Universidade de São Paulo
Instituto de Arquitetura e Urbanismo

PAULO GIOVANY QUADROS DO AMARAL

Avaliação da alterabilidade e da exalação do gás radônio em **rochas ornamentais**

São Carlos - SP
2016

PAULO GIOVANY QUADROS DO AMARAL

AVALIAÇÃO DA ALTERABILIDADE E DA EXALAÇÃO DO GÁS RADÔNIO EM ROCHAS ORNAMENTAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo na área de
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia para
obtenção do título de Doutor em Ciência pela
Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Tit. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Artur

Versão Corrigida

São Carlos – SP

2016

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A485a   Amaral, Paulo Giovany Quadros do
Avaliação da alterabilidade e da exalação do gás
radônio em rochas ornamentais / Paulo Giovany Quadros
do Amaral; orientador Eduvaldo Paulo Sichieri; co
orientador Antonio Carlos Artur. -- São Carlos, 2016.
119 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2016.

1. rochas ornamentais. 2. gás radônio. 3.
radioatividade. 4. contaminantes internos. 5.
ambiente construído. I. Sichieri, Eduvaldo Paulo,
orient. II. Artur, Antonio Carlos, co-orient. III.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Arquiteto e Urbanista **Paulo Giovany Quadros do Amaral**

Título da tese: "Avaliação da alterabilidade e da exalação do gás radônio em rochas ornamentais"

Data da defesa: 26/10/2016

Orientador: Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri

Aprovado

(IAU/USP)

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos
(IAU/USP)

APROVADO

Prof. Dra. Kelen Almeida Dorneles
(IAU/USP)

Aprovado

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto
(IGCE/UNESP)

APROVADO

Prof. Dr. Rogerio Pinto Ribeiro
(EESC/USP)

APROVADO

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Profa. Dra. **Cibele Saliba Rizek.**

Dedico a todos que acreditam no meu potencial e me apoiam para sempre seguir em frente, especialmente a minha família (mãe, pai que partiu um ano antes da defesa e deixa saudade, irmã, cunhado, sobrinha e meu amor) que é a minha base de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma formal a todos que me ajudaram e apoiaram para a realização deste trabalho, pois sozinho ninguém consegue nada, aproveitando para agradecer principalmente a minha família que sempre me apoiou na busca do conhecimento.

Ao programa de Pós-Graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, *campus* São Carlos.

Aos professores, técnicos, funcionários e alunos da USP e da Unesp que colaboraram para a realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de pesquisa de doutorado.

À Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo (PRPG/USP) pelo custeio do 1º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Guimarães, Portugal.

Agradeço também, de forma informal, o que foi muito especial em minha vida durante o período da pesquisa acadêmica em que resultou o meu título de Doutor.

Agradeço a Deus, por tudo, pela minha fé e força para não desistir e superar os desafios que surgiram. Estudei um gás que sai da rocha e não se vê, mas consegue medir por um aparelho que capta a atividade radioativa. Não vejo Deus, mas às vezes sinto algo que parece capitar essa energia atribuída a Ele. Assim é a ciência, da vivência surgem as teorias, a qual tive fé no meu saber e comprovei a minha teoria nessa Tese.

Agradeço especialmente à minha Mãe, Maria Lucia, que me incentivou correr atrás dos meus sonhos, sempre do meu lado mesmo, sendo o seu apoio fundamental para o meu crescimento.

Agradeço ao meu Pai, Romildo, por tudo, pelos momentos ao meu lado, que foram especiais me ajudando na arrumação das amostras, apressado como sempre não conseguiu esperar pelo menos um ano para assistir a minha defesa de Doutorado, mas acredito que aonde estiver, ficou feliz ao ver meu trabalho terminado, pois sabia o quanto era muito importante para minha vida.

Agradeço à minha única Irmã, Giovanna, pelo carinho e compreensão, por acreditar e me apoiar sempre em todos momentos. Também agradeço por ter me dado um Cunhado meio que irmão, Rubens, o qual também agradeço e vem me apoiando nessa vida acadêmica, assim

também como a minha única Sobrinha, Elisabeth, que me faz tornar um Tio orgulhoso e acredito ser um bom exemplo para ela.

Agradeço ao meu Amor, Aline, presente no momento que mais precisei de alguém do meu lado, responsável pelo equilíbrio entre a vida acadêmica e social, responsável por momentos de alegria, contribuindo indiretamente para a realização dos meus sonhos.

Agradeço, em ordem cronológica, ao Prof. Dr. Antonio Carlos Artur, principal responsável pelo início dessa pesquisa e da minha vida acadêmica, fazendo questão de ser meu co-orientador, tornando um amigo, dedicando parte do seu tempo para conversas e reflexões sobre a pesquisa e a vida.

À Prof. ^a Dra. Tamar Milca Bortolozzo Galembeck, que no final da sua orientação do Mestrado, mesmo aposentada de suas funções, junto com o Prof. Dr. Artur, continuou me orientando para conseguir realizar o Doutorado no formato que estávamos idealizando.

Ao Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri por ter aceito me orientar e defendido minhas ideias, acreditando no meu potencial, quebrando paradigmas, pois com sabedoria compreendeu a importância do tema da radioatividade natural no ambiente construído dentro da Arquitetura.

Ao Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto, por suas sugestões e contribuições nas atividades e produções da pesquisa, abrindo as portas do Laboratório de Isótopos e Hidroquímicas da Unesp de Rio Claro quando sempre precisei.

Aos amigos de Cachoeiro de Itapemirim-ES desde a época da faculdade, Gleidson Bós e Renato Zanoteli, que contribuíram para conseguir as amostras, dedicando um tempo sem cobrar nada em troca.

Também em ordem cronológica, agradeço as novas amizades de São Carlos-SP, começando pelo Victor José dos Santos Baldan, um amigo sempre presente, em que juntos transformamos um depósito de mesas e cadeiras dentro do Laboratório da Construção Civil do IAU/USP em uma sala de pesquisa, conhecida como “salinha”, que apesar desse diminutivo sai grandes ideias.

Ao Leandro Lima, pela amizade construída fora da USP.

À Poliana Cardoso, amiga, frequentadora da salinha e responsável por me apresentar Aline.

Ao Renato Lima de Oliveira, amigo responsável pelo café filosófico nos finais da tarde.

À Taça Universitária de São Carlos – TUSCA, pois não é só de pesquisa que vive o homem.

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”

Marie Curie

RESUMO

AMARAL, P. G. Q. **Avaliação da Alterabilidade e da Exalação do Gás Radônio em Rochas Ornamentais**. 2016. 120 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2016.

A presente Tese se baseia no estudo das rochas ornamentais em relação aos seus aspectos de alterabilidade e exalação do gás radioativo radônio, que irão influenciar diretamente na contaminação do ambiente construído no decorrer do seu tempo de uso. Este fato é devido às interações com o meio de onde é instalada a rocha, como exemplo da sua manutenção e limpeza, que implicará no seu padrão estético e estrutural, no qual poderá provocar um aumento da atividade e concentração do gás radônio no ambiente interno. Temas como a qualidade do ar interior relacionada à qualidade de vida do usuário, à radioatividade natural, o perigo do gás radioativo radônio no interior do ambiente construído e às rochas ornamentais como composição e uso na arquitetura são apresentados para embasamento da Tese, auxiliando no entendimento dos ensaios realizados. Para isso, cinco rochas ornamentais foram escolhidas e utilizadas em ensaios de alterabilidade química, ensaios de caracterização física e mecânica e ensaios de caracterização radiométrica a fim de prever o comportamento de uma dada rocha no ambiente ao ser aplicado na arquitetura. O ataque do ácido clorídrico nas rochas diminuiu sua resistência mecânica e aumentou a quantidade de radônio exalado, relacionado diretamente ao aumento da porosidade, aumentando também a eficiência da exalação na rocha. O ataque do hidróxido de potássio diminuiu a resistência das rochas, interferiu na porosidade, diminuindo ou mantendo estável a quantidade de radônio exalado em alguns casos. Demonstra que, mesmo conhecendo o material e a sua contribuição na adição do gás radônio no interior do ambiente, com o passar do tempo a rocha poderá aumentar sua exalação quando não conservadas, podendo aumentar o nível de radônio acumulado no ambiente construído. Com isso, a Tese realça a importância de conhecer o material que irá compor o interior do ambiente afim de prevenir futuros danos à saúde da edificação e dos usuários, facilitando assim o entendimento desses materiais e como interfere na qualidade do ambiente construído.

Palavras-chaves: rochas ornamentais, gás radônio, radioatividade, contaminantes internos, ambiente construído.

ABSTRACT

AMARAL, P. G. Q. **Evaluation of alterability and exhalation of Radon Gas in Dimension Stones**. 2016. 120 f. Thesis (Doctoral) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2016.

The present Thesis is based on the Dimension Stones in relation to their aspects of alterability and exhalation of the radioactive radon gas, which will directly influence on the contamination of the built environment during its time of use. This fact is due to interactions with the environment where it is placed the rock, as an example of its maintenance and cleaning, which will result in its aesthetic and structural pattern, in which can cause an increase in the activity and concentration of the radon gas in the indoor environment. Topics such as indoor air quality related to the quality of life of the user, the natural radioactivity, the danger of radioactive radon gas inside the built environment and to ornamental rocks as composition and use in the architecture are presented for the basis of the thesis, helping in the understanding of the tests performed. For this, five ornamental rocks were chosen and used in chemical alterability tests, physical and mechanical characterization tests and radiometric characterization tests in order to predict the behavior of a given rock in the environment when applied in the architecture. The hydrochloric acid attack on the rocks decreased its mechanical resistance and increased the amount of exhaled radon, related directly to the increase of porosity, also increasing the exhaling efficiency in the rock. The attack of the potassium hydroxide decreased the resistance of the rocks, interfered in the porosity, reducing or maintaining stable the amount of radon exhaled in some cases. It shows that, even knowing the material and its contribution in addition to the radon gas inside the environment, with the passage of time the rock could increase its exhalation when not preserved, may increase the level of radon levels accumulated in the built environment. With this, the thesis emphasizes the importance of knowing the material that will make up the interior of the environment in order to prevent future damages to the health of the building and the users, thus facilitating the understanding of these materials and how it interferes in the quality of the built environment.

Keywords: dimension stone, radon gas, radioactivity, indoor contaminants, built environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Inalação e deposição da progênie do radônio no pulmão humano (THAD GODISH et al., 1991).	31
Figura 3.2. Intervalos de duas partículas alfa emitidas por descendência do radônio depositada na superfície do pulmão e a profundidade média de células serosa e basal no pulmão humano. (HALL, 1992 apud FRONT MATTER, 1999).	32
Figura 4.1 – Lavra de matacões do monzogranito “Cinza Corumbá” localizado no município de Castelo – ES. Fonte: o Autor.	44
Figura 4.2. Lavra por bancada alta do diorito “Preto São Gabriel” extraído no município de Colatina – ES. Fonte: o Autor.	45
Figura 4.3. Bota-fora da pedreira do diorito “Preto São Gabriel”. Fonte: o Autor.	46
Figura 4.4. Tear convencional de grande porte. Fonte: o Autor.	47
Figura 4.5. Depósito da lama abrasiva. Fonte: o Autor.	47
Figura 4.6. Polideira automática. Fonte: o Autor.	48
Figura 4.7. Fatores de durabilidade das rochas (NAVARRO, 2006).	53
Figura 5.1. Aspecto macroscópico do Diorito Preto São Gabriel.	59
Figura 5.2. Aspecto macroscópico do charnockito Verde Labrador.	60
Figura 5.3. Aspecto macroscópico do monzogranito Cinza Corumbá.	61
Figura 5.4. Aspecto macroscópico do pegmatito Timbalada.	62
Figura 5.5. Aspecto macroscópico do pegmatito Giallita.	63
Figura 6.1. Conjunto de ensaios aplicados, sendo que os conjuntos A e C foram mergulhados somente a face polida aos compostos agressivos e os conjuntos B e D foram mergulhados totalmente as amostras aos compostos.	65
Figura 6.2. Ataque parcial do ácido HCl no diorito Preto São Gabriel do conjunto A.	69
Figura 6.3. Ataque total do ácido HCl no diorito Preto São Gabriel do conjunto B.	69
Figura 6.4. Ataque parcial do ácido HCl no charnockito Verde Labrador do conjunto A. ..	70
Figura 6.5. Ataque total do ácido HCl no charnockito Verde Labrador do conjunto B.	70
Figura 6.6. Ataque parcial do ácido HCl no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto A.	71
Figura 6.7. Ataque total do ácido HCl no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto B. ...	71
Figura 6.8. Ataque parcial do ácido HCl no pegmatito Timbalada do conjunto A.	72
Figura 6.9. Ataque total do ácido HCl no pegmatito Timbalada do conjunto B.	72

Figura 6.10. Ataque parcial do ácido HCl no pegmatito Giallita do conjunto A.	73
Figura 6.11. Ataque total do ácido HCl no pegmatito Giallita do conjunto B.	73
Figura 6.12. Ataque parcial do KOH no diorito Preto São Gabriel do conjunto C.	74
Figura 6.13. Ataque total do KOH no diorito Preto São Gabriel do conjunto D.	74
Figura 6.14. Ataque parcial do KOH no charnockito Verde Labrador do conjunto C.	75
Figura 6.15. Ataque total do KOH no charnockito Verde Labrador do conjunto D.	75
Figura 6.16. Ataque parcial do KOH no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto C.	76
Figura 6.17. Ataque total do KOH no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto D.	76
Figura 6.18. Ataque parcial do KOH no pegmatito Timbalada do conjunto C.	77
Figura 6.19. Ataque total do KOH no pegmatito Timbalada do conjunto D.	77
Figura 6.20. Ataque parcial do KOH no pegmatito Giallita do conjunto C.	78
Figura 6.21. Ataque total do KOH no pegmatito Giallita do conjunto D.	78
Figura 6.22. Comparação dos valores de densidade aparente obtidos.	84
Figura 6.23. Comparação dos valores de porosidade aparente obtidos.	85
Figura 6.24. Comparação dos valores de absorção d'água aparente obtidos.	86
Figura 6.25. Comparação dos valores dos esforços flexores por carregamento em 4 pontos obtidos.	89
Figura 6.26. Comparação dos valores dos esforços flexores por carregamento em 4 pontos versus porosidade.	89
Figura 6.27. Comparação entre o Rn exalado com a concentração de U em cada amostra.	95
Figura. 6.28. Relação entre porosidade e exalação do gás radônio.	96
Figura 6.29. Exalação do gás radônio antes e depois do ataque.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Os principais poluentes internos e suas fontes.	21
Tabela 3.1. Série de decaimento radioativo e meia vida.	27
Tabela 3.2. Séries de decaimento radioativo.	27
Tabela 3.3. Isótopos naturais do gás radônio.	29
Tabela 4.1. Requisitos para granitos.	50
Tabela 4.2. Mecanismos químicos de deterioração.	54

