

MATEUS DELAI RODRIGUES LIMA

Avaliação de radônio em agregados utilizados na construção civil

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston.

Divisão de Biblioteca da EPUSP
Biblioteca de Engenharia de Minas

São Paulo
2014

MATEUS DELAI RODRIGUES LIMA

Avaliação de radônio em agregados utilizados na construção civil

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston.

2014

2014

2014

2014

TF-2014

L 628a

Lpno 2667452

H2014d

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009813

Catalogação-na-publicação

Lima, Mateus Delai Rodrigues

Avaliação de radônio em agregados utilizados na construção civil / M.D.R. Lima. -- São Paulo, 2014.

50 p.

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

1.Saúde ocupacional 2.Radônio 3.Agregados I.Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston por ter acreditado e investido neste trabalho, e a toda equipe de seu Laboratório de Controle Ambiental, Segurança e Higiene na Mineração (LACASEMIN), especialmente a Profa. Dr. Maria Renata M. Stellin, pelo suporte e incentivo.

Ao Prof. Mauro Gandolla, da Università della Svizzera italiana (USI), por sua incrível disposição em compartilhar seu conhecimento em cada uma de suas visitas ao Brasil, e a Msc. Thammiris M. El Hajj por todo auxílio nos experimentos e textos deste trabalho.

Aos a meus pais, Augusta B. D. R. Lima e Rodrigo R. R. Lima, por todos os sacrifícios que tiveram que fazer para me darem a oportunidade de chegar onde cheguei, e a minha namorada, Giuliana L. Domingues, por todo apoio e incentivo nas horas difíceis.

RESUMO

O gás radônio (Rn) é gerado a partir de qualquer material que contenha um dos três precursores das séries radioativas naturais. Um exemplo de material que gera este gás é a brita utilizada como material de construção. O objetivo deste estudo foi apresentar uma comparação entre a emanação de gás radônio em diferentes frações granulométricas de três britas diferentes. A metodologia do trabalho consistiu na visita às pedreiras para coleta das amostras e posterior tratamento destas. As etapas de tratamento foram: britagem, homogeneização, peneiramento a seco, lavagem das alíquotas para retirar os finos arrastados com as frações mais grossas e secagem em estufa. Após a etapa de tratamento, foram realizadas as medições da emanação de gás radônio utilizando uma Câmara de Lucas para mensurar a quantidade de raios alfa em Bq/m^3 , esta medida foi realizada com o auxílio de um tubo confeccionado especialmente para acondicionar a amostra. Os resultados mostraram um aumento da emanação conforme a granulometria do material diminui, e mostraram que a maior parte do Radônio em duas das amostras aparece na forma do isótopo Torônio. Foi também realizada uma comparação entre a medida com Célula de Lucas e um monitor de contaminação que consiste em um medidor de raios alfa separadamente dos raios beta e gama nas amostras.

Palavras-chave: Radônio. Mineração. Construção.

ABSTRACT

Radon gas (Rn) is generated from any material containing one of the three precursors belonging to the natural radioactive series, for example crushed stone, used as building material. The aim of this study was to present a comparison between the emanations of radon gas in different size fractions of three different granites. The methodology of the research was to visit the quarries to collect the samples and subsequent treatment of these. The processing steps were crushing, homogenization, screening, washing and drying in an oven of each fraction of the material. After the treatment phase, measurements of radon emanation gas were made using a Lucas's Cell which measures the amount of alpha rays in Bq/m³. This measurement was performed with a tube made to store the samples designed especially for this experiment. The results showed an increase of emanation of the material as the particle size decreases, and showed that most part of the Radon in two of the samples appears in the form of the isotope Thoron. A comparison between the measurement with Lucas's Cell and a contamination monitor which measures alpha rays separately from beta and gamma rays was also performed for the three samples.

Keywords: Radon. Mining. Construction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Escalas de decaimento radioativo (FIOR, 2008).....	14
Figura 2. Escalas de decaimento radioativo (FIOR, 2008).....	14
Figura 3. Saída do radônio do Solo. Na figura estão mencionados os elementos Radon (radônio), Radium (Rádio) e Uranium (Urânio). (EPA-USA, 2010).....	16
Figura 4. Mapa da porcentagem de casas acima do valor crítico para tomada de uma ação. Fonte: UK Health Protection Agency (2007).....	17
Figura 5. Mecanismo de entrada do Radônio em construções.....	19
Figura 6. Comparaçao de causas de morte nos Estados Unidos.....	20
Figura 7. Distribuição do Radônio no corpo humano (Fonte: EPA-USA).....	21
Figura 8. Processo de liberação do gás radônio para a atmosfera.....	23
Figura 9. Coleta do material utilizado no trabalho. (Fonte: Arquivo Pessoal).....	29
Figura 10. Pilha Alongada construída para amostragem.....	30
Figura 11. Britador de Rolos utilizado na cominuição do material.....	30
Figura 12. Conjunto utilizado na lavagem do material.....	31
Figura 13. Fluxograma do processo de preparação da amostra.....	32
Figura 14. Equipamento RadonMapper utilizado nas medições.....	33
Figura 15. Projeto utilizado para elaboração do tubo de acondicionamento da amostra.....	34
Figura 16. Tubo para acondicionamento da amostra.....	34
Figura 17 Medidor de vazão utilizado (Fonte: Arquivo Pessoal)	35
Figura 18. Esquema de medição em laboratório.....	35
Figura 19. Arranjo de equipamentos para medição em laboratório.....	36
Figura 20. Monitor de Contaminação Radioativa SEA CoMo170	36
Figura 21. Medição de Radônio, Umidade, Temperatura e Pressão na Amostra A ..	38
Figura 22. Comparação Entre entrada e Saída de Radônio.....	38
Figura 23. Emanação de Radônio da Amostra A	39
Figura 24. Resumo dos Resultados	40
Figura 25. Diferenciação de Rn ²²² e Rn ²²⁰ na amostra A.....	41
Figura 26. Diferenciação de Rn ²²² e Rn ²²⁰ na amostra B	42
Figura 27. Curva granulométrica da amostra.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre número de prótons, neutros, massas molares e meias vidas dos diferentes isótopos de radônio.....	15
Tabela 2. Descrição dos locais de coletas das amostras.	28
Tabela 3. Condições das medições realizadas	37
Tabela 4. Resumo dos Resultados de Emanação de Radônio	40
Tabela 5. Medições realizadas com o detector de radiação Alfa e Beta	42
Tabela 6. Distribuição Granulométrica do material amostrado.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVO.....	11
1.2. JUSTIFICATIVA.....	11
2. REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1. ASPECTOS FÍSICOS E QUÍMICOS	12
2.2. COMPORTAMENTO DO RADÔNIO.....	15
2.3. RISCO À SAÚDE.....	20
2.4. COMPORTAMENTO DO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	22
2.5. AGREGADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. COLETA DOS MATERIAIS.....	28
3.2. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS.....	29
3.3. MEDIÇÃO DE RADÔNIO.....	33
3.4. MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO ALFA E BETA	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1. MEDIÇÃO DE RADÔNIO.....	37
4.1.1. Condições das Medidas	37
4.1.2. Medição com RadonMapper	37
4.1.3. Diferenciação Radônio e Torônio	41
4.2. MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO ALFA E BETA	42
5. CONCLUSÕES	43
ANEXO A – CURVA GRANULOMÉTRICA	45
ANEXO B – EXEMPLO DE OUTPUT DO RADONMAPPER	45
ANEXO C – FOTOS DA MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO ALFA E BETA	47

1. INTRODUÇÃO

Radônio é um elemento químico que se apresenta na forma de gases radioativos. A exposição prolongada a níveis elevados destes gases pode implicar em um aumento significativo nas chances da pessoa exposta desenvolver câncer de pulmão. Para se estudar os principais aspectos da proteção ao radônio é necessária uma abordagem multidisciplinar: envolvendo desde conceitos químicos e físicos das radiações até aspectos geológicos e de engenharia. É por isso que deseja-se olhar para questão do Radônio sob um ponto de vista da Higiene Ocupacional.

A Higiene Ocupacional é a ciência da antecipação, reconhecimento, avaliação e controle de fatores de riscos que ocorrem no local de trabalho ou dele provém e podem prejudicar a saúde e o bem-estar dos trabalhadores, também levando em consideração o possível impacto nas comunidades adjacentes e no meio ambiente em geral.

Por conta disso, a Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, através do Laboratório de Controle Ambiental, Segurança e Higiene na Mineração (LACASEMIN), deu início a uma série de pesquisas sobre o tema, e, em parceria com a Universidade Suíço-Italiana, trouxe equipamentos e técnicas para estudar e detectar a presença de Radônio.

A análise de Radônio em agregados da construção Civil é apenas uma parte das pesquisas que se deseja desenvolver dentro do LACASEMIN sobre este tema ainda pouco estudado.

1.1. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi comparar a emanação de do gás radônio em diferentes frações granulométricas de três tipos diferentes de britas, visando proteger a saúde tanto dos trabalhadores que operam a extração desse material quanto das pessoas que frequentam construções feitas a partir deles.

1.2. JUSTIFICATIVA

Apesar de ser um problema pouco conhecido, o radônio é a segunda maior causa de câncer de pulmão no mundo, atrás apenas do cigarro (WHO, 2009). O câncer de pulmão é uma doença bastante agressiva, em média menos de 20% dos diagnosticados sobrevivem mais de cinco anos após a doença constatada (AMERICAN LUNG ASSOCIATION, 2014).

Embora medidas de Radônio já tenham sido feitas em minas e em casas, mesmo próximas à cidade de São Paulo, nunca houve um trabalho voltado para agregados de construção civil. Sabe-se que o gás Radônio é uma ameaça, e apesar disso pouco foi feito para verificar a existência dele em casas, e muito menos para rastrear sua origem.

Justifica-se o trabalho então na intenção, não só de verificar o Radônio em três diferentes amostras, mas na intenção de divulgar e contribuir com a discussão sobre a proteção contra o gás Radônio, uma discussão não só sobre matérias prima minerais, mas sim sobre saúde pública e bem estar da população.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ASPECTOS FÍSICOS E QUÍMICOS

O Urânio é um elemento químico presente na crosta terrestre que se associa a outros elementos formando minerais. Por conta do elevado número de prótons e nêutrons que compõe seu núcleo, todas as formas existentes de Urânio são instáveis, ou seja, com o passar do tempo irão mudar a configuração para uma de menor energia, se transformando em outros elementos num processo chamado decaimento radioativo.

Cada vez que uma dessas transformações ocorre há liberação de radiação, e neste caso o átomo que antes era Urânio se tornará Tório. Por ser instável, como o Urânio, o Tório também decai e os novos elementos gerados por ele também decaem, formando uma sequência que só irá parar em um elemento estável. Para um mesmo elemento inicial (chamado de pai) há uma sequência determinada de filhos esperados, como na Figura 2, e cada uma destas sequências está se repetindo a bilhões de anos no interior da Terra. (SERWAY e JEWETT JR., 2009).

