

DIEGO DIEGUES FRANCISCA

**UTILIZAÇÃO DO RADONMAPPER NA AVALIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO
AO GÁS RADÔNIO EM AMBIENTES DE MINERAÇÃO**

Divisão de Biblioteca da EPUSP
Biblioteca de Engenharia de Minas

São Paulo
2014

DIEGO DIEGUES FRANCISCA

**UTILIZAÇÃO DO RADONMAPPER NA AVALIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO
AO GÁS RADÔNIO EM AMBIENTES DE MINERAÇÃO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas do curso de graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston

São Paulo
2014

TF-2014
F847m

FICHA CATALOGRÁFICA

Lyra 2667460

H20140

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009825

Francisca, Diego Diegues

Utilização do radonmapper na avaliação de exposição ao gás radônio em ambientes de mineração / D.D. Francisca. -- São Paulo, 2014.

53 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Segurança em mineração 2.Riscos ocupacionais (Estudo comparativo; Metodologia; Avaliação) 3.Radônio I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Dedico este trabalho ao meu orientador,
Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston, à Profa.
Dra. Maria Renata Machado Stellin, aos
meus pais e aos colaboradores do
LACASEMIN.

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador, Dr. Sérgio Médici de Eston pela confiança e por todas as oportunidades que me apresentou ao longo destes anos acadêmicos.

Ao grande amigo e mentor, Me. Michiel Wichers Schrage por ter me auxiliado muito na realização deste projeto.

Aos colaboradores da Prominer Projetos Ltda., George, Michelle, Marcos, Allan, Caio e Gabriel pela companhia e auxílio em todas as medições.

Gostaria de agradecer também a toda a equipe do LACASEMIN – Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração, pelo companheirismo e dedicação, e um agradecimento em especial à Profa. Dra. Maria Renata Machado Stellin pelo carinho, confiança e atenção em todos estes anos de trabalho.

Aos meus amigos pelo apoio e pelas risadas nos momentos de descontração.

Não poderia deixar de agradecer também ao grande mestre Ademar Yoshitake Tahira que em vida sempre incentivou e acreditou em mim, e que agora me acompanha sempre em alma e pensamento.

E por último, a maior gratidão de todas, a gratidão de um filho aos pais que dedicaram uma vida para que eu pudesse estruturar a minha própria. Antonio Francisca e Lucélia Diegues de Oliveira, sem vocês, nenhuma de minhas conquistas seria possível e nenhum esforço faria sentido. Obrigado pelo amor incondicional. Amo vocês.

*"As dificuldades são o aço estrutural
que entra na construção do caráter."*

Carlos Drummond de Andrade

RESUMO

Nas atividades que são desenvolvidas na indústria em geral, existem muitas condições perigosas às quais os trabalhadores estão expostos, dentre os agentes físicos, existem as radiações ionizantes que podem causar câncer. Grande parte da energia radioativa recebida pelos seres humanos é proveniente de fontes naturais como por exemplo o gás radônio. Em ambientes de mineração a exposição a este gás pode ser potencialmente maior. O objetivo deste trabalho é verificar a aplicabilidade de uma metodologia de análise do perigo da exposição ao gás radônio em ambientes de mineração e também, verificar se é possível estabelecer uma relação entre faixa granulométrica dos materiais lavrados com o potencial de emissão deste gás radioativo, definindo um modelo de comportamento. A metodologia utilizada se mostrou bastante prática e eficiente, porém, é necessário o ajuste do tempo de amostragem. Os resultados mostraram que o comportamento logarítmico é bastante eficaz para definir a relação entre a faixa granulométrica dos materiais e os níveis de radônio emanados. Em dois locais em que as medições foram realizadas, o potencial chega a ser 10 vezes maior do que os níveis de exposição aplicados em outros países mostrando que a preocupação com este agente químico deve ser levada em consideração pelos diversos empreendimentos em que houver a possibilidade de exposição.

Palavras-chave: Mineração; Radônio; Higiene Ocupacional.

ABSTRACT

In activities that are developed in the industry, there are many hazards to which workers are exposed, and among the physical agents, there are ionizing radiation that can cause cancer. Much of the radiation energy received by humans comes from natural sources such as radon gas. In mining environments, exposure to this gas can be potentially increased. The objective of this project is to verify the applicability of a methodology to analyze the danger of exposure to radon gas in mining environments and also, to find out if it's possible to establish a relation between granulometry of the mining material and the gas emanation, defining a behavior model. The methodology proved quite practical and efficient, however, it is necessary to adjust the sampling time. The results showed that the logarithmic behavior is very effective to define the ratio between the particle size and radon emanating levels. In two sites at which measurements were taken, the danger potential becomes 10 times higher than the levels of exposure considered in other countries. This implies in concern with this chemical agente, and that it must be taken into consideration in workplaces where there is the danger of exposure.

Keywords: Mining; Radon; Occupational hygiene.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Séries radioativas naturais	15
Figura 2 – Difusão de radônio em função da permeabilidade.....	17
Figura 3 – Exemplo de pilha de agregados	20
Figura 4 – RadonMapper	21
Figura 5 – RadonMapper detalhado.....	21
Figura 6 – Anemômetro TSI Airflow modelo AV-2	22
Figura 7 – RadonMapper em modo ativo e sentido de fluxo do ar	22
Figura 8 – RadonMapper em modo ativo (equipamento central)	23
Figura 9 – Haste de metal utilizada nas medições	23
Figura 10 – Ponto de medição em relação à direção do vento.....	25
Figura 11 – Inserção da haste de metal na pilha	25
Figura 12 – Tubo de captação acoplado	26
Figura 13 – Medição sendo realizada	26
Figura 14 – Gráfico dos valores instantâneos medidos na pedreira A.....	28
Figura 15 – Relação entre granulometria e nível de radônio na pedreira A.....	29
Figura 16 – Gráfico dos valores instantâneos medidos na pedreira B.....	30
Figura 17 – Relação entre granulometria e nível de radônio na pedreira B.....	31
Figura 18 – Gráfico dos valores instantâneos medidos na pedreira C.....	32
Figura 19 – Relação entre granulometria e nível de radônio na pedreira C.....	33
Figura 20 – Gráfico dos valores medidos na mineração subterrânea	34
Figura 21 – Comparativo entre as médias obtidas em cada local de medição na mineração subterrânea	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do radônio.....	14
Tabela 2 – Concentrações médias de urânio em alguns tipos de rochas	16
Tabela 3 – Fontes de radiação por pessoa no Reino Unido	18
Tabela 4 – Risco de morte por câncer de pulmão por exposição de 200 Bq/m ³ de radônio durante uma vida inteira	18
Tabela 5 – Níveis de ação e limites de exposição ao radônio em diversos países	19
Tabela 6 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na pedreira A.....	27
Tabela 7 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na pedreira B.....	29
Tabela 8 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na pedreira C	31
Tabela 9 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na mineração subterrânea.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WHO	<i>World Health Organization</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
NRPB	<i>National Radiological Protection Board</i>
LACASEMIN	Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Radiação alfa
β	Radiação beta
Ra	Elemento rádio
${}^4\text{He}_2$	Partícula alfa
Rn	Elemento radônio
I	Elemento iodo
Xe	Elemento xenônio
${}^0\text{e}_{-1}$	Partícula beta
γ	Radiação gama
Co	Elemento cobalto
Ni	Elemento níquel
K	Kelvin
J	Joule
Pa	Pascal
W	Watt
g	grama
m	metro
Bq/m ³	Becquerel por metro cúbico
R ²	Coeficiente de aderência da curva

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
OBJETIVO.....	12
JUSTIFICATIVA	12
1. REVISÃO DA LITERATURA	13
1.1. RADIAÇÃO IONIZANTE PROVENIENTE DOS ÁTOMOS	13
1.2. O RADÔNIO	14
1.3. FONTES DE EMISSÃO E LIBERAÇÃO DO GÁS RADÔNIO.....	16
1.4. O RADÔNIO EM AMBIENTES DE MINERAÇÃO	17
1.5. VALORES DE REFERÊNCIA PARA EXPOSIÇÃO AO RADÔNIO	17
1.6. EFEITOS BIOLÓGICOS DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
2.1. LOCAIS DE MEDIÇÃO	20
2.2. EQUIPAMENTOS E INFRAESTRUTURA UTILIZADOS	20
2.3. PREPARAÇÃO DO RADONMAPPER	22
2.4. METODOLOGIA APLICADA.....	24
3. RESULTADOS	27
3.1. PEDREIRA A	27
3.2. PEDREIRA B	29
3.3. PEDREIRA C	31
3.4. MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA.....	33
4. DISCUSSÃO	35
5. CONCLUSÕES.....	37
6. REFERÊNCIAS	39

INTRODUÇÃO

Cada vez mais, a preocupação com a segurança dos trabalhadores tem sido crescente. Dentre os problemas a serem citados estão: ruído, vibrações, gases tóxicos, poeiras, agentes químicos e radiações. Estas últimas podem ser subdivididas entre radiações ionizantes e não ionizantes.

As radiações alfa, beta e gama são exemplos de radiações ionizantes, ou seja, têm energia superior à ligação dos elétrons de um átomo. Essas radiações são provenientes de núcleos atômicos muito energéticos que contêm excesso de partículas ou de carga que são emitidas a partir do processo de tentativa de estabilização dos elementos radioativos.

Esses elementos são divididos em três famílias radioativas naturais de acordo com seu decaimento, são elas: série do urânio, série do actínio e a série do tório. As três séries têm como elemento intermediário o gás radônio, cada uma delas com uma massa atômica distinta. Estes isótopos são gases inertes que emitem partículas alfa como produto de seu decaimento e esta é altamente energética, podendo gerar mutação genética em células humanas quando entram em contato com o DNA. Por serem derivados do urânio e do tório, as rochas e o solo emanam esses gases radioativos.

Os trabalhadores de minerações respiram um gás que é potencial causador de câncer de pulmão, pois nestes ambientes de trabalho, o contato das pessoas com material proveniente de rochas fraturadas e com o solo propriamente dito é muito maior do que em outros campos da indústria, assim, a exposição nestes ambientes é muito mais preocupante.

Uma visão dos efeitos do radônio pode ser encontrada nos dados divulgados pelo *World Health Organization* (WHO), órgão da Organização das Nações Unidas (ONU). O documento final do seu *International Radon Project* afirma que o radônio é a segunda maior causa de câncer de pulmão no mundo, atrás apenas do cigarro (ZEEB, 2007).

OBJETIVO

Este estudo possui duas etapas, a primeira, visa apresentar e avaliar uma proposta de metodologia de medição da exalação de gás radônio em matérias primas minerais, principalmente areia e brita em pilha e no campo (em pedreiras). A segunda etapa tem como objetivo estabelecer uma relação estatística entre a granulometria dos materiais pré-usina e a quantidade de gás radônio emitido.

JUSTIFICATIVA

Estabelecer esta metodologia e este parâmetro é importante do ponto de vista da higiene ocupacional e da engenharia de segurança do trabalho, pois, a partir deles, estudos podem ser desenvolvidos para aprimorar a detecção das condições perigosas e o controle dos riscos associados ao gás radônio.

1. REVISÃO DA LITERATURA

Conceitos sobre radiação foram baseados nas publicações do CNEN em sua “apostila educativa: Radioatividade” (CARDOSO, 2004) e na apostila da USP utilizada no curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho na disciplina “Higiene do Trabalho – Parte B” (PEREIRA, 2013).

1.1. RADIAÇÃO IONIZANTE PROVENIENTE DOS ÁTOMOS

Dentre os diversos elementos químicos encontrados na natureza, alguns possuem em sua estrutura atômica uma quantidade excessiva de energia armazenada no núcleo. Estes elementos tendem a se estabilizar emitindo partículas e ondas eletromagnéticas, sofrendo o fenômeno conhecido por decaimento radioativo.

Estas emissões, por possuírem alto poder energético, podem produzir ionização nos átomos dos elementos que compõem a matéria orgânica, por esta razão, são chamadas de radiações ionizantes.

As partículas emitidas, por sua vez, são compostas por elementos que possuem massa e uma energia associada, estas são denominadas alfa (α) ou beta (β), de acordo com a sua estrutura.

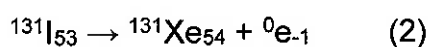
As partículas do tipo alfa são lançadas pelos átomos com excesso de partículas em seus núcleos, estas são compostas por 2 prótons e 2 nêutrons, correspondente ao núcleo do gás hélio. Neste caso, como existe a alteração da proporção de prótons/nêutrons, ocorre a transformação de um elemento químico em outro, como no exemplo da eq. (1). Este tipo de emissão possui um curto alcance em condições normais, e grande quantidade de energia armazenada.

Exemplo:



As partículas do tipo beta são lançadas pelos átomos com excesso de nêutrons quando, no processo de estabilização, no caso de excesso de cargas negativas, ocorre a conversão de um nêutron em um próton (emissão de partícula beta negativa) ou quando, no caso de excesso de cargas positivas, ocorre a conversão de um próton em nêutron (emissão de partícula beta positiva ou pósitron). Neste caso, como a proporção prótons/nêutrons e a carga do elemento é alterada, há a transformação de um elemento químico em outro, como no exemplo da eq. (2). O alcance deste tipo de emissão é maior, e a energia armazenada é menor quando comparada com as emissões do tipo alfa.

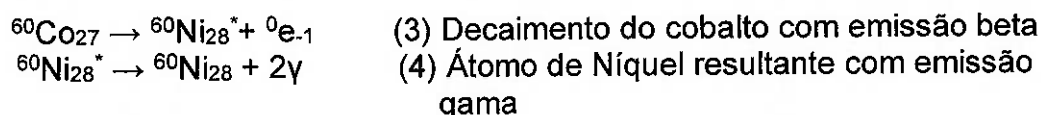
Exemplo:



As ondas eletromagnéticas emitidas neste fenômeno são da mesma natureza da luz e das ondas de transmissão de rádio e TV, elas não possuem

massa e se propagam a uma velocidade de aproximadamente $3,0 \times 10^8$ m/s independentemente de sua carga energética, no decaimento radioativo, esta emissão é conhecida como radiação gama (γ) e são emitidas quando, mesmo após a emissão de partículas alfa ou beta, o núcleo resultante ainda apresentar um excesso de energia, como no exemplo das eq. (3) e (4). Neste caso, ocorre apenas a mudança de nível energético, sem alterar a proporção prótons/nêutrons, o elemento químico não será transformado em outro.