Tabela 5.1. Concentração de ^{238}U e ^{222}Rn exalado em rochas ornamentais.	56
Tabela 5.2. Relação das rochas estudadas.	56
Tabela 5.3. Síntese dos resultados da caracterização petrográfica.	58
Tabela 6.1. Valores de pH obtido nas amostras.	67
Tabela 6.2. Síntese dos resultados dos índices físicos de cada conjunto.	81
Tabela 6.3. Comparação da média dos resultados dos índices físicos das rochas estudadas.	82
Tabela 6.4. Resultados dos índices físicos após ataque químico de compostos químicos.	84
Tabela 6.5. Resultado dos ensaios de esforços flexores por carregamento em 4 pontos em MPa.	88
Tabela 6.6. Concentrações de U, Th e K nas amostras estudadas.	91
Tabela 6.7. Teor de urânio em minerais de rochas ígneas.	91
Tabela 6.8. Valores médios obtidos em Bq/m ³ do radônio exalado das amostras.	94
Tabela 6.9. Eficiência de exalação do gás radônio.	100
Tabela 6.10. Valores convertidos para o ambiente interno.	103
Tabela 6.11. Comparação da influência relativa à quantidade do material aplicado no ambiente.	104

LISTA DE SIGLAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira de Rochas Ornamentais

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

CETEMAG - Centro Tecnológico do Mármore e Granito

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral

DPM - Departamento de Pesquisa Mineral

EPA - United States Environmental Protection Agency

FMVDR – Fundação Mies van der Rohe

IAEA - International Atomic Energy Agency

IAU - Instituto de Arquitetura e Urbanismo

ICPR - International Commission on Radiological Protection

IGCE - Instituto de Geociências e Ciências Exatas

INCA - Instituto Nacional de Câncer

LABIDRO - Laboratório de Isótopos e Hidroquímica

LCC - Laboratório da Construção Civil

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

NCM - Nomenclatura Comum do Mercosul

RCBP - Registro de Câncer de Base Populacional

SED - Síndrome do Edifício Doente

SINDIMÁRMORE - Sindicato dos Trabalhadores do Mármore e Granito do Espírito Santo

SINDIROCHAS - Sindicato das Indústrias de Rochas Ornamentais, Cal e Calcários do Espírito Santo

UNESP - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”

USP - Universidade de São Paulo

WHO - World Health Organization

SUMÁRIO

1. Introdução	16
1.2. Hipótese e objetivo da tese	17
1.3. Objetivos específicos	17
1.3. Importância do tema	18
2. A qualidade do ar interior	19
3. A radioatividade natural e o gás radônio	23
3.1. Conceitos básicos sobre a radioatividade	24
3.2. Séries naturais de decaimento radioativo	26
3.3. O gás radônio	29
3.4. Exposição e dosimetria de ^{222}Rn e filhos	31
3.5. Questão do radônio em ambientes internos no Brasil	34
4. As Rochas Ornamentais	37
4.1. A gênese das rochas	39
4.2. O uso contemporâneo das rochas	40
4.3. O Setor de Rochas Ornamentais em números	42
4.4. Cadeia produtiva de Rochas Ornamentais	44
4.5. Normatização e caracterização tecnológica das rochas no Brasil	49
4.6. Alterabilidade e durabilidade nas Rochas Ornamentais	52
5. Materiais estudados	56
5.1. Caracterização petrográfica das rochas estudadas.	57
5.2. Preto São Gabriel	59
5.3. Verde Labrador	59
5.4. Cinza Corumbá	60
5.5. Timbalada	61
5.6. Giallita	62
6. Metodologia aplicada e análise dos resultados	64
6.1. Ensaio de alterabilidade química	66
6.1.1. Determinação do pH das amostras	66
6.1.2. Resistência ao ataque químico de compostos agressivos	67
6.1.2.1. Resultados e discussões	68

6.2. Ensaio tecnológicos de caracterização	79
6.2.1. Índices Físicos	79
6.2.1.1. Resultados e discussões	80
6.2.2. Determinação da resistência à esforços flexores	86
6.2.2.1. Resultados e discussões	87
6.3. Ensaio de caracterização radiométrica	90
6.3.1. Determinação do U, Th e ^{40}K	90
6.3.1.1. Resultados e discussões	91
6.3.2. Leitura do ^{222}Rn nas rochas	92
6.3.2.1. Resultados e discussões	93
6.4. Aplicação dos dados	98
6.4.1. Coeficiente de exalação do radônio	98
6.4.1.1. Resultados e discussões	99
6.4.2. Influência de adição do nível do radônio em um ambiente interno	101
6.4.2.1. Resultados e discussões	102
7. Considerações finais e conclusão	106
8. Referências Bibliográficas	110

1. Introdução

De um lado apresentam-se os problemas relativos à qualidade do ar interior devido aos contaminantes do ambiente construído, encontrados naturalmente nos materiais construtivos, que persistem apesar de ser um tema de conhecimento antigo como demonstram os trabalhos da World Health Organization – WHO (2010, 2011) e da United States Environmental Protection Agency - EPA (1990, 2003).

Do outro, as rochas ornamentais, fonte de radioatividade natural, como exemplo de materiais construtivos aplicados principalmente como revestimento interno e sofrem problemas de alterabilidades com o tempo, devido a sua aplicação e uso.

Esta tese é direcionada ao estudo do uso das rochas ornamentais e sua interação com o ambiente interno, como fator de adição do nível do gás radioativo radônio internamente no decorrer do seu uso que influenciará diretamente na qualidade da vida do usuário no ambiente construído.

A rocha é um dos materiais historicamente mais utilizados na construção, um bem mineral, utilizado como fonte de matéria prima presente ao longo de toda a história da humanidade para a construção de “abrigos” como proteção e, garantia de uma melhor qualidade de vida.

Apesar da sua tradição de uso, o desconhecimento das interações entre as características petrográficas e as propriedades tecnológicas requeridas com o ambiente de aplicação refletem no surgimento de patologias, como destacam alguns estudos de referência no tema, citando os trabalhos de Winkler (1973), Aires-Barros (1991), Prikryl e Smith (2007).

O mesmo acontece com o homem, devido ao desconhecimento do ambiente de sua interação poderá surgir o aparecimento de algumas patologias/doenças afetando a sua saúde e o seu padrão de qualidade de vida. Como exemplo, a presença do gás radônio internamente, onde o acúmulo de altos níveis em um ambiente pode conduzir ao surgimento de doenças carcinogênicas (EPA, 2003).

Na literatura existem poucas publicações brasileiras focando essa temática de contaminantes com as rochas ornamentais, cabendo destaques para os trabalhos de Salas, Nalini e Mendes (2003) sobre as radiações naturais encontradas em diversas rochas brasileiras, Moura *et al.* (2011), Amaral (2011), Amaral *et al.* (2012) e Azevedo *et al.* (2015) ao divulgar as primeiras metodologias e resultados para medição do gás radônio em rochas ornamentais.

Ressalva a importância do conhecimento dos materiais construtivos afim de saber a sua influência ao meio aplicado no decorrer do uso, para que tenham uma manutenção adequada, alertando sobre as formas de contaminações internas, no caso proposto pelo gás radioativo radônio exalado por rochas ornamentais.

1.2. Hipótese e objetivo da tese

É de conhecimento que parte do gás radônio gerado pela rocha fica retido na sua estrutura cristalina (AMARAL *et al.*; 2012). Sendo assim, a hipótese central da tese é de que a rocha com o passar do tempo de uso possa exalar uma maior quantidade de radônio em um determinado ambiente devido ao aumento de sua porosidade por processos de uso, gerando implicações na saúde do indivíduo (contaminação por radônio) e da edificação (padrões estético e de durabilidade).

Com essa hipótese, tem como objetivo principal avaliar as rochas ornamentais em relação aos aspectos de alterabilidade que irá influenciar nos aspectos de exalação do gás radônio, ao longo do tempo de uso, que em tese fica retido na rocha.

As especificações e manutenções incorretas podem trazer malefícios não apenas no que diz respeito ao desempenho e durabilidade, mas também ao proporcionar doenças graves aos usuários submetidos a doses excessivas da radiação.

1.3. Objetivos específicos

- Descobrir se o radônio retido na estrutura cristalina da rocha, com o passar do tempo de uso, será liberado, o que resultará no aumentando da atividade do gás radônio no ambiente interno.

- Obter parâmetros para a compreensão dos mecanismos da exalação do gás radônio nas rochas ornamentais.

- Avaliar a resistência da rocha ao sofrer ataques de compostos químicos agressivos encontrados em produtos de limpeza do ambiente construído, descobrindo qual é o mais agressivo nas rochas.

- Aplicar uma metodologia, que permite a caracterização das propriedades radiométricas e de exalação do gás radônio em rochas silicáticas utilizadas para fins ornamentais e de revestimento, para avaliar o uso desses materiais em condições de ambientes fechados.

1.3. Importância do tema

Ao conscientizar sobre as fontes contaminantes e suas consequências para a saúde humana ressalta a importância do tema. O estudo dos materiais construtivos, no caso as rochas ornamentais, irá garantir um melhor uso dos recursos naturais ao aplicá-los na arquitetura e possibilitará a prevenção de futuras doenças, pois, a não eliminação da fonte geradora da doença, no caso o ^{222}Rn acumulado interiormente, ao tratar a doença do indivíduo, o mesmo continuará doente devido ao seu ambiente de convívio continuar contaminado.

2. A qualidade do ar interior

A qualidade de vida está relacionada com o meio em que o homem está inserido e ao estar na natureza, nas grandes cidades ou em um ambiente fechado, como local de trabalho ou moradia, alguns fatores devem estar em equilíbrio para garantir a sua coexistência.

Quando se fala em ambiente contaminado, em primeiro plano, passa-se a ideia macro de atmosferas poluídas, contaminações do solo e dos lençóis freáticos como principais fatores que interferem na qualidade de vida e, os edifícios seriam um meio de fuga ao proporcionar uma sensação de segurança e proteção dessa poluição do ar exterior.

Por isso, existe uma maior preocupação do público com os impactos na saúde pela poluição ao ar livre, também observado por Jones (1999), fato que ao pensar na sustentabilidade dentro da Arquitetura, voltando somente para o pensamento macro, poderá influenciar no direcionamento das pesquisas.

Temas como os edifícios ecoeficientes, o uso da eficiência energética, o uso racional do material construtivo e materiais recicláveis, novos métodos construtivos e pós uso dos materiais construtivos que pode estar contaminando o agora, influenciam diretamente ou indiretamente na qualidade do ar interior no ambiente construído.

Logo, tem que questionar se somente o ar exterior irá influenciar mais na saúde do indivíduo, pois há de se considerar que o homem contemporâneo passa a maior parte do tempo em locais fechados, e, portanto, sujeito aos malefícios de contaminantes gerados em um ambiente que deveria ser o de proteção.

A International Commission on Radiological Protection – ICRP (1993) estima que o indivíduo passe 7 mil horas por ano na residência e 2 mil horas por ano em locais de trabalho, dando uma noção de tempo que possa estar exposto a algum tipo de contaminação interna, influenciada pela qualidade do ar interior.

Por isso, enquanto não conscientizar à respeito do perigo do ar interior, que interfere diretamente na qualidade de vida, esse tema continuará atual, como demonstram diversos estudos (antigo e novos), destacando os trabalhos de Turiel *et al.* (1983); Epa (1990); Jones (1998, 1999); Vallero (2008); WHO (2009); Milner *et al.* (2014); Derbez *et al.* (2014), resultando em alguns casos na Síndrome do Edifício Doente (SED) como um exemplo, em que os usuários de um edifício apresentam os mesmos sintomas de saúde devido a contaminação interna, fato ligado a má qualidade do ar interno.

Sendo assim, para esta tese, destaca-se de um lado o homem e sua interação com o ambiente e do outro os materiais que compõem esse ambiente que irá interferir diretamente na qualidade de vida.

No caso, os materiais utilizados para essa composição podem conter substâncias passíveis de serem dispersas no ar e que, ao acumularem, contribuem com o aumento do teor de toxidade no ambiente, conforme demonstram as pesquisas de Jones (1999), Vallero (2008) e Amaral (2011).

Esse aumento de toxidade no ar ao ser inalado pode gerar a ocorrência de algumas doenças, como o aparecimento de câncer, principalmente nas vias respiratórias, sendo motivos de investigações de algumas agências e organizações mundiais ligada à saúde e meio ambiente como a EPA (1990, 2003) e WHO (2011, 2010).

Existem muitas fontes potenciais de poluição do ar interior, sendo que isoladamente ou em combinação, produzem efeitos adversos à saúde, podendo ser gerados por uma fonte específica, limitada ou várias fontes sobre uma área ampla, sendo gerados periodicamente ou continuamente (EPA, 1990).

Entre essas fontes, destaca-se o benzeno, o monóxido de carbono, o formaldeído, o naftaleno, o dióxido de nitrogênio, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, o radônio, o tricloroetileno e o tetracloroetileno, por possuir fontes internas são conhecidas em relação a sua periculosidade para a saúde e são frequentemente encontrados no interior do ambiente construído em concentrações de riscos (WHO, 2010).

Os materiais presentes no ar que irão afetar a qualidade do ar interior pode ser classificado como gases ou partículas e, no caso dos gases que podem ser um potencial problema, lista-se o radônio, o CO₂, o NO₂ e os hidrocarbonetos (VALLERO, 2008).

Na Tabela 2.1 são apresentados os principais poluentes responsáveis pela contaminação interna nos edifícios, sendo gases ou partículas e suas diversas fontes, sendo emitidos e percolados nas estruturas dos edifícios, como a infiltração de fora para dentro do contaminante através da água, ar ou solo; ou um subproduto das atividades que são realizadas no interior, com as fontes associadas nas atividades dos ocupantes do edifício e outras fontes biológicas; a combustão de substâncias para aquecimento ou combustível e emissões de materiais de construção (JONES, 1999).

Tabela 2.1. Os principais poluentes internos e suas fontes.

Poluentes	Principais fontes de emissão
Agentes alérgicos	Poeira doméstica, animais domésticos, insetos
Amianto	Materiais retardadores de fogo, isolantes
Dióxido de carbono	Atividade metabólica, atividades de combustão, motor de automóveis nas garagens
Monóxido de carbono	Aquecedores de queima de combustível, caldeiras, fornos a gás ou querosene, fumo de tabaco
Formaldeído	Aglomerado, isolamento, mobiliário
Microrganismo	Pessoas, animais, plantas, sistema de ar condicionado
Dióxido de nitrogênio	Ar exterior, queima de combustível, motor de automóveis nas garagens
Substâncias orgânicas	Adesivos, solventes, materiais de construção, volatilização, combustão, tintas, fumaça de cigarro
Ozônio	Reações fotoquímicas
Partículas respiráveis	Suspensa ao ar, fumaça de cigarro, produtos de combustão
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	Combustão de combustível, fumaça de cigarro
Pólen	Ar exterior, árvores, grama, ervas daninhas, plantas
Radônio	Solo, água, materiais de construção (concreto, rocha, argila)
Fungos	Solo, plantas, alimentos, superfícies internas
Dióxido de Enxofre	Ar exterior, queima de combustíveis
Compostos orgânicos voláteis	Tintas, adesivos de paredes, aparelhos de combustão

Fonte: Adaptado de Jones (1999).

Essas fontes de origem interna podem estar associadas com as atividades de ocupantes do edifício e outras fontes biológicas, a combustão de substâncias para aquecimento ou combustível e emissões de materiais de construção que é o foco do estudo da tese, ou como origem externa, através da infiltração de fora, seja por água, ar ou solo (JONES, 1999).

Estes contaminantes apresentados são dispersos pelo ar, logo, a má ventilação é um fator de contribuição importante em muitos casos dos edifícios doentes devido possuírem uma baixa renovação do ar, assim, o aumento nas taxas de ventilação diminui a concentração de poluentes no ar como as baixas taxas de fluxo de ar aumentam a concentração deles (EPA, 1990; TURIEL *et al.* 1983).