É impossível saber com exatidão quando um átomo instável sofrerá seu decaimento, porém, em uma população de um mesmo átomo é possível prever com bastante precisão quantos são esperados para sofrer decaimento (CARDOSO, 2005). Esta taxa de decaimentos por tempo é chamada de atividade da amostra e é sempre a mesma para todas as amostras do mesmo isótopo. No Sistema Internacional (SI) de unidades, a unidade da taxa de decaimento radioativo é o becquerel (Bq), que corresponde a um decaimento por segundo, ou seja, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimento/s}$. Outra unidade comum de atividade aplicada a todos os tipos de radioatividade é o Curie (Ci), que é definido como $1 \text{ Ci} = 3,70 \times 10^{10} \text{ decaimentos/s}$, ou seja $3,70 \times 10^{10} \text{ Bq}$ (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

Caso haja uma população de um mesmo átomo instável isolada, esta irá diminuir por causa dos decaimentos, e após certo tempo será metade população da população

inicial. O tempo para que a população se torne metade da inicial é menor se o átomo tiver taxa de decaimento mais alta, ou seja, for mais instável, ou é menor se o átomo for menos instável. O tempo para que metade da massa de uma amostra inicial tenha decaído é chamado de “Meia Vida” e é também é sempre o mesmo para uma mesma população de um átomo determinado (SERWAY e JEWETT JR., 2009).

Quando o decaimento radioativo ocorre parte do átomo se separa, e isto pode ocorrer de três formas principais: raios alfa (α), em que as partículas emitidas são núcleos de ${}^4\text{He}$, ou seja, dois prótons e dois neutros; raios beta (β), nos quais as partículas emitidas são elétrons e raios gama (γ), nos quais as partículas emitidas são fôtons de alta energia (SERWAY & JEWETT Jr., 2009).

O radônio está classificado, na tabela periódica, na família dos gases nobres e tem 86 prótons no núcleo (Figura 1.). Não há nenhum isótopo deste elemento que não seja emissor de radiação, mas cada isótopo tem um tempo de meia vida diferente, e por isso diferenciá-los é importante. Os isótopos são identificados por um número que é a soma do número de prótons e neutros (massa atômica). São três os que representam a maior ameaça: Rn^{222} , com meia vida de 3,8 dias; Rn^{220} com meia vida de 56 segundos; e Rn^{219} com meia vida de 4 segundos (WHO, 2009). Os três isótopos são apresentados na Figura 2 e Tabela 1.

Figura 1. Escalas de decaimento radioativo (FIOR, 2008).

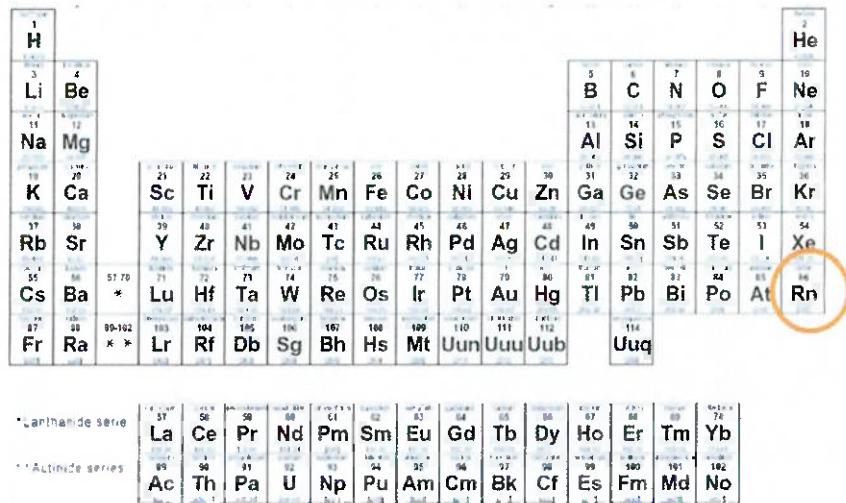
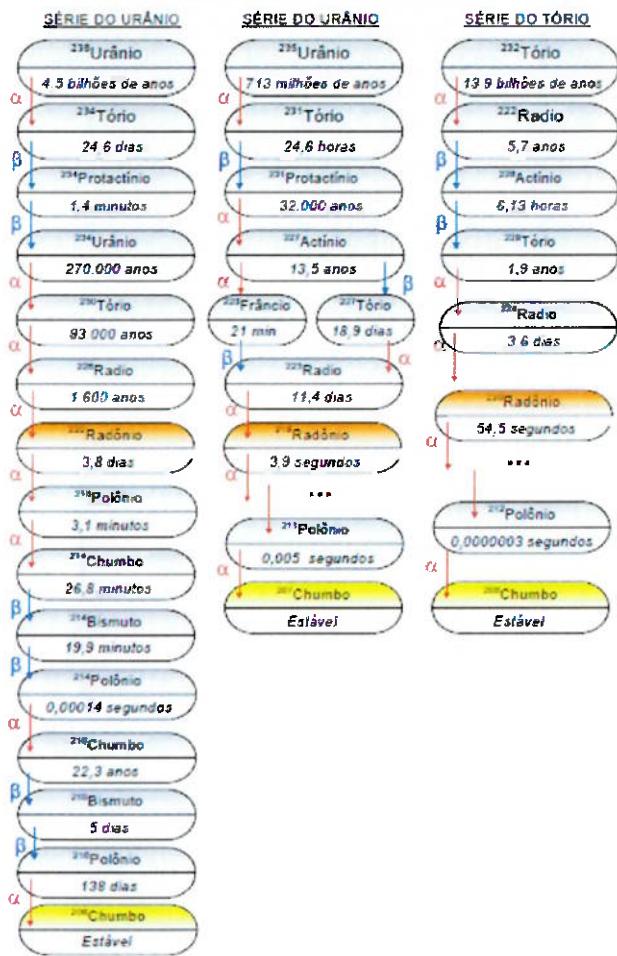


Figura 2. Escalas de decaimento radioativo (FIOR, 2008).

SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS



No caso do Rn²¹⁹, chamado também de Actínion, como a meia vida é apenas 4s, passados 40s o número de átomos terá sido dividido pela metade tantas vezes que sobrará apenas 0,001% do inicial. Nesses 40s dificilmente o gás terá saído do solo, e terá poucas chances de chegar ao pulmão de alguma pessoa, portanto, dificilmente será detectado pelos equipamentos (ISHIMORI, LANGE, et al., 2013). Mesmo assim, há casos específicos em que ele pode ser uma ameaça, por exemplo, em algumas minerações. O isótopo Rn²²² é chamado de gás radônio, enquanto o Rn²²⁰ é chamado, por motivos históricos de sua descoberta, de Torônio. (WHO, 2009).

Tabela 1. Comparação entre número de prótons, neutros, massas molares e meias vidas dos diferentes isótopos de radônio.

Isótopos			
Nome	Actínion - Rn ²¹⁹	Torônio - Rn ²²⁰	Radônio - Rn ²²²
Prótons	86	86	86
Nêutrons	133	134	136
Massa Molar	219	220	222
Meia Vida	4s	56s	3,8dias

A posição do radônio na tabela periódica também dá informações importantes sobre ele, especialmente o fato de ele pertencer à família dos gases nobres (décima oitava coluna da tabela). Todos os gases nobres têm em comum a baixa (ou praticamente nula) reatividade, ou seja, o radônio não aparecerá naturalmente combinado com outros elementos, ou mesmo combinado com ele mesmo. Isso ocorre, pois as ligações químicas ocorrem através principalmente de compartilhamento de elétrons ou de atração eletrostática entre átomos, sempre levando os átomos envolvidos a formarem camadas de elétrons mais estáveis, mas os gases nobres já têm a camada de elétrons muito estável, completa, então tendem a não reagir.

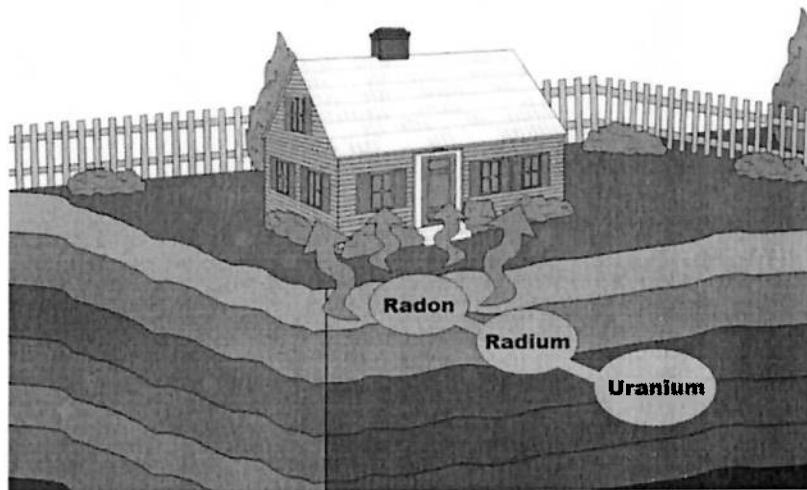
2.2. COMPORTAMENTO DO RADÔNIO

O U²³⁵, o U²³⁸ e o Tório Th²³² são pais das séries de decaimentos onde estão os principais isótopos de radônio. Estes dois isótopos formam minerais ligando-se a

outros elementos, e estão naturalmente dispersos pela crosta terrestre, sendo, por exemplo, cerca de mil vezes mais comuns que o ouro (HAXEL, HENDRICK e ORRIS, 2007). No subsolo, esses minerais irão sofrer seus decaimentos, e formarão novos elementos, novos minerais, e, consequentemente, gerarão radônio em algum momento, como ilustra a Figura 3.

Os minerais geradores de radônio não estão uniformemente distribuídos pela Terra, e sendo assim há lugares onde eles são mais abundantes e lugares em que eles são praticamente inexistentes. Então, não são todas as partes do globo que terão problema com esse gás, e, por consequência, também haverá regiões em que esses problemas serão potencializados.

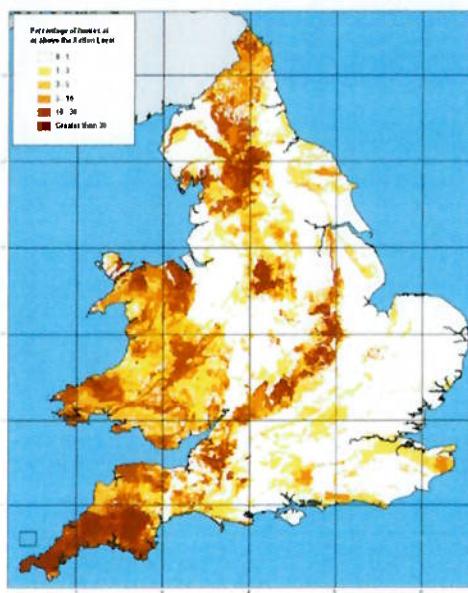
Figura 3. Saída do radônio do Solo. Na figura estão mencionados os elementos Radon (radônio), Radium (Rádio) e Uranium (Urânio). (EPA-USA, 2010).



Apesar de ser clara a existência de uma relação entre a formação do terreno e os problemas com radônio, o número de variáveis geológicas envolvidas nessa relação é enorme. Por conta disso ainda não é possível estimar com uma precisão razoável o quanto desse elemento existirá dentro de uma construção apenas projetando-a. Para fins de previsão, o que é comumente feito hoje, é medir os níveis do Rn em construções existentes espalhadas pelos países, e a partir desses dados é possível levantar quais regiões são mais problemáticas (WHO, 2009).

As autoridades utilizam estes dados para decidir onde focar mais as campanhas de conscientização e prevenção. O Reino Unido fez um levantamento desse tipo, resultando em um mapa (Figura 4), onde estão marcadas em vermelho escuro, por exemplo, regiões onde mais de 30% das casas avaliadas estão com a média acima de um valor considerado crítico por eles.

Figura 4. Mapa da porcentagem de casas acima do valor crítico para tomada de uma ação. Fonte: UK Health Protection Agency (2007).