Exemplo:



1.2. O RADÔNIO

O elemento químico radônio (Rn) é um gás nobre que está presente nas três séries de decaimento naturais dos elementos radioativos como mostra a Figura 1 (CARDOSO, 2004). As propriedades físicas deste elemento estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do radônio

Estado da matéria	Gás
Ponto de fusão	202 K
Ponto de ebulição	2113,3 K
Entalpia de fusão	3,247 kJ/mol
Entalpia de vaporização	18,10 kJ/mol
Pressão de vapor	1 Pa a 110 K
Calor específico	84 J/(kg.K)
Condutividade térmica	0,00364 W/(m.K)
1º potencial de ionização	1037 kJ/mol

Fonte: Hayness (2011)

Este elemento é encontrado em três formas isotópicas na natureza, o radônio-222 (${}^{222}\text{Rn}$) com meia vida de 3,8 dias, chamado de gás radônio, o radônio-220 (${}^{220}\text{Rn}$) com meia vida de 54,5 segundos, chamado de gás torônio e o radônio-219 (${}^{219}\text{Rn}$) com meia vida de 3,9 segundos, chamado de gás actínion, este último em quantidades desprezíveis na natureza (GAVIOLI, 2009).

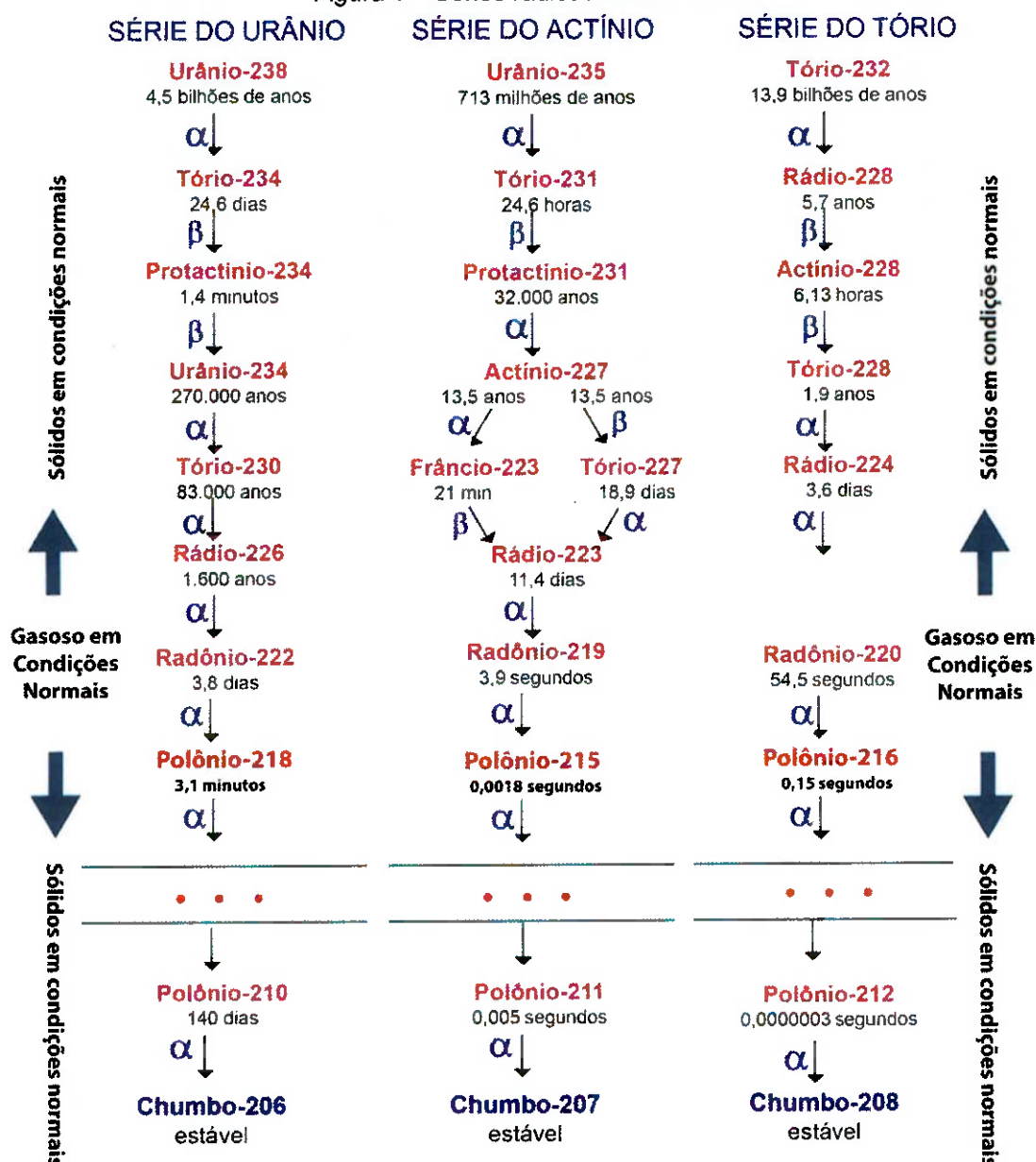
Pode-se dizer que o ponto mais importante a se considerar quando o radônio é comparado com os demais elementos radioativos das séries de decaimento é que o seu estado físico natural, em condições normais de temperatura e pressão, é o estado gasoso, por esta razão, ele é o responsável pela maior parte da exposição das pessoas à radiação ionizante natural (FIANCO, 2011).

O radônio, ao sofrer decaimento, emite partículas alfa que, por possuírem baixo poder de penetração, não ultrapassam as camadas mais superficiais da pele dos seres humanos, em contrapartida, a inalação de ar com altos níveis de

concentração de gás radônio, pode representar um perigo à saúde. Após inalado, este gás poderá sofrer decaimento dentro dos pulmões, expondo células das mucosas internas à radiação ionizante. Como a radiação alfa possui uma alta concentração de energia armazenada, a densidade de ionização deste tipo de radiação também é muito alta em comparação com as outras formas de radiação, possibilitando assim, o aumento da probabilidade de desenvolvimento de câncer, principalmente o de pulmão, no indivíduo exposto (GAVIOLI, 2009; ZEEB, 2007).

Outro fator importante a se considerar a respeito da inalação do gás radônio é o fato de que os elementos sucessores na sequência de decaimento radioativo são sólidos, e se apresentam na forma de metais pesados, estes se acumulam no organismo e continuam sofrendo decaimento dentro do corpo, emitindo radiação ionizante até se transformarem no elemento chumbo estável.

Figura 1 – Séries radioativas naturais



Fonte: adaptado de Cardoso (2004)

1.3. FONTES DE EMISSÃO E LIBERAÇÃO DO GÁS RADÔNIO

Por se tratar de um produto do decaimento do urânio, o gás radônio¹ tem ocorrência natural em rochas, solos e materiais da crosta terrestre que possuam ou possuíram urânio em sua formação.

Alguns tipos de rochas são mais propensos a terem uma concentração maior de urânio do que outros tipos como mostra a Tabela 2 (FIANCO, 2011).

Tabela 2 – Concentrações médias de urânio em alguns tipos de rochas

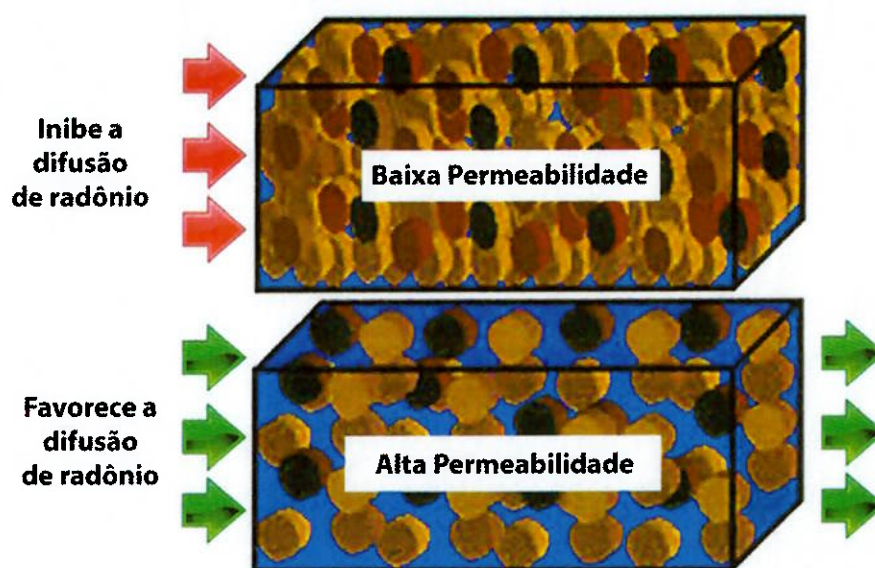
	Rocha	U (ppm)		Rocha	U (ppm)
Ígneas	Graníticas	4,19	Sedimentares	Arenitos	1,48
	Gabróides	0,84		Grauvacas	2,1
	Ultramáficas	0,022		Arcóseos	1,5
	Intrusivas Alcalinas	9,82		Folhelhos	3,25
	Extrusivas Silicáticas	5,0		Bauxita	11,4
	Basálticas	0,43		Bentonita	5,0
Metamórficas	Affibólito	3,5		Calcários	2,19
	Gnaiss	2,2		Dolomitos	0,03 – 2,0
	Rochas Máficas	3,2		Fosfáticas	50 – 300
	Granulito	4,9		Evaporitos	<0,1
	Ortognaisse	3,6		Areias	3,0
	Mármore	0,17		Lamas	2,3
	Filito	1,9		Lamas Argilosas	2,7
	Xisto	2,5		Argilas Pelágicas	2,0

Fonte: Fianco (2011)

Segundo Fianco (2011), a distribuição e emissão de gás radônio em rochas sedimentares e nos solos está principalmente condicionada às suas características físicas e geoquímicas. As características geoquímicas determinam o potencial de formação do gás dependendo das características do material gerador (concentração de urânio), as características físicas determinam o potencial de liberação ou de emanção, a porosidade, permeabilidade e a presença de água são os fatores mais importantes. Geralmente solos argilosos inibem a migração e difusão do gás em sua estrutura, atuando muitas vezes como selantes que impedem que o gás chegue até a atmosfera, por sua vez, os solos e rochas arenosas favorecem a migração aumentando o potencial de liberação do mesmo como mostrado na Figura 2.

¹ a partir desta parte do trabalho, os três isótopos, gás radônio, torônio e actínion serão tratados apenas por "gás radônio".

Figura 2 – Difusão de radônio em função da permeabilidade



Fonte: elaboração própria

1.4. O RADÔNIO EM AMBIENTES DE MINERAÇÃO

Tomando como base os conceitos apresentados por Fianco (2011), é possível observar que, em ambientes onde é recorrente a remoção de terra ou rocha do subsolo, a concentração de radônio terá uma maior probabilidade de ser elevada em comparação com outros ambientes, dependendo das características do local de trabalho.

Pessoas que permanecerem nestes locais por tempo elevado, como por exemplo, durante toda a jornada de trabalho semanal, ou em grande parte dela, estarão propensos a inalar uma quantidade maior de gás radônio, logo, terão uma maior probabilidade de desenvolver as doenças relacionadas a este elemento, além disso, ao longo do tempo, irão acumular uma quantidade maior de outros elementos radioativos e metais pesados, filhos do radônio na série de decaimento, em seus organismos.

Na indústria da mineração, grande parte do trabalho é desenvolvido em contato direto com áreas onde ocorre a remoção de rocha do subsolo, nas cavas e galerias subterrâneas. Uma outra parte do trabalho é desenvolvido nas usinas de beneficiamento, a rocha extraída passará por etapas de cominuição através de processos de britagem e moagem que visam diminuir a granulometria do material para facilitar a liberação e a separação dos minérios de interesse dos minerais de ganga.

1.5. VALORES DE REFERÊNCIA PARA EXPOSIÇÃO AO RADÔNIO

Segundo o documento *National Radiological Protection Board* (NRPB, 1989), de toda a radiação recebida por um cidadão britânico durante um ano, que é de 2,8 milisievert, estima-se que 85% é proveniente de fontes naturais, como raios cósmicos, raios gama, produtos de decaimento radiativo e radionuclídeos ingeridos. Dentro desta gama de radiações provenientes de

fontes naturais, o radônio representa 47% de toda esta dose anual, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Fontes de radiação por pessoa no Reino Unido

Fonte	Dose Anual (%)
Fontes Naturais	87,0
Gás radônio (^{222}Rn) do solo.	47,0
Tório (^{220}Rn) do solo.	4,0
Raios gama do solo e de materiais de construção.	14,0
Comida e bebida	12,0
Raios cósmicos	10,0
Fontes Artificiais	13,0
Médicas	12,0
Descargas nucleares	0,1
Trabalho	0,2
Outras	0,8

Fonte: NRPB (1989)

Estudos realizados com trabalhadores da área de mineração, que foram acompanhados por mais de 30 anos, e que desenvolviam suas atividades em contato com diversos tipos de minerais como urânio, ferro, estanho e fluorita mostram um aumento na incidência de câncer de pulmão nestes indivíduos devido à exposição ao radônio e aos seus produtos de decaimento, esta relação foi obtida em diversas localidades como Austrália, Canadá, China, Europa e Estados Unidos, a metodologia aplicada em cada estudo não foi a mesma (FIANCO, 2011).

A Tabela 4 apresenta o risco de morte por câncer de pulmão associado à exposição ao gás radônio, um parâmetro importante que pode ser utilizado como referência no estudo da exposição dos trabalhadores ao gás radônio.

Tabela 4 – Risco de morte por câncer de pulmão por exposição de 200 Bq/m³ de radônio durante uma vida inteira

	Risco (%)
População geral	3-5
Fumantes	10-15
Não-Fumantes	1-3

Fonte: NRPB, 2000

Fonte: NRPB (1989)

A unidade Sievert estabelece a absorção de uma determinada quantidade de energia radioativa pelo ser humano, ou seja, corresponde à dose e a unidade Becquerel estabelece a razão da variação do número de eventos ionizantes por unidade de tempo.