A taxa de troca de ar influencia diretamente na concentração dos poluentes por dois fatores:

- O *primeiro fator* seria nos locais de maiores taxas de troca de ar, onde os poluentes no interior de uma estrutura são removidos a partir do interior do ambiente enquanto o ar de fora desse ambiente possui concentrações de poluentes mais baixos. No entanto, se a concentração do poluente no exterior é elevada, então um aumento na taxa de troca de ar irá trazer esses poluentes para o interior. Logo, a taxa de troca de ar alta ajuda a diminuir ou aumentar os níveis de poluentes do ar interior dependendo da qualidade do ar exterior (VALLERO, 2008).

- O *segundo fator* seria que para taxas de renovação do ar mais baixas, os poluentes liberados a partir de fontes no interior do edifício podem contribuir para uma concentração e assim possuir um nível mais elevado de poluentes no interior (VALLERO, 2008).

Logo, como condicionantes que interferem na qualidade do ar no interior do ambiente construído temos a renovação do ar interior, juntamente com os poluentes encontrados nos materiais construtivos somados com os poluentes do ar exterior e a taxa de exalação desses poluentes nos materiais construtivos.

O desequilíbrio nessas condicionantes irá originar doenças provocadas pela má qualidade do ar interno nos ambientes, destacando-se o câncer como uma realidade cada vez mais evidente, tornando-se uma das principais causas de mortes no mundo, sendo que 19% da doença são atribuídos ao meio ambiente incluindo o ambiente de trabalho, que afeta principalmente o pulmão (WHO, 2011).

O “Relatório de Riscos de Radônio em Casas” estima 21.000 mortes ao ano por câncer de pulmão nos EUA como consequência da exposição ao ^{222}Rn e filhos (também encontrado nos materiais de construção), sendo a segunda causa de morte por contaminação do ar interior em diversos países, perdendo apenas para o cigarro (EPA, 2003).

Com isso, pode-se simplificar em dois fatores o risco de contaminação do indivíduo no ambiente: o tempo de permanência na área contaminada e a concentração da substância tóxica neste ambiente durante o tempo de convívio, o seu uso e ocupação.

Fatores de risco que podem ser agravados devido existir uma tendência de diminuição dos espaços de circulação de ar adentro com o agrupamento das edificações, fornecendo ambientes fechados e propícios ao acúmulo de contaminantes, quebrando o equilíbrio para garantir uma melhor qualidade de vida ao homem nesses ambientes.

Tais considerações vêm reforçar a importância de caracterizar os materiais de construção, os quais individualmente ou somados com outros materiais empregados podem liberar contaminantes nos ambientes, com a consequente geração de riscos à saúde do usuário, o que deve representar uma das preocupações do profissional ao compor o ambiente.

Nessa linha de pensamento, a tese buscou conhecer melhor sobre o contaminante proposto, o gás radioativo radônio, e o material de estudo, as rochas ornamentais, nos aspectos referente à origem do radônio no interior da rocha e os mecanismos que o permitem exalar no interior do ambiente construído, facilitando no entendimento do leitor nos métodos propostos e nas discussões dos resultados.

3. A radioatividade natural e o gás radônio

Segundo a International Atomic Energy Agency - IAEA (2004), estamos expostos à radiação, em maior ou menor extensão, e a radiação ionizante natural é a principal fonte de exposição para a maioria das pessoas, presente em alimentos, bebidas e no ar.

Como exemplo dessa exposição, o gás radônio que é considerado uma potencial fonte de radiação natural absorvida pelo homem e o acúmulo de altos níveis desse gás no interior de um ambiente de convívio humano pode conduzir ao surgimento de doenças carcinogênicas (EPA, 2003).

A origem do radônio inicia do decaimento radioativo do urânio e tório que ocorrem naturalmente nas rochas e solos e, por ser um gás, difunde-se através de fissuras até alcançar lençóis freáticos ou diretamente a superfície terrestre.

Ao utilizar os materiais construtivos, que possuem suas origens em matérias primas onde existem elementos radioativos naturalmente, estaria levando essa radiação diretamente para dentro do ambiente, podendo elevar os índices de concentração de radônio no seu interior.

Logo, as rochas ornamentais podem contribuir com a adição do nível do gás radônio e da radioatividade natural e, por saberem disso, algumas agências de comunicação dos EUA especularam ao atribuir a adição do gás radônio ao uso de rochas ornamentais no interior das residências com elevados níveis (ABIROCHAS, 2008), como a reportagem intitulada “*What’s Lurking in Your Countertop?*” (*O que está escondido em sua bancada?*) e assinada por Murphy (2008).

Assim, devido à falta de literatura, alguns trabalhos começaram a surgir sobre a relação entre o gás radônio e as rochas ornamentais, cabendo destaques para os primeiros trabalhos relativos ao tema de Moura *et al.* (2011), Amaral *et al.* (2012), Artur *et al.* (2013) e Azevedo *et al.* (2015).

O estudo da radioatividade natural torna-se importante não somente quando se trata de rocha ornamental, pois é comum o uso de matérias primas provenientes da natureza em diversos materiais construtivos que interagem principalmente no interior dos edifícios, fora a sua ocorrência natural em solos e na água, que ao ser encanada chega aos edifícios, conforme visto nos trabalhos de Lara *et al.* (2015), Salim e Bonotto (2015) e Bonotto (2014).

É preciso fazer interferências no edifício para diminuir a taxa de exalação do gás radônio no ambiente quando atinge níveis altos, como a impermeabilização dos pisos e fundações, pressurização do ambiente e ventilação mecânica para troca de ar gerando despesas extras

(EPA, 2001 e 2013), as quais poderiam ser evitadas com o conhecimento prévio dessa problemática, prevenindo transtornos econômicos e principalmente futuras doenças.

Para isso, torna-se importante compreender a radioatividade natural e saber os limites aceitáveis de exposição humana.

3.1. Conceitos básicos sobre a radioatividade

Tudo o que conhece na Natureza é constituído por átomos, a menor estrutura da matéria a qual apresenta as propriedades de um elemento químico, formado por um núcleo onde concentra sua massa e partículas denominados elétrons girando ao seu redor.

O núcleo é formado por partículas de cargas positivas denominadas prótons e partículas do mesmo tamanho, mas sem carga denominadas nêutrons. O número de prótons (número atômico) é o que identifica o elemento químico.

O número de nêutrons no núcleo pode ser variável por não possuir carga elétrica, sendo assim, um mesmo elemento químico pode ter massas diferentes, com o mesmo número de prótons. Portanto, átomos de um mesmo elemento químico com massas diferentes são denominados átomos isótopos e os isótopos radioativos também são conhecidos como radionuclídeos.

Em 1896, Antoine Henri Becquerel, ao deixar um sal de urânio extraído do mineral pechblenda, que contém alto teor de urânio, sobre um filme fotográfico virgem, acabou revelando o filme. Este fenômeno foi denominado de radioatividade, tendo Marie Skłodowska Curie, em 1898, provado que essa propriedade não era apenas do urânio e, os elementos que apresentavam esta propriedade foram chamados de elementos radioativos.

Na natureza, todos os elementos tendem a adquirir a maior estabilidade possível, quando um núcleo muito energético por ter excesso de partículas ou de carga, tende a estabilizar-se, emitindo o excesso de energia na forma de radiação.

Logo, a radioatividade natural é a que se manifesta espontaneamente nos elementos radioativos e nos isótopos através da desintegração do núcleo atômico, resultando na emissão de partículas (alfa, beta) ou radiação eletromagnética (raios gama).

Todos os elementos com número atômico maior que 83 são radioativos, sendo conhecidos 58 radionuclídeos naturais que ao serem somados aos artificiais e aos produtos de fissão do urânio, resultam em mais de 1.500 radionuclídeos (BONOTTO, 1996).

Assim, é notado três formas de radiação por decaimento radioativo: *decaimento alfa*, *decaimento beta* e *radiação gama*.

No *Decaimento Alfa*, o radionuclídeo emite uma partícula alfa (He) constituída por dois prótons e dois nêutrons (HUDA, 2010). Portanto, quando um átomo radioativo emite uma partícula alfa, o número de massa do átomo resultante diminui de quatro unidades e o número atômico de duas unidades.

Como exemplo, o $^{238}_{92}\text{U}$, no qual a série de seu decaimento irá surgir o gás radônio, demonstrado pela Equação 3.1:

Onde:

Th: elemento produto do decaimento;

He: partícula alfa (gás nobre estável que não reage quimicamente com os demais elementos);

$Q\alpha$: quantidade da energia total do decaimento alfa.

Para se ter uma ideia, uma partícula alfa com a interação dos átomos do ar, perde em média 33,85 MeV de energia por ionização, uma partícula alfa de 4,8 MeV emitida pelo ^{226}Ra , produz no ar cerca de 142 mil ionizações em uma distância menor que 3,5 cm (EPA, 2003).

Uma partícula alfa é mais pesada, de maior carga e menos penetrante que as partículas β e as radiações γ , conseguindo apenas atingir a superfície da pele humana, sendo facilmente blindadas. Mas devido ao fato de possuir alta densidade de ionização, essa energia pode trazer consequências à saúde humana quando ingeridos ou inalados os seus radionuclídeos emissores alfa (EPA, 2003).

O *Decaimento Beta* ocorre quando o núcleo atômico tem uma diferenciação de nêutrons em relação aos prótons. No decaimento beta negativo, o nêutron no interior do núcleo é convertido em próton com a liberação de um elétron (β^-) pelo núcleo atômico e, no decaimento beta positivo, ocorre a conversão de um próton em um nêutron com a liberação de uma subpartícula positiva, o pósitron (β^+), do núcleo atômico (TIPLER, 2009; HUDA, 2010).

Quando o nêutron se transforma em um próton o número atômico do átomo sofre aumento de uma unidade e o número de nêutrons sofre redução de uma unidade.

Em relação às partículas α , as partículas β são menores, mais leves e mais penetrantes, produzem uma densidade de ionização menor e um alcance maior. Uma partícula β de 3 MeV

possui um alcance no ar de 1260 cm e 1,56 cm no tecido humano e os nêutrons, que são muito penetrantes, por serem sem carga, não produzem ionização, mas transferem energia para outras partículas que podem ionizar, podendo ser blindados com matérias que possuem o elemento hidrogênio (KAPLAN, 1983).

A *Radiação Gama* ocorre depois da emissão de uma partícula α ou β , o núcleo resultante é deixado em estado excitado, apresentando energia em excesso. Esse núcleo ao retornar em seu estado fundamental de energia produz a emissão de fótons ou onda eletromagnética da mesma natureza da luz na forma de radiação gama (γ).

Os raios γ por não possuírem massa e nem carga, possuem alto poder de penetração, pois esta radiação não é uma partícula, mas sim uma onda. Estes raios percorrem grandes distancias no ar, sendo blindados por chumbo (por ser um elemento muito fechado).

A radiação γ interage com a matéria sendo emitidos ou criados elétrons ou pósitrons que ionizam os átomos do meio.

3.2. Séries naturais de decaimento radioativo

Na natureza os núcleos dos elementos radioativos emitem radiações até que os núcleos atinjam uma configuração estável, decaindo sucessivamente até obter o equilíbrio. Esse processo forma uma série de gerações de núcleos relacionados um ao próximo da série como pai para filho.

Os núcleos radioativos se agrupam em quatro séries de decaimento onde o decaimento α ocasiona uma diminuição de quatro unidades no número de massa do núcleo pai para o núcleo filho e os decaimentos β e γ não ocasionam mudança nesse número, visto no item 3.1.

As séries diferem por múltiplos de quatro, sendo que a série $4n$ começa com o núcleo de tório 232, a série $4n + 1$ que começa com o núcleo de netúnio 237, a série $4n + 2$ começa com o núcleo de urânio 238 e, a série $4n + 3$, que começa com o núcleo de urânio 235 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Série de decaimento radioativo e meia vida.

Série	Núcleo Pai	Meia Vida (em anos)
4n	Tório 232	$2,01 \times 10^{10}$
4n + 1	Netúnio 237	$3,25 \times 10^6$
4n + 2	Urânio 238	$6,52 \times 10^9$
4n + 3	Urânio 235	$1,02 \times 10^9$

Fonte: Kaplan, 1983.

Os “pais” das cadeias naturais de decaimento radioativo são o urânio e o tório, onde o elemento U possui duas séries, a série do urânio (^{238}U) e a série do actínio (^{235}U), e o elemento Th a série do tório (^{232}Th), onde decai por uma série de emissões α e β até atingir estabilidade nos isótopos de chumbo (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Séries de decaimento radioativo.

Série do Urânio	Série do Actínio	Série do Tório
$^{238}\text{U} - 4,49 \times 10^9 \text{a}$	$^{235}\text{U} - 7,13 \times 10^8 \text{a}$	$^{232}\text{Th} - 1,39 \times 10^4 \text{a}$
$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$
$^{234}\text{Th} - 24,1 \text{d}$	$^{231}\text{Th} - 25,6 \text{h}$	$^{228}\text{Ra} - 6,7 \text{a}$
$\beta \downarrow$	$\beta \downarrow$	$\beta \downarrow$
$^{234}\text{Pa} - 1,16 \text{m}$	$^{231}\text{Pa} - 3,43 \times 10^4 \text{s}$	$^{228}\text{Ac} - 6,13 \text{h}$
$\beta \downarrow$	$\alpha \downarrow$	$\beta \downarrow$
$^{234}\text{U} - 2,48 \times 10^5 \text{a}$	$^{227}\text{Ac} - 2,2 \text{s}$	$^{228}\text{Th} - 1,9 \text{a}$
$\alpha \downarrow$	$\beta \downarrow$	$\alpha \downarrow$
$^{230}\text{Th} - 7,5 \times 10^4 \text{a}$	$^{227}\text{Th} - 16,6 \text{d}$	$^{224}\text{Ra} - 3,64 \text{d}$
$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$
$^{226}\text{Ra} - 1622 \text{a}$	$^{223}\text{Ra} - 11,1 \text{d}$	$^{220}\text{Rn} - 54,5 \text{s}$
$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$
$^{222}\text{Rn} - 3,83 \text{d}$	$^{219}\text{Rn} - 3,52 \text{s}$	$^{216}\text{Po} - 0,16 \text{s}$
$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$
$^{218}\text{Po} - 3,05 \text{d}$	$^{215}\text{Po} - 1,6 \times 10^{-3} \text{s}$	$^{212}\text{Pb} - 10,6 \text{h}$
$\alpha \downarrow$	$\alpha \downarrow$	$\beta \downarrow$
$^{214}\text{Pb} - 26,5 \text{m}$	$^{211}\text{Pb} - 36,1 \text{m}$	$^{212}\text{Bi} - 60,5 \text{s}$
$\beta \downarrow$	$\beta \downarrow$	$\alpha \downarrow \quad \beta \downarrow$
$^{214}\text{Bi} - 19,7 \text{m}$	$^{211}\text{Bi} - 2,16 \text{m}$	$^{208}\text{Tl} - 3,1 \text{m} \quad ^{212}\text{Po} - 3,0 \times 10^{-7} \text{s}$
$\beta \downarrow$	$\alpha \downarrow$	$\beta \downarrow \quad \alpha \downarrow$
$^{214}\text{Po} - 1,6 \times 10^{-4} \text{s}$	$^{207}\text{Tl} - 4,79 \text{m}$	$^{208}\text{Pb} - \text{estável}$
$\alpha \downarrow$	$\beta \downarrow$	
$^{210}\text{Pb} - 22,2 \text{a}$	$^{207}\text{Pb} - \text{estável}$	
$\beta \downarrow$		
$^{210}\text{Bi} - 50 \text{d}$		
$\beta \downarrow$		
$^{210}\text{Po} - 138 \text{d}$		
$\alpha \downarrow$		
$^{206}\text{Pb} - \text{estável}$		

Fonte: Adaptado de Kaplan (1983).