Sabe-se que, para ser de fato uma ameaça o gás radônio deve chegar à atmosfera, ou seja, um meio na qual ele realmente possa ser respirado. Quando o gás gerado fica preso no subsolo ele não chegará a ser inalado e nem a gerar poeira radioativa, logo não poderá prejudicar a saúde da população em geral. É por isso que saber quão fácil é de o Radônio escapar da rocha ou solo onde ele está é crítico. Se o gás ficar aprisionado tempo suficiente para decair novamente e virar partícula sólida, ela se depositará e dificilmente sairá do subsolo (WHO, 2009).

Um dos parâmetros que auxiliam a quantificar essa permeabilidade dos solos e rochas ao gás é a permeabilidade. Quanto maior a permeabilidade, mais vazios tem o material, e então mais caminhos para o gás percorrer. No caso de uma rocha, há também como parâmetro o seu fraturamento natural, que poderá oferecer ainda mais

para o fluxo deste gás. A umidade do solo pode ser determinante também, pois ela pode penetrar os espaços vazios, mudando também o regime de saída do gás. Mais do que isso, quando está em contato direto com uma rocha geradora de Radônio, como em um lençol freático, a água pode passar a carregar Radônio também (apesar do baixo coeficiente de solubilidade do Rn em água), e trazê-lo para superfície, sendo mais um fator alterador de concentrações.

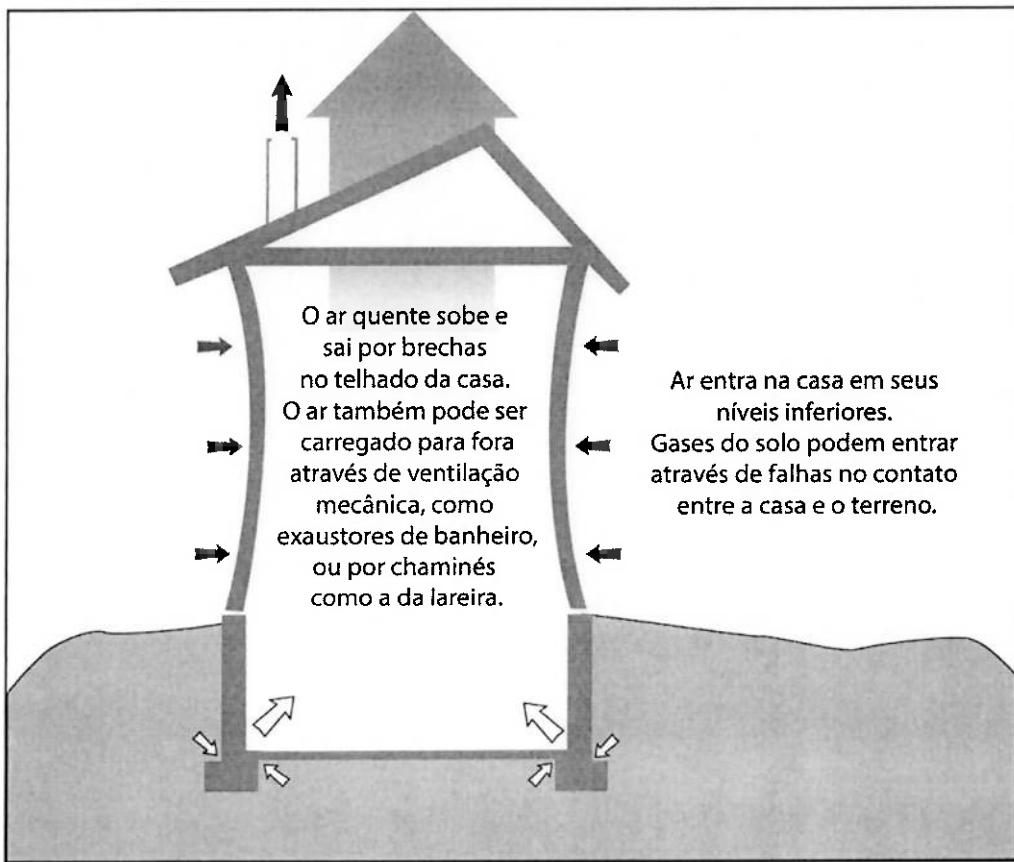
Por outro lado, pode haver um solo bastante rico em minerais que geram Radônio, bastante poroso, e mesmo assim, ao se fazer medições no ar desse local, durante um dia, o resultado não ser muito elevado (WHO, 2009). O ar na atmosfera e os gases presentes no solo estão em constante equilíbrio: o ar atmosférico exerce uma pressão empurrando os gases para dentro do solo, enquanto os gases do solo forçam sua saída para atmosfera. A pressão atmosférica varia conforme fatores climáticos, como temperatura, umidade, entre outros, e estes fatores deslocam o equilíbrio: se a pressão atmosférica aumenta a saída dos gases do solo diminui, e assim cai a concentração de Radônio no ar, enquanto que se a pressão abaixa o contrário ocorre, a concentração de Radônio sobe.

De maneira geral, prédios, especialmente casas, tendem a acumular o gás em seus interiores. Isso pode ocorrer por vários motivos, mas um deles é porque, em boa parte do tempo, a temperatura no interior de uma casa é maior que a temperatura externa. Quando o ar interno da casa está mais quente se torna menos denso que o ar externo mais frio, e por isso esse ar irá subir e poderá escapar pelo telhado por exemplo. Quando o ar quente sai, a pressão na casa fica ligeiramente menor que a externa, então mais ar entrará na casa para compensar este desequilíbrio. Esse novo ar pode vir do solo, entrar através de trincas ou frestas, especialmente em cômodos no térreo ou porões.

Quando ocorre este jogo de pressões a casa está “sugando” Radônio da terra para seu interior, extraíndo esse gás numa taxa mais alta do que ele sairia normalmente para a atmosfera. A consequência é que ele fica mais concentrado no interior da casa do que ao ar livre.

Determinados equipamentos, como exaustores de cozinha ou banheiro, podem gerar também essa diferença de pressão, porque estão continuamente jogando ar para fora do ambiente, e esse ar pode ser reposto por ar vindo do solo, carregado de Radônio (Figura 5).

Figura 5. Mecanismo de entrada do Radônio em construções (Fonte: EPA-USA, adaptada).



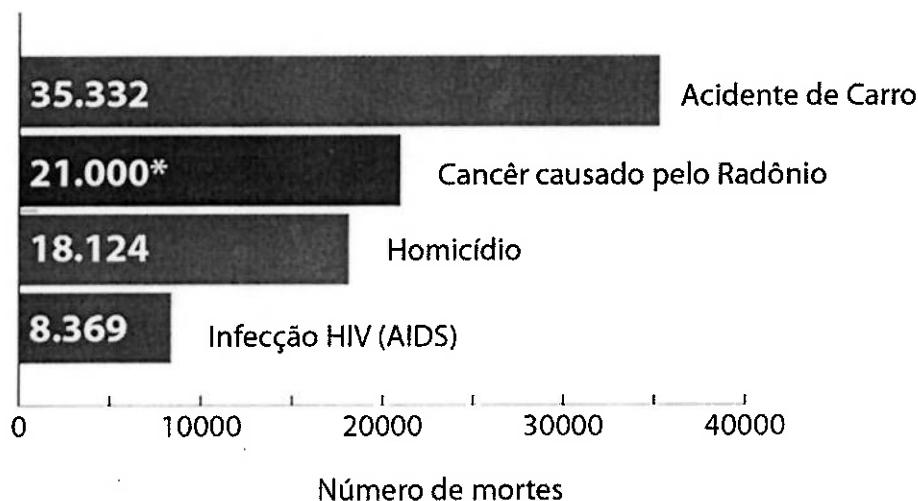
Um dos fatores que mais pode prejudicar os estudos no solo e no interior das casas é o fato da rocha geradora de radônio não necessariamente estar no subsolo. Grande parte das construções é feita ou revestida por material rochoso e este também deve ser estudado, pois não são poucos os minerais de construção civil e rochas ornamentais emissores de Radônio.

2.3. RISCO À SAÚDE

Os Estados Unidos são referência em estudos sobre o Radônio, e o governo americano aborda esse tema através da *Environmental Protection Agency* (EPA-USA), agência de proteção ambiental. Essa agência faz levantamentos, estimativas, e cria procedimentos para medições de Radônio, e é responsável por fazer campanhas de conscientização do problema para população dos Estados Unidos. Para dar outra dimensão da ameaça representada pelo gás em questão, a EPA-USA fez uma estimativa do número de mortes causadas por ano por conta do câncer de pulmão causado pelo Radônio: 21.000.

Esse número, colocado em perspectiva com alguns dados do centro de controle e prevenção de doenças também dos Estados Unidos (*Center for Disease Control and Prevention*) permitem fazer a comparação na Figura 6. Ainda para fins de comparação, nesse mesmo ano em que a estimativa de 21.000 mortes por câncer de Radônio foi feita (2005), morreram 2.448.017 pessoas no total nos Estados Unidos, ou seja, 0,86% das mortes daquele ano (quase uma morte a cada cem) teriam sido causadas pelo Radônio.

Figura 6. Comparação de causas de morte nos Estados Unidos (Fonte: EPA-USA, adaptada)..

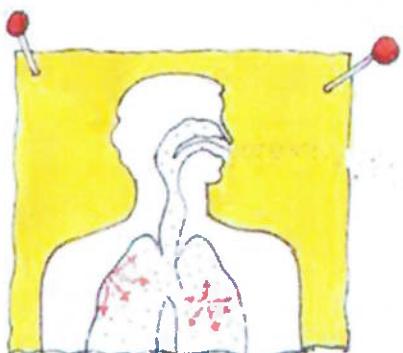


Câncer é o nome dado a um conjunto de doenças decorrentes da reprodução descontrolada de células que tiveram sua estrutura genética (DNA) aletrada (AMERICAN LUNG ASSOCIATION, 2014). Essas células invadem diferentes tecidos e podem ser danosas, se acumulando e ameaçando a vida do doente. As origens possíveis para essas células de estrutura genética alterada são bastante diversas, mas uma possibilidade é que uma partícula, ou energia, interfira no exato momento da replicação do material genético, alterando pontualmente parte ou partes de sua cadeia e dessa forma mudando algum aspecto crítico de seu funcionamento, fazendo ela se tornar uma célula cancerígena. A radiação ionizante, como aquela emitida pelo Radônio, tem essa capacidade.

A Radiação do Radônio é do tipo alfa, que tem como característica possuir uma alta energia, mas que é suficiente para causar uma mudança no DNA, mas ter também um baixo poder de penetração, ou seja, ela não é capaz de viajar muito mais que alguns centímetros no ar, e distâncias ainda menores em outros meios (SERWAY e JEWETT JR., 2009).

A partícula alfa muitas vezes não é capaz de atravessar sequer a pele humana, e por isso quando vem de fontes externas, não representa um problema tão alarmante. O grande problema do radônio decorre do fato dele ser um gás. Porque uma vez que este gás é respirado, e a partícula alfa é emitida de dentro do seu corpo, ela poderá incidir diretamente sobre algumas das células mais sensíveis a efeitos radioativos, que são as do pulmão (AMERICAN LUNG ASSOCIATION, 2014). A Figura 7 mostra a movimentação das partículas de gás radônio no corpo humano.

Figura 7. Distribuição do Radônio no corpo humano (Fonte: EPA-USA).



Os efeitos no corpo humano causados pelo Radônio não acabam com essa emissão alfa. Esse gás, quando decai, dá origem a outros elementos, e estes ainda não são estáveis, ou seja, eles vão emitir ainda mais radiação. Só que os elementos gerados pelo Radônio não são mais gases, e sim sólidos, o que quer dizer que eles podem se depositar no pulmão, de onde não sairão mais, e onde poderão continuar a decair. Quando todos os decaimentos tiverem ocorrido, o elemento restante será chumbo, que continuará depositado no corpo por se tratar de um metal pesado.

O Radônio pode sofrer seu decaimento no ar, sem estar no interior do corpo humano, e assim sua emissão alfa não representará um grande problema, mas ao fazer isso ele deixa em suspensão partículas de materiais pesados radioativos, criando uma poeira radioativa, que pode se depositar no pulmão de quem a respirar.

Conforme a exposição ao Radônio aumenta, também aumentam as chances de se desenvolver câncer de pulmão. Uma publicação afirma que a probabilidade de se desenvolver câncer de pulmão aumenta em 50% para uma pessoa exposta diariamente a concentrações acima de 4 picocurie por litro (pCi/L) (148 Bq/m³) (FIELD, STECK e SMITH, 2000), e ainda assim essa concentração é encontrada, segundo a EPA, em uma a cada quinze casas americanas. Os efeitos do Radônio também podem se somar aos do cigarro.

2.4. COMPORTAMENTO DO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Já existem diretrivas na Europa outros tipos de normas entrando em vigor pelo mundo, regulamentando o quanto de radônio o material de construção pode gerar para ser utilizado, desenvolveu-se uma metodologia de para fazer essa avaliação de maneira eficiente é importante.

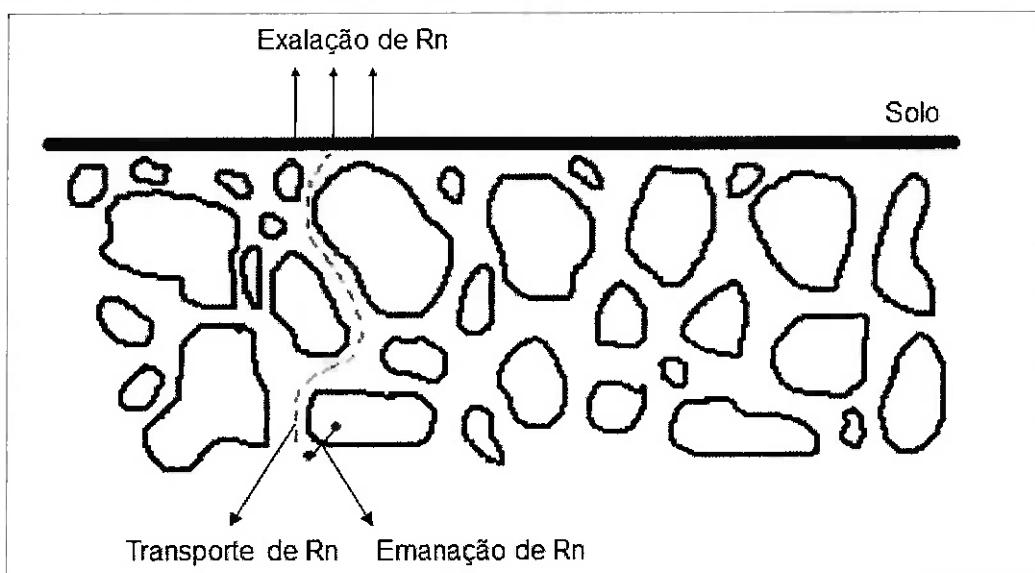
A metodologia europeia estipula um limite em função da atividade dos elementos predecessores do radônio material. Para esta avaliação, é feita uma espectrometria

de raios gama, e assim é possível a atividade dos percursos por massa de material e, assim, estimar a quantidade de Radônio formada. Porém, é improvável que um átomo de radônio, localizado no interior de um grão, escape para a atmosfera, por conta do baixo coeficiente de difusão do gás em meio sólido (ISHIMORI, LANGE, et al., 2013).

Entretanto, se este átomo estiver localizado no espaço intersticial entre os grãos ele poderá sair mais facilmente do meio sólido e se difundir até a atmosfera. Existem assim três mecanismos que devem ocorrer para que este o radônio escape do solo, ou da rocha para atingir a superfície (Figura 8):

- Emanação: átomos de Radônio, provenientes do decaimento do rádio, escapam do interior para o espaço intersticial entre grãos.
- Transporte: O Radônio que escapou do espaço interno ao grão é transportado até a superfície do material, ou por fluxo advectivo ou por difusão.
- Exalação: O radônio escapa dos espaços internos do material e vai a atmosfera.

Figura 8. Processo de liberação do gás radônio para a atmosfera. (Fonte: AIEA, adaptada).



A quantidade de Radônio disponível para o transporte até a superfície é dada então pela taxa de produção de Radônio por unidade de volume de material P ($\text{Bq}^*\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$) (ISHIMORI, LANGE, et al., 2013).

Equação 1. Produção de radônio em função de sua constante de decaimento, coeficiente de emanação, concentração de rádio e densidade.

$$P = \lambda E R \rho_b$$

λ – É a constante de decaimento do radônio (s^{-1}).

E – É o coeficiente de emanação (adimensional).

R – É a concentração de atividade de Rádio no material (Bq/kg).

ρ_b – É a densidade do material (kg/m^3).

Este é o termo de geração de radônio em um material particular. Pode-se notar que a produção de Radônio aumenta com o coeficiente de emanação, com a atividade de Rádio e com a densidade do material, sendo que a constante de decaimento do Radônio será sempre a mesma. A preocupação da norma europeia está em torno apenas do fator R da Equação 1, sendo que a produção real de Radônio em um material depende igualmente de seu coeficiente de emanação, desconsiderado até então.

Radônio nos espaços intersticiais pode ser transportado para a superfície através de difusão ou de um fluxo advectivo. O fluxo advectivo pode ser significativo em alguns casos onde o radônio está sendo arrastado por outros gases ou água, mas no geral o mecanismo de transporte predominante é a difusão, e por isso muitas vezes o fenômeno do transporte do radônio é referido apenas como difusão. Após a emanação e o transporte para superfície, o radônio pode ser liberado para atmosfera. Essa liberação é chamada de exalação e é caracterizada pelo fluxo de exalação ($\text{Bq}^*\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

O coeficiente de emanação é definido pela fração de átomos gerada que escapa da fase sólida para outro meio. No geral, é aceito que o Radônio escapa de um grão devido a um efeito chamado *recoil*, quando seu elemento pai, o Rádio, decai. Este recuo do material é causado pela conservação da quantidade de movimento da partícula, ou seja, quando parte da massa do material se desprende e sai como radiação, o material é lançado na direção oposta. Como o alcance do recoil é pequeno, tipicamente menor que $0,05\mu\text{m}$, a maioria dos átomos decaídos permanece no interior do grão. O movimento posterior deste gás no interior do grão dificilmente contribuirá para a emanação de radônio devido ao baixíssimo coeficiente de difusão no interior dos minerais, da ordem de $10-25$ a $10-27 \text{ m}^2/\text{s}$. Já se o *recoil* terminar além dos limites do grão ou no interior de um poro o radônio poderá migrar.

Alguns modelos buscam descrever qualitativamente e quantitativamente as variações encontradas no coeficiente de emanação de um mesmo material. Porém, fatores como a mineralogia dos materiais, seus teores e suas distribuições granulométricas fazem com que este valor, na prática, tenha que ser medido para cada material.

A distribuição granulométrica determina quanto do urânio e do rádio estão próximos o suficiente da superfície do grão para permitir a saída do radônio para os poros e espaço intersticial. Se o rádio estiver distribuído uniformemente pelo grão, o coeficiente de emanação irá ser inversamente proporcional ao diâmetro da partícula, se esse diâmetro for maior que $0,1\mu\text{m}$. A distribuição uniforme do rádio é uma característica no geral de minerais primários.

Parte dos átomos de radônio tem o *recoil* forte o suficiente para escapar do grão, mas acabam atravessando até outro grão ou atravessam os poros ficando retidos ainda dentro do mesmo grão. Como a umidade diminui a distância percorrida no *recoil* do radônio, a parcela de átomos que pularia de um grão para outro diminui bastante, e assim a emanação é maior em meio aquoso do que em um meio completamente seco.

2.5. AGREGADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Agregados são materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades para uso em obras de engenharia civil. A denominação “agregado” não é função de uma geologia determinada, mas sim da forma do material. Brita é um termo utilizado para denominar fragmentos de rochas duras, originários de processos de beneficiamento (britagem e peneiramento) de blocos maiores, extraídos de maciços rochosos com auxílio de explosivos.

Em geral estes materiais são abundantes no Brasil e no mundo, pois são feitos a partir de algumas das rochas mais comuns na crosta terrestre, os granitos e gnaisses, assim como calcários, dolomitos, basaltos e diabásios, normalmente utilizados em regiões em que os primeiros não são tão abundantes (LA SERNA, RECUERO e REZENDE, 2007).

Os agregados são os materiais de construção mais utilizados no mundo, sendo que em 16 países europeus é registrado o consumo médio 6-10t/habitante/ano, nos EUA a taxa é de 8t/habitante/ano, e em São Paulo, na Região Metropolitana, as taxas avançam para 3,5t/ habitante/ano e 4,2t/ habitante/ano, respectivamente. (LA SERNA, RECUERO e REZENDE, 2007).

A produção total de brita foi avaliada em mais de 11 bilhões de dólares nos Estados Unidos no ano de 2013. Foram cerca de 1500 empresas, operando cerca de 4000 pedreiras e 91 minas subterrâneas. Das 575 milhões de toneladas produzidas, cerca de 82% foram utilizadas para material de construção, principalmente para construção e manutenção de estradas, 10% para fabricação de cimento e 8% para outros usos. (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2014).

No Brasil, o número de empresas que produzem pedra britada é da ordem de 600, a maioria de controle familiar, sendo que estas empresas geram cerca de 20mil empregos diretos e mais de 100 mil indiretos.

Destas empresas, 60% produzem menos de 200.000 toneladas/ano, ou seja, são de pequeno porte para os padrões da mineração; 30%, entre 200.000 toneladas/ano e 500.000 toneladas/ano, são de médio porte; e 10%, mais do que 500.000

toneladas/ano, grande porte. A produção de brita no Brasil foi em 2005, 130 milhões de toneladas; em 2006, 142 milhões; em 2007, 156 milhões; e em 2008, 185 milhões. (SECRETARIA DA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E CONSTRUÇÃO MINERAL - SGM, 2009)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. COLETA DOS MATERIAIS

Foi observada uma dificuldade em visitar pedreiras com a finalidade de coletar amostras para o presente estudo, , pois diversas empresas enxergam o estudo de Radônio apenas como uma ameaça. Para estes gestores de pedreiras, a confirmação da existência deste gás poderia desvalorizar o produto que eles produzem e pode inclusive alarmar seus funcionários.

Por conta destas limitações, o principal critério de seleção dos locais para coleta foi a disponibilidade das empresas que concordaram com o estudo, com a ressalva dos nomes . não serem citados.

Nas três pedreiras a coleta foi realizada em uma pilha de material com granulometria elevada, pois o objetivo era realizar a cominuição controlada deste em laboratório. A pilha comumente chamada de “rachão miúdo” foi escolhida, pois apesar do material ser grosso, ele poderia ser amostrado sem necessidade de levar quantidades muito grandes de material.