A Tabela 5 apresenta os valores adotados em diversos países para limite de exposição e nível de ação em relação à exposição ao gás radônio em construções residenciais e comerciais (ZEEB, 2007).

Tabela 5 – Níveis de ação e limites de exposição ao radônio em diversos países

País	Nível de ação	Limite de exposição
Argentina	200 Bq/m ³	400 Bq/m ³
Áustria	200 Bq/m ³	400 Bq/m ³
República Checa	200 Bq/m ³	400 Bq/m ³
China	200 Bq/m ³	400 Bq/m ³ (residências) – 1000 Bq/m ³ (locais de trabalho)
Alemanha	100 Bq/m ³	100 Bq/m ³
Reino Unido	200 Bq/m ³	200 Bq/m ³
Estados Unidos	148 Bq/m ³	148 Bq/m ³

Fonte: Zeeb (2007)

1.6. EFEITOS BIOLÓGICOS DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO

O efeito imediato, logo após a irradiação de uma célula é a ionização e excitação de seus átomos e moléculas e como consequência, a criação de íons e radicais livres que são altamente reativos e difusíveis. Estas moléculas, por sua vez, reagem quimicamente com moléculas vizinhas e entre si. Essas associações podem ocasionar uma reação em cadeia e o resultado é a criação de macromoléculas, tais como proteínas e cadeias metabólicas importantes, com funções celulares alteradas, ou, em casos mais extremos, podem causar a morte celular (PEREIRA, 2013).

Quando o organismo todo (corpo inteiro, ou grande parte) é exposto a uma dose muito alta de radiação, desenvolve-se um quadro de afecções denominada síndrome aguda das radiações ocasionando perda de pelos, alteração sanguínea, distúrbios gastrointestinais, danos no sistema nervoso central e eventualmente a morte, quando a dose recebida é muito alta (PEREIRA, 2013).

Para o caso de exposição contínua a baixas doses de radiação, comum em casos de contato ocupacional com o gás radônio, a preocupação se dá nos efeitos biológicos tardios ou crônicos. Como resultado da inalação de radioisótopos e eventuais decaimentos no interior do organismo, os elementos químicos radioativos que são gerados, por possuírem similaridade química com metabólitos normais, podem ficar depositados em tecidos e órgãos. O resultado deste fenômeno é o fato de que as células próximas aos locais de deposição destes elementos, serão continuamente irradiadas.

Os efeitos crônicos ou tardios incluem o desenvolvimento de catarata e câncer, sendo os mais comuns o de pulmão, de tireoide, os que afetam os ossos e o sistema hematopoiético (PEREIRA, 2013).

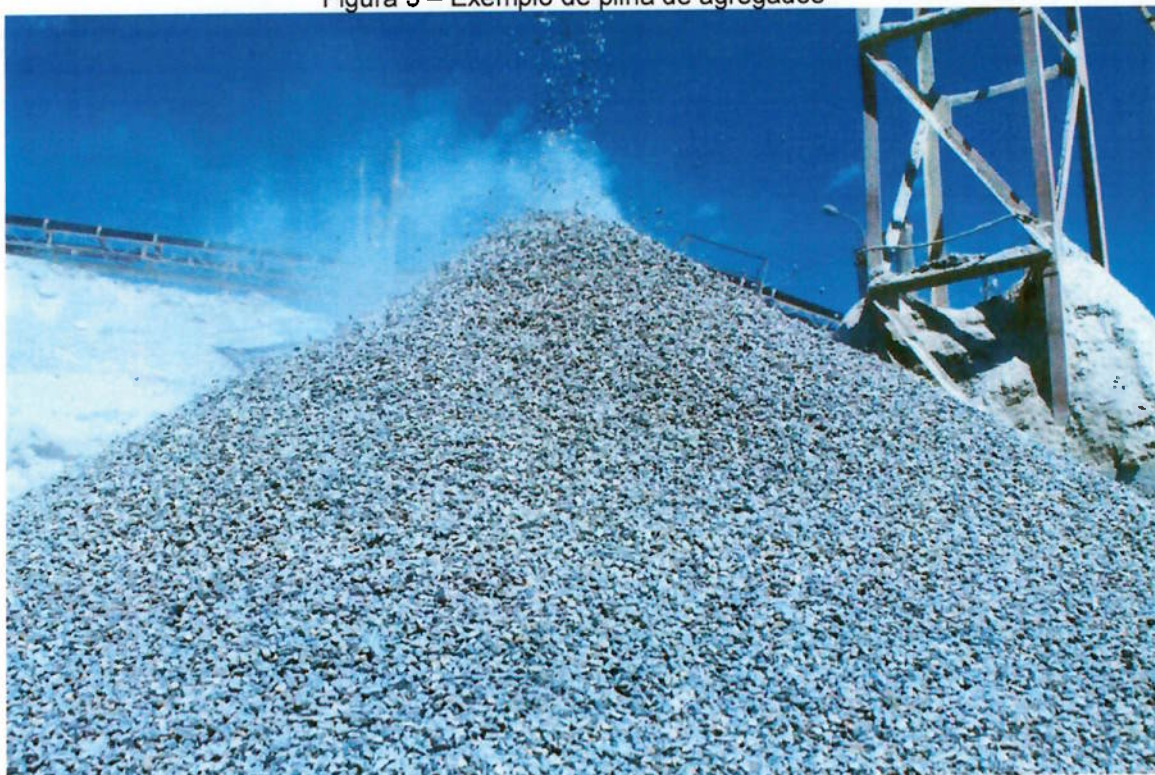
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. LOCAIS DE MEDIÇÃO

As medições de níveis de radônio foram realizadas em pedreiras ativas localizadas no estado de São Paulo. Também foi realizada uma medição em uma mina subterrânea de calcário.

As pedreiras em que foram realizadas as medições operam com extração de rocha granítica para produção de agregados utilizados na construção civil (areia e pedra). Nas pedreiras, as medições foram realizadas nas pilhas de materiais em diversas granulometrias, exemplificado na Figura 3, com o intuito de verificar o potencial de exalação de radônio. Na mina subterrânea, as medições foram feitas nas galerias para verificar se havia acúmulo de gás radônio nos ambientes de trabalho.

Figura 3 – Exemplo de pilha de agregados



Fonte: arquivo pessoal

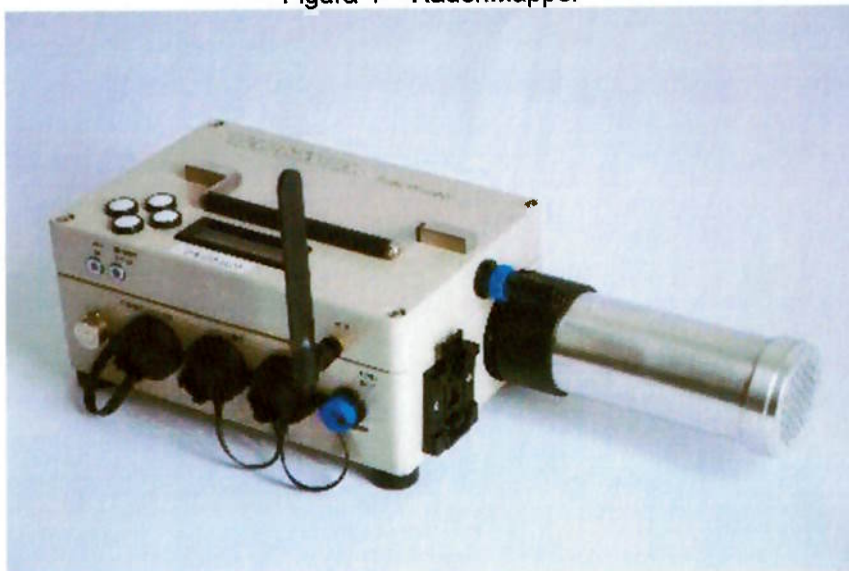
2.2. EQUIPAMENTOS E INFRAESTRUTURA UTILIZADOS

O equipamento principal utilizado nas medições foi o RadonMapper® fabricado pela Tecnavia™ (Figura 4) que é específico para quantificar a atividade radioativa gerada pelo gás radônio presente em um determinado ambiente. O funcionamento se dá pela passagem passiva (sem auxílio) ou ativa (com bombeamento) do ar filtrado, para que não haja material sólido, através de uma célula de medição, mostrada na Figura 5, que irá realizar a contagem das emissões de partículas alfa realizadas. Como apenas elementos químicos

gasosos adentram a célula, toda radiação alfa emitida registrada será devida ao decaimento do radônio.

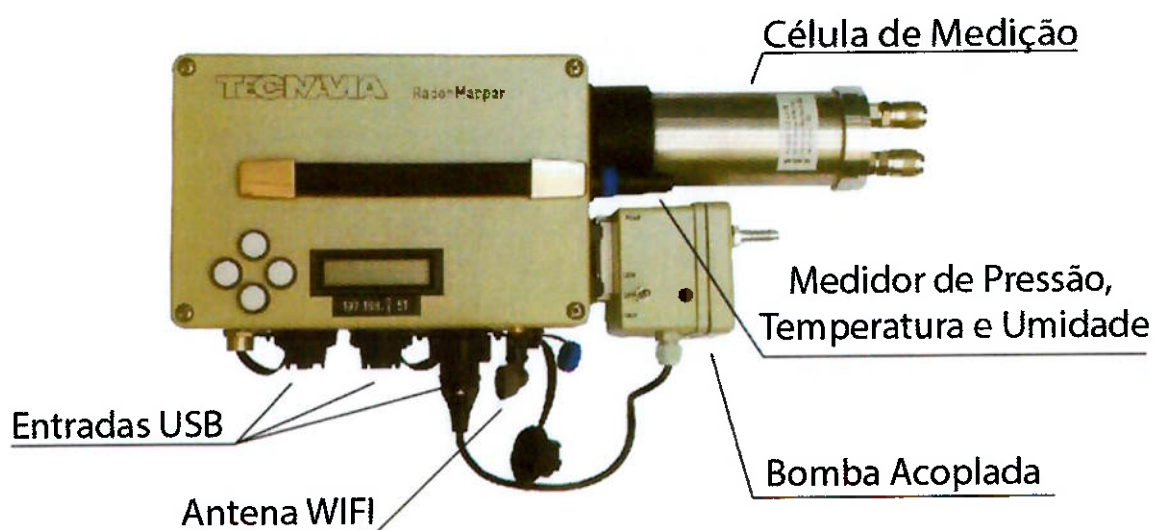
O aparelho registra o número de eventos ionizantes devido às emissões alfa e apresenta estes dados em Bq/m^3 , ou seja, eventos ionizantes por tempo por unidade de volume de ar, desta forma, a quantidade de gás radônio pode ser estimada, analisada e comparada.

Figura 4 – RadonMapper



Fonte: divulgação

Figura 5 – RadonMapper detalhado



Fonte: arquivo pessoal

Para verificar a direção do vento, foi utilizado o anemômetro de pás de alumínio da marca TSI Airflow modelo AV-2 apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Anemômetro TSI Airflow modelo AV-2

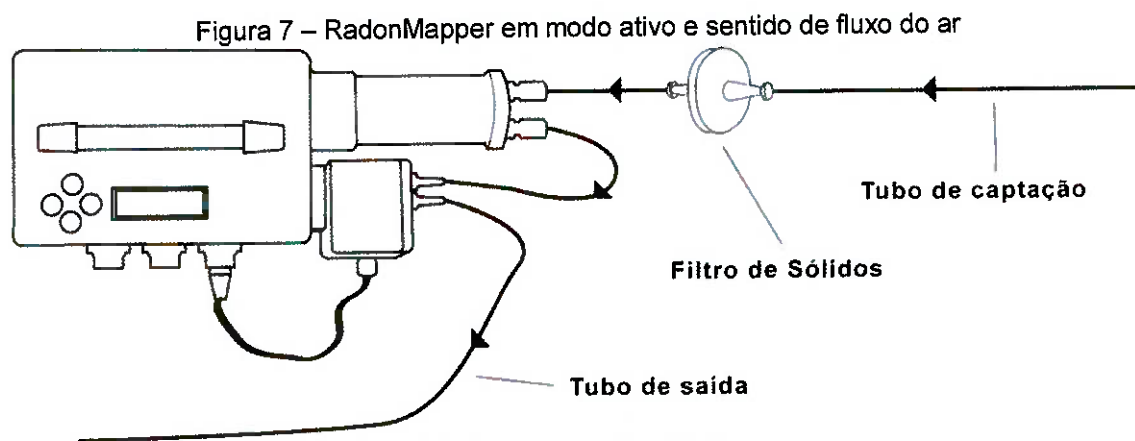


Fonte: arquivo pessoal

Todos os equipamentos utilizados foram fornecidos pelo LACASEMIN – Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração da Escola Politécnica da USP, bem como toda a infraestrutura para preparação dos equipamentos e obtenção e tratamento dos dados de medição.

2.3. PREPARAÇÃO DO RADONMAPPER

Para realizar as medições da maneira proposta, o RadonMapper foi configurado de maneira ativa, ou seja, com a utilização da bomba para manter a pressão sempre positiva na entrada da célula, mostrado na Figura 7 e na Figura 8, a vazão da bomba foi mantida na posição *high* (alta vazão).