Os núcleos instáveis de um mesmo elemento químico chamados de radioisótopos realizam as emissões de radiação de um modo imprevisível, não sendo determinado o momento em que o núcleo irá emitir a radiação.

Para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra, estima-se certo número de emissões ou transformações em cada segundo. Essa “taxa” de transformações é denominada atividade e é medida em Becquerel (Bq = uma desintegração por segundo) e Curie ($Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq$).

Cada elemento radioativo se transmuta ou decai em um intervalo de tempo que lhe é característico. Nos processos radioativos o tempo necessário que um radioisótopo leva para desintegrar metade de sua massa, isto é, ter sua atividade reduzida à metade da atividade inicial, é denominado de meia vida ou período de semidesintegração deste isótopo. Logo, os períodos de semidesintegração oscilam entre milésimos de segundos e bilhões de anos, dependendo do grau de instabilidade do radioisótopo.

A abundância média de urânio na crosta continental é de 1,3 ppm, com concentração mais elevada na crosta continental superior (2,7 ppm) e menor na crosta inferior (0,2 ppm) (ULBRICH e GOMES, 1981) e, a sua distribuição na crosta terrestre está relacionada com as atividades magmáticas da formação da Terra.

A ocorrência de urânio é mais marcante em rochas graníticas, pegmatitos graníticos e em sienitos, sendo constituinte numa grande variedade de minerais, encontrando-se nos principais minerais formadores de rocha, nos minerais secundários e acessórios ou formando seus próprios minerais (UO_2).

A distribuição de urânio, presente como traços nos minerais formadores de rochas ígneas como quartzo e feldspato, pode estar ligada aos processos de substituição isomórfica, concentração e adsorção em minerais imperfeitos, inclusão no retículo cristalino e em microcristais como sugerido por Pertlik, Roger e Adams (1974). A biotita retém de 19 a 22% do total de urânio e os minerais pesados como, zircão, monazita, apatita, magnetita, ilmenita e riebeckita contêm de 61 a 65% deste teor (MOREIRA-NORDEMANN, 1977).

O Th existe somente em estado tetravalente e como composto insolúvel em água, seu íon tem raio parecido com o do U, podendo um substituir o outro. Durante a fusão parcial e a cristalização fracionada do magma, o U e o Th são incorporados aos produtos mais ricos em sílica, sendo assim, as rochas de composição granítica estão mais enriquecidas nesses elementos do que rochas de composição basáltica e ultramáfica (ROGERS e ADAMS, 1969).

O potássio se torna um importante elemento por constituir minerais, como feldspatos e micas, que compõem grande variedade de rochas, ocorrendo três isótopos de potássio, o ^{39}K , ^{40}K e ^{41}K na natureza.

O ^{40}K é um isótopo radioativo, que é o menos abundante, onde decai por captura de elétrons para ^{40}Ar e por emissão β^- para ^{40}Ca . Tem sua importância na geoquímica onde é

utilizado na datação geocronológica e participação na geração de calor terrestre (FAURE, 1988).

O potássio é um elemento principal das principais rochas ígneas geradas na crosta, e assim, utilizado na classificação petrográfica e petrogenética dessas rochas a partir da quantidade de potássio existente na rocha (STRECKEISEN, 1976).

3.3. O gás radônio

O gás radônio resulta do decaimento radioativo das séries do urânio e tório e, por ser um gás, difunde-se através das fissuras alcançando o exterior da estrutura em que foi gerado. Como os materiais usados para construção civil têm suas origens em matérias primas vindas da natureza, assim como a base onde é construída, o solo ou mesmo a água encanada que chegam às residências, podem apresentar um teor significativo de ^{222}Rn que, ao acumular, eleva os índices de concentração no seu interior.

Como os indivíduos chegam a passar 90% do seu tempo em locais fechados, a contaminação por radiação do radônio pode ser provocada por situações de exposições prolongadas (VALLERO, 2008).

As rochas usadas para fins ornamentais e de revestimento contêm diferentes concentrações de urânio e outros elementos radioativos que ocorrem naturalmente. Apesar, segundo a EPA (2003), que a principal fonte de radônio em residência é proveniente do solo que entra em contato com o assoalho das residências, as rochas ornamentais e de revestimento podem vir a ocasionar uma adição na quantidade do gás retido no interior das residências.

O radônio é um gás nobre, assim chamado por ser relativamente inerte, o mais pesado dos gases e o único que não possui isótopos estáveis, ocorrendo na forma de três isótopos naturais, onde todos são emissores alfa vindo da cadeia de decaimento de três séries radioativas (Tabela 3.3).

Tabela 3.3. Isótopos naturais do gás radônio.

Isótopos de Rn	Série Radioativa	Meia-Vida
^{222}Rn	^{238}U (série do Urânio)	3,82 dias
^{220}Rn	^{232}Th (série do Tório)	54,5 segundos
^{219}Rn	^{235}U (série do actínio)	3,52 segundos

A série do Urânio inicia-se com o ^{238}U e após 14 transformações, 8 α e 6 β gera o nuclídeo estável ^{206}Pb . Nesta série na 6ª transformação é gerado como filho o ^{222}Rn , sendo entre os isótopos de radônio, o de maior meia-vida (3,83 dias), sendo assim, é o alvo de maior interesse desta pesquisa.

Ao estudar sua série radioativa, notam-se que todos os isótopos naturais do radônio são emissores alfa e filhos dos isótopos de rádio e os seus descendentes são os sólidos de Po, Pb e Bi.

Ao se difundir através dos interstícios das rochas ou do solo e por ser solúvel em água podem concentrar nas rochas que contém pouca abundância de urânio ou tório. Além disso, a quantidade de radônio que escapa na rocha depende da quantidade liberada, influenciado pela porosidade e pressão atmosférica.

No caso das rochas ornamentais, a superfície de acabamento é importante, pois além de ser polida com ou sem resina, a rocha pode ser assentada bruta ou com acabamentos do tipo flameado ou apicoado, interferindo no seu meio natural de escape.

Quando o rádio decai por emissão alfa, alguns isótopos de radônio são liberados da matriz sólida por “recuo”, possuindo como principais fatores determinantes para a saída do meio em que se encontra a localização do átomo de rádio no grão mineral, a densidade do meio e a direção que o átomo de radônio assume no momento de sua emissão. Se o átomo de rádio estiver localizado em uma região muito interna na estrutura do mineral, dificilmente o radônio é liberado para a atmosfera, mas se estiver localizado próximo a sua superfície e sua direção for nesse sentido, ele poderá se libertar e se difundir para o espaço de poro entre os grãos ou planos de fraturas da rocha (SANTOS, 2008).

Por difusão molecular ou por diferença de pressão, o ^{222}Rn pode ser exalado dos materiais e se difundir na atmosfera continuamente, a uma taxa determinada pelas diferentes estruturas geológicas, geoquímicas (teor de ^{226}Ra) e ambientais (umidade, gradiente térmico, pressão do ar, velocidade do vento), podendo em ambientes fechados atingir níveis de concentração muito elevados (AMARAL, 2011).

Segundo Santos (2008), o fluxo de radônio de um material é definido como o fluxo do gás por unidade de área e por unidade de tempo ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), sendo função de dois fenômenos que seria o transporte de ^{222}Rn da matriz sólida para o interstício do poro e, do poro até a superfície da matriz. O primeiro fenômeno é causado pela energia cinética da emissão da partícula alfa do ^{226}Ra no momento do seu decaimento e o consequente recuo do átomo de ^{222}Rn recém-formado sendo chamado de emissão. A difusão do ^{222}Rn provocada por forças

decorrentes de gradientes de concentração e de pressão entre o material e o meio externo é a causa do segundo fenômeno. A exalação é o processo decorrente dos dois fenômenos.

3.4. Exposição e dosimetria de ^{222}Rn e filhos

Os filhos do ^{222}Rn (^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po), onde uma fração dos seus descendentes poderão aderir às partículas suspensas no ar e uma parte ficará livre, quando inalados em um ambiente atmosférico que os contém, podem ficar retidos no interior das vias respiratórias, aumentando o risco de câncer pulmonar (THAD GODISH *et al.*, 1991; AMARAL, 2011) (Figura 3.1).

Figura 3.1. Inalação e deposição da progênie do radônio no pulmão humano (GODISH, 1991).

Conforme Santos (2008), quanto maior a quantidade de partículas, maior será a probabilidade de os descendentes do radônio aderirem nessas partículas de aerossóis e seguirem o caminho delas através do ar, onde essas partículas têm muito mais massa que um único átomo e são menos móveis e flutuam no ar, como exemplo, carregando o átomo de ^{218}Po .

Este, ao se depositar no sistema respiratório, bombardeia os tecidos com emissão alfa e dá a sequência ao decaimento, ^{214}Pb por radiação β , ^{214}Bi por radiação β , ^{214}Po por radiação α e ^{210}Pb por radiação β que tem a meia vida de 22,2 anos.

É o processo de decaimento mais prejudicial à saúde humana, onde uma partícula α com determinada energia é cerca de 20 vezes mais danosa aos tecidos pulmonares que uma partícula β de mesma energia e, para efeito de cálculo, define-se “energia potencial” como a energia que é transferida ao tecido pulmonar, em decorrência da inalação de um determinado radionuclídeo e quando está relacionada a átomos de ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po é igual a 7,69MeV (PAULO, 1991).

Para os átomos de ^{218}Po , a energia potencial é igual a 13,69MeV (6 + 7,69MeV), onde cada átomo de ^{218}Po que emite uma partícula alfa de 6MeV acaba se transformando em um átomo de ^{214}Po que emite uma partícula alfa de 7,69MeV (PAULO, 1991).

Segundo Front Matter (1999), essa emissão permite a passagem de partículas através do tecido humano que produz faixas essencialmente lineares com densas colunas de ionização, que dão origem à dose alta de radiação no local depositado e, é geralmente aceito que as células-alvo (se basal ou serosa) estão dentro da faixa de partículas alfa depositado na superfície do brônquica epitélio (Figura 3.2.), sendo susceptíveis de estar perto da extremidade das faixas de partículas alfa, onde a densidade de ionização da radiação ao longo das faixas é elevada, mas mudando rapidamente.

Figura 3.2. Intervalos de duas partículas alfa emitidas por descendência do radônio depositada na superfície do pulmão e a profundidade média de células serosa e basal no pulmão humano. (HALL e BRENNER, 1992 apud FRONT MATTER, 1999).

Quando os tecidos pulmonares são expostos as partículas alfa, as células dos tecidos podem ser mortas ou esterilizado, sofrer mutações, ou ser transformado para um estado

maligno, causando o câncer pulmonar, mas nem todos os tipos de câncer provocados pela exposição de radônio estão ligados ao sistema respiratório, pois existem associações entre os índices de exposição ao radônio e à incidência de vários tipos de câncer como a leucemia e linfoma amiloides (THAD GODISH *et al.*, 1991; FRONT MATTER, 1999).

A exposição do indivíduo em relação a fonte de radônio interna no ambiente construído é geralmente sujeita à variação diurna e sazonal sistemática e, a concentração anual média de radônio é também sujeita a uma variação aleatória substancial ano-a-ano, podendo estar relacionada a diversos fatores como os padrões climáticos e comportamento dos ocupantes, relação da troca de ar do edifício, além que o risco de desenvolver o câncer aumenta com a exposição ao longo prazo, recomendando a definir um nível de referência a ser encontrado no ambiente interno para que os países utilizem como forma de prevenção à essas doenças causadas pelo gás radônio (WHO, 2009).

Concentração e dose são termos muito usados, onde a concentração de radônio é dada pela unidade Bq/m³ e a dose é normalmente expressa na unidade de mSv (CHEN; 2005).

Segundo Chen (2005), existem grandes incertezas nas avaliações de dosimetria, assim como numa análise epidemiológica. Para a avaliação da dosimetria dos níveis de radônio para o ser humano, a ICRP (1993) considera dois ambientes distintos, o residencial e o de trabalho:

- Para o residencial, estima-se o tempo de ocupação do indivíduo em 7.000 horas por ano e, sendo recomendado para intervenção entre 200 e 600 Bq/m³ para concentração média anual de radônio e dose anual efetiva de radiação entre 3 mSv a 10 mSv por ano.

- Para os locais de trabalho, estima-se o tempo de 2.000 horas por ano com níveis recomendado para intervenção entre 500 a 1500 Bq/m³ e dose anual efetiva de radiação entre 3 mSv a 10 mSv por ano.

A EPA (2003) recomenda níveis de concentrações de radônio abaixo de 148 Bq/m³ (4 pCi/L) em residências, onde 6,1% dos domicílios pesquisados pela agência excedeu esses níveis e a WHO (2009) recomenda que as concentrações em ambientes internos sejam menores que 100 Bq/m³.

No caso do Brasil, seria a Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN que por meio das suas diretrizes básicas de proteção radiológica (CNEN-NN-3.01:2014) recomenda o mesmo estabelecido na ICRP (1993) com ações de intervenção de 10 mSv/ano que corresponde a uma concentração de ²²²Rn no ar de 300 Bq/m³.

3.5. Questão do radônio em ambientes internos no Brasil

A política de “selos verdes” e as “garantias de sustentabilidades” infelizmente nem sempre significam uma melhoria sobre a qualidade de vida nos ambientes internos, deixando claro uma despreocupação com o ar interior no tocante de não conhecer totalmente os materiais de construção.

Alguns temas pensando na sustentabilidade (uso racional do material construtivo, materiais recicláveis, novos métodos construtivos, edifícios ecoeficientes e eficiência energética) geram políticas públicas relacionadas no pensamento macro, não atendendo a melhoria na qualidade de vida do usuário no requisito da saúde do ambiente interior, onde os materiais construtivos podem interferir na qualidade do ar no ambiente construído.

Além da radioatividade natural, que em doses elevadas interfere na saúde do usuário, a exemplo, os materiais construtivos podem possuir algum tipo de contaminação como a de metais pesados, o qual foi observado por Pablos e Sichieri (2010) ao descobrir excesso de Cr no cimento, que pode interferir na saúde dos funcionários da obra.

Em parte, as pesquisas acabam se preocupando apenas com o descarte dos materiais construtivos e dos resíduos gerados. Com isso, costumam utilizar as normas de descarte dos resíduos sólidos baseadas nos ditames da NBR 10004 (ABNT, 2004a), realizando os ensaios para obtenção de extrato solubilizado e lixiviado, para classificá-los como perigosos ou não perigosos, inertes ou não inertes ao meio em que é descartado e não aplicado (ABNT, 2004b e 2004c), buscando apenas o encapsulamento em uma matriz cimentícia como justificativa para o seu reaproveitamento.

Faz-se aqui um alerta da interação com o ambiente interno construído no qual a norma não justifica o uso, além de fatores como a radiação natural encontrada nesses materiais ou exalação de algum gás, que ao não ser incluído nas pesquisas para descobrir se é prejudicial ao meio que é utilizado para compor o ambiente, talvez por um pensamento macro existente ao ter apenas a preocupação maior com o descarte e o resíduo, acaba deixando em segundo plano uma preocupação com os problemas que os materiais em uso podem causar na saúde das pessoas.

Cita-se, como mais um exemplo, a busca na eficiência energética nos edifícios, que culminou com a necessidade de intervenções no projeto para alcançar as metas de redução dos gases de efeito estufa em países de clima frio, em que suas matrizes energéticas lançam grandes quantidades de CO₂, como o Reino Unido adotando em 2008 a Lei de Mudanças Climáticas, sendo de consenso que as intervenções de eficiência energética com baixa renovação de ar

afetam a qualidade do ar interior, constituindo risco para a saúde humana (MILNER *et al.*, 2014; DERBEZ *et al.* 2014).

No caso do Brasil é comum o uso de refrigeração vedando o ambiente e diminuindo as taxas de renovação do ar interno, gerando o risco similar dos países de clima frio.

O aumento nas taxas de ventilação diminui a concentração de poluentes no ar, como baixas taxas de fluxo de ar aumentam a concentração deles (EPA, 1990; TURIEL *et al.* 1983), demonstrando a importância da renovação do ar nos ambientes construídos.

Logo, levanta-se as questões da renovação do ar e a interação dos materiais construtivos que podem concentrar algum contaminante no ambiente construído que acabam ficando em segundo plano ou esquecidos, refletindo na legislação brasileira.

Assim, as leis vigentes no País referentes a Qualidade do Ar Interno são relativas em ambientes climatizados como a Portaria nº 3.523 de 28 de agosto de 1998 (BRASIL, 1998), que não faz menção ao radônio, além da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 3 de 22 de agosto de 1990 (BRASIL, 1990) que somente atende o quesito da qualidade do ar exterior.

A WHO (2009) e o ICRP (1993), recomendam que os órgãos reguladores nacionais de cada País estabeleçam um nível de referência de concentração de radônio *indoor*, que ao serem aceitas contribuirá na prevenção de doenças causadas pela contaminação e também força, por parte dos profissionais da construção civil, conhecer melhor os materiais que estariam sendo utilizados no ambiente a ser construído, melhor os caracterizando e influenciando nos estudos de outros contaminantes.

No Brasil, através da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (2014), por meio das suas diretrizes básicas de proteção radiológica (CNEN-NN-3.01:2014), é encontrado algum assunto relacionado sobre o radônio, mas com foco em instalações nucleares.

A CNEN recomenda o mesmo estabelecido pelo ICRP (1993) com ações de intervenção de 10 mSv/ano que corresponde a uma concentração de Rn no ar de 300 Bq/m³, intervenções que seriam dadas caso fosse rotina em nossa cultura medir o nível de radônio nos edifícios construídos.

No entanto, WHO (2009) recomenda que as concentrações em ambientes internos sejam menores que 100 Bq/m³, um número menor que o estabelecido pela EPA (2003), ICRP (1993) e CNEN (2014) e, se embasa em dados científicos sobre os efeitos na saúde relativos ao radônio no interior do ambiente construído, onde conclui que o nível de referência de 100 Bq/m³ é plenamente seguro para uma redução efetiva dos perigos para a saúde populacional associados ao radônio *indoor*.

Segundo Antoniazzi *et al.* (2013), a prática de disseminar informação a respeito dos riscos de câncer, relacionado a exposição do radônio, não faz parte da rotina dos serviços oferecidos no Brasil. Apenas 18% da população do País é monitorada, através de 22 centros de estudos RCBP (Registro de Câncer de Base Populacional) que enviam seus dados para o Instituto Nacional de Câncer – INCA, com lacunas sobre a causa da doença. Demonstra-se que a doença é tratada sem procurar a causa e, no caso de câncer por exposição ao radônio, o meio que a pessoa frequenta (ambiente residencial, de trabalho ou lazer) pode ser o responsável pela origem da doença.

De acordo com WHO (2009), em virtude de a população não estar ciente das medidas de prevenção de radônio instalados em seus lares, ela pode não saber que um sistema de prevenção de radônio é necessário, não forçando as construtoras a estabelecerem essas medidas. Por isso, a população deve estar ciente de que a medição de radônio no interior do ambiente é a única maneira de saber se a residência estará com níveis de concentração aceitáveis do gás radônio.

Esses fatos demonstram que o Brasil precisa avançar em políticas relacionadas ao perigo do radônio *indoor*, estabelecer métodos de prevenção e intervenção no ambiente construído.

4. As Rochas Ornamentais

As rochas sempre fascinam os arquitetos e escultores em diversas culturas, presentes nas manifestações mais antigas da civilização humana e utilizadas no decorrer da história em construções grandiosas e representações monumentais, permanecendo as estruturas erguidas apesar das ações do tempo, demonstrando o poder, a permanência e a representação, e, no contemporâneo, utilizado em sede de grandes corporações para decorar seus edifícios devido a essa sensação de poder e eternidade que representa em sua tradição, em contraste com o vidro e o aço que incorporam o progresso técnico (SIEGESMUND e SNETHLAG, 2011).

Inicialmente, as rochas eram utilizadas como matéria prima na construção devido a sua resistência, como demonstram os edifícios históricos que sobreviveram a ação do tempo. Porém, devida a beleza de suas faces ao serem polidas, realçando suas cores e os seus minerais, começaram a ser utilizadas para ornamentação.

Segundo Siegesmund e Snethlag (2011), com essa crença de que as rochas naturais são bens duráveis, utilizou-se para a construção de imponentes monumentos e edifícios, no início com materiais provenientes da própria região e, com a evolução, materiais importados de outros lugares, como no caso do granito Porfido Rosso Antico (Imperial Vermelho) de Mons Claudianus do Egito entregue para a Itália, de uso exclusivo do imperador romano em seus edifícios imperiais, servindo também de ornamentação.

Por não permitir a construção de obras mais extremas devido à sua baixa resistência a flexão, um novo rumo se abriu para o uso dessas rochas, destacando a técnica construtiva do arquiteto Otto Wagner (PATÓN, 1995; SIEGESMUND e SNETHLAGE, 2011).

Ao utilizar placas de rochas com pequenas espessuras para compor o revestimento externo de um edifício, Otto Wagner projetou e aplicou pela primeira vez o uso de *inserts* de bronze para a fixação de placas de mármore e granito no Wiener Stadtmuseums (museu da cidade de Viena na Áustria), encomendado pelo imperador Franz Josef, e, na fachada da Igreja de São Leopoldo “am Steinhoff” em Viena na Áustria, 1909, com placas de mármore de 2 cm de espessura (PATÓN, 1995).

Também começaram a surgir os trabalhos visando a conservação e a manutenção dessas rochas, cabendo destaque ao Winkler (1973) que visava a multidisciplinaridade neste assunto, abrindo espaço para uma gama de estudos como os de Aires-Barros (1991) e Prikryl e Smith (2007) e, a consagração do termo de “patologias” devido às alterações apresentadas nas rochas utilizadas na construção com o passar do tempo, fruto de processos físicos e

químicos com o meio ambiente, alterando o aspecto natural da rocha e a estrutura cristalina nos minerais.

A utilização das rochas ornamentais na arquitetura permite uma gama de aplicação expressa pela criatividade e conhecimento do arquiteto. Para ser transformada do papel para a realidade, é fundamental conhecer o Setor e as Rochas Ornamentais para tirar o máximo de proveito do conhecimento a ser adquirido.

Um exemplo dessa importância é que, ao conhecer toda a cadeia produtiva e as propriedades tecnológicas das rochas, facilitará na escolha de um material que manterá o padrão visual em toda a obra e uma maior durabilidade, como no caso do padrão do material que influencia diretamente nos pisos e fachadas.

Quando se especifica um determinado material para um grande espaço, se a rocha não manter a mesma textura em sua face, permite o usuário notar alguma diferença de paginação. Nesse caso, deve escolher uma rocha que conseguirá manter as mesmas características visuais, um mesmo padrão de textura em sua face polida.

Sabendo o quanto irá utilizar e uma visita até a pedreira para escolher uma frente de lavra que o atenda, no sentido em que dará um padrão suficiente a ser retirado na pedreira do material desejado, permitirá conseguir obter o desejado, ou talvez além do desejado, pois a criatividade somada ao conhecimento na hora de especificar permitirá transformar o que muitos dizem serem “defeitos do material”, como os veios e os enclaves, em obras que estampam os processos geológicos históricos da rocha em harmonia com o ambiente.

Ao olhar uma face polida de uma rocha estará vendo/lendo uma parte do registro histórico da formação da Terra, que continua em constante transformação, assim como as cidades que são moldadas com o passar do tempo.

Os minerais para se formarem e agruparem, consolidando a rocha, passaram por toda uma dinâmica em sua gênese de formação, datadas de milhares de anos, que influenciam diretamente na estrutura e resistência das rochas, fornecendo propriedades que as diferenciam entre si, pois cada rocha possui uma gênese.

Mas infelizmente, essas propriedades tecnológicas, que são diferentes ao compararem as rochas entre si, acabam sendo esquecidas pelos profissionais. A predominância na seleção somente da estética pela beleza dos minerais constituintes nas rochas ao formarem sua textura é fato perigoso, pois os diversos tipos litológicos das rochas possuem suas próprias características e interação de forma diferencial ao serem aplicadas no ambiente construído.

Essas interações podem provocar o surgimento de patologias, como um exemplo de não levar em conta as propriedades tecnológicas da rocha ao especificar, perdendo assim a

função estética que predominou na escolha do material. Como mais um exemplo do perigo de desconhecer as características inerentes em cada rocha, no caso, no tocante das propriedades radiométricas, a rocha poderá elevar o nível de radônio no ambiente interno, que por não ser divulgado e pouco pesquisado pelos profissionais, poderá influenciar na saúde do usuário.

4.1. A gênese das Rochas

Cada diversidade de rocha, apresentada nos edifícios históricos e contemporâneos, representa uma história do tempo geológico para a sua formação e, ao ser moldada pelo homem, revela toda a nobreza e beleza escondida por seus minerais. Logo, ao conhecer melhor a rocha contribui para o aperfeiçoamento do seu uso na construção civil.

As rochas são constituídas por minerais cristalinos que se agregam de forma naturalmente de acordo com o seu tempo geológico, cuja distribuição e constituição é controlada pela composição química da crosta terrestre.

Esses minerais são sólidos inorgânicos naturais com estruturas cristalinas específicas e composições químicas que podem ser fixas ou variáveis, sendo que, por serem constituídas de átomos, as substâncias químicas reagem entre si para formar compostos, perdendo ou ganhando elétrons, ou por compartilhamento de elétrons (ligações iônicas ou covalentes), onde, quando se cristaliza devido a condições geológicas de temperatura e pressão, os átomos ou íons se agrupam em proporções adequadas para formar uma estrutura cristalina (PRESS *et al.*, 2006; TEIXEIRA *et al.*, 2003).

Entre os principais minerais formadores de rochas encontra-se os silicatos (o mais abundante, sendo um tetraedro composto por um íon de silício circundado por quatro íons de oxigênio podendo se arranjar com outros elementos); os carbonatos (consistem em um íon de carbono circundado por três íons de oxigênio, em um triângulo, podendo ser ligados a cálcio ou magnésio ou ambos); os óxidos (são compostos onde o oxigênio é ligado a átomos ou cátions de outros elementos, normalmente íon metálicos como o ferro); os sulfetos (compostos do íon sulfeto com cátions metálicos) e sulfatos (formado por um tetraedro composto por um átomo central de enxofre circundado por quatro íons de oxigênio), sendo que, as propriedades químicas (composição e estrutura) refletem nas propriedades físicas, como a dureza, a densidade e seu hábito cristalino (PRESS *et al.*, 2006; TEIXEIRA *et al.*, 2003).

Logo, oito elementos são encontrados abundantemente nas zonas superiores da Terra, presentes nos minerais das rochas, sendo o oxigênio (47%), o silício (31%), o alumínio (8%), o ferro (4%), o cálcio (3%), o potássio (3%), o sódio (3%) e o magnésio (1%), os restantes dos outros elementos que ocorrem na natureza também são encontrados em minerais (SIEGESMUND e SNETHLAGE, 2011).

Entre os principais minerais constituintes das rochas há o Quartzo, os Feldspatos, as Micas, os Piroxênios, os Anfibólios, os Feldspatóides, a Olivina, a Calcita, a Dolomita, os Argilominerais e o Talco.

Logo, nas rochas encontra-se uma mineralogia (os tipos e proporções de minerais constituintes) e uma textura (os tamanhos, as formas e o arranjo espacial de seus cristais ou grãos) que a definem podendo ajudar a classificá-las em três tipos devidos sua formação geológica:

As *rochas ígneas* formam-se pela cristalização do magma, ou seja, quando o magma se consolida e resfria. Se a ocorrência desse resfriamento for no interior da Terra é chamada de intrusiva (ex: granito) e quando se formam pelo rápido resfriamento do magma que chega à superfície por meio de erupções vulcânicas é chamada de extrusiva (ex: basalto).

As *rochas sedimentares* formam-se pela litificação de sedimentos derivados do intemperismo e da erosão das rochas expostas na superfície terrestre após serem soterrados, como o arenito, o calcário e conglomerado.

As *rochas metamórficas*, submetidas a altas temperaturas e pressões formam-se devido a uma alteração em estado sólido das rochas ígneas, sedimentares e até metamórficas, a exemplo os gnaisses.

Devido os processos geológicos serem produzidos de forma mais lenta que o consumo pela população, a maioria dos materiais geológicos é considerado não renovável e a cada ano, a mineração raspa mais materiais da superfície terrestre que a erosão natural dos rios e anualmente, os rejeitos da mineração excedem a quantidade de resíduos urbanos (PRESS *et al.*, 2006).

4.2. O uso contemporâneo das rochas

Assim como na Arquitetura em seus períodos históricos, os avanços tecnológicos contribuíram para a evolução do uso das rochas ornamentais, as quais já eram utilizadas como

elementos decorativos nas obras clássicas, com o passar do tempo, naturalmente ocorreu a transição da sua função estrutural para somente fins de ornamentação.

A arquitetura gótica serviu de um ponto final com o uso da rocha natural como estrutura, devido à baixa resistência a flexão não permitir a construção das obras mais extremas, recorrendo ao uso de âncoras de aço escondidos em suas estruturas para estabilizar a construção e, o domínio do homem sobre a ciência resultou em avanços tecnológicos substituindo a pedra e madeira para o concreto, posteriormente concreto armado e aço, além das novas tecnologias da revolução industrial do século XIX, permitindo iniciar uma nova era de design arquitetônico na construção (SIEGESMUND e SNETHLAGE, 2011).

Na arquitetura moderna, o uso das rochas se manteve, continuando o seu uso para compor o ambiente. Destaca-se o Pavilhão de Barcelona como exemplo, obra do arquiteto Ludwig Mies van der Rohe, construído em 1929 e desmontado em 1930 e reconstruído em 1986, utilizando em sua construção o vidro, o aço e quatro diferentes tipos de rochas (mármore travertino romano, verde mármore Alpine, mármore verde da Grécia e ônix dourado das Montanhas Atlas) utilizadas como pisos e paredes internamente e externamente (MIESBCN, 2015).