Em cada empresa foi colhida uma amostra, e estas serão denominadas conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Descrição dos locais de coletas das amostras.

Amostra	Empresa
A	Pedreira pertencente a uma empresa de grande porte, em Itapecerica da Serra. O material é um granito.
B	Pedreira de grande porte, com produção horária de 600m ³ /h, localizada em Guarulhos. O material é um granito
C	Empresa C: Pedreira de pequeno porte, na cidade de São Sebastião. O material é um granito.

A Figura 9 mostra o autor do trabalho coletando as amostras em campo.

Figura 9. Coleta do material utilizado no trabalho. (Fonte: Arquivo Pessoal).



3.2. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

A preparação de amostras teve como objetivo principal criar porções de material representativas a partir daquilo que foi coletado, adequando-as a frações granulométricas escolhidas, e colocando-as em condições iguais e adequadas a análise de Radônio. Procurou-se nesta etapa preparar amostras de modo que a interferência de fatores externos na análise fosse minimizada, como variação na massa, umidade e poeira.

Para cada amostra, a primeira etapa de preparação do material foi a britagem em britador de mandíbulas de laboratório. A redução granulométrica permite que o material seja amostrado de maneira representativa, através de pilha alongada. O material foi passado duas vezes pelo britador, sendo que entre a primeira e a segunda vez a abertura foi diminuída.

Com o material britado foi construída uma pilha alongada, como na Figura 10, e a fração retirada da pilha foi então rebritada no britador de rolos de laboratório, como o da Figura 11. Essa segunda etapa de britagem foi feita associada a um peneiramento, e repetida até que 95% de todo material fosse capaz de passar na peneira de malha 6,35mm.

Figura 10. Pilha Alongada construída para amostragem (Fonte: Arquivo Pessoal).



Figura 11. Britador de Rolos utilizado na cominuição do material (Fonte: Arquivo Pessoal).



Com o material em granulometria adequada, foi realizado um peneiramento de bancada a seco, nas malhas 6,35mm; 4,35mm; 2,36mm; 1,70mm; 1,19mm; 0,84mm. O peneiramento a seco em bancada foi realizado de maneira manual, utilizando-se peneiras de laboratório de 20 cm de diâmetro.

O peneiramento foi cuidadoso no sentido de não se colocar uma quantidade de massa superior à capacidade das peneiras, evitando-se o entupimento das mesmas e, consequentemente, queda da qualidade do peneiramento. Cada fração foi devidamente etiquetada, pesada e separada, e os dados de massa foram colhidos para construção da curva granulométrica (Anexo A – Curva Granulométrica).

Para eliminar qualquer poeira que tenha ficado aderida a superfície dos grãos maiores, o material peneirado foi lavado. No procedimento de lavagem, o material foi colocado sobre a peneira que ele foi peneirado, e esta peneira foi mergulhada e agitada em uma bacia com água, como na Figura 12.

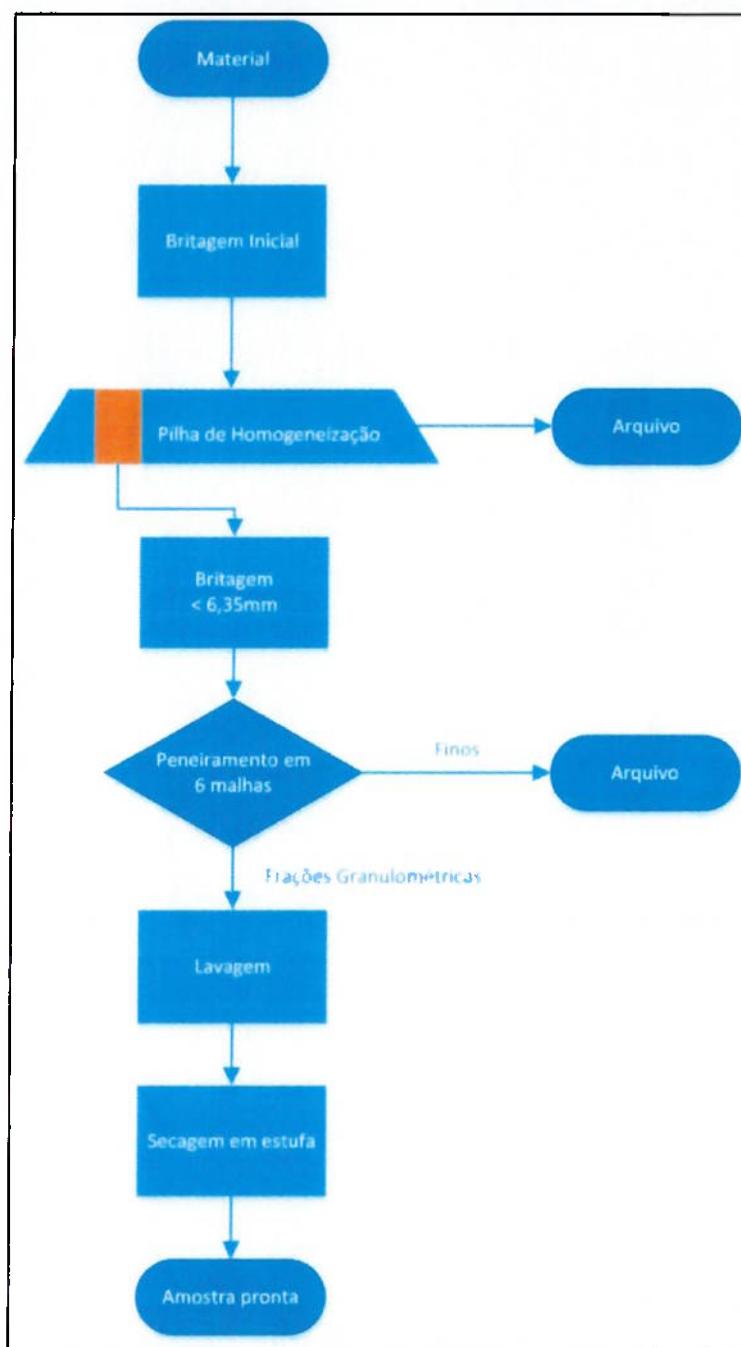
Este procedimento foi realizado em 3 bacias sequenciais, sendo que a terceira bacia era de verificação, e não havia praticamente saída de material. O material lavado foi colocado em bacias metálicas para secagem em estufa para eliminar toda umidade contida.

Figura 12. Conjunto utilizado na lavagem do material (Fonte: Arquivo Pessoal).



Cada fração retirada foi então amostrada novamente em um quarteador Jones, até que uma amostra de 200g por fração pudesse ser separada. As amostras foram ensacadas e cuidadosamente etiquetadas, e o restante do material foi arquivado. O fluxograma da Figura 13 resume o procedimento.

Figura 13. Fluxograma do processo de preparação da amostra.



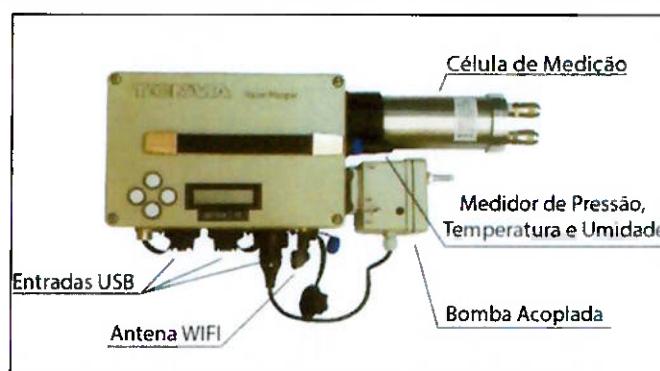
3.3. MEDIÇÃO DE RADÔNIO

O equipamento utilizado para medir a concentração de radônio no ar foi o RadonMapper, fabricado pela TECNAVIA. Seu funcionamento se baseia na Célula de Lucas, ou seja, uma célula de medição revestida internamente pela substância ZnS(Ag), que emite uma cintilação cada vez que é atingida pelo produto de um decaimento Alfa. Essas cintilações são contadas, e a partir do intervalo entre elas e do volume conhecido da célula o equipamento é capaz de fornecer a concentração desses elementos na unidade de becqueréis por metro cúbico (Bq/m³).

O RadonMapper (Figura 14) dispõe também de medidores de pressão, temperatura e umidade, porém estes não foram utilizados nesse experimento. Para que houvesse uma vazão de ar passado pela amostra foi utilizada uma bomba de ar acoplável, própria do RadonMapper, responsável por manter uma vazão constante máxima de 0,75l/min durante o experimento. Toda medição realizada por este equipamento foi automaticamente enviada à internet, através da função de rede do equipamento para um servidor da TECNAVIA, de onde os dados puderam ser carregados.

Este equipamento tem diversos selos de aprovação por instituições europeias, por exemplo, o *Paul Scherrer Institut* do Governo Federal da Suíça, a Agência Nacional para Novas Tecnologias, Energia e Desenvolvimento Econômico Sustentável da Itália (ENEA), e foi calibrado na sede da TECNAVIA, na Suíça.

Figura 14. Equipamento RadonMapper utilizado nas medições (Fonte: Arquivo Pessoal).



Para medição na brita foi utilizado um tubo para acondicionamento da amostra. O tubo, construído especificamente para este experimento, é um cilindro de acrílico, com duas pontas de PVC rosqueáveis (projeto do tubo ilustrado na Figura 15). Tanto na entrada como na saída de ar do tubo há filtros de material particulado, para impedir que o material mais fino seja carregado para fora pelo fluxo de ar. Uma fotografia dele está na Figura 16.

Figura 15. Projeto utilizado para elaboração do tubo de acondicionamento da amostra.

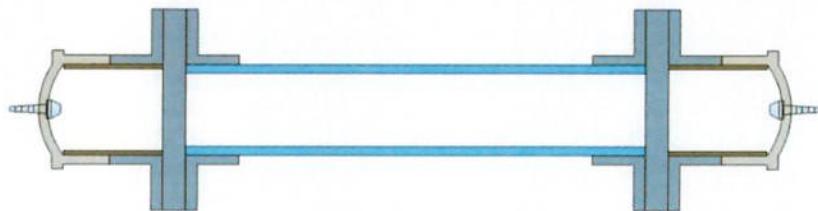


Figura 16. Tubo para acondicionamento da amostra.



No arranjo de medição, a amostra de cada fração foi colocada dentro do tubo de medição, e conectada ao sistema. Uma unidade do RadonMapper, a unidade 1, tinha como principal função obter a concentração de radônio no ar que entrava no equipamento, pois como há uma concentração de radônio, mesmo que pequena, no ar do laboratório ela não poderia ser ignorada (*background*). Um filtro de material particulado atua para impedir que poeira, ou qualquer outra partícula entre na célula.

O fluxo de ar passa então pelo tubo de medição e segue para a unidade 2 após passar por mais um filtro. Após a unidade 2, há uma bomba de ar conectada ao sistema que assegura que haja um fluxo de ar desejado circulando. Esse ar é liberado novamente na atmosfera, tomando-se sempre o cuidado para que a liberação seja bastante distante da captura de ar novo.

Na entrada de ar foi posicionado um medidor de vazão, da marca *Vögtlin* e modelo *Red-y Meter*, capaz de regular e medir a vazão de ar utilizada na amostra com precisão de 1%.

Figura 17 Medidor de vazão utilizado (Fonte: Arquivo Pessoal).



Esse esquema de montagem está representado na Figura 18, e fotografado na Figura 19.

Figura 18. Esquema de medição em laboratório.

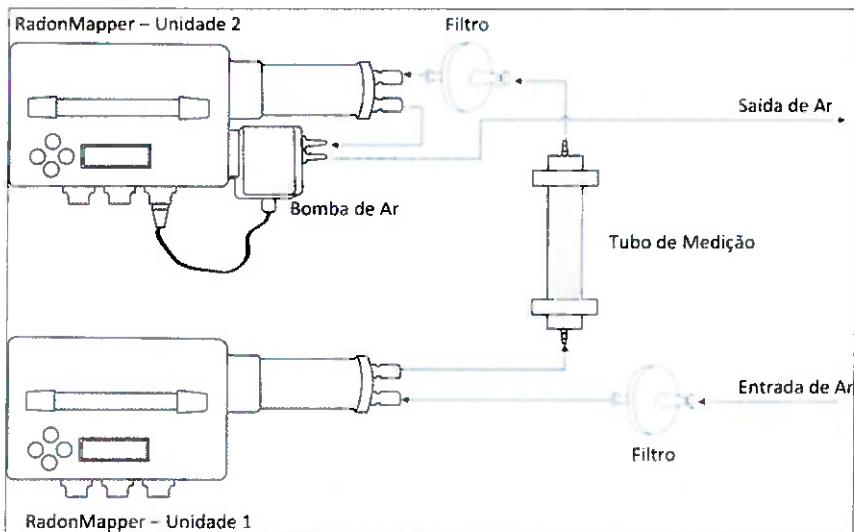


Figura 19. Arranjo de equipamentos para medição em laboratório.



3.4. MEDAÇÃO DE RADIAÇÃO ALFA E BETA

O medidor de radiação da marca S.E.A, de modelo CoMO170 (*Contamination Monitor*) é um equipamento utilizado na rotina em indústrias para medir e verificar as emanações de radiação alfa, beta e gama. Este equipamento funciona através de plástico permeável a essas radiações, que dá acesso a uma câmara de cintilação usada para fazer a contagem de decaimentos.

Figura 20. Monitor de Contaminação Radioativa SEA CoMo170



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. MEDIÇÃO DE RADÔNIO

4.1.1. Condições das Medições

Para o experimento, a massa de amostra colocada no tubo de medição e a vazão de ar foram mantidas constantes durante todo o experimento. As variáveis ambientais, que não puderam ser controladas, foram registradas pelos medidores do equipamento RadonMapper, e seus valores médios são apresentados na Tabela 3.

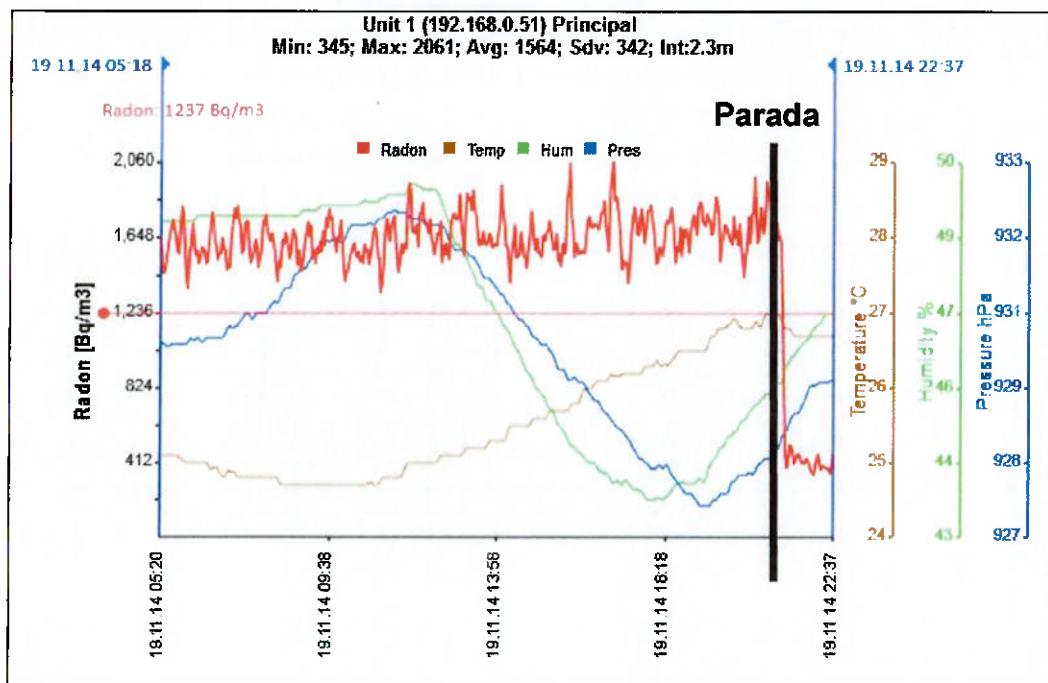
Tabela 3. Condições das medições realizadas

Condições Controladas		
Vazão de Ar	0,200	l/min
Massa da Amostra	200	g
Condições Ambientais Médias		
Temperatura	25,7	°C
Pressão Atmosférica	931,4	hPa
Umidade Relativa do Ar	46,8	%

4.1.2. Medição com RadonMapper

A Figura 21 é um gráfico de *output* do software do equipamento RadonMapper utilizado, e representa apenas uma fração das medições realizadas. Neste caso, nota-se que a amostra A, na fração retida entre as malhas de 2,36mm e 1,70mm, tem uma emanação de Radônio oscilante ao redor de uma média, e este valor muda bruscamente na linha “Parada”, momento em que a bomba foi desligada e a medição parou.

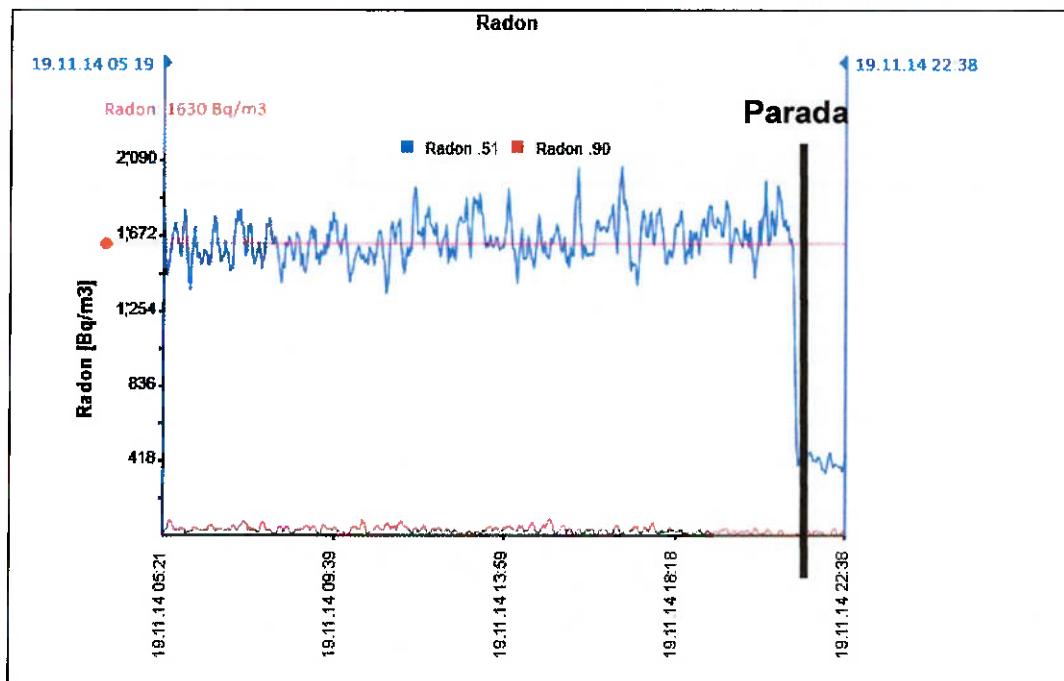
Figura 21. Medição de Radônio, Umidade, Temperatura e Pressão na Amostra A



É possível ver que esta medição foi realizada durante 20 horas, e que nesse período os valores de temperatura do ar, a pressão e a umidade variaram, porém, sem nenhum efeito significativo nas medidas. A Figura 22 apresenta o mesmo período de medição, mas estão representados os valores de entrada e saída de radônio.

Figura 22. Comparação Entre entrada e Saída de Radônio

Em vermelho estão as medidas de entrada e em azul as medidas de saída de Radônio.



O equipamento RadonMapper fornece a concentração de Radônio no ar, em Becqueréis por metro cúbico, a cada minuto. Como a vazão de ar e a massa da amostra são conhecidas, torna-se possível realizar o cálculo apresentado na Equação 2.:

Equação 2. Unidades de Trabalho.

$$\text{Media de Radônio} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \times \text{Vazão de ar} \left[\frac{\text{l}}{\text{min}} \right] \div \text{Massa da amostra} [\text{kg}] = \left[\frac{\text{Bq}}{\text{g} \cdot \text{min}} \right]$$

Ao se trabalhar com a unidade de $[\text{Bq g}^{-1} \text{min}^{-1}]$ o que se está avaliando é a quantidade de decaimentos por segundo de Radônio são acrescentados por minuto em uma corrente de ar que passa por uma massa de amostra (emanação específica). Como se está trabalhando com exatas 0,2kg por amostra e com 0.200 l/min, os valores para conversão de unidade se anulam. Na Figura 23 está representada a emanação por fração na amostra A apenas, e sua linha de tendência de crescimento com a diminuição da granulometria, e na Tabela 6 e na Figura 24 o resumo de todas as medidas realizadas com o RadonMapper.

Figura 23. Emanação de Radônio da Amostra A

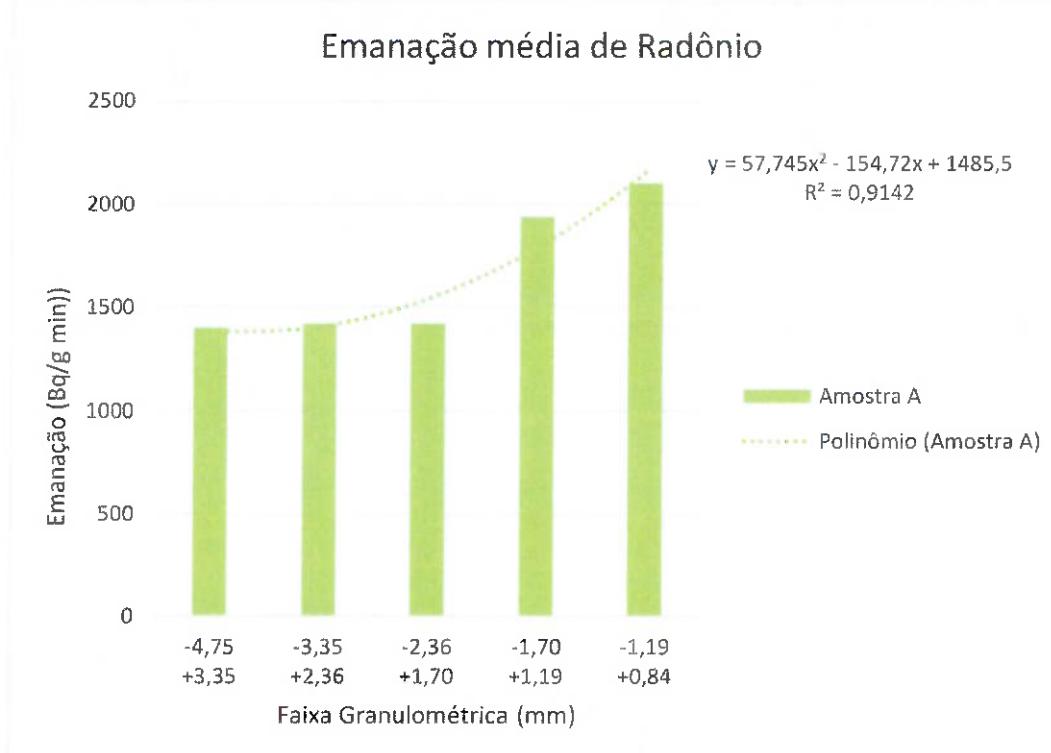


Tabela 4. Resumo dos Resultados de Emanação de Radônio

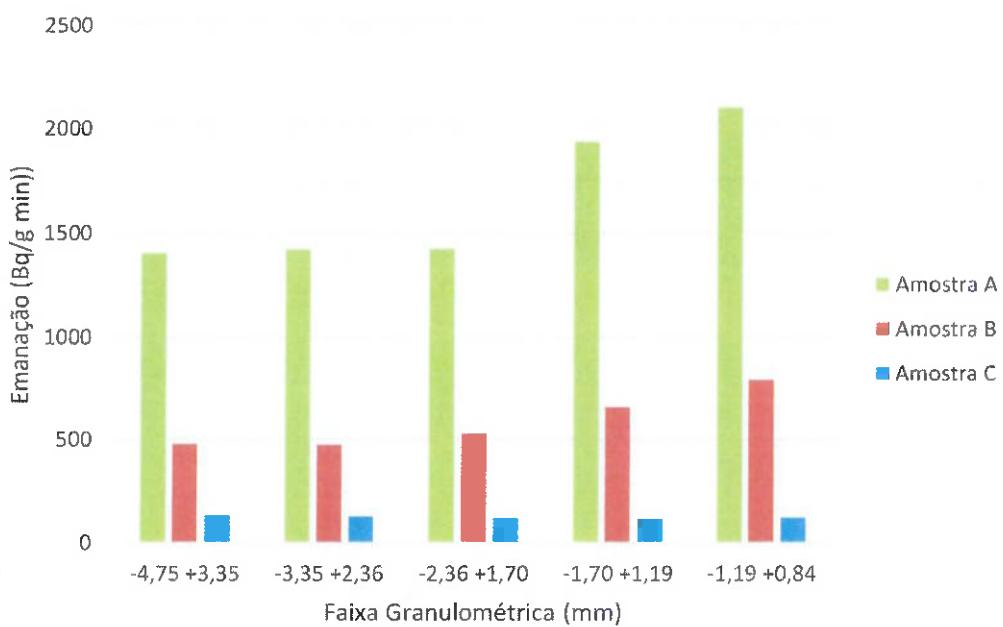
Amostra A [$\text{Bq g}^{-1} \text{ min}^{-1}$]				
Peneiras	Entrada		Saída	
(mm)	Média	Desvio	Média	Desvio
-4,75 +3,35	23,25	3,20	1424,88	35,48
-3,35 +2,36	42,91	1,72	1463,79	32,82
-2,36 +1,70	35,61	1,85	1456,77	29,87
-1,70 +1,19	69,47	1,83	2006,09	31,23
-1,19 +0,84	41,38	4,69	2143,88	34,64

Amostra B [$\text{Bq g}^{-1} \text{ min}^{-1}$]				
Peneiras	Entrada		Saída	
(mm)	Média	Desvio	Média	Desvio
-4,75 +3,35	31,03	3,50	506,68	13,87
-3,35 +2,36	29,76	1,83	502,93	14,24
-2,36 +1,70	22,00	1,86	550,75	16,51
-1,70 +1,19	35,31	1,79	693,84	14,83
-1,19 +0,84	33,44	1,51	825,12	17,25

Amostra C [$\text{Bq g}^{-1} \text{ min}^{-1}$]				
Peneiras	Entrada		Saída	
(mm)	Média	Desvio	Média	Desvio
-4,75 +3,35	42,82	2,43	175,63	9,99
-3,35 +2,36	39,09	1,63	166,58	7,58
-2,36 +1,70	41,03	1,75	159,66	6,95
-1,70 +1,19	33,99	1,89	146,99	8,14
-1,19 +0,84	34,67	1,85	155,59	7,95

Figura 24. Resumo dos Resultados

Emanação de Radônio

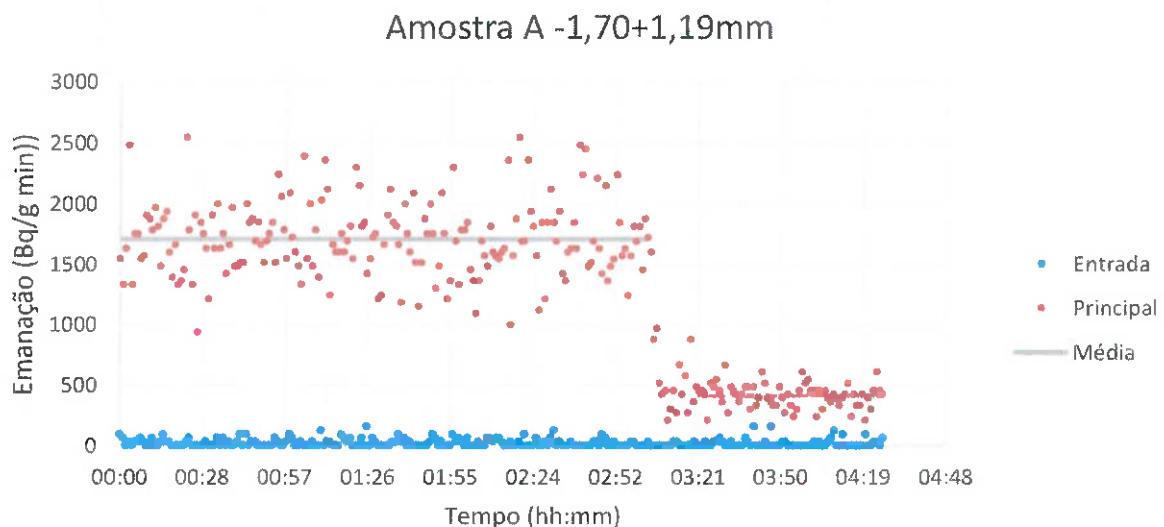


É possível notar pelos resultados apresentados que a amostra A apresenta uma concentração de Radônio muito mais elevada do que as outras duas, enquanto a amostra B apresenta um valor intermediário, e a amostra C concentração muito baixa. As amostras A e B apresentam clara tendência de variação com a granulometria, e a amostra C tem resultados tão baixos que não é possível detectar essa variação com a resolução do equipamento.

4.1.3. Diferenciação Radônio e Torônio

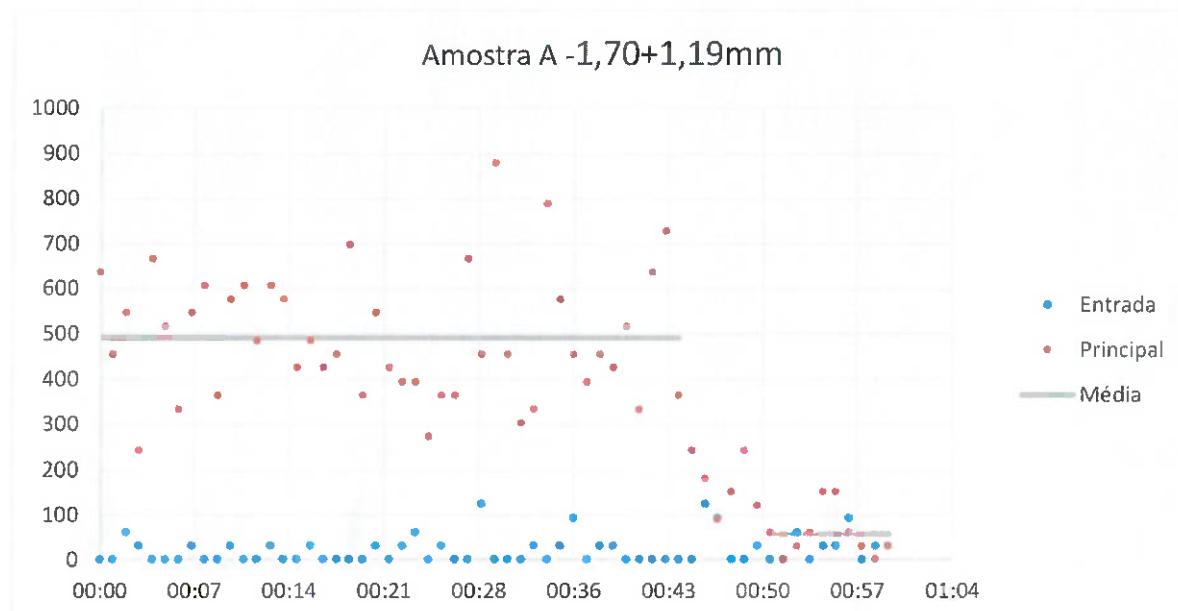
Na Figura 25 está apresentada uma medição realizada na amostra A, e ao término de 3 horas a célula do equipamento foi fechada. O gás ficou retido no interior da célula por mais uma hora e, neste tempo, uma nova média foi realizada. Logo após o fechamento, nota-se que há uma brusca queda na medição, e uma nova estabilização após 10 min, e isto ocorre porque os isótopos de Rn^{220} , conhecido como Torônio, tem meia vida de 56 segundos, e nesses 10 min praticamente todo ele já sofreu decaimento. É possível notar que a grande parte do Radônio presente na amostra é do tipo Rn^{220} , ou seja, é Torônio. A média de Rn^{220} foi de 1297,25 Bq/(g min) e a de Rn^{222} foi de 413,12 Bq/(g min), indicando que há aproximadamente três vezes mais Torônio.

Figura 25. Diferenciação de Rn^{222} e Rn^{220} na fração entre 1,70mm e 1,19mm na amostra A



A mesma medição foi realizada, durante um período de tempo menor, na amostra B, na mesma fração. A média de Rn^{220} foi de 433,78 Bq/(g min) e a de Rn^{222} foi de 57,22 Bq/(g min), indicando que há aproximadamente 7,5 vezes mais Torônio. A medição é mostrada através da Figura 26.

Figura 26. Diferenciação de Rn^{222} e Rn^{220} na fração entre 1,70mm e 1,19mm na amostra B



4.2. MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO ALFA E BETA

As medições realizadas com o detector de Radiação Alfa, Beta e Gama estão representadas na Tabela 5. Nota-se que elas também indicam a amostra A como mais radioativa, e que este medidor não foi capaz de detectar radiação alfa saindo de nenhuma das amostras o que mostra baixa sensibilidade para este tipo de raio.

Tabela 5. Medições realizadas com o detector de radiação Alfa e Beta (medidas em ips)

	Amostra A		Amostra B		Amostra C	
	α	$B+\gamma$	$\alpha+\gamma$	$\beta+\gamma$	$\alpha+\gamma$	$\beta+\gamma$
-4,35+3,36	0,0	15,9	0,0	13,3	0,0	5,6
3,36+2,35	0,0	13,4	0,0	11,7	0,0	4,7
-2,38+1,70	0,0	12,2	0,0	9,2	0,0	3,0
-1,70+1,19	0,0	12,5	0,0	9,1	0,0	2,8
-1,19+0,84	0,0	12,4	0,1	11,0	0,0	3,1
Média	0,0	13,3	0,0	10,9	0,0	3,8

5. CONCLUSÕES

A medição de radiação alfa, beta e gama nas amostras não foi capaz de detectar a radiação alfa, mas detectou radiação beta e gama. É possível ver apenas pela radiação beta e gama que a amostra A tem mais atividade radioativa que a amostra B, porém, enquanto em termos de emanação de raios beta e gama uma é um pouco maior que a outra, em termos de emanação de Radônio a amostra A tem o triplo da B. A medição de radiação beta e gama das amostras não cresce com a diminuição do tamanho, diferente da medição de Radônio. Percebe-se então que atividade radioativa beta e gama e emanação de radônio são grandezas ligadas, mas não diretamente.

As medidas nas amostras A e B cresceram à medida que material mais fino foi testado, o que está de acordo com o esperado pela teoria. Para que a amostra C pudesse apresentar o mesmo comportamento alguma mudança precisaria ser feita no experimento, por exemplo, o uso de mais massa de material. Nas amostras A e B pode-se notar que a grande parte do Radônio aparece na forma do isótopo Torônio.

Uma construção civil feita utilizando agregados da pedreira A pode ter problemas com Radônio, pois apenas poucas gramas de material pode emanar quantidades grandes de radônio por minuto no ambiente. A amostra B também tem valores consideráveis de Radônio, enquanto a amostra C tem uma emanação muito menos preocupante.

É possível, portanto, observar que mesmo materiais com características semelhantes de geologia, uso semelhantes, podem ser bastante diferentes quanto à emanação de Radônio, sendo alguns pouco ou nada emanadores e alguns muito. A metodologia usada para realizar estas análises se mostrou eficiente, e forneceu resultados claros e compatíveis com as teorias, mostrando que pode ser aplicada no futuro, para prevenir que construções sejam feitas com material cancerígeno como o Radônio, melhorando a vida e saúde das pessoas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN LUNG ASSOCIATION. Lung Cancer Fact Sheet - American Lung Association. **Lung Cancer Fact Sheet**, 2014. Disponível em: <<http://www.lung.org/lung-disease/lung-cancer/resources/facts-figures/lung-cancer-fact-sheet.html>>. Acesso em: 23 Setembro 2014.

CARDOSO, E. M. **Apostila Educadita Radioatividade**. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEM, 2005.

EUROPEA, C. **Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials**. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection. [S.I.]: [s.n.]. 1999.

FIELD, W. R.; STECK, D. J.; SMITH, B. J. Residential Radon Gas Exposure and Lung Cancer. **American Journal of Epidemiology**, Baltimore, v. 151, n. 11, p. 12, 2000.

FIOR, L. **Análise da Concentração de Radônio Proveniente de Materiais de Construção**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, p. 148. 2008.

HAXEL, B. G.; HENDRICK, B. J.; ORRIS, J. G. **Critical Resources for High Technology**. Unites States Geological Survey. Denver, Colorado, p. 4. 2007.

ISHIMORI, Y. et al. **Measurement and Calculation Of Radon Releases From Norm Residues**. International Atomic Energy Agency. Vienna, p. 2013. 2013.

LA SERNA, H. A. D.; RECUERO, J. C.; REZENDE, M. M. **Agregados para Construção Civil**. DNPM -Departamento Nacional de Produção Mineral. São Paulo, p. 2. 2007.

SECRETARIA DA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E CONSTRUÇÃO MINERAL - SGM. **Relatório Técnico 30 - Perfil de brita para construção civil**. MME - Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 30. 2009.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. **Física para Cientistas e Engenheiros**. [S.I.]: Cengage Learning, 2009.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries**. USGS. Denver, Corado. EUA, p. 5. 2014.

WHO. **International Radon Project - Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities**. World Health Organization - WHO. Geneva, p. 49. 2007.

WHO. **Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective**. 1^a. ed. Geneva, Suiça: World Health Organization, v. I, 2009. ISBN ISBN 978 92 4 154767 3.

ANEXO A – CURVA GRANULOMÉTRICA

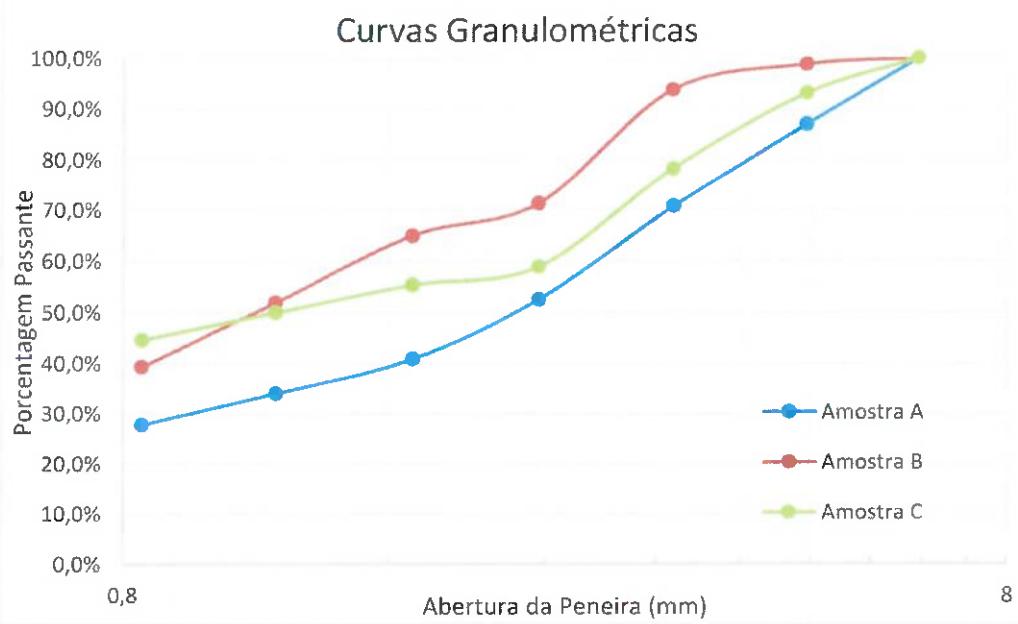
A curva granulométrica do material preparado está representada na Tabela 6. Foi realizado peneiramento a seco de todo material passante na peneira de 6,35mm.

Tabela 6. Distribuição Granulométrica do material amostrado.

Peneiras (mm)	Amostra A			Amostra B			Amostra C		
	Massa Retida (g)	Massa (%)	Passante (%)	Massa Retida (g)	Massa (%)	Passante (%)	Massa Retida (g)	Massa (%)	Passante (%)
6,35	0,0	0,0%	100,0%	0,0	0,0%	100,0%	0	0,0%	100,0%
4,75	967,6	13,0%	87,0%	48,1	1,2%	98,8%	202,8	6,9%	93,1%
3,35	1206	16,2%	70,7%	200,0	5,0%	93,8%	438,2	14,9%	78,2%
2,36	1353,5	18,2%	52,5%	896,3	22,4%	71,4%	566,6	19,3%	59,0%
1,7	867,2	11,7%	40,8%	254,2	6,4%	65,0%	105,8	3,6%	55,4%
1,19	509,8	6,9%	33,9%	525,9	13,1%	51,9%	160,8	5,5%	49,9%
0,84	456,1	6,1%	27,8%	502,0	12,5%	39,3%	156,1	5,3%	44,6%
-0,84	2063	27,8%	0,0%	1574,0	39,3%	0,0%	1311,9	44,6%	0,0%
Total	7423,2			4000,5			2942,2		

As porcentagens de passante acumulado foram colocadas em um gráfico com o eixo horizontal na forma logarítmica (Figura 27).

Figura 27. Curva granulométrica da amostra.



ANEXO B – EXEMPLO DE OUTPUT DO RADONMAPPER

A tabela a baixo apresenta um exemplo de tabela extraída diretamente do software do equipamento RadonMapper, sem nenhum tratamento de dados. Há dados que não foram considerados neste trabalho, como a temperatura interna do equipamento, a voltagem da bateria e a tensão de alimentação do equipamento.

GMT_DateTime	Interval length [s]	Sample counts [n]	Cpm [n]	Total counts [n]	Radon Value [Bq/m³]	Measurement uncertainty [Bq/m³]	Unit	Temperature [°C]	Temperature [°C]	Humidity [%]	Pressure [hPa]	Ualim [V]	Upoe [V]	Ubatt [V]	Network Status	Movements
18.11.2014 21:49:00	60	120	60	60	1787	251	32.8	26.9	45.8	930.3	4.2	11.8	3.4	3	79	
18.11.2014 21:50:00	60	120	65	65	1939	263	32.8	26.8	45.8	930.3	4.2	11.8	3.4	3	83	
18.11.2014 21:51:00	60	120	44	44	1302	211	32.8	26.8	45.9	930.4	4.2	11.8	3.4	3	92	
18.11.2014 21:52:00	60	120	62	62	1848	256	32.8	26.8	45.9	930.4	4.2	11.8	3.4	3	95	
18.11.2014 21:53:00	60	120	50	50	1484	227	32.8	26.8	45.9	930.4	4.2	11.8	3.4	3	83	
18.11.2014 21:54:00	60	120	47	47	1393	219	32.8	26.8	45.9	930.4	4.2	11.8	3.4	3	79	
18.11.2014 21:55:00	60	120	50	50	1484	227	32.8	26.8	45.9	930.4	4.2	11.8	3.4	3	79	
18.11.2014 21:56:00	60	120	38	38	1121	195	32.8	26.8	45.9	930.4	4.2	11.8	3.4	3	47	
18.11.2014 21:57:00	60	120	46	46	1363	217	32.8	26.7	45.9	930.4	4.2	11.8	3.4	3	63	
18.11.2014 21:58:00	60	120	59	59	1757	249	32.8	26.7	46	930.4	4.2	11.8	3.4	3	95	
18.11.2014 21:59:00	60	120	50	50	1484	227	32.8	26.7	46	930.4	4.2	11.8	3.4	3	75	
18.11.2014 22:00:00	60	120	53	53	1575	234	32.8	26.7	46	930.5	4.2	11.8	3.4	3	83	
18.11.2014 22:01:00	60	120	58	58	1727	246	32.8	26.7	46	930.5	4.2	11.8	3.4	3	47	
18.11.2014 22:02:00	60	120	51	51	1515	229	32.8	26.7	46	930.5	4.2	11.8	3.4	3	71	
18.11.2014 22:03:00	60	120	51	51	1515	229	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	00	
18.11.2014 22:04:00	60	120	47	47	1393	219	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	684	
18.11.2014 22:05:00	60	120	57	57	1696	244	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	79	
18.11.2014 22:06:00	60	120	51	51	1515	229	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	71	
18.11.2014 22:07:00	60	120	59	59	1757	249	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	95	
18.11.2014 22:08:00	60	120	58	58	1727	246	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	99	
18.11.2014 22:09:00	60	120	44	44	1302	211	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	83	
18.11.2014 22:10:00	60	120	43	43	1272	209	32.8	26.7	46	930.6	4.2	11.8	3.4	3	55	
18.11.2014 22:11:00	60	120	65	65	1939	263	32.8	26.7	46.1	930.6	4.2	11.8	3.4	3	766	

ANEXO C – FOTOS DA MEDAÇÃO DE RADIAÇÃO ALFA E BETA

As fotos abaixo foram tiradas durante a medição de radiação do material com o medido de radiações alfa, beta e gama. As fotos 1, 2 e 3 são fotos da fação -1,19+0,84 das amostras A, B e C respectivamente. Já a imagem 4 foi tirada durante a medição da radiação de fundo.