Fonte: elaboração própria

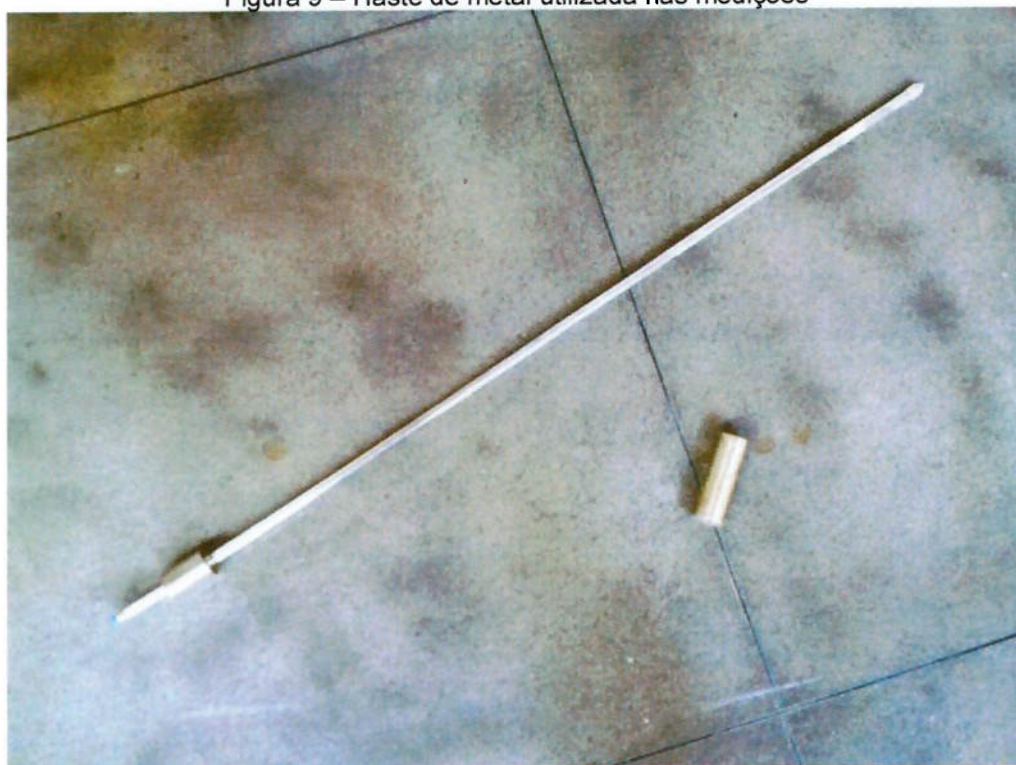
Figura 8 – RadonMapper em modo ativo (equipamento central)



Fonte: arquivo pessoal

Para auxiliar a captação de ar de dentro das pilhas de materiais, foi confeccionada uma haste de metal oca com abertura nas pontas usada como prolongamento do tubo de captação mostrada na Figura 9.

Figura 9 – Haste de metal utilizada nas medições



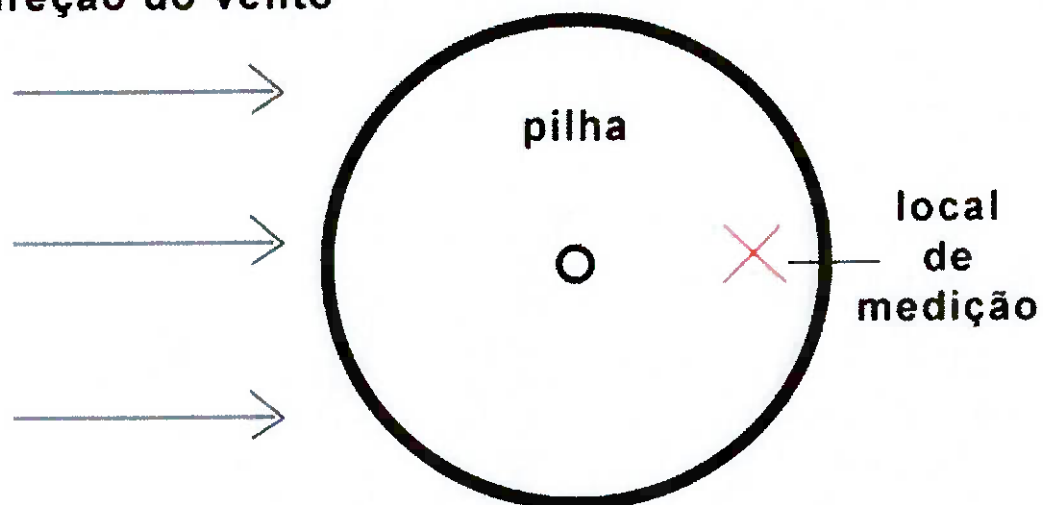
Fonte: arquivo pessoal

2.4. METODOLOGIA APLICADA

Nas pedreiras, a finalidade do estudo é realizar as medições dentro das pilhas de materiais e verificar o potencial de geração de radônio nas mesmas, após o procedimento, relacionar os valores medidos com as diferentes faixas granulometrias e avaliar o procedimento proposto. A metodologia aplicada se repete em cada pilha de material e pode ser descrita através dos seguintes passos:

- I. Definição da pilha em que será realizada a medição, a escolha das pilhas foi baseada nas diferentes faixas granulométricas disponíveis em cada local e a medição foi realizada uma vez em cada local.
- II. Verificação da direção do vento com a utilização do anemômetro de maneira a identificar em qual frente da pilha, o ar tem a maior velocidade.
- III. Se possível, definir o local de medição na pilha num ponto que esteja contrário à direção do vento, ou seja, da frente de maior velocidade, para minimizar os efeitos da pressão externa dentro da pilha (Figura 10).
- IV. Com a utilização de um martelo, inserir a haste de metal na pilha até atingir uma profundidade de aproximadamente de 45 cm (Figura 11) para garantir que o ar bombeado pelo equipamento é totalmente proveniente da pilha.
- V. Acoplar o tubo de captação do RadonMapper na haste (Figura 12).
- VI. Deixar o equipamento ligado por 5 minutos realizando a medição com a bomba na posição de alta vazão (Figura 13).
- VII. Retirar o tubo coletor, retirar a haste e repetir o procedimento para a próxima pilha de medição deixando o equipamento com a bomba ligada pelo menos por 3 minutos entre cada ciclo de repetição, desta forma, o ar com uma concentração menor de radônio irá adentrar a célula fazendo com que o ponto de medição anterior não interfira nos valores obtidos no próximo ponto.

Figura 10 – Ponto de medição em relação à direção do vento

direção do vento

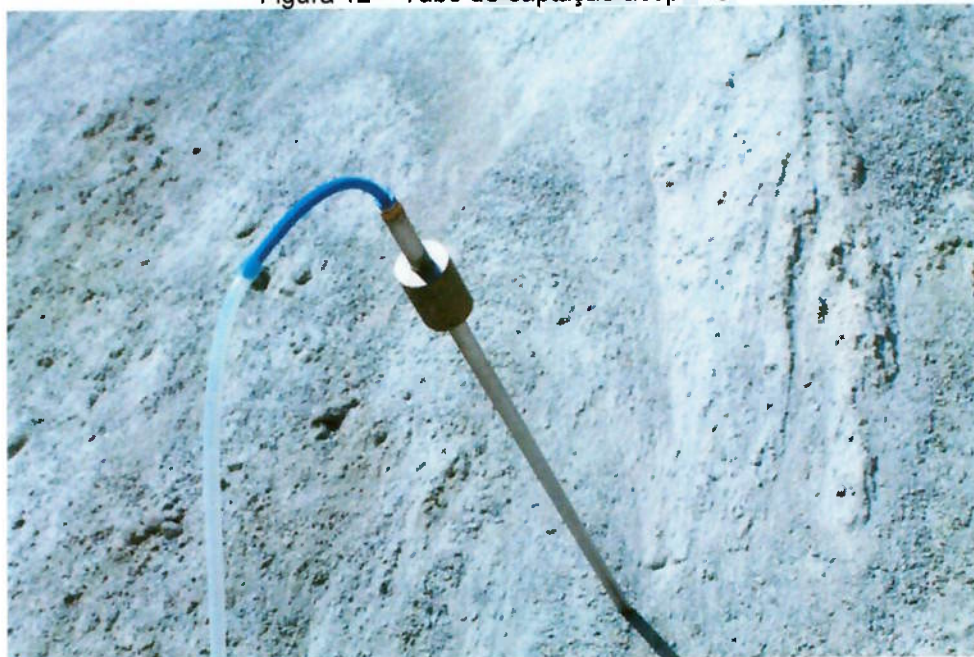
Fonte: arquivo pessoal

Figura 11 – Inserção da haste de metal na pilha



Fonte: arquivo pessoal

Figura 12 – Tubo de captação acoplado



Fonte: arquivo pessoal

Figura 13 – Medição sendo realizada



Fonte: arquivo pessoal

Dentro das galerias da mina subterrânea, o procedimento se resume a definir o ponto onde será realizada a medição e efetuar a medida durante 5 minutos, com a zona de captação (extremidade do tubo de captação) a uma altura de aproximadamente 1,5 m do chão, desta forma, o ar bombeado será proveniente de uma altura compatível com a média da zona de respiração dos trabalhadores. Como o ar é bombeado diretamente do espaço aberto, não é necessária a utilização da haste de metal, as medições foram realizadas na galeria de entrada principal, na galeria de exaustão e em duas frentes de lavra ativas.

3. RESULTADOS

Os apêndices A, B e C são referentes às medições realizadas nas pedreiras em ordem cronológica e o apêndice D é referente à medição realizada na mineração subterrânea. As tabelas apresentadas nos apêndices apresentam os resultados das medições e foram exportadas diretamente do RadonMapper, foram retiradas apenas as colunas com dados que não são pertinentes à esta medição, como a voltagem nos terminais de alimentação do equipamento, temperatura interna e os dados do acelerômetro interno. Os valores medidos de pressão e temperatura também foram retirados pois os sensores estão acoplados ao equipamento, logo as medidas não foram feitas na zona onde o ar foi captado.

3.1. PEDREIRA A

As medições realizadas na primeira pedreira foram feitas no dia 23/08/2013 no período entre 13:20 e 15:10 horas, horário GMT. Nesta pedreira, antes de iniciar as medições nos pontos internos às pilhas, foi feita uma medição de teste num ponto a uma distância de 50 metros do britador primário em um local onde a poeira gerada pela atividade do britador ainda era visível. As pilhas de materiais disponíveis neste local eram as seguintes:

- Brita 4 com granulometria entre 50mm e 76mm.
- Brita 3 com granulometria entre 25mm e 50mm.
- Brita 2 com granulometria entre 19mm e 25mm.
- Brita 1 com granulometria entre 9,5mm e 19mm.
- Areia de brita com granulometria de 0,074mm.

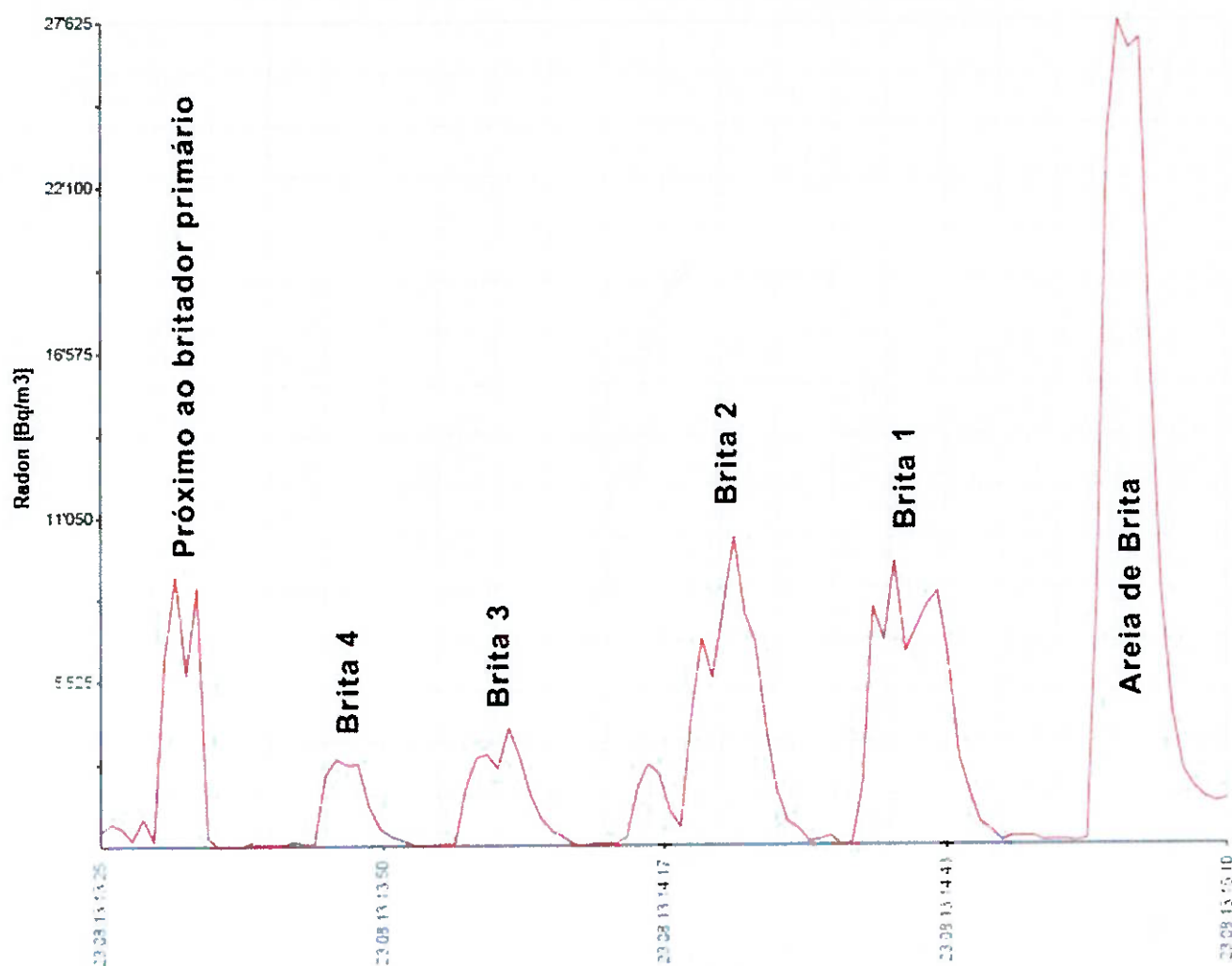
Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios e os desvios padrão obtidos nas medições realizadas na pedreira A, organizados por pilhas de material, o primeiro valor da tabela é referente à medição de teste que foi realizada no local, próximo ao britador primário.

A Figura 14 apresenta as medições realizadas pelo equipamento em formato de gráfico, os valores utilizados pelo aparelho para traçar os gráficos são das medições diretas instantâneas registradas na pedreira A.

Tabela 6 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na pedreira A

Local	Média [Bq/m ³]	Desvio padrão
Britador primário	6012 Bq/m ³	3570
Brita 4	2437 Bq/m ³	658
Brita 3	3137 Bq/m ³	498
Brita 2	7737 Bq/m ³	1740
Brita 1	7981 Bq/m ³	1153
Areia de Brita	24293 Bq/m ³	4660

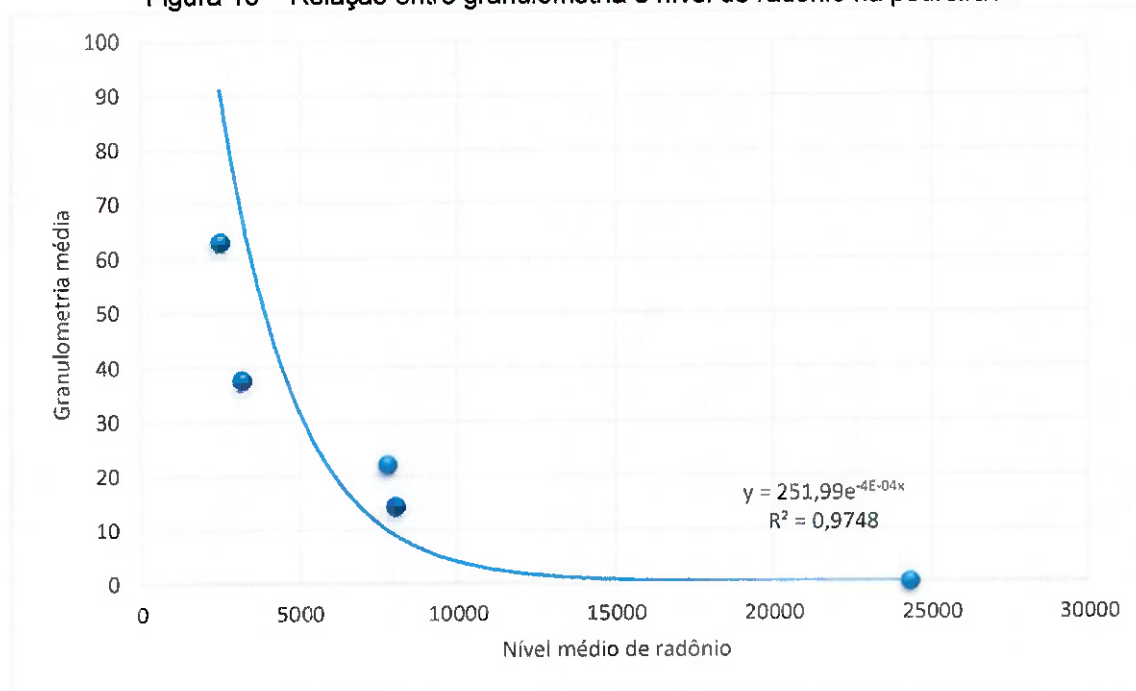
Figura 14 – Gráfico dos valores instantâneos medidos na pedreira A



Fonte: arquivo pessoal

A Figura 15 apresenta o gráfico de dispersão com a linha de tendência que relaciona a granulometria do material com os níveis de radônio obtidos em média na pedreira A, bem como a equação da linha de tendência e o valor do coeficiente de aderência da curva, R^2 .

Figura 15 – Relação entre granulometria e nível de radônio na pedreira A



Fonte: arquivo pessoal

3.2. PEDREIRA B

As medições realizadas na segunda pedreira foram feitas no dia 03/09/2014 no período entre 15:15 e 16:40 horas, horário GMT. As pilhas de materiais disponíveis neste local eram as seguintes:

- Brita 4 com granulometria entre 50mm e 76mm.
- Brita 2 com granulometria entre 19mm e 25mm.
- Brita 1 com granulometria entre 9,5mm e 19mm.
- Pedrisco ou Brita 0 com granulometria entre 4,8mm e 9,5mm.
- Areia de brita com granulometria de 0,074mm.

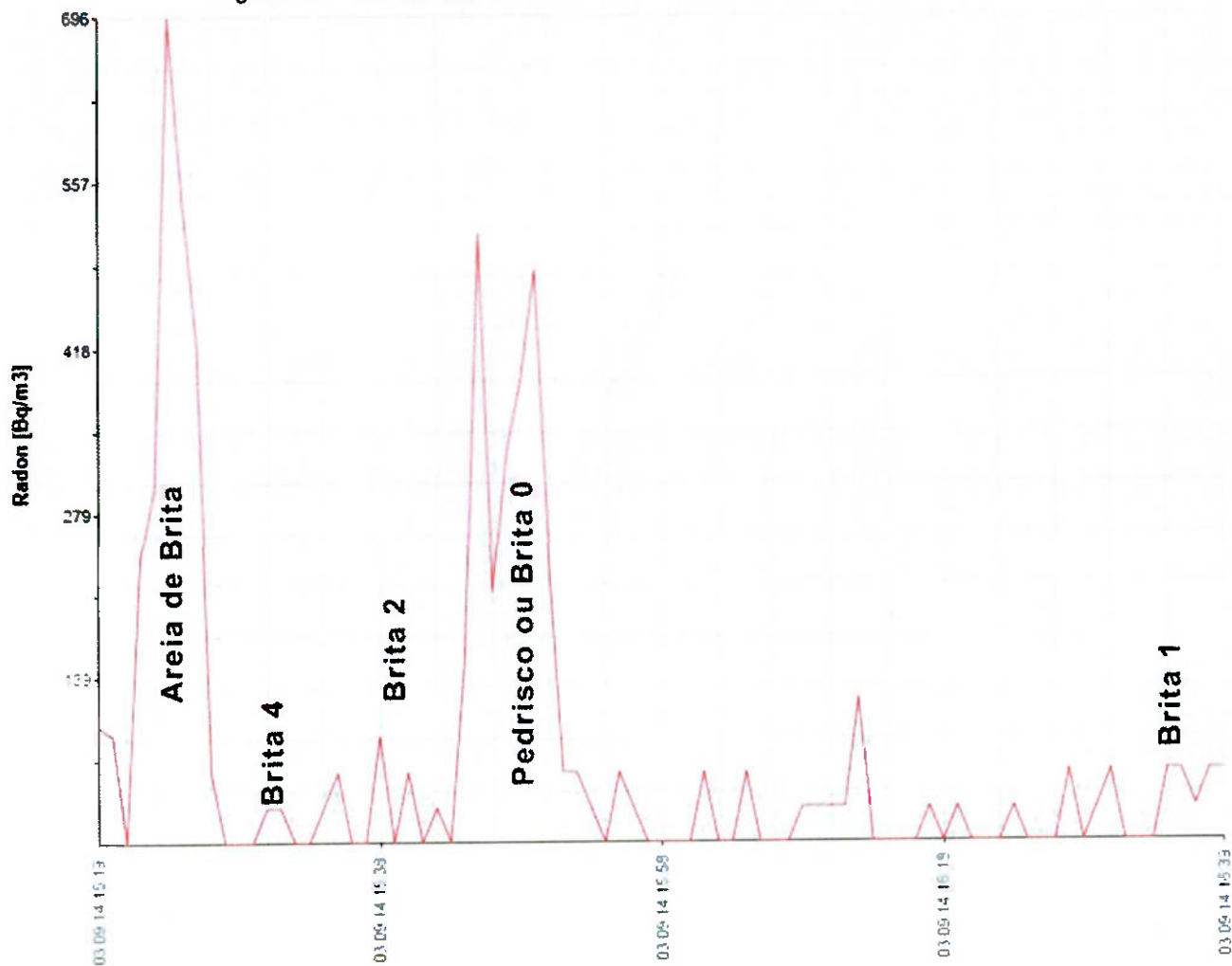
Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios e os desvios padrão obtidos nas medições realizadas na pedreira B.

A Figura 16 apresenta as medições realizadas pelo equipamento em formato de gráfico, os valores utilizados pelo aparelho para traçar os gráficos são das medições diretas instantâneas registradas na pedreira B.

Tabela 7 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na pedreira B

Local	Média [Bq/m ³]	Desvio padrão
Brita 4	12 Bq/m ³	16
Brita 2	36 Bq/m ³	39
Brita 1	54 Bq/m ³	13
Pedrisco ou Brita 0	387 Bq/m ³	121
Areia de Brita	442 Bq/m ³	184

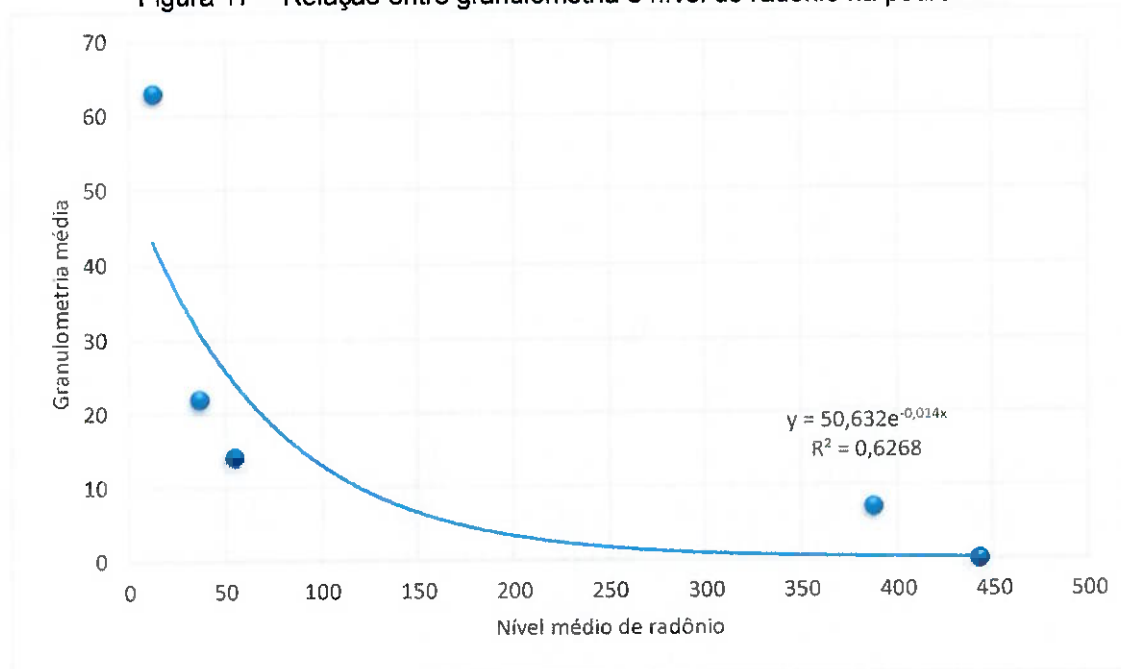
Figura 16 – Gráfico dos valores instantâneos medidos na pedreira B



Fonte: arquivo pessoal

A Figura 17 apresenta o gráfico de dispersão com a linha de tendência que relaciona a granulometria do material com os níveis de radônio obtidos em média na pedreira B, bem como a equação da linha de tendência e o valor do coeficiente de aderência da curva, R^2 .

Figura 17 – Relação entre granulometria e nível de radônio na pedreira B



Fonte: arquivo pessoal

3.3. PEDREIRA C

As medições realizadas na terceira pedreira foram feitas no dia 26/09/2014 no período entre 14:05 e 17:09 horas, horário GMT. As pilhas de materiais disponíveis neste local eram as seguintes:

- Brita 4 com granulometria entre 50mm e 76mm.
- Brita 3 com granulometria entre 25mm e 50mm.
- Brita 2 com granulometria entre 19mm e 25mm.
- Brita 1 com granulometria entre 9,5mm e 19mm.
- Pedrisco ou Brita 0 com granulometria entre 4,8mm e 9,5mm.
- Areia de brita com granulometria de 0,074mm.

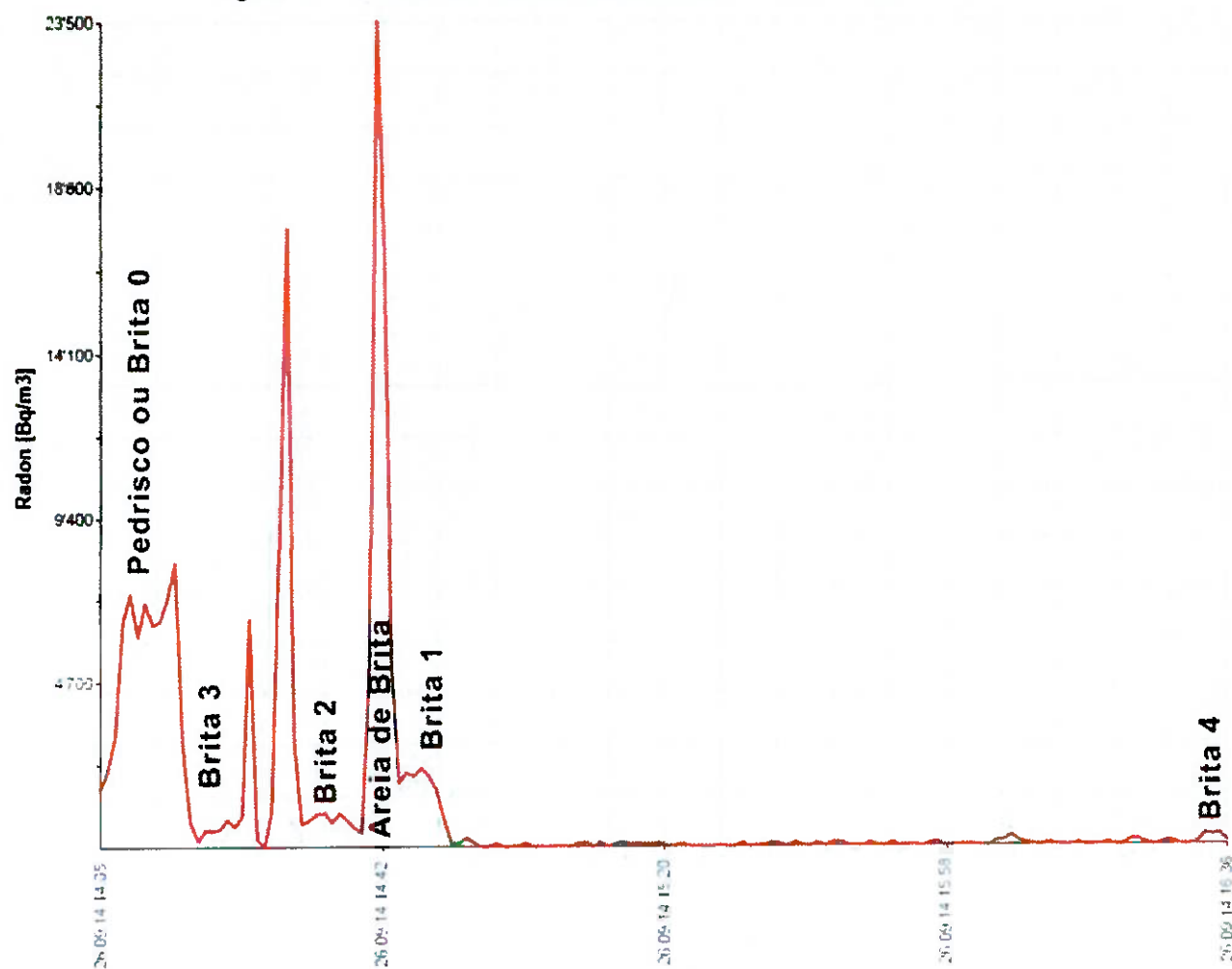
Na Tabela 8 estão apresentados os valores médios e os desvios padrão obtidos nas medições realizadas na pedreira C.