Na arquitetura contemporânea, como exemplos, a Torre Unicredit do arquiteto César Pelli, com 16 mil m² de granito Verde Savana, e o Museu do Amanhã, projeto do arquiteto Santiago Calatrava, utilizando rochas do Estado do Espírito Santo (MOREIRA, 2016).

O uso das rochas, inicialmente de blocos estruturais, com o passar do tempo, foram moldadas praticamente para chapas polidas, com diferentes espessuras a serem comercializadas, que permitem uma gama de uso. Ao se tornarem um processo de produção em série, na atualidade, as rochas ornamentais são muitas utilizadas como revestimento interno e externo, tanto em forma horizontal como vertical através do recorte dessas chapas.

As rochas são utilizadas para compor ambientes externos como bordas de piscina e áreas de churrasqueira, além de serem muito utilizadas na arte funerária, e o uso de placas de rochas nas fachadas dos edifícios, além do uso decorativo, permite proteger a estrutura do prédio. No caso do revestimento interno são aplicadas como pisos, rodapés, bancadas e tampos de cozinha ou lavatórios, colunas e escadas e paredes de áreas úmidas.

Segundo Frascá (2004), a escolha da rocha baseia-se empiricamente em três fatores: o aspecto estético, o custo e o desempenho histórico dos materiais nas condições de uso pretendidas, onde tradicionalmente as rochas graníticas, pela sua durabilidade e maior variedade de cores e padrões texturais e estruturais, são mais utilizadas nos revestimentos exteriores, em função da estética e como proteção da estrutura.

4.3. O Setor de Rochas Ornamentais em números

Segundo o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral - DNPM (2016), a produção mundial de rochas ornamentais atingiu em 2014 aproximadamente cerca de 136,5 milhões de toneladas, onde o Brasil se colocaria em 4º lugar no ranking mundial em produção e 7º como exportador.

Montani (2014), destaca uma evolução aproximadamente de 1,8 milhão de toneladas ao ano, comercializada mundialmente na década de 1920, para aproximadamente 130 milhões de toneladas ao ano na atualidade, com um mercado de aproximadamente US\$ 130 bilhões por ano, crescimento devido ao aumento da globalização nas décadas de 1980 e 1990.

O Brasil é detentor de uma grande diversidade litológica encontrada em todo seu território. Em 2008, apresentou uma movimentação anual da ordem de 3 a 4 bilhões de dólares ao longo da cadeia produtiva, com 900 variedades de rochas e 11.000 empresas atuando na cadeia produtiva, gerando 133.000 empregos diretos e 390.000 empregos indiretos (DNPM, 2009; BRASIL, 2009).

Em 2013, as rochas ornamentais silicáticas (quartzo-feldspática e feldspáticas) representaram 50% da produção brasileira por tipo de rocha (ABIROCHAS, 2014). Em âmbito nacional, seu consumo interno de rochas é diretamente proporcional ao desenvolvimento econômico regional, sendo que 80% das rochas beneficiadas são utilizadas para revestimentos verticais e horizontais e 30% para tampos, destaques para os estados do Espírito Santo com 66% da participação na produção brasileira e o de São Paulo, responsável por 45% do consumo interno (BRASIL, 2009; ABIROCHAS, 2014).

Segundo a Associação Brasileira de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS (2014), foram disponibilizadas 9.082,52 mil toneladas de rochas brutas para processamento, gerando 3.723,8 mil toneladas de rejeito e 5.358,6 mil toneladas de rochas processadas, ou seja, 41% dos blocos se transformam em rejeito e aproximadamente 4.212,1 mil toneladas de rochas processadas foram utilizadas para o consumo interno. Desse volume consumido internamente, de 10 a 20% podem se tornar pedaços (cacos) de rochas devido as sobras para confecção das peças recortadas (GOBBO *et al.*, 2004).

Em estimativas, há disponível 3.723,8 mil toneladas entre rejeito e resíduos como pó de rocha encontrado na lama abrasiva e 421,21 mil toneladas de pedaços (cacos) de rocha, ao se considerar 10% do material de origem pétreo espalhado nas marmorarias, no qual grande parte desses encontra-se no estado do Espírito Santo, fora os rejeitos de rocha bruta das

pedreiras. Resíduos considerado por Gonçalves, Moura e Dal Molin (2002) como não inerte de classe II com potencial de reaproveitamento.

O Estado do Espírito Santo é referência brasileira, sendo o responsável por aproximadamente 71,7% das exportações de rochas do Brasil em valor, reflexo da estrutura de logística e modernização do parque de beneficiamento existente (DNPM, 2012, 2016).

Em 7 de abril de 1957 ocorreu a extração do primeiro bloco de mármore em Prosperidade, dando o início para o surgimento do setor no Espírito Santo, onde é possível encontrar o mármore capixaba em obras que se destacam como a Praça dos Três Poderes em Brasília (SINDIROCHAS, 2012).

Em Cachoeiro de Itapemirim-ES, devido ao seu pioneirismo histórico em conjunto com as demais cidades circunvizinhas, forma o Arranjo Produtivo Local (APL) de Rochas Ornamentais, sendo a sede do Sindicato das Indústrias de Rochas Ornamentais, Cal e Calcários do Espírito Santo – SINDIROCHAS, o sindicato patronal, criado em 1973.

Em 1988, criou na cidade o Centro Tecnológico do Mármore e Granito – CETEMAG e realizou a Primeira Feira Internacional do Mármore e Granito, que atualmente acontece duas por ano, onde em 2004 começou a também ser realizada na capital Vitória.

A cidade também possui uma unidade do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, órgão federal vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, que atua na cidade principalmente em pesquisas ligadas a rochas ornamentais.

Em agosto de 1990, período democrático do Brasil, conseguiu-se criar o Sindicato dos Trabalhadores do Mármore e Granito do Espírito Santo – SINDIMÁRMORE em Cachoeiro de Itapemirim, ganhando reconhecimento institucional em março de 1991, onde representa aproximadamente 19411 trabalhadores de 2616 empresas ligadas ao setor, com vários históricos de óbitos, onde nos primeiros seis meses de 2012 foram registrados 8 óbitos no setor devido acidentes de trabalhos (SINDIMÁRMORE, 2012a e 2012b).

Logo, o Setor de Rochas Ornamentais, destaca-se como fonte de beleza e de riquezas capital, mas também pode destacar uma riqueza encontrada no grande volume de rejeito e resíduos desperdiçados, sem valor de capital atualmente.

Além das rochas destaca o homem, responsável por toda essa transformação, que igualmente às vezes são desperdiçados por falta de reconhecimento dos profissionais do setor, como exemplo da dificuldade de formarem um sindicato.

Assim, destaca-se o conhecimento na área que também acaba sendo desperdiçado, por ser pouco difundido entre os profissionais, sendo utilizado empiricamente na maioria das vezes, demonstrando o potencial de pesquisa atualmente a ser explorado nesse setor.

4.4. Cadeia produtiva de Rochas Ornamentais

O Setor de Rochas Ornamentais pode ser dividido em quatro fases: *Prospecção e pesquisa mineral, lavra, desdobramento e beneficiamento*.

A *Prospecção e pesquisa mineral* é responsável por obter informações sobre a área pesquisada, estudando sua forma de ocorrência mineral, tanto no escritório como no campo, através de amostras e análise das áreas sendo lavradas ou na busca de novas áreas através da prospecção.

A *Lavra* é a fase da retirada dos blocos de rochas da natureza para serem beneficiados ou comercializados. A rocha pode ser lavrada na forma de matacões ou em maciço rochoso.

A lavra na forma de matacões resume em “abrir” o matacão e depois particioná-lo em blocos com a dimensão comercial, com o uso de marteletes pneumáticos para a demarcação e execução dos furos e a pólvora negra ou argamassa expansiva para o desprendimento desejado. Apresenta problemas dos níveis produtivos e qualitativos decorrentes de micro-fratura, impureza e alterabilidade dos minerais, contribuindo para uma baixa recuperação e a geração de um grande volume de rejeito (GIACONI, 1998) (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Lavra de matacões do monzogranito “Cinza Corumbá” localizado no município de Castelo – ES.
Fonte: o Autor.

Na lavra de matacões é observado uma grande quantidade de blocos irregulares que não são aproveitados para o beneficiamento, geralmente sendo deixados no local e aterrados na fase da recuperação da área degradada.

A lavra de maciço rochoso (Figura 4.2) permite um melhor aproveitamento, gerando menos rejeitos ao comparar com a lavra de matacões. Sua configuração é determinada pela inclinação do terreno, para superfícies horizontais/sub-horizontais a cava pode ser fossa ou poço e, superfícies com grau de elevação acentuado evolui por tombamento ou desabamento do material da encosta (CHIODI, 1995).

Figura 4.2. Lavra por bancada alta do diorito “Preto São Gabriel” extraído no município de Colatina – ES. Fonte: o Autor.

Um dos problemas na extração, ao pensar em sustentabilidade, é a formação de rejeitos de rochas que poderiam ser aproveitados para outros fins. A Figura 4.3 demonstra uma quantidade de matéria prima disponível no “bota-fora” da pedreira, local destinado para armazenar os pedaços de rochas originados pelo processo de extração dos blocos. Geralmente é lançado terra por cima desses pedaços de rochas e, em alguns casos, fazem um plantio de mudas de árvores para a recuperação da área degradada e diminuição da poluição visual.

Figura 4.3. Bota-fora da pedreira do diorito “Preto São Gabriel”. Fonte: o Autor.

O *Desdobramento* é a fase que transforma os blocos em chapas utilizando o processo de serragem, através dos teares que podem ser o convencional de lâminas (com uso de granalha como abrasivo) e os diamantados (por fios diamantados ou lâminas diamantadas). No caso para a confecção de pisos, pode ser utilizado os talha-blocos (que podem ser de fios ou discos diamantados), serrando o bloco e o transformando em tiras com a largura determinada do piso desejado.

O processo de serragem dos blocos em chapas, nos teares convencionais de lâmina, é auxiliado por uma polpa de água, cal e granalha que são despejadas continuamente em cima da carga (bloco) para o atrito entre a lâmina, a granalha e rocha promover o desgaste da rocha e também para o resfriamento. Prevê, descontando os casqueiros (que são as laterais dos blocos), que para cada 2 cm de espessura serrado, se perde um 1cm de espessura no desdobramento.

Segundo Chiodi (1996), a granalha utilizada na polpa abrasiva, misturada com cal e água, é de aço, sendo 30% esférica e 70% angular, medindo entre 0,7 mm e 1,2 mm de diâmetro. Essa granalha é utilizada nos teares multilâminas convencionais e tem a função de proporcionar o desgaste na superfície da rocha, ajudando na serragem.

Os blocos utilizados em formatos retangulares de tamanhos variáveis podem chegar até 3,50 metros de comprimento por 2 metros de altura e largura. Alguns teares possuem a capacidade de serrar 2 blocos de uma vez, conforme visualizado na Figura 4.4, ou mais, procurando colocar na carga, materiais de dureza aproximada.

Figura 4.4. Tear convencional de grande porte. Fonte: o Autor.

Uma das características desse processo é a formação do depósito de lama abrasiva (água, cal, gralha e pó de rocha que desprende durante a serragem do bloco), resíduos que muitas das vezes são depositados num buraco cavado na terra sem nenhum controle (Figura 4.5)

Figura 4.5. Depósito da lama abrasiva. Fonte: o Autor.

Na fase de *Beneficiamento* pode-se citar o acabamento na superfície da chapa (levigamento, polimento e lustro) através da polideira (Figura 4.6) e depois a utilização dessas chapas para a confecção de peças especiais ou pisos.

Figura 4.6. Polideira automática. Fonte: o Autor.

O levigamento representa o desgrosso das chapas com a criação de superfícies planas, o polimento produz o desbaste fino da chapa e o fechamento dos grãos minerais criando uma superfície lisa e opaca, o lustro é produzido pelo espelhamento das faces dos cristais constituintes das rochas, imprimindo um brilho na superfície da chapa (CHIODI, 1995).

Algumas chapas passam pelo processo de resinagem, nos quais as chapas ao serem levigadas são levadas ao forno, para serem aquecidas e depois aplicadas uma resina, que penetra no material, aumentando sua resistência e, depois retornam ao polimento para terminar o processo.

Algumas chapas são teladas, onde uma tela de fibra é aplicada sobre a face oposta a ser polida, sendo colada com resina. A principal finalidade desse processo de telagem é aumentar a resistência do material em materiais considerados frágeis no processo de polimento, um exemplo as rochas de origem pegmatíticas, que requerem uma menor tensão dos cabeçotes de polimento.

Para confecção das peças sob medidas, as chapas são quebradas em pedaços ou cortadas com uma serra manual pelo cortador. Depois são levadas até a cortadeira de disco diamantado, onde o operador irá cortar as peças de acordo com as medidas solicitadas.

Através de gabaritos (pedaços de chapa recortada com medidas padronizadas), o cortador prepara o carrinho da cortadeira para a peça sair com a medida exata. Com esse processo há uma perda de material, essas sobras podem ser reutilizadas como pisos, soleiras e rodapés, mas tendo variações no padrão do material.

Essas peças recortadas da chapa se tornam peças acabadas como tampos, bancadas, soleiras e outras peças de acordo com o que o cliente pede, passando por um processo manual de acabamento através do uso de rebolos abrasivos, onde já existem máquina automáticas que fazem esse serviço. O acabamento mais usado é o lustre na espessura do material recortado, assim como o polimento, utiliza uma sequência de abrasivos para deixar polida na espessura do material.

Assim como na serragem, existe a geração de lama abrasivas e cacos de rochas como resíduos dessa fase.

4.5. Normatização e caracterização tecnológica das rochas no Brasil

As rochas ornamentais, ao serem aplicadas nos edifícios, tendem a sofrer interações com o meio, fato que ocorre com todo material utilizado na construção civil. Na lógica, devem atender certos requisitos para serem aplicadas e para saber se adequam, alguns ensaios normatizados são recomendados.

Segundo Navarro (2006), o ambiente em que a rocha será aplicada encontrará o conjunto de solicitações que a rocha será submetida, logo, atuando sobre as propriedades petrográficas intrínsecas, a durabilidade da rocha será definida pelo estado de equilíbrio alcançado pela interação entre as propriedades petrofísicas da rocha e as solicitações do ambiente.

Frascá (2004) sugere um quadro normativo que permita a orientação na escolha do material rochoso e que forneça parâmetros para a elaboração de projetos arquitetônicos. Os *Parâmetros petrográficos x físicos x mecânicos x químicos* devem ser conhecidos e utilizados para uma correta aplicação dessas rochas nas edificações.

Trabalhos pioneiros como de Frazão e Farjallat (1995, 1996) caracterizaram vários tipos de rochas brasileiras em suas propriedades tecnológicas, os quais tornaram-se referências de comparação em outros trabalhos publicados e, incentivaram a criar um quadro com os valores limítrofes das propriedades que a rocha deve ter para a sua aplicação.

Em 2010, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, através da Norma Brasileira – NBR referente ao uso de rochas ornamentais, a ABNT NBR 15844 (2010a), adotou-se um quadro de requisitos para granitos (Tabela 4.1) com base principalmente nos estudos de Frazão e Farjallat (1995, 1996) e Frazão, Dozzi e Queiroz (2013).

Tabela 4.1. Requisitos para granitos.

Propriedades	Requisitos	Norma
Densidade aparente (kg/m ³), mín.	2550	ABNT NBR 15845-2
Porosidade aparente (%), máx.	1,0	ABNT NBR 15845-2
Absorção d'água (%), máx.	0,4	ABNT NBR 15845-2
Módulo de ruptura (flexão por 3 pontos) (MPa), mín.	10	ABNT NBR 15845-6
Resistência à flexão por quatro pontos (MPa), mín.	8,0	ABNT NBR 15845-7
Resistência ao desgaste (mm/ 1000 m) máx.	1,0	ABNT NBR 12042
Resistência ao impacto de corpo duro (m), mín.	0,3	ABNT NBR 15845-8
Coefficiente de dilatação térmica linear [10-3 mm/(m x °C)], máx.	8,0	ABNT NBR 15845-3
Resistência à compressão uniaxial (MPa), mín.	100	ABNT NBR 15845-5

Fonte: ABNT NBR 15844 (2010, 2015).

Esses valores referem aos ensaios que os métodos estão descritos na ABNT NBR 15.845 (2010b), que voltou a ser desmembrada ao ser atualizada em 2015 e ABNT NBR 12.042 (2013). Ao todo encontramos cinco normas ligadas diretamente ao uso e aplicação das rochas ornamentais no Brasil:

- *ABNT NBR 15844/2015 – Rochas para revestimento – Requisito para granitos;*
- *ABNT NBR 15012/2013 – Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia;*
- *ABNT NBR 12042/2012 – Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão – Método de ensaio;*
- *ABNT NBR 15845/2015 – Rochas para revestimento – Parte 1 ao 8;*
- *ABNT NBR 15846/2010 – Rochas para revestimento – Projeto, execução e inspeção de revestimento de fachadas de edificações com placas fixadas por insertos metálicos.*

Ao analisar as NBR da ABNT, somente duas especificam quais ensaios devem ser realizados para o uso dessas rochas chamadas empiricamente de “granitos”, a ABNT NBR 15844 (2015) e ABNT NBR 1845 (2015).

A ABNT NBR 12.042 (2012) normatiza o ensaio de *Determinação do desgaste por abrasão*, que determina a resistência que a rocha apresenta ao ser submetida ao desgaste abrasivo, ocorrido naturalmente quando usada como pisos ou fachadas, devido ao atrito causado pela ação de grãos de areia e poeira transportados por vento ou pelo tráfego de pedestres, no caso dos pisos.

Essas normas apresentadas possuem os principais ensaios de caracterização tecnológica, que toda empresa deve possuir a respeito das rochas que comercializa para fornecer ao seu cliente, apresentando os parâmetros *petrográficos x físicos x mecânicos das rochas*. Segundo Navarro (2006), o desenvolvimento na rocha de suas estruturas e texturas durante os processos genéticos as deixam anisótropas quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, logo, apresentam variações das propriedades em diferentes direções do volume rochoso. Fato esse que irá estabelecer novos ensaios tecnológicos durante o avanço da pedreira na fase da lavra, devendo sempre atualizar os dados de cada material rochoso.

Uma observação realizada nas normas brasileiras atuais é a falta de parâmetros aos aspectos intempéricos e de contaminação por radioatividade, essa observação realça a importância da tese que estuda esses aspectos.

As normas da American Society for Testing and Materials – ASTM, no caso a ASTM C629 (2010a) e ASTM C615 (2011), ao serem comparadas com as da ABNT, possuem um aumento de requisitos. Em relação à radioatividade, que possa ser encontrada nas rochas ou em materiais de construção ao pesquisar de um modo geral, a ASTM possui normas para o ambiente construído como a ASTM D6327 (2010b). No caso da ABNT, não se encontra nenhuma norma em relação a contaminação de qualquer tipo de radioatividade no ambiente construído.

Salienta-se que a oferta de tecnologia de processos existentes contribuiu para o aumento da demanda do uso da rocha como materiais em revestimentos, o que, em contrapartida, acaba por gerar riscos de aplicações errôneas, devido ao desconhecimento das interações entre as características petrográficas e propriedades tecnológicas requeridas com o ambiente de aplicação, onde os profissionais que especificam essas rochas em seu projeto, visam principalmente ou somente a característica estética do material.

Além disso, no mercado de Rochas Ornamentais, é comum ouvir os termos “granito” e “mármore” para classificar as rochas ao invés do nome petrográfico, utilizando principalmente um nome comercial geralmente associado com a cor, como “Verde Labrador”, “Preto São Gabriel”, “Ouro Brasil”, “Azul Fantástico” e outros.

Esse fato, pode gerar problemas na indicação do uso da rocha, pois sua gênese é descartada, sendo comum no mercado a venda de rochas diferentes com o mesmo nome comercial por possuir padrões estéticos semelhantes.

Vício de mercado presente até então na ABNT NBR 15.844 (2010a, 2010b), com o termo *granito* no senso comercial usado para determinar toda rocha silicática magmática ou metamórfica, sendo eliminado em sua atualização (ABNT, 2015a).

No estudo do caso, a norma brasileira incentiva a generalização do termo no mercado comercial, um erro que contribui para a falta de conhecimento da gênese da rocha. A mesma associação, na ABNT NBR 15012 (2013), diferencia o termo *Rocha Ornamental* e *Rocha para Revestimento*, mas a mesma rocha aplicada para revestimento também exerce uma função estética.

4.6. Alterabilidade e durabilidade nas Rochas Ornamentais

As rochas, no decorrer do seu tempo de uso, perdem as características originais e, como é de conhecimento, estão expostas a solicitações de ordem física, química e mecânica, começaram a surgir trabalhos visando a conservação e a manutenção dessas rochas.

Destaque-se Winkler (1973) que visava a multidisciplinaridade neste assunto, consagrando o termo “patologias” devido às alterações apresentadas nas rochas utilizadas na construção com o passar do tempo, fruto de processos físicos e químicos com o meio ambiente que altera o aspecto natural da rocha e a sua estrutura cristalina nos minerais.

Nessa linha de estudo, Aires-Barros (1991) define o termo “alterabilidade” em rochas como referência da aptidão de uma rocha em se alterar em função do tempo à escala das obras humanas, diferenciando da alteração provocada por ações intempéricas no tempo geológico.

A alterabilidade da rocha está ligada com a sua durabilidade que é relacionada com as propriedades físicas como a porosidade e a configuração desse sistema, a superfície específica e as propriedades hídricas, relacionadas com o movimento dos fluídos no material rochoso e, por isso, muitos fatores podem ocorrer para o surgimento de alterabilidade em rochas ornamentais, descaracterizando o aspecto estético original da rocha e acelerando a sua deterioração (FRASCÁ, 2003; FRASCÁ, 2004).

Segundo Frazão (2002), os mecanismos de alteração podem se manifestar pela desagregação, que leva à perda da coesão da rocha e à progressiva individualização de seus

constituintes minerais sem modificar a natureza destes, sendo um mecanismo físico e, a decomposição que implicará em modificações progressivas na natureza dos minerais sendo um mecanismo físico-químico e, em climas tropicais ou subtropicais irá predominar os mecanismos de decomposição.

A desagregação está relacionada com a dilatação e contração dos minerais, fato que ocorre devido a variação de temperatura e expansão de sais por cristalização ou absorção de água por argilominerais (FRAZÃO, 2002).

A decomposição se relaciona com a dissolução que é a completa dissociação de um mineral em um solvente como a água, como no caso da sílica que é levemente solúvel em qualquer pH sendo elevado em $\text{pH} > 9$ e a alumina em $\text{pH} < 4$ ou $> 8,5$; a hidratação e reações de oxidação e redução que na maior parte das rochas ígneas ocorre sob a forma de compostos ferrosos e; a hidrólise que se relaciona com a hidratação (FRAZÃO, 2002; FRASCÀ 2004).

Esses mecanismos irão contribuir para o aparecimento de algumas patologias como manchamentos, fissuras e descolamentos minerais.

Navarro (2006), identifica os fatores intrínsecos (característicos do próprio material) e extrínsecos (do ambiente circundante) como referência para a durabilidade das rochas ornamentais (Figura 4.7) em que os mecanismos de alteração podem agir.

Figura 4.7. Fatores de durabilidade das rochas (NAVARRO, 2006).

Na questão do gás radônio, retido na estrutura cristalina da rocha, interessa-se os mecanismos de decomposição relacionados ao ambiente de aplicação e solicitação de uso, devido que a alteração dos minerais e da estrutura cristalina, em teoria, possa ligar e aumentar a rede porosa da rocha ou liberar alguns elementos radioativos da estrutura cristalina,

contribuindo para o aumento da exalação do gás radônio para o exterior da rocha com o seu tempo de uso no interior do ambiente.

Os mecanismos químicos que irá influenciar na deterioração das rochas são apreciados na Tabela 4.2, demonstrando a importância de obter mais informações sobre essas rochas além dos ensaios de caracterização tecnológica estabelecido pela norma, pois reações com o meio provocado pelo mecanismo químico de deterioração é de elevada importância.

Tabela 4.2. Mecanismos químicos de deterioração.

Reação	Mecanismo	Exemplos
Dissolução	Depende da quantidade de água e da solubilidade mineral: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3)^-$	Minerais solúveis: halita, gipsita e carbonato de calcita
Oxidação	Reação com oxigênio para formar óxidos ou mudança do estado de valência (Fe^{2+} para Fe^{3+}): $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 = 4\text{Fe}^{3+} + 4\text{OH}^-$	Magnetita oxidada; Pirita oxidada
Hidratação	Adição de água ao mineral: $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 = 4\text{Fe}^{3+} + 4\text{OH}^-$	Hidróxidos de ferro, de manganês
Hidrólise	Reação dos íons H^+ e OH^- da água com os íons dos minerais: $3\text{H}_2\text{O} + 2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 + 4\text{SiO}_2 + 2\text{K}(\text{OH})$	Feldspato potássico transforma-se em caulinita; olivina, em serpentina

Fonte: Frascá, 2004.

Além dos ensaios normatizados previstos, devido as normas existentes da ABNT visar somente as características físico-mecânicas da rocha, para avaliar a resistência em relação a sua durabilidade e alterabilidade é importante a realização de outros ensaios, buscando acelerar o intemperismo da rocha e simulando a reação da sua aplicação com o meio proposto, que podem ser retirados de outras normas para buscar um melhor conhecimento da rocha.

Para suprir a falta desses ensaios de durabilidade e alterabilidade da rocha, alguns pesquisadores utilizam ensaios como a *Resistência ao ataque químico de compostos agressivos* que visa simular os efeitos de substâncias presentes em compostos químicos de produto de limpeza, frutas cítricas, bebidas, entre outros, que podem descaracterizar a aparência estética da rocha.

Este ensaio é observado na ABNT NBR 13.818 – anexo H (1997), utilizado em placas cerâmicas, que consiste na aplicação de substâncias como HCl (ácido clorídico), $\text{H}_8\text{C}_6\text{O}_7$ (ácido cítrico), KOH (hidróxido de potássio), NaClO (hipoclorito de sódio) e NH_4Cl (cloreto de amônia) para simular em velocidade acelerada alguns ambientes agressivos à rocha.

Diversas patologias como o surgimento de fissuras, manchas, quebras e destacamento das placas de rochas ornamentais podem ocorrer quando é aplicada como pisos, revestimento de paredes e fachadas sem os procedimentos adequados ou com a sua manutenção inadequada devido ao uso de compostos químicos em sua limpeza.

Esse fato demonstra a importância de ensaios de alterabilidade nas rochas para melhor conhecer a sua resistência, principalmente ao meio que está sendo utilizada, como na relação do *Radônio* com as *Rochas*, sabendo que quanto menos as propriedades intrínsecas das rochas forem afetadas, mais os mecanismos de exalação do gás continuarão a seguir o padrão de exalação, não correndo o risco de aumentar em tese a sua taxa de exalação e, como a porosidade na rocha não é comunicante, logo, a rocha possa vir a contribuir para reter o gás exalado naturalmente do solo ao ser aplicado como piso.

Devido essas informações apresentadas, ressalta que a melhor garantia ao especificar um material é conhecer as solicitações do ambiente que a rocha será aplicada com os seus parâmetros tecnológicos químicos e físicos, possibilitando uma melhor comparação e seleção entre as rochas ornamentais.

Logo, a escolha certa da rocha pretendida para compor o ambiente irá depender do grau de conhecimento do profissional, mas infelizmente o mercado não fornece informações suficientes para atender um melhor estudo ao especificar o material, pois atende somente o que a norma brasileira estabelece.

Soma com essa realidade o despreparo acadêmico na formação profissional sobre esse assunto, fatos que poderá afetar diretamente com a saúde do ambiente construído e, no caso de a rocha contribuir para o aumento da adição no nível do gás radônio *indoor*, afeta também na saúde dos usuários desse ambiente.

Uma solução seria a inclusão da questão de alterabilidade e durabilidade nas normas brasileiras existentes de rochas ornamentais, a transformando mais abrangente em seus requisitos ao incluir ensaios de alterabilidade, fornecendo melhor as informações para o profissional que deve pensar no seu pós-uso e interação com o ambiente.

A questão do radônio deve ser tratada de forma mais abrangente, pois ele pode estar presente nos demais materiais construtivos e, essas questões aqui apresentadas devem ser levantadas na sala de aula durante a formação do profissional, pois ele tem o dever de conhecer melhor os materiais que especifica para compor o ambiente, pois existirá uma interação desses materiais com o ambiente construído.

Assim, conhecer o processo produtivo do material a ser especificado, as suas interações com o ambiente a ser aplicado e as suas propriedades tecnológicas visando uma menor alterabilidade e uma maior durabilidade irá contribuir para o seu uso racional, garantindo a sustentabilidade na Arquitetura, aproveitando o máximo que a Rocha Ornamental possa oferecer.

5. Materiais estudados

Os materiais escolhidos para esta pesquisa vieram de uma seleção de 10 tipos de rochas ornamentais, dando continuidade ao trabalho de Amaral (2011), que ao montar uma metodologia para quantificar o gás radônio permitiu descobrir a quantidade do gás radônio exaladas por essas rochas (Tabela 5.1.):

Tabela 5.1. Concentração de ^{238}U e ^{222}Rn exalado em rochas ornamentais.

Rocha	^{238}U (ppm)	^{222}Rn (Bq/m ³) em 25 dias
Diorito Preto São Gabriel	11,05	12
Sianito Ocre Itabira	2,91	21,67
Charnockito Verde Labrador	7,67	10
Monzogranito Cinza Corumbá	37,03	69,33
Pegmatito Timbalada	22,53	1135,67
Pegmatito Mascarello	5,20	471,67
Pegmatito Giallita	6,41	2483,33
Granulito Icaraf Light	7,70	23,00
Gnaiss Golden Cristal	18,47	98,33
Migmatito Crema Bordeuax	20,44	752

Fonte: Amaral (2011).

Em Amaral (2011), utilizou-se os critérios de abranger os mais diferentes tipos litológicos, buscando uma maior diversidade litológica. Dessa seleção, escolheu 05 rochas para investigar o comportamento do gás radônio retido em sua estrutura, conforme os objetivos da tese, permitindo avançar no conhecimento do gás radônio retido na rocha.

Logo, as duas rochas que mais exalaram o gás radônio, as duas rochas que menos exalaram e a rocha que possuía a maior concentração de urânio em sua composição foram as escolhidas para darem continuidade na pesquisa.

Na Tabela 5.2 é possível ver o nome comercial, a classificação petrográfica, a sigla (de acordo com o nome comercial para facilitar o entendimento durante os ensaios realizados e da leitura da tese) e a unidade federativa de extração das rochas escolhidas.

Tabela 5.2. Relação das rochas estudadas.

Nome Comercial	Classificação Petrográfica	Sigla	UF
Preto São Gabriel	Hiperstênio Diorito com Quartzo	PSG	ES
Verde Labrador	Charnockito com Granada	VL	ES
Cinza Corumbá	Monzogranito	CC	ES
Timbalada	Pegmatito Granítico Hidrotermalizado	TI	MG
Giallita	Pegmatito Granítico	GI	ES

Estas rochas são extraídas nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais e beneficiadas em empresas de Cachoeiro de Itapemirim-ES, cidade responsável por 19,42% em participação das exportações de rochas ornamentais brasileiras, onde são comercializadas tanto no mercado interno quanto externo e classificadas como produtos comerciais na Nomenclatura Comum do Mercosul – NCM 6802.93.90 que representa as chapas de granitos e rochas similares (ABIROCHAS, 2013a; 2013b).

O maciço rochoso em que as rochas estão contidas são observados nas folhas geológicas SE.24 Rio Doce (CPRM, 1987) e SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória (CPRM, 1983), das quais foram obtidas informações de seu ambiente de origem de formação geológica, sendo que em Amaral (2011) encontra-se um mapa geológico simplificado com as localizações das extrações dos blocos, não sendo o foco de estudo dessa tese.

Para a amostragem, para cada rocha, as coletas foram de uma mesma placa polida a ser vendida comercialmente com 2 cm de espessura, objetivando obter as mesmas características individuais para cada material ao dividi-las em 05 conjuntos para os ensaios posteriormente realizados (A, B, C, D e E), sendo recortado 10 filetes (com aproximadamente 3 cm de largura com 25 cm de comprimento) por material em cada conjunto, totalizando 250 filetes de rochas.

A seguir é apresentado a caracterização petrográfica e uma breve descrição das rochas.

5.1. Caracterização petrográfica das rochas estudadas

Na Tabela 5.3. é apresentada uma síntese dos resultados de caracterização petrográfica dessas rochas demonstrando as características petrográficas de cada uma.

Essa caracterização é fundamental para obter informações para a classificação das rochas objeto de estudo, auxiliando para obter uma melhor compreensão das correlações entre as propriedades petrográficas e a difusão do gás radônio.

Tabela 5.3. Síntese dos resultados da caracterização petrográfica.

Mineralogia (%)		PSG	VL	CC	TI	GI
Quartzo		5,0	25,0	31,6	31,0	25,0
Feldspato Potássico		4,0	40,0	31,0	40,0	41,0
Plagioclásio		58,0	19,0	25,0	15,5	24,0
Biotita		9,0	6,0	7,5	0,5	5,0
Hornblenda		4,0	0,5	-	-	-
Clinopiroxênio		4,0	1,0	-	-	-
Ortopiroxênio		12,0	3,0	-	-	-
Opacos		3,5	0,5	0,4	0,5	Tr
Apatita		0,5	0,4	1,0	Tr	Tr
Zircão		Tr	0,1	0,4	-	-
Titanita		Tr	0,5	1,0	-	-
Allanita		-	-	0,1	-	-
Sillimanita		-	-	-	-	0,5
Rutilo		-	Tr	Tr	-	-
Granada		-	4,0	-	-	1,0
Turmalina		-	-	-	Tr	-
Topázio		-	-	-	0,5	-
Muscovita		-	-	-	7,5	3,5
Sericita		Tr	Tr	2,0	1,5	Tr
Clorita		Tr	Tr	Tr	-	-
Epidoto		Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
Bastita		Tr	Tr	-	-	-
Goethita		-	-	-	1,5	-
Hidróxido de Ferro		-	-	-	1,5	Tr
Carbonatos		Tr	Tr	Tr	-	-
Minerais Pesados (%)		33,0	16,0	12,4	13,5	10,0
Grã (mm)	Variação	0,5 a 10,0	0,3 a 30,0	0,3 a 30,0	2,0 a 200,0	2,0 a 80,0
	Predomin./Matriz	2,0 a 6,0	3,0 a 7,0	2,5 a 5,0	20,0 a 80,0	10,0 a 30,0
Estrutura		Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica
Textura		Equigranular	Porfírica	Inequigranular	Pegmatítica	Pegmatítica
Microfissuras/mm ²		1,73	6,39	2,21	4,20	3,2
Microfissuras (%)	Intragrãos preenchida	47,2	41,2	33,6	35,4	58,2
	Intragrãos não preench.	23,0	48,8	62,4	58,2	36,3
	Intergrãos preenchida	18,7	5,4	2,7	1,4	3,8
	Intergrãos não preench.	11,1	4,6	1,3	5,0	1,7
Contatos (%)	Côncavo/convexo	49,8	58,7	61,8	64,0	40,5
	Reto	47,8	36,9	32,4	25,1	44,2
	Serrilhado	2,4	4,4	5,8	10,9	15,3
Alteração Mineral	Feldspato Potássico	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Fraco
	Plagioclásio	Incipiente	Incipiente	Moderado	Incipiente	Fraco
	Biotita	Incipiente	Fraco	Incipiente	Fraco a intenso	Muscovitizada
	Hiperstênio	Incipiente	Incipiente	--	--	--
Classificação (QAP)		Hiperstênio Diorito c/ qtz	Charnockito c/ granada	Monzogranito	Pegmatito Granítico Hidrotermalizado	Pegmatito granítico

5.2. Preto São Gabriel

A rocha ornamental *Preto São Gabriel* é um hiperstênio diorito com quartzo de coloração cinza escura (Figura 5.1), é extraído na região de Baunilha no município de Colatina-ES. É uma rocha com estrutura isotrópica detentora de textura fanerítica de granulação média a média-grossa (predominância entre 2 mm e 6 mm), pouco inequigranular, e de aspecto geral bastante homogêneo. Exibe grau de microfissuramento relativamente baixo com cerca de 1,73 microfissuras/mm², predominantemente do tipo intragrãos preenchidas. O grau de alteração mineral é incipiente, praticamente restrita a discreta saussuritização do plagioclásio e de transformações parciais do ortopiroxênio para biotita e hornblenda acompanhados pela liberação de opacos disseminados.

Figura 5.1. Aspecto macroscópico do Diorito Preto São Gabriel.

5.3. Verde Labrador

O tipo comercial Verde Labrador é um charnockito megaporfirítico serial com granada de cor verde escura (Figura 5.2), é oriundo do município de Baixo Guandú - ES. Exibe estrutura isotrópica com matriz fanerítica hipidiomórfica bastante quartzosa de grã média a média-grossa, predominantemente entre 3,0 mm e 5,0 mm. Os megacristais são de feldspato potássico com dimensões entre 1,5 cm e 2,0 cm. O microfissuramento é moderado a elevado, com 6,39 microfissuras/mm², principalmente intragranular, por vezes intergranulares e

transgranulares, principalmente presentes nos cristais maiores de quartzo, de feldspato potássico, de granada e do ortopiroxênio, onde a maior parte é do tipo intragrãos não preenchidas (48,8%). As microfissuras intragrãos preenchidas representam cerca de 41% e as intergrãos não preenchidas ao redor de 4,6%. A alteração mineral é incipiente a fraca, praticamente restrita aos cristais de ortopiroxênio que se apresentam parcialmente bastitizados e oxidados.

Figura 5.2. Aspecto macroscópico do charnockito Verde Labrador.

5.4. Cinza Corumbá

O Cinza Corumbá é um monzogranito cinza claro (Figura 5.3) extraído no município de Castelo - ES, apresenta estrutura compacta e textura fanerítica de grã média a média-grossa, pouco inequigranular, de aspecto estético bastante homogêneo. A granulação predominante oscila entre 2 mm e 4 mm com a presença mais ou menos frequente de cristas de feldspatos com dimensões que podem ultrapassar a 1,5 cm. O microfissuramento é moderado, com 2,21 microfissuras/mm², na sua maioria dado por microfissuras intragrãos não preenchidas (64,4%), sobretudo nos cristais maiores de feldspatos. A alteração mineral é incipiente nos cristais de feldspato potássico e de biotita e moderada nos cristais maiores de plagioclásio.

Figura 5.3. Aspecto macroscópico do monzogranito Cinza Corumbá.

5.5. Timbalada

O tipo Timbalada, sendo telado e resinado no seu beneficiamento e considerado comercialmente um material exótico devido a sua textura, é um pegmatito granítico hidrotermalizado (Figura 5.4), é explorado no município de Itinga - MG. Exibe pontuações e manchas irregulares, normalmente difusas, de coloração acastanhada a vermelho sangue dada por óxidos e hidróxidos de ferro caoticamente distribuídas pela rocha. A coloração verde resulta de discreta alteração micropontual de parte dos cristais de feldspato potássico com a produção de fina massa microcristalina filossilicática (sericita; muscovita fingítica) que também pode se irradiar ao longo de planos de clivagens e das interfaces minerais. Exibe estrutura isotrópica com textura pegmatítica de granulação muito grossa a gigante, com cristais de microclínio e de quartzo com dimensões que chegam a superar 10 cm imersos em massa também inequigranular com granulação entre 3 cm e 5 cm. A muscovita, de aspecto prateado, forma agregados lamelares com dimensões máximas entre 0,5 cm a 2 cm preferencialmente concentradas em determinadas porções da rocha. Apesar de microscopicamente evidenciar um grau de microfissuramento aparentemente baixo, com 4,2 microfissuras/mm², principalmente do tipo intragrão (94,5% do total; com cerca de 58,2% não preenchidas e 36,3% preenchidas), em nível macroscópico exibe visível grau de microfissuramento tanto intragrãos (cristais maiores de quartzo) quanto transgralunares com dimensões de até 5 cm a 6 cm de extensão, dadas por planos normalmente abertos e quase sempre preenchidos por fina massa microcristalina filossilicática mais ou menos enriquecida

em óxidos e hidróxidos de ferro. A alteração mineral é discreta, destacando-se a quase imperceptível microalteração parcial de cristais de microclínio com a geração de microagregados filossilicáticos esverdeados e pela evidente presença de hidróxidos sobre cristais de feldspato potássico, ao longo de planos de clivagens, de microfissuras e em interfaces minerais.

Figura 5.4. Aspecto macroscópico do pegmatito Timbalada.

5.6. Giallita

O tipo Giallita, um pegmatito granítico de coloração creme a pouco amarelada (Figura 5.5), telado e resinado no seu beneficiamento e considerado comercialmente um material exótico devido a sua textura, é extraído no município de Cachoeiro de Itapemirim - ES. Apresenta estrutura discretamente orientada, de aspecto geral movimentado, e textura heterogênea em virtude da brusca variação na granulação de seus constituintes minerais. As frações pegmatóides quartzo-feldspáticas, praticamente desprovidas de micas, apresentam granulação altamente variável, com porções onde a granulação predominante oscila entre 1,5 cm e 4 cm e outras contendo cristais de feldspato gráfico que atingem ao redor de 20 cm. A fração mais fina, de aspecto geral levemente gnáissico, também marcadamente inequigranular, exibe granulação entre 2 mm e 4 mm. O microfissuramento é igualmente variável, predominantemente intragãos nas frações de granulação mais fina a pouco pegmatóide e relativamente elevada nas porções pegmatóides, onde são frequentes microfraturas intergãos e transgranulares mais ou menos abertas e com preenchimento por

finha massa filossilicática contendo hidróxidos de ferro. Também se destaca a presença de evidentes planos de clivagens relacionadas aos cristais de feldspato potássico mais desenvolvidos, realçadas pela presença de hidróxidos de ferro. Determinações efetuadas sob observação microscópica indicaram na média 3,2 microfissuras/mm², principalmente do tipo intracristalina, das quais 58,2% não são preenchidas e 35,4% são preenchidas por filossilicatos. Entretanto, as microfissuras transgranulares são melhores observadas ao nível macroscópico e são mais frequentes nas porções com texturas tipicamente pegmatíticas. A alteração mineral é discreta, denotada pela saussuritização do plagioclásio e localmente pela muscovitização da biotita com certa liberação de opacos disseminados e de hidróxidos de ferro que se irradiam pelas microfissuras e planos de clivagens dos minerais circunvizinhos. No caso, buscou recortar na chapa um pedaço com granulação menor devido a largura do filete a ser usado nos ensaios.

Figura 5.5. Aspecto macroscópico do pegmatito Giallita.

6. Metodologia aplicada e análise dos resultados

A hipótese central da tese é que o gás radônio retido na estrutura cristalina da rocha pode ser liberado em maior quantidade com o tempo de uso, fato devido a fatores de alterabilidade da rocha mediante as interações com o meio de onde é instalado, principalmente devido a sua manutenção e durante limpeza. Logo, buscou aplicar uma metodologia que fornecesse informações capazes de comprovar essa teoria, no caso, aplicando ensaios que permitem avaliar a resistência da rocha em função da sua alterabilidade e a radioatividade natural, de um modo que os ensaios se interligassem, permitindo utilizar os mesmos corpos-de-prova para comparações de resultados.

Ao observar as diretrizes das normas ABNT NBR 15.844 (2010a, 2015a) e ABNT NBR 15.845 (2010b, 2015b), apesar de suas constantes atualizações avançando somente em um quadro de requisitos básicos para os granitos, não estabelecem ensaios relativos a alterabilidade.

No tocante à radioatividade natural, em comparação com as normas internacionais, destaca-se as normas ASTM E2121 (2013), ASTM E1760 (2009), ASTM E1465 (2008) e ASTM D6327 (2010) quando o assunto é radioatividade em ambiente construído e, no caso da ABNT, existiu uma preocupação com o radônio encontrado em água, a ABNT NBR 11272 (1990) que está atualmente cancelada, servindo apenas de estudo.

Sabendo que a porosidade na rocha não é comunicante e é através dela que o radônio emanado exala para o exterior da rocha, os ensaios de alterabilidade são realizados para simular a passagem do tempo, afim de saber se iria exalar mais radônio ao forçar um aumento em sua porosidade. Foi preciso adaptar parte dos ensaios estabelecidos de normas existentes e utilizados em algumas literaturas específicas quando o tema é alterabilidade e, no caso dos ensaios de radioatividade não existe uma normatização a seguir para o caso proposto.

Com isso, a metodologia aplicada foi dividida em três partes que se correlacionam no resultado final:

- *Ensaios de alterabilidade química* adaptado de norma existente, ABNT NBR 13.818 – anexo H (1997), para descobrir a reação da rocha ao ataque químico de compostos agressivos como o ácido clorídrico (HCl) e o hidróxido de potássio (KOH), encontrados em produtos de limpeza, simulando o seu tempo de uso em uma edificação;
- *Ensaios tecnológicos de caracterização* previsto em norma para descobrir a porosidade aparente, ABNT NBR 15.845 – Parte 2 (2015b), que é um dos meios que

influencia na exalação do gás radônio nas rochas e, a resistência a esforços flexores por 4 pontos, ABNT NBR 15.845 – Parte 7 (2015c), para saber se aconteceu uma diminuição de sua resistência depois do ataque químico como indicador de alteração em sua estrutura;

- *Ensaio de caracterização radiométrica* para descobrir a radioatividade natural da rocha, utilizando a metodologia aplicada em Amaral (2011) e Artur *et al.* (2013) que permite estudar o quanto de radônio emanado fica retido na estrutura da rocha.

Os ensaios foram interligados para fornecer dados na pesquisa sