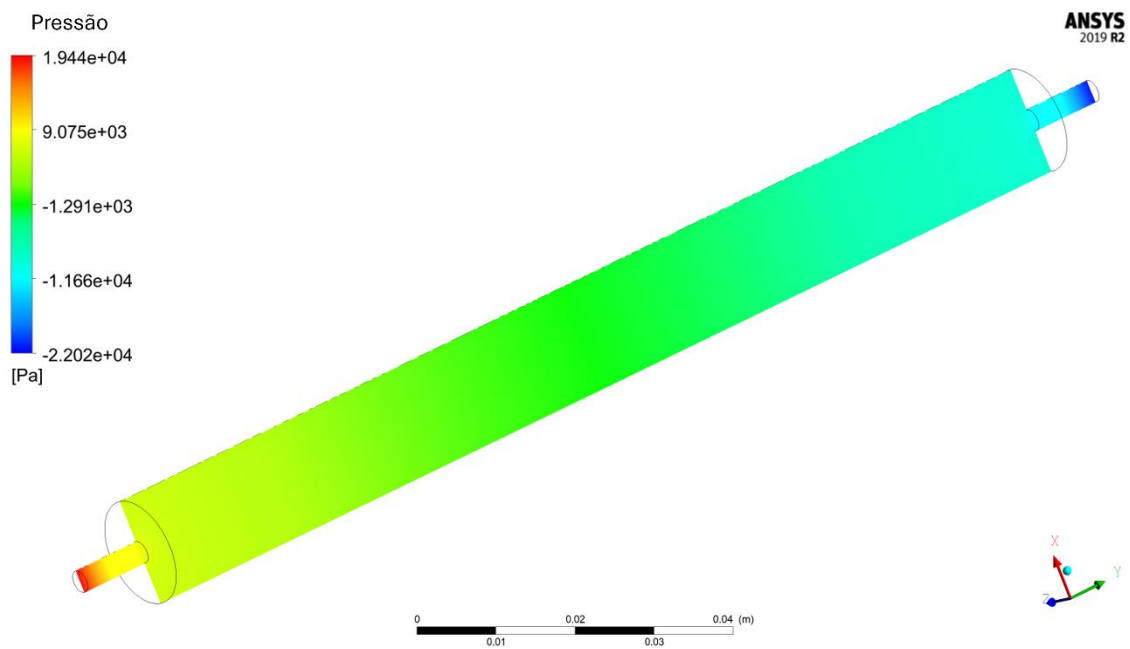
A figura 57 apresenta, em cores, as pressões dentro do portaamostra medidas via simulação. A diferença de pressão resultante foi de 842 Pa, enquanto no experimento laboratorial foi de 825 Pa (experimento de calibração para a simulação), valores bem próximos. Dessa forma, considera-se o modelo computacional como calibrado e validado.

Figura 57 - Resultado da simulação, via CFD, da amostra na granulometria de brita



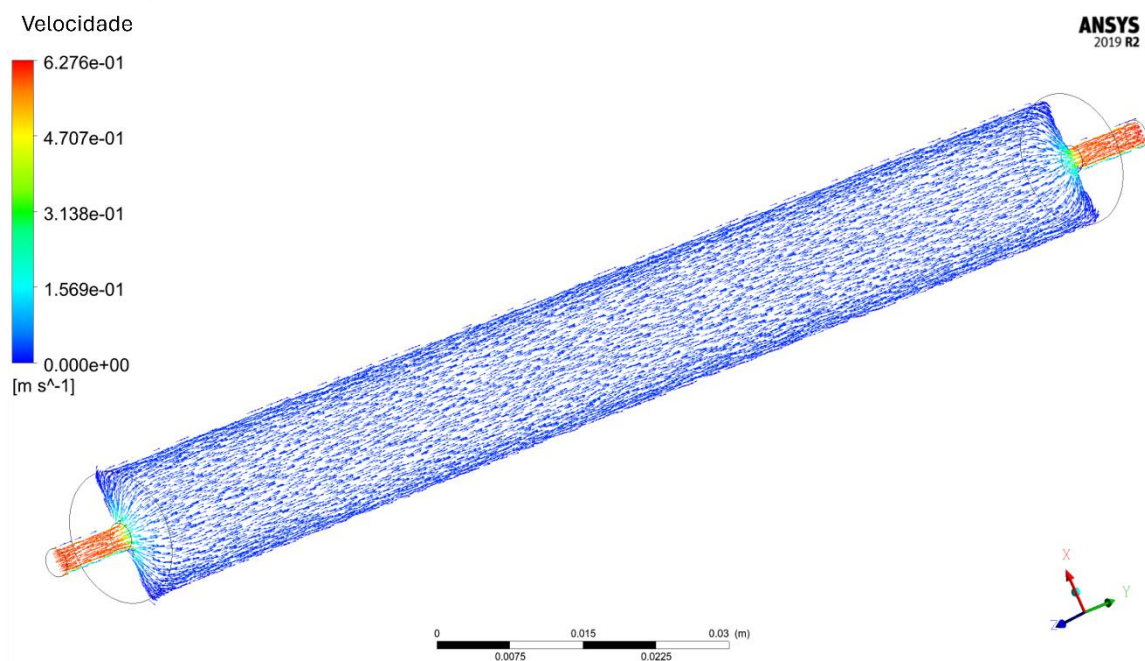
Com o modelo calibrado, foi possível perceber, que assim como no experimento, a simulação registrou uma queda de pressão bastante elevada na amostra com granulometria muito fina, sugerindo que o efeito de compactação que a argila causa resulta no impedimento de manter o fluxo de ar, invalidando o experimento. A figura 58 apresenta em cores e numericamente, a variação de pressão na amostra de argila. De acordo com os valores, conclui-se que os valores da pressão dentro do portaamostras são muito altos, muito maiores do que no modelo calibrado na ordem de 10^{+04} , enquanto que o primeiro (Fig. 57) esteve na ordem de 10^2 , como esperado.

Figura 58 - Resultado da simulação da pressão da argila via CFD



Os vetores de velocidade da amostra de argila, via simulação, estão na figura 59. Como esperado, as velocidades são maiores (setas vermelhas) em secções de diâmetro menor.

Figura 59 - Resultados da velocidade, via CFD, para amostra de granulometria brita



Modelagens computacionais como o Monte Carlo, por exemplo, são comumente citadas na literatura sobre o comportamento de exalação do Rn. Feng et al.

(2019) estudaram a difusão de radônio através de meios porosos combinando a teoria fractal e o método de Monte Carlo, ser uma técnica eficaz. Outras linhas de pesquisa utilizam simulações de Monte Carlo (GCMC) para simular a capacidade de adsorção de Rn em carvão ativado com diferentes tamanhos de poro (Deng et al., 2023).

8. CONCLUSÕES

Conforme o discutido ao longo do trabalho, algumas conclusões podem ser citadas. Todos os métodos de estudo de exalação de radônio para as diferentes granulometrias discutidos neste trabalho, conduzem à ideia da complexidade de se obter valores precisos. Os diversos fatores que devem ser considerados para a análise de resultados de exalação, tais como geologia, temperatura, umidade, tamanho de grão, posição do átomo de rádio no grão, trajeto de recuo dos átomos pais e filhos após decaimento, dentre outros, justifica a continuidade de pesquisas para diferentes ambientes.

De forma a responder os objetivos propostos as conclusões do trabalho são apresentadas nos itens a seguir:

- A metodologia da medida do diâmetro utilizada, para fins de comparação, mostrou-se eficaz.
- A composição mineralógica e elementar das amostras confirmaram as características de rochas gnaisse-graníticas.
- A exalação de Rn em diferentes granulometrias de rochas foram analisadas. A rua da Bahia apresentou as maiores concentrações de radônio, em especial, em amostras na granulometria de areia. Entre as amostras das pedreiras, as alíquotas da Prado Lopes apresentaram as maiores concentrações.
- Portanto, as populações que vivem próximos aos locais amostrados possuem maior probabilidade de estar expostos a maiores níveis de radiação proveniente do radônio. Contudo, diversos fatores tais como tempo de permanência nos ambientes internos, fluxo ventilatório, permeabilidade das rochas e do solo, temperatura, dentre outros, devem ser levados em consideração para o estudo da dose.
- A hipótese teórica de que as menores granulometrias exalam mais radônio por terem uma área superficial maior não foi completamente satisfeita com os experimentos realizados, visto que a argila, menor granulometria testada, exalou a menor concentração do gás em diversos cenários e, mesmo nas comparações entre as frações brita e areia, a brita apresentou maior exalação (ou similar) em

alguns outros cenários. O que se pode concluir, com os dois experimentos, é que a fração brita tende a apresentar exalação considerável, que pode superar ou ser similar à exalação em frações menores (areia) ou até mesmo argila (considerando a interferência de efeitos fluidodinâmicos, como suposto nesta pesquisa). É importante lembrar que materiais de origem mineral nessas frações (brita e areia) são costumeiramente manipulados por trabalhadores em diversos ramos, como a construção civil.

- O circuito de exalação com o *AlphaGuard* pode ser utilizado como método padrão para o estudo da exalação de radônio em rochas, até granulometrias de areia (cerca de 16#). Amostras mais finas apresentaram tendência de serem compactadas no porta amostras, não permitindo a passagem do fluxo de ar necessário. Dessa forma, trabalhos futuros que consigam indicar constantes de proporção entre as diferentes granulometrias, é possível utilizar extrapolações para valores mais finos.
- As simulações via CFD foram concordantes com os experimentos laboratoriais, indicando os desafios em estudar a exalação de radônio em granulometrias muito finas.
- Com o modelo calibrado e validado, a simulação em CFD poderia ser utilizada para estudos da exalação do radônio nessa configuração de experimento – para grãos finos-, considerando as características individuais de cada amostra, embora sem a necessidade de se realizar o experimento laboratorial sistematicamente. O CFE, então, confirmou a hipótese de auto-compactação da amostra e consequente redução da exalação.

REFERÊNCIAS

- ABUMURAD, K. M.; ISMAIL, A. M.; ABU-SAFIA, H. A photometry method for measuring tracks density on SSNTDs. **Radiation Measurements**, v. 40, p. 303–306, 2005.
- ADEPELUMI, A. A.; AJAYI, T. R.; AKO, B. D. Radon soil gas as a geological mapping tool: case study from basement complex of Nigeria. **Environ. Geol.**, v. 48, p. 762 - 770. 2005.
- AFONSO, J. C. Radônio. **Química Nova na Escola**, v. 32, n. 4, p. 267 -268, nov. 2009.
- ALKMIM, F. F; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, p. 29-58, 1998.
- ALMEIDA, F. F. M. O Cráton de São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- ALVES, J. V. **Seminário: ocorrência de urânio no arqueano- Pré-Cambriano Inferior**. Disciplina: Geologia Global e Evolução Crustal, coordenador: Eduardo A. Ladeira. Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, Pós-graduação em Geologia, UFMG, 1988.
- ALVES, J. V. **Seminário: Ouro e urânio em conglomerados com seixos de quartzo**. Disciplina: Metalogênese, coordenador: Eduardo A. Ladeira. Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, Pós-graduação em Geologia, UFMG, 1989.
- ALVES, Mara R. F. V.; SOUZA, Susana O. **Technological options for disposal of waste containing TENORM of oil industry in Brazil**. Waste Management, [S.l.], p. 1-10, 2012.
- AMARAL, P. G. Q. **Caracterização radiométrica e de exalação de radônio em rochas ornamentais silicáticas beneficiadas no estado do Espírito Santo**. 2011. 194 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/280d0ec6-0640-43c5-a3ba-16793b7c4b91/content>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- AMES, L. L. *et al.* Uranium and radium sorption on amorphous ferric oxyhydroxide. **Chemical Geology**, v. 40, p. 135-148, 1983a.
- AMES, L. L *et al.* Sorption of uranium and radium by biotite, muscovite, and phlogopite. **Clays and Clay Minerals**, v. 31, p. 343-351, 1983b.
- AMES, L. L *et al.* Sorption of trace constituents from aqueous solutions onto secondary minerals, II. Radium. **Clays and Clay Minerals**, v. 31, p. 335-342, 1983c.
- ANJOS, R. M. *et al.* Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. **Radiation Measurements**, n. 39, p. 245-253, 2005.

APPLETON, J. D. Radon: sources, health risks, and hazard mapping. **Royal Swedish Academy of Sciences**. v. 36, n. 1, p. 85 - 89, fev. 2007.

AZEVEDO, L. R. *et al.* Caracterização petrográfica de índices físicos e da exalação de radônio em rochas ornamentais do estado do Ceará, Brasil. **Geociências**, UNESP, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 423-440, 2015.

AZEVEDO, U. R. **Patrimônio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**: potencial para a criação de um Geoparque da UNESCO. 2007, 90 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. Disponível em: <http://geoturismobrasil.com/artigos/tese%20ursula%20cap1-6.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

BABINSKI, M.; CHEMALE JR., F.; VAN SCHMUS, W.R. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: CONGR. BRAS. GEOQUIM., 3., 1991, São Paulo, **Anais...** São Paulo: SBGq, v. 1, 1991., p. 628-631.

BABINSKI, M.; CHEMALE JR., F.; VAN SCHMUS, W.R. A idade das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e da Austrália. In: SIMP. CRATON SÃO FRANCISCO, 2., 1993, Salvador. **Anais...** Salvador: SBG-BA,SE/SGM, 1993, p. 152-153.

BALL, C. J. **An introduction to the Theory of Diffraction**. New York: Pergamon Press, 1971.

BARNICOAT, I. C. *et al.* Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. **Nature**, v. 386, p. 820-824, 1997.

BASKARAN, M. **Radon**: a tracer for geological, geophysical and geochemical studies. Wayne State University, Detroit, USA. Editora: Springer Geochemistry. 2016.

BETHE, H. A. **In Handbook of Physics**. Berlin: Springer, 1933. v. 24, p. 273.

BONFIM, S. A. **Radônio como indicador de contaminação por NAPLs**. 2018. 66f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/3f3eeb37-b53b-45c1-ae58-d3c2e289b07a/content>. Acesso em: 28 abr. 2021.

BONOTTO, D. M. **Radioatividade nas águas**: da Inglaterra ao Guarani. São Paulo: Editora UNESP, 2004.

CAMARGO, I. M. C. **Determinação da concentração de isótopos naturais de urânio e tório em amostras de água**. 1994. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciências – área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo, 1994.

CHAUHAN, R. P. Passive and active techniques for radon measurement in indoor environments. **Journal of Environmental Research and Development**, v. 8, n. 3A, p. 763–770, 2014.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Norma CNEN NN 3.01: **Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação**. Resolução CNEN nº 323, de 28 de março de 2024. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 abr. 2024.

CUNEY, M. The extreme diversity of uranium deposits. **Mineralium Deposita**, v. 44, n. 1, p. 3-9, 2009. ISSN 1432-1866.

CUNEY, M.; KYSER, T. K. **Recent and Not-so-recent Developments in Uranium Deposits and Implications for Exploration**. Mineralogical Association of Canada. ISBN 9780921294481, 2009.

DENG, X. *et al.* **Investigation of the effect of the key pore size on the radon adsorption performance by combining grand canonical Monte Carlo and activated carbon modification experiments**. Applied Surface Science, 2023.

DICK, W.; JONASSON, I. R. Book radon. Handbook of Exploration Geochemistry, Elsevier Science, v. 7, 2000.

DUVAL, J. S. *et al.* **Geology and indoor radon in Schools of the Palos Verdes Peninsula Unified School District, Palos Verdes Peninsula, California**; Open File Report 2004–1050; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2004

DURRANI, S. A.; BULL, R. K. **Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Applications**. Pergamon Press, 1987.

EISENBUD, M.; GESSEL, T. **Environmental radioactivity**. San Diego, Califórnia, 1997.

EGIDI, H., HULL, C. **NORM and TENORM**: procedures, users and proposed regulations. In: Proceedings of the Health Physics Society 1999 (32nd) Midyear Topical Meeting, 24–27 January, Albuquerque, New Mexico, p. 1, 1999.

FLEISCHER, R. L.; PRICE, P. B.; WALKER, R. M. **Nuclear Tracks in Solids**. Berkley: University of California Press, 1975.

GABELMAN, J. W. **Migration of uranium and thorium-Exploration science**: Tulsa, Okla. Studies in Geology, American Association of Petroleum Geologists, n. 3, 1977, 168 p.

HASSAN, N. M. *et al.* Radon migration process and its influence factors: review. **Japanese Journal of Health Physics**. N. 44, n. 2, p. 2018 – 231, 2009.

IBRAHIM, E. M. *et al.* Dependence of radon exhalation on grain size of sedimentary waste. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, p. 534, 2018.

IELSCH, G. *et al.* Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: Methodology and first application to region Bourgogne. **Journal of Environmental Radioactivity**, Elsevier, v. 101, p. 813-820, 2010.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (Iphan). **História de Belo Horizonte**. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/1832/>. Acesso em 18 abr. 2020.

JEONG, T. W. *et al.* CR-39 track detector for multi-MeV ion spectroscopy. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 2152, 2017.

KLINK, T. *et al.* Characterisation of the gas transport properties of porous materials by determining the radon diffusion coefficient. **Materials and Structures**, v. 32, p. 749–754, 1999.

KUMAR, A.; CHAUHAN, R. P. Active and passive measurements of radon diffusion coefficient from building construction materials. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, p. 251–257, 2014.

LARSEN, E. S. Jr.; PHAIR, G. **The distribution of uranium and thorium in igneous**. In: FAUL, H. Nuclear Geology. New York: John Wiley and Sons, 1954. p.75-89.

LI, X. *et al.* **Radon exhalation and temperature**. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE RADIOATIVIDADE AMBIENTAL, 2022, Pequim. Anais. Pequim: IAEA, p. 123-130, 2022a.

LOTTERMOSER, B. G. **Mine wastes**. 3. ed. Berlin: Springer, 2010.

LOWRY, J. D.; BRANDOW, J. E. Removal of radon from water supplies. **Journal of Environmental Engineering**, v. 111, p. 511-527, 1985.

MALINOWSKA, A. *et al.* Characterization of solid state nuclear track detectors of the polyallyl-diglycol-carbonate (CR-39/PM-355) type for light charged particle spectroscopy. **Review of Scientific Instruments**, v. 85, p. 123505, 2014.

MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**. W.H. Freeman, 1983.

MARKKANEN, M.; ARVELA, H. Radon emanation from soils. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 45, p. 269–272, 1992.

MATOLÍN, M.; KOUDELOVÁ, P. Radon in soil gas - investigation and data standardisation at radon reference sites, Czech Republic. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 130, n. 1, p. 52 - 55, abr. 2008.

MEGUMI K. Radioactive disequilibrium of uranium and actinium series nuclides in soil. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. 87, p. 3.677–3.682, 1979.

MEGUMI K., MAMURO T. Concentration of uranium series nuclides in soil particles in relation to their size. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, n. 2, p. 353–356, 1977.

MELO, A. K. S. **Análise das propriedades ópticas dos aerossóis na atmosfera sobre Natal/RN a partir de dados dos sistemas CALIPSO e DUSTER**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MUJAHID, S. A. *et al.* Determination of porosity of different materials by radon diffusion. **Radiation Measurements**, v. 40, p. 106–109, 2005.

NARULA, A. K. *et al.* Study of radon diffusion from RHA-modified ordinary Portland cement using SSNTD technique. **Radiation Measurements**, v. 50, p. 109–111, 2013.

NAZAROFF, W. W. Radon transport from soil to air. **Reviews of Geophysics**, v. 30, n. 2, p. 137-160, 1992.

NAZAROFF, W.W. & NERO Jr., A.V. **Radon and its decay products in indoor air**. Wiley-Interscience, New York, 1988.

NOCE, C. M. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 1995. 128 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

NOCE, C. M. *et al.* A sequência vulcano-sedimentar do Grupo Nova Lima na região de Piedade do Paraopeba, borda oeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Rev. Bras. Geoc.**, v. 22, (no prelo), 1992.

NOCE, C.M, TEIXEIRA W.; MACHADO, N. Geoquímica dos gnaisses TTGs e granitóides neoarqueanos do complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, 1997.

PARIZZI, Maria Giovana. **Riscos geológicos e hidrológicos no município de Belo Horizonte, MG**. Geological and hydrological risks in Belo Horizonte, MG.

PAPACHRISTODOULOU, C.; IOANNIDES, K.; SPATHIS, S. The effect of moisture content on radon diffusion through soil: assessment in laboratory and field experiments. **Health Physics**, v. 92, p. 257, 2007.

RAYNER-CANHAM, M. F.; RAYNER-CANHAM, G. W. (2004). Rutherford, the “True Discoverer of Radon”. **Bulletin for the History of Chemistry**, Volume 29, Number 2, pp. 89–90.

REIS, Rócio Glória dos. **NORM: guia prático**. 2016. 236 p.

SAHOO, B. K.; MAYYA, Y. S. Two dimensional diffusion theory of trace gas emission into soil chambers for flux measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 9, p. 1211–1224, 2010.

SAKODA, A.; ISHIMORI, Y.; YAMAOKA, K. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 69, n. 10, p. 1422-1435, 2011.

SCHUMANN, R. R.; GUNDERSEN, L. C. S. Geologic and climatic controls on the radon emanation coefficient. **Environmental International**, v. 22, p. 439–446, 1996.

SJÖLANDER P. **Specific activity in size-fractionated alum-shales effects of particle size**. M.Sc. Thesis, Department Of Radiation Physics, University of Gothenburg, p 29, 2008.

SOMOGYI, G. *et al.* Revision of the concept of registration threshold plastic track detectors. **Nuclear Instruments and Methods**, v. 109, p. 129–141, 1976.

STOULOS, S.; MANOLOPOULOU, M.; PAPASTEFANOU, C. Assessment of Natural Radiation Exposure and Exhalation from Building Materials in Greece. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 69, p. 225-240, 2003.

TALBOT, D. K. *et al.* A comparison of field and laboratory analytical methods for radon site investigation. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 65, p. 79 - 90, Keyworth, Reino Unido. 1998.

TAKAHASHI, L. C. **Proposta de nova metodologia para cálculo de dose da exposição ao radônio e progênie.** 2021. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

TAKAHASHI, L.C.; SANTOS, B. Calibration of Solid State Nuclear Track Detectors CR-39 for radon study in a high concentration underground mines. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 09, n. 01A, p. 01-13, 2021.

TANNER, A. B., **Radon migration in the ground: a supplementary review.** Proceedings of Natural Radiation Environment III: Springfield. US DOE, v. 1, p. 5-56. Report CONF – 780422, 1980.

TAVEIRA, N. F. Study of the relationship between mineralogical types and potential radon in rocks of the region of Serra do Gandarela – Quadrilátero Ferrífero-MG. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 09, n. 01A, p. 01-19, 2021

TCHORZ-TRZECIAKIEWICZ, D. E.; KOZŁOWSKA, B.; WALENCIK-ŁATA, A. **Seasonal variations of terrestrial gamma dose, natural radionuclides and human health.** Chemosphere, v. 310, 2023.

TUCCIMEI, P. *et al.* **Radon Exhalation Rates of Building Materials: Experimental, Analytical Protocol and Classification Criteria.** In: Building materials: Properties, Performance and Applications, Frank Columbus Editore, Nova Science Publishers. Hauppauge, NY, 2009

TURNER, J. E. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection.** New York, 1995.

VAN DER PAL, M. *et al.* **Measurements and modelling of combined diffusive and advective radon transport in porous building materials.** Radioactivity in the Environment, v. 7, p. 371–380, 2005.

VERDELOCCO, S. *et al.* **Radon-222 Monitoring in the Joint Research Centre – ISPRA.** The Science of the total environment, p. 367-368, 2001.

VILLAÇA, J. N. **Projetos do Quadrilátero Ferrífero.** Belo Horizonte: NUCLEBRÁS, E. R. D. B. H., v. I, 1976. 98 p. Relatório de Síntese.

NIKOLOPOULOS, D., *et al.* Factors affecting indoor radon concentrations of Greek dwellings through multivariate statistics. **Journal of Physical Chemistry & Biophysics**, v. 4, n. 2, 2014.

WANG, J.; WARD, I. C. CFD modeling of radon transport in soil and its entry into buildings. **Building and Environment**, v. 35, n. 6, p. 615–631, 2000.

WEIGEL, F. *et al.* **Radon**: Chemiker Zeitung. v. 102, p. 287-299. 1978.

YE, Y. J. *et al.* A universal laboratory method for determining physical parameters of radon migration in dry granulated porous media. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 177, p. 135–141, 2017.

YU, B.; ZOU, M.; FENG, Y. Permeability of fractal porous media by Monte Carlo simulations. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 2787–2794, 2005.

ZHANG, L. *et al.* Accurate measurement of the radon exhalation rate of building materials using the closed chamber method. **Journal of Radiological Protection**, v. 32, p. 315–323, 2012.

ZHANG, Y. *et al.* Energy calibration of a CR-39 nuclear-track detector irradiated by charged particles. **Nuclear Science and Techniques**, v. 30, p. 87, 2019.

ZHENG, Q.; LI, X. P. Gas diffusion coefficient of fractal porous media by Monte Carlo simulations. **Fractals**, v. 23, p. 1–8, 2015.

ZHENG, Q. *et al.* A diffusivity model for gas diffusion through fractal porous media. **Chemical Engineering Science**, v. 68, p. 650–655, 2012.