A Figura 18 apresenta as medições realizadas pelo equipamento em formato de gráfico, os valores utilizados pelo aparelho para traçar os gráficos são das medições diretas instantâneas registradas na pedreira C.

Tabela 8 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na pedreira C

Local	Média [Bq/m ³]	Desvio padrão
Brita 4	237 Bq/m ³	95
Brita 3	662 Bq/m ³	188
Brita 2	818 Bq/m ³	146
Brita 1	1612 Bq/m ³	876
Pedrisco ou Brita 0	6587 Bq/m ³	495
Areia de Brita	14413 Bq/m ³	7346

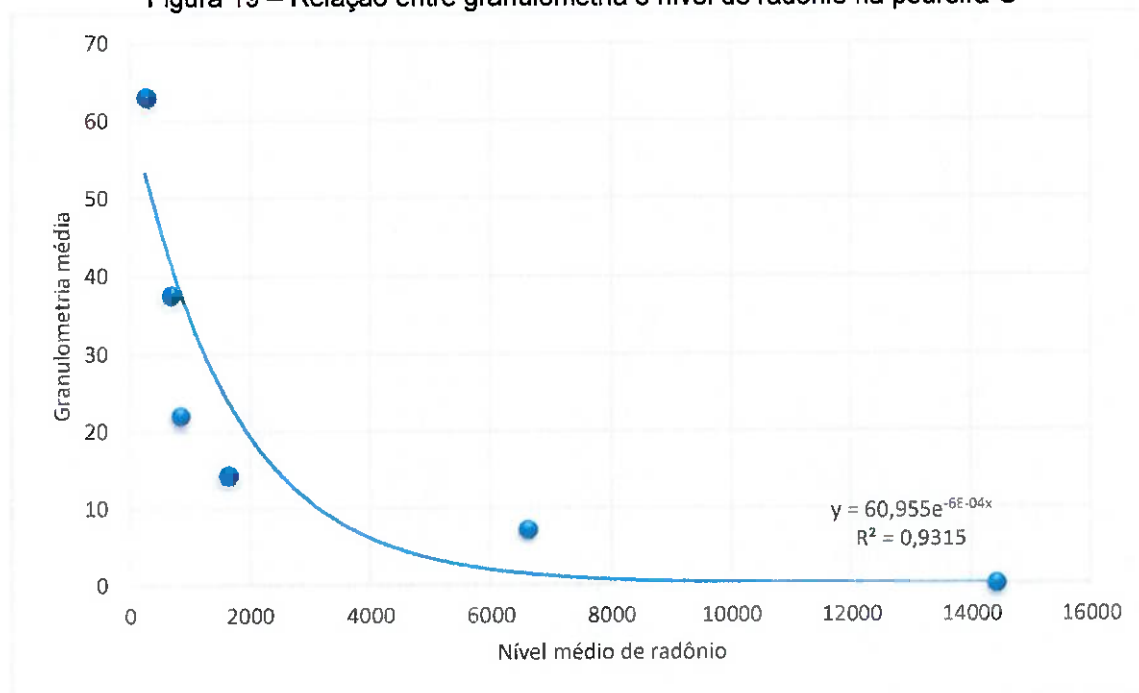
Figura 18 – Gráfico dos valores instantâneos medidos na pedreira C



Fonte: arquivo pessoal

A Figura 19 apresenta o gráfico de dispersão com a linha de tendência que relaciona a granulometria do material com os níveis de radônio obtidos em média na pedreira B, bem como a equação da linha de tendência e o valor do coeficiente de aderência da curva, R^2 .

Figura 19 – Relação entre granulometria e nível de radônio na pedreira C



Fonte: arquivo pessoal

3.4. MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

As medições realizadas na mineração subterrânea ocorreram no dia 23/07/2014, no período entre 12:24 e 14:24 horas, horário GMT. Os pontos de medição estavam dispostos entre 450 e 750 metros de profundidade.

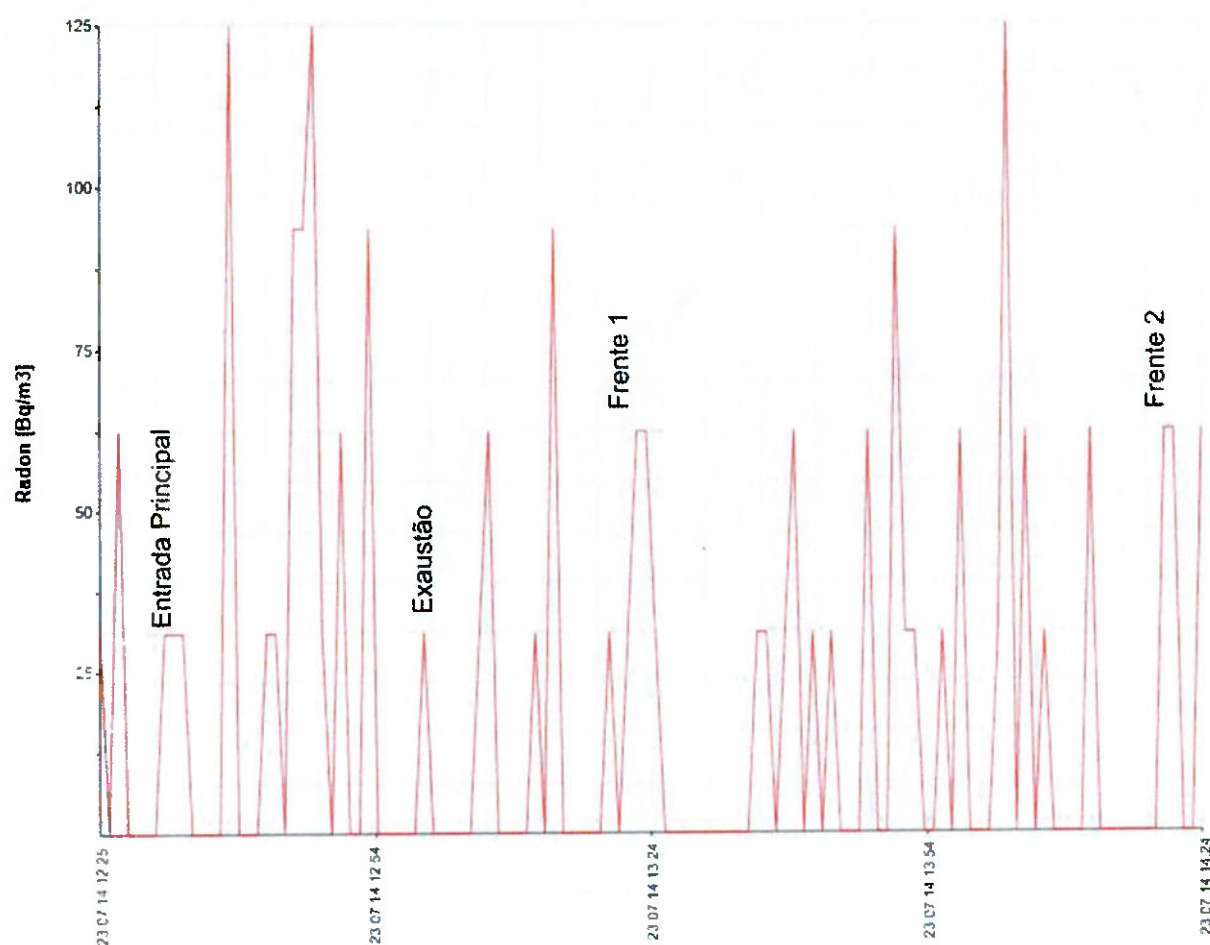
Neste local foram feitas 4 medidas, os respectivos valores de média e desvio padrão das medições está apresentado na Tabela 9.

A Figura 20 apresenta as medições realizadas pelo equipamento em formato de gráfico, os valores utilizados pelo aparelho para traçar os gráficos são das medições diretas instantâneas registradas na mineração subterrânea.

Tabela 9 – Média e desvio padrão dos níveis de radônio em cada pilha de material obtidos na mineração subterrânea

Local	Média [Bq/m³]	Desvio padrão
Entrada principal	12 Bq/m³	17
Exaustão	6,9 Bq/m³	14
Frente de lavra 1	37 Bq/m³	26
Frente de lavra 2	25 Bq/m³	34

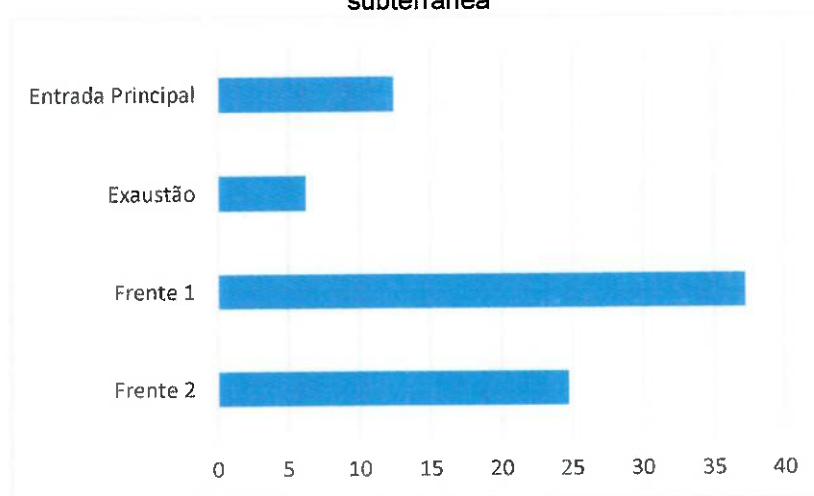
Figura 20 – Gráfico dos valores medidos na mineração subterrânea



Fonte: arquivo pessoal

A Figura 21 apresenta um gráfico comparando as médias obtidas em cada local de medição.

Figura 21 – Comparativo entre as médias obtidas em cada local de medição na mineração subterrânea



Fonte: arquivo pessoal

4. DISCUSSÃO

Esta etapa será apresentada em duas partes, a primeira consistirá em uma breve consideração dos resultados obtidos individualmente para cada medição e por fim serão feitas algumas considerações gerais sobre todas as medições.

- Pedreira A

As medições realizadas na primeira pedreira mostraram que a média do nível de atividade radioativa, devido ao gás radônio, presente no material lavrado é bastante elevado.

A relação entre granulometria e nível de gás radônio medido apresentou um comportamento que pode ser aproximado ao modelo logarítmico com um valor de aderência de 0,9748, ou seja, o modelo escolhido para representar este comportamento consegue aproximar com 97,48% de acerto, logo, neste caso específico, fica claro que o nível de gás radônio emanado cresce exponencialmente quando a granulometria é reduzida, dentre as medições realizadas, esta foi a que apresentou a melhor compatibilidade com o modelo escolhido para representação.

- Pedreira B

Apesar de lavrar o mesmo tipo de rocha e utilizar condições similares nas metodologias de trabalho, as medições realizadas na segunda pedreira mostraram que a média do nível de atividade radioativa, devido ao gás radônio presente no material lavrado é relativamente baixa quando comparada com as pedreiras A e C.

O comportamento apresentado na relação entre o nível de gás radônio medido e a granulometria se manteve próximo do modelo logarítmico, porém, com um valor de aderência de 62,68%, ou seja, significativamente menor que os valores apresentados nas pedreiras A e C. A linha de tendência apresentou uma curva menos acentuada em comparação com as demais pedreiras.

- Pedreira C

Na terceira pedreira, novamente, um local em que é lavrado o mesmo tipo rochoso das pedreiras A e B, os níveis de atividade radioativa devido ao gás radônio, nas granulometrias mais finas, foram quase tão elevados quanto os valores registrados na pedreira A.

A relação entre faixa granulométrica e atividade radioativa desta pedreira também apresentou um comportamento logarítmico com coeficiente de aderência de 93,15%, novamente, o modelo apresentado representa o comportamento com uma alta taxa de acerto.

- Mineração subterrânea

As medições realizadas na mineração subterrânea apresentaram baixos valores de atividade radioativa devido à presença de gás radônio. Os valores de média obtidos nas frentes de lavra são maiores que os valores medidos nas galerias de acesso e exaustão, porém, ainda assim, são valores baixos quando comparados com as medidas realizadas nas pedreiras A e B.

- Considerações gerais sobre as medições

A análise estatística mostrou que todas as medições apresentaram altos valores de desvio padrão.

Houveram diferenças significativas nos níveis médios de radônio obtidos em cada local de medição.

A relação granulometria/nível de radônio emitido apresentou o modelo logarítmico como uma ótima forma de representação nas pedreiras A e C e com uma boa representação na pedreira B. O nível de radônio emitido aumenta de maneira aproximadamente exponencial com a diminuição da granulometria do material.

5. CONCLUSÕES

Os pontos em que as medições foram realizadas se localizam em municípios distintos com distâncias entre si da ordem de centenas de quilômetros. As características geológicas do maciço rochoso também apresentam diferenças. Este motivo pode ser responsável pelas notáveis disparidades entre os níveis de radônio observados em cada local.

A presença ou não de urânio no material rochoso, a porosidade das rochas encaixantes, a quantidade de água subterrânea, a presença de solos argilosos ou arenosos no entorno do minério explorado, todas estas características influenciam no nível de radônio emitido pelo material e estas diferenças foram observadas já que mesmo em granulometrias similares, os valores medidos foram bastante distintos.

Portanto, o risco envolvendo radônio pode ou não ser relevante nos diversos empreendimentos de mineração. É interessante que seja feita uma análise preliminar para avaliar se a situação em relação ao contaminante é ou não preocupante.

Para estas medições realizadas, observa-se que o risco é bastante relevante na pedreira A, e neste local, seria interessante que uma análise mais profunda da exposição dos trabalhadores fosse realizada. Confirma-se este fato quando é verificado os níveis obtidos próximo ao britador primário, neste local há um posto de trabalho e os valores medidos são de 5 a 10 vez maiores do que os limites de tolerância aplicados em diversos países. É importante também, que, caso esta constatação seja confirmada pela análise, medidas de controle sejam tomadas como por exemplo, um sistema de ventilação local nos postos de trabalho que estejam nos locais de maior risco.

Para as medições realizadas na pedreira B, verificamos que os níveis de radônio se tornam relevantes quando a granulometria do material está abaixo de 10 mm, porém, estes valores não são suficientes para que a quantidade de gás exalado das pilhas seja iminentemente perigosa aos trabalhadores. Esta condição é verificada quando analisamos os níveis de fundo, no entorno dos locais de medição apresentados no Apêndice B. Para este local, é interessante que o acompanhamento dos níveis seja feito periodicamente para garantir que nenhuma característica da exposição seja alterada ao longo do desenvolvimento da pedreira.

A pedreira C apresenta uma situação similar à da pedreira A, com valores bastante elevados e um potencial de risco muito alto, variando de 3 a 8 vezes os limites de tolerância considerados em outros países. Dependendo das condições de exposição dos trabalhadores do local, novamente, é aconselhável que uma análise mais detalhada da situação de exposição ao gás radônio seja feita nos postos de trabalho em que seja identificado proximidade com locais em que há geração de poeira de rocha constante.

As medições realizadas na mina subterrânea mostraram que os níveis de radônio no local estão sob controle e abaixo dos limites de tolerância e níveis de

ação aplicados em diversos países, apesar destas medições terem sido realizadas em locais com profundidade bastante elevada, os valores obtidos mostram que o gás radônio não apresenta risco aos trabalhadores.

A relação obtida entre a faixa granulométrica e os níveis de radônio medidos apresentaram um comportamento logarítmico, confirmando a hipótese de que o nível de radônio aumenta exponencialmente conforme o material é britado/cominuído, ou seja, em locais onde estão estocados materiais com granulometria mais baixa, o risco tende a ser maior, este fenômeno também ocorre nos locais onde a poeira é diretamente dispersada na atmosfera. É importante frisar que o uso de máscaras não apresenta redução de risco comprovada em relação ao gás radônio visto que este é um gás nobre e inerte, ou seja, barreiras físicas não são eficientes e os filtros químicos não atuam para este contaminante. Este comportamento fica mais claro quando o nível médio de radônio presente no material é maior.

As diferenças observadas nos coeficientes das linhas de tendências podem ser relacionadas às diferenças de níveis médios de radônio presentes em cada material e também às condições físicas em que as medições foram realizadas (umidade, pressão e a presença ou não de vento).

A metodologia aplicada nas medições se mostrou bastante confiável e prática, porém, como pôde se observar, os valores de desvio padrão foram excessivamente elevados. Para corrigir este fator, seria interessante que o tempo de amostragem fosse aumentado de 5 a 10 vezes passando de 5 para 25 ou 50 minutos, já que o equipamento registra apenas 1 valor por minuto (média temporal a cada 60 segundos). Nestas medições, em cada ponto, obteve-se apenas 5 valores para avaliar o local, numa amostragem com um número entre 25 e 50 valores, o desvio padrão provavelmente será menor e a precisão estatística por sua vez, será maior.

6. REFERÊNCIAS

CARDOSO, E. M. **Apostila Educativa: Radioatividade**. Rio de Janeiro: CNEN, 2004. 19 p.

Costa, L. J. P. **Estudo da Exalação de Radônio em Placas e Tijolos de Fosfogesso de Diferentes Procedências**. São Paulo: 2011. 65 p.

FIANCO, A. C. B. **Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de porto alegre, RS**. Porto Alegre: 2011. 51 p.

Fior, L. **Análise da Concentração de Radônio Proveniente dos Materiais de Construção**. Curitiba: 2008. 131 p.

GAVIOLI, Y. S. Emissão de Radônio em Rochas Ornamentais. In: XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM. 2009, Rio de Janeiro. **Anais**, Rio de Janeiro: ...2009. p. 95-101.

Haynes, W. M. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. USA: 2011.

NRPB. **Living with Radiation**. National Radiological Protection Board, Reino Unido: 1989. 32 p.

PEREIRA, J. G. **Higiene do Trabalho – Parte B**. São Paulo: PECE, 2013. 400 p.

ZEEB, H. **International Radon Project: Survey on radon guidelines, programmes and activities**. Genebra: 2007. 49 p.

APÊNDICE A - Dados obtidos nas medições realizadas na primeira pedraira.

	GMT_Data e Hora	Contagem Total [n]	Valor de Radônio [Bq/m3]	Incerteza da Medição [Bq/m3]
	23.08.2013 13:24:00	17	500	129
	23.08.2013 13:25:00	25	750	156
	23.08.2013 13:26:00	20	593	140
	23.08.2013 13:27:00	7	187	83
	23.08.2013 13:28:00	31	937	174
	23.08.2013 13:29:00	6	156	77
Britador I	23.08.2013 13:30:00	206	6406	449
	23.08.2013 13:31:00	291	9062	533
	23.08.2013 13:32:00	185	5750	425
	23.08.2013 13:33:00	279	8687	522
	23.08.2013 13:34:00	10	281	99
	23.08.2013 13:35:00	1	0	31
	23.08.2013 13:36:00	1	0	31
	23.08.2013 13:37:00	1	0	31
	23.08.2013 13:38:00	5	125	70
	23.08.2013 13:39:00	3	62	54
	23.08.2013 13:40:00	4	93	63
	23.08.2013 13:41:00	3	62	54
	23.08.2013 13:42:00	5	125	70
	23.08.2013 13:43:00	4	93	63
	23.08.2013 13:44:00	4	93	63
Brita 4	23.08.2013 13:45:00	78	2406	276
	23.08.2013 13:46:00	95	2937	305
	23.08.2013 13:47:00	89	2750	295
	23.08.2013 13:48:00	90	2781	296
	23.08.2013 13:49:00	43	1312	205
	23.08.2013 13:50:00	20	593	140
	23.08.2013 13:51:00	11	312	104
	23.08.2013 13:52:00	7	187	83
	23.08.2013 13:53:00	3	62	54
	23.08.2013 13:54:00	1	0	31
	23.08.2013 13:55:00	2	31	44
	23.08.2013 13:56:00	3	62	54
	23.08.2013 13:57:00	3	62	54

Brita 3	23.08.2013 13:58:00	63	1937	248
	23.08.2013 13:59:00	96	2968	306
	23.08.2013 14:00:00	100	3093	313
	23.08.2013 14:01:00	85	2625	288
	23.08.2013 14:02:00	128	3968	354
	23.08.2013 14:03:00	98	3031	309
	23.08.2013 14:04:00	57	1750	236
	23.08.2013 14:05:00	31	937	174
	23.08.2013 14:06:00	17	500	129
	23.08.2013 14:07:00	11	312	104
Brita 2	23.08.2013 14:08:00	3	62	54
	23.08.2013 14:09:00	1	0	31
	23.08.2013 14:10:00	3	62	54
	23.08.2013 14:11:00	3	62	54
	23.08.2013 14:12:00	3	62	54
	23.08.2013 14:13:00	9	250	94
	23.08.2013 14:14:00	62	1906	246
	23.08.2013 14:15:00	89	2750	295
	23.08.2013 14:16:00	79	2437	278
	23.08.2013 14:17:00	39	1187	195
	23.08.2013 14:18:00	21	625	143
	23.08.2013 14:19:00	137	4250	366
	23.08.2013 14:20:00	223	6937	467
	23.08.2013 14:21:00	181	5625	420
	23.08.2013 14:22:00	256	7968	500
	23.08.2013 14:23:00	333	10375	570
	23.08.2013 14:24:00	250	7781	494
	23.08.2013 14:25:00	219	6812	462
	23.08.2013 14:26:00	129	4000	355
	23.08.2013 14:27:00	61	1875	244
	23.08.2013 14:28:00	27	812	162
	23.08.2013 14:29:00	19	562	136
	23.08.2013 14:30:00	5	125	70
	23.08.2013 14:31:00	7	187	83
	23.08.2013 14:32:00	11	312	104
	23.08.2013 14:33:00	1	0	31
	23.08.2013 14:34:00	3	62	54
	23.08.2013 14:35:00	66	2102	254
	23.08.2013 14:36:00	265	7983	509

Brita 1	23.08.2013 14:37:00	221	6875	465
	23.08.2013 14:38:00	306	9531	547
	23.08.2013 14:39:00	209	6500	452
	23.08.2013 14:40:00	235	7312	479
	23.08.2013 14:41:00	259	8062	503
	23.08.2013 14:42:00	273	8500	516
	23.08.2013 14:43:00	201	6250	443
	23.08.2013 14:44:00	96	2968	306
	23.08.2013 14:45:00	57	1750	236
	23.08.2013 14:46:00	25	750	156
	23.08.2013 14:47:00	17	500	129
	23.08.2013 14:48:00	5	125	70
	23.08.2013 14:49:00	10	281	99
	23.08.2013 14:50:00	10	281	99
	23.08.2013 14:51:00	10	281	99
	23.08.2013 14:52:00	5	125	70
	23.08.2013 14:53:00	6	156	77
	23.08.2013 14:54:00	6	156	77
	23.08.2013 14:55:00	4	93	63
Areia de Brita	23.08.2013 14:56:00	7	187	83
	23.08.2013 14:57:00	278	8656	521
	23.08.2013 14:58:00	760	23718	862
	23.08.2013 14:59:00	885	27625	930
	23.08.2013 15:00:00	855	26687	914
	23.08.2013 15:01:00	866	27031	920
	23.08.2013 15:02:00	526	16406	717
	23.08.2013 15:03:00	270	8406	513
	23.08.2013 15:04:00	143	4437	374
	23.08.2013 15:05:00	82	2531	283
	23.08.2013 15:06:00	63	1937	248
	23.08.2013 15:07:00	52	1593	225
	23.08.2013 15:08:00	47	1437	214
	23.08.2013 15:09:00	50	1531	221

APÊNDICE B - Dados obtidos nas medições realizadas na segunda pedra.

	GMT_Data e Hora	Contagem Total [n]	Valor de Radônio [Bq/m3]	Incerteza da Medição [Bq/m3]
	03.09.2014 15:18:32	2	99	43
	03.09.2014 15:19:00	4	90	61
	03.09.2014 15:20:00	0	0	3
Areia de Brita	03.09.2014 15:21:00	9	242	91
	03.09.2014 15:22:00	11	302	101
	03.09.2014 15:23:00	24	696	148
	03.09.2014 15:24:00	19	545	132
	03.09.2014 15:25:00	15	424	117
	03.09.2014 15:26:00	3	60	53
	03.09.2014 15:27:00	1	0	30
	03.09.2014 15:28:00	1	0	30
Brita 4	03.09.2014 15:29:00	1	0	30
	03.09.2014 15:30:00	2	30	43
	03.09.2014 15:31:00	2	30	43
	03.09.2014 15:32:00	1	0	30
	03.09.2014 15:33:00	1	0	30
	03.09.2014 15:34:00	2	30	43
	03.09.2014 15:35:00	3	60	53
	03.09.2014 15:36:00	1	0	30
	03.09.2014 15:37:00	1	0	30
Brita 2	03.09.2014 15:38:00	4	90	61
	03.09.2014 15:39:00	1	0	30
	03.09.2014 15:40:00	3	60	53
	03.09.2014 15:41:00	1	0	30
	03.09.2014 15:42:00	2	30	43
	03.09.2014 15:43:00	1	0	30
	03.09.2014 15:44:00	6	151	74
Pedrisco	03.09.2014 15:45:00	18	515	129
	03.09.2014 15:46:00	8	212	86
	03.09.2014 15:47:00	12	333	105
	03.09.2014 15:48:00	14	393	113
	03.09.2014 15:49:00	17	484	125
	03.09.2014 15:50:00	9	242	91
	03.09.2014 15:51:00	3	60	53
	03.09.2014 15:52:00	3	60	53
	03.09.2014 15:53:00	2	30	43
	03.09.2014 15:54:00	1	0	30
	03.09.2014 15:55:00	3	60	53

	03.09.2014 15:56:00	2	30	43
	03.09.2014 15:57:00	1	0	30
	03.09.2014 15:58:00	1	0	30
	03.09.2014 15:59:00	1	0	30
	03.09.2014 16:00:00	1	0	30
	03.09.2014 16:01:00	3	60	53
	03.09.2014 16:02:00	1	0	30
	03.09.2014 16:03:00	1	0	30
	03.09.2014 16:04:00	3	60	53
	03.09.2014 16:05:00	1	0	30
	03.09.2014 16:06:00	0	0	3
	03.09.2014 16:07:00	0	0	3
	03.09.2014 16:08:00	2	30	43
	03.09.2014 16:09:00	2	30	43
	03.09.2014 16:12:00	5	121	68
	03.09.2014 16:13:00	0	0	3
	03.09.2014 16:14:00	1	0	30
	03.09.2014 16:15:00	1	0	30
	03.09.2014 16:16:00	1	0	30
	03.09.2014 16:17:00	2	30	43
	03.09.2014 16:18:00	1	0	30
	03.09.2014 16:19:00	2	30	43
	03.09.2014 16:20:00	0	0	3
	03.09.2014 16:21:00	1	0	30
	03.09.2014 16:22:00	1	0	30
	03.09.2014 16:23:00	2	30	43
	03.09.2014 16:24:00	0	0	3
	03.09.2014 16:25:00	0	0	3
	03.09.2014 16:26:00	1	0	30
	03.09.2014 16:27:00	3	60	53
	03.09.2014 16:28:00	1	0	30
	03.09.2014 16:29:00	2	30	43
	03.09.2014 16:30:00	3	60	53
	03.09.2014 16:31:00	0	0	3
	03.09.2014 16:32:00	1	0	30
	03.09.2014 16:33:00	1	0	30
Brita 1	03.09.2014 16:34:00	3	60	53
	03.09.2014 16:35:00	3	60	53
	03.09.2014 16:36:00	2	30	43
	03.09.2014 16:37:00	3	60	53
	03.09.2014 16:38:00	3	60	53

APÊNDICE C - Dados obtidos nas medições realizadas na terceira pedreira.

	GMT_Data e Hora	Contagem Total [n]	Valor de Radônio [Bq/m3]	Incerteza da Medição [Bq/m3]
	26.09.2014 14:04:00	55	1687	247
	26.09.2014 14:05:00	71	2187	285
	26.09.2014 14:06:00	103	3187	355
Pedrisco	26.09.2014 14:07:00	206	6406	551
	26.09.2014 14:08:00	232	7218	597
	26.09.2014 14:09:00	193	6000	528
	26.09.2014 14:10:00	224	6968	583
	26.09.2014 14:11:00	204	6343	548
	26.09.2014 14:12:00	207	6437	553
	26.09.2014 14:13:00	228	7093	590
	26.09.2014 14:14:00	261	8125	648
	26.09.2014 14:15:00	93	2875	334
	26.09.2014 14:16:00	24	718	157
	26.09.2014 14:17:00	7	187	83
	26.09.2014 14:18:00	17	500	131
Brita 3	26.09.2014 14:19:00	16	468	127
	26.09.2014 14:20:00	18	531	135
	26.09.2014 14:21:00	27	812	167
	26.09.2014 14:22:00	20	593	143
	26.09.2014 14:23:00	30	906	177
	26.09.2014 14:24:00	209	6500	557
	26.09.2014 14:25:00	9	250	95
	26.09.2014 14:26:00	0	0	4
	26.09.2014 14:27:00	35	1062	192
	26.09.2014 14:28:00	274	8531	670
	26.09.2014 14:29:00	567	17687	1156
	26.09.2014 14:30:00	99	3062	347
Brita 2	26.09.2014 14:31:00	22	656	150
	26.09.2014 14:32:00	26	781	164
	26.09.2014 14:33:00	31	937	180
	26.09.2014 14:34:00	33	1000	186
	26.09.2014 14:35:00	24	718	157
	26.09.2014 14:36:00	32	968	183
	26.09.2014 14:37:00	26	781	164
	26.09.2014 14:38:00	19	562	139
Areia de Brita	26.09.2014 14:39:00	14	8922	119
	26.09.2014 14:40:00	157	17832	461
	26.09.2014 14:41:00	753	23500	1455
	26.09.2014 14:42:00	535	16687	1104
	26.09.2014 14:43:00	165	5125	476

Brita 1	26.09.2014 14:44:00	60	1843	259
	26.09.2014 14:45:00	69	2125	280
	26.09.2014 14:46:00	66	843	273
	26.09.2014 14:47:00	73	2250	290
	26.09.2014 14:48:00	66	2031	273
	26.09.2014 14:49:00	54	1656	244
	26.09.2014 14:50:00	28	2031	171
	26.09.2014 14:51:00	4	93	63
	26.09.2014 14:52:00	4	93	63
	26.09.2014 14:53:00	9	250	95
	26.09.2014 14:54:00	5	125	70
	26.09.2014 14:55:00	1	0	31
	26.09.2014 14:56:00	1	0	31
	26.09.2014 14:57:00	4	93	63
	26.09.2014 14:58:00	0	0	4
	26.09.2014 14:59:00	0	0	4
	26.09.2014 15:00:00	2	31	44
	26.09.2014 15:01:00	4	93	63
	26.09.2014 15:02:00	0	0	4
	26.09.2014 15:03:00	0	0	4
	26.09.2014 15:04:00	1	0	31
	26.09.2014 15:05:00	2	31	44
	26.09.2014 15:06:00	2	31	44
	26.09.2014 15:07:00	1	0	31
	26.09.2014 15:08:00	4	93	63
	26.09.2014 15:09:00	5	125	70
	26.09.2014 15:10:00	0	0	4
	26.09.2014 15:11:00	5	125	70
	26.09.2014 15:12:00	0	0	4
	26.09.2014 15:13:00	3	62	54
	26.09.2014 15:14:00	5	125	70
	26.09.2014 15:15:00	3	62	54
	26.09.2014 15:16:00	4	93	63
	26.09.2014 15:17:00	3	62	54
	26.09.2014 15:18:00	3	62	54
	26.09.2014 15:19:00	4	93	63
	26.09.2014 15:20:00	0	0	4
	26.09.2014 15:21:00	2	31	44
	26.09.2014 15:22:00	3	62	54
	26.09.2014 15:23:00	1	0	31
	26.09.2014 15:24:00	1	0	31
	26.09.2014 15:25:00	0	0	4
	26.09.2014 15:26:00	1	0	31
	26.09.2014 15:27:00	2	31	44

26.09.2014 15:28:00	0	0	4
26.09.2014 15:29:00	0	0	4
26.09.2014 15:30:00	4	93	63
26.09.2014 15:31:00	1	0	31
26.09.2014 15:32:00	2	31	44
26.09.2014 15:33:00	2	31	44
26.09.2014 15:34:00	4	93	63
26.09.2014 15:35:00	3	62	54
26.09.2014 15:36:00	1	0	31
26.09.2014 15:37:00	4	93	63
26.09.2014 15:38:00	2	31	44
26.09.2014 15:39:00	1	0	31
26.09.2014 15:40:00	4	93	63
26.09.2014 15:41:00	0	0	4
26.09.2014 15:42:00	4	93	63
26.09.2014 15:43:00	5	125	70
26.09.2014 15:44:00	2	31	44
26.09.2014 15:45:00	2	31	44
26.09.2014 15:46:00	1	0	31
26.09.2014 15:47:00	4	93	63
26.09.2014 15:48:00	2	31	44
26.09.2014 15:49:00	0	0	4
26.09.2014 15:50:00	4	93	63
26.09.2014 15:51:00	1	0	31
26.09.2014 15:52:00	2	31	44
26.09.2014 15:53:00	2	31	44
26.09.2014 15:54:00	1	0	31
26.09.2014 15:55:00	3	62	54
26.09.2014 15:56:00	5	125	70
26.09.2014 15:57:00	0	0	4
26.09.2014 15:58:00	1	0	31
26.09.2014 15:59:00	2	31	44
26.09.2014 16:00:00	2	31	44
26.09.2014 16:01:00	2	31	44
26.09.2014 16:02:00	1	0	31
26.09.2014 16:03:00	1	0	31
26.09.2014 16:04:00	5	125	70
26.09.2014 16:05:00	6	156	77
26.09.2014 16:06:00	10	281	100
26.09.2014 16:07:00	5	125	70
26.09.2014 16:08:00	3	62	54
26.09.2014 16:09:00	2	31	44
26.09.2014 16:10:00	0	0	4
26.09.2014 16:11:00	3	62	54
26.09.2014 16:12:00	2	31	44

	26.09.2014 16:13:00	1	0	31
	26.09.2014 16:14:00	1	0	31
	26.09.2014 16:15:00	3	62	54
	26.09.2014 16:16:00	1	0	31
	26.09.2014 16:17:00	1	0	31
	26.09.2014 16:18:00	2	31	44
	26.09.2014 16:19:00	3	62	54
	26.09.2014 16:20:00	1	0	31
	26.09.2014 16:21:00	1	0	31
	26.09.2014 16:22:00	6	156	77
	26.09.2014 16:23:00	6	156	77
	26.09.2014 16:24:00	3	62	54
	26.09.2014 16:25:00	1	0	31
	26.09.2014 16:26:00	2	31	44
	26.09.2014 16:27:00	5	125	70
	26.09.2014 16:28:00	3	62	54
	26.09.2014 16:29:00	1	0	31
	26.09.2014 16:30:00	1	0	31
	26.09.2014 16:31:00	3	62	54
Brita 4	26.09.2014 16:32:00	11	312	105
	26.09.2014 16:33:00	10	281	100
	26.09.2014 16:34:00	11	312	105
	26.09.2014 16:35:00	4	93	63
	26.09.2014 16:36:00	7	187	83
	26.09.2014 16:37:00	1	0	31

APÊNDICE D - Dados obtidos nas medições realizadas na mineração subterrânea

	GMT_Data e Hora	Contagem Total [n]	Valor de Radônio [Bq/m3]	Incerteza da Medição [Bq/m3]
	23.07.2014 12:24:00	2	31	44
	23.07.2014 12:25:00	1	0	31
	23.07.2014 12:26:00	3	62	54
	23.07.2014 12:27:00	0	0	3
Entrada principal	23.07.2014 12:28:00	0	0	3
	23.07.2014 12:29:00	1	0	31
	23.07.2014 12:30:00	1	0	31
	23.07.2014 12:31:00	2	31	44
	23.07.2014 12:32:00	2	31	44
	23.07.2014 12:33:00	2	31	44
	23.07.2014 12:34:00	0	0	3
	23.07.2014 12:35:00	0	0	3
	23.07.2014 12:36:00	0	0	3
	23.07.2014 12:37:00	0	0	3
	23.07.2014 12:38:00	5	125	70
	23.07.2014 12:39:00	0	0	3
	23.07.2014 12:40:00	1	0	31
	23.07.2014 12:41:00	0	0	3
	23.07.2014 12:42:00	2	31	44
	23.07.2014 12:43:00	2	31	44
	23.07.2014 12:44:00	0	0	3
	23.07.2014 12:45:00	4	93	63
	23.07.2014 12:46:00	4	93	63
	23.07.2014 12:47:00	5	125	70
	23.07.2014 12:48:00	2	31	44
	23.07.2014 12:49:00	1	0	31
	23.07.2014 12:50:00	3	62	54
	23.07.2014 12:51:00	1	0	31
	23.07.2014 12:52:00	0	0	3
	23.07.2014 12:53:00	4	93	63
	23.07.2014 12:54:00	0	0	3
	23.07.2014 12:55:00	1	0	31
	23.07.2014 12:56:00	1	0	31
Exaustão	23.07.2014 12:57:00	1	0	31
	23.07.2014 12:58:00	0	0	3
	23.07.2014 12:59:00	2	31	44
	23.07.2014 13:00:00	0	0	3
	23.07.2014 13:01:00	1	0	31
	23.07.2014 13:02:00	1	0	31

	23.07.2014 13:03:00	1	0	31
	23.07.2014 13:04:00	0	0	3
	23.07.2014 13:05:00	2	31	44
	23.07.2014 13:06:00	3	62	54
	23.07.2014 13:07:00	1	0	31
	23.07.2014 13:08:00	0	0	3
	23.07.2014 13:09:00	1	0	31
	23.07.2014 13:10:00	1	0	31
	23.07.2014 13:11:00	2	31	44
	23.07.2014 13:12:00	0	0	3
	23.07.2014 13:13:00	4	93	63
	23.07.2014 13:14:00	0	0	3
	23.07.2014 13:15:00	1	0	31
	23.07.2014 13:16:00	1	0	31
	23.07.2014 13:17:00	0	0	3
	23.07.2014 13:18:00	1	0	31
	23.07.2014 13:19:00	2	31	44
	23.07.2014 13:20:00	1	0	31
Frente 1	23.07.2014 13:21:00	2	31	44
	23.07.2014 13:22:00	3	62	54
	23.07.2014 13:23:00	3	62	54
	23.07.2014 13:24:00	2	31	44
	23.07.2014 13:25:00	1	0	31
	23.07.2014 13:26:00	1	0	31
	23.07.2014 13:27:00	1	0	31
	23.07.2014 13:28:00	1	0	31
	23.07.2014 13:29:00	1	0	31
	23.07.2014 13:30:00	0	0	3
	23.07.2014 13:31:00	1	0	31
	23.07.2014 13:32:00	0	0	3
	23.07.2014 13:33:00	1	0	31
	23.07.2014 13:34:00	1	0	31
	23.07.2014 13:35:00	2	31	44
	23.07.2014 13:36:00	2	31	44
	23.07.2014 13:37:00	0	0	3
	23.07.2014 13:38:00	2	31	44
	23.07.2014 13:39:00	3	62	54
	23.07.2014 13:40:00	1	0	31
	23.07.2014 13:41:00	2	31	44
	23.07.2014 13:42:00	1	0	31
	23.07.2014 13:43:00	2	31	44
	23.07.2014 13:44:00	1	0	31
	23.07.2014 13:45:00	1	0	31
	23.07.2014 13:46:00	1	0	31

	23.07.2014 13:47:00	3	62	54
	23.07.2014 13:48:00	1	0	31
	23.07.2014 13:49:00	0	0	3
	23.07.2014 13:50:00	4	93	63
	23.07.2014 13:51:00	2	31	44
	23.07.2014 13:52:00	2	31	44
	23.07.2014 13:53:00	0	0	3
	23.07.2014 13:54:00	1	0	31
	23.07.2014 13:55:00	2	31	44
	23.07.2014 13:56:00	1	0	31
	23.07.2014 13:57:00	3	62	54
	23.07.2014 13:58:00	1	0	31
	23.07.2014 13:59:00	1	0	31
	23.07.2014 14:00:00	1	0	31
	23.07.2014 14:01:00	2	31	44
	23.07.2014 14:02:00	5	125	70
	23.07.2014 14:03:00	1	0	31
	23.07.2014 14:04:00	3	62	54
	23.07.2014 14:05:00	0	0	3
	23.07.2014 14:06:00	2	31	44
	23.07.2014 14:07:00	1	0	31
	23.07.2014 14:08:00	0	0	3
	23.07.2014 14:09:00	1	0	31
	23.07.2014 14:10:00	1	0	31
	23.07.2014 14:11:00	3	62	54
	23.07.2014 14:12:00	1	0	31
	23.07.2014 14:13:00	0	0	3
	23.07.2014 14:14:00	1	0	31
	23.07.2014 14:15:00	1	0	31
Frente 2	23.07.2014 14:16:00	0	0	3
	23.07.2014 14:17:00	1	0	31
	23.07.2014 14:18:00	1	0	31
	23.07.2014 14:19:00	3	62	54
	23.07.2014 14:20:00	3	62	54
	23.07.2014 14:21:00	0	0	3
	23.07.2014 14:22:00	1	0	31
	23.07.2014 14:23:00	3	62	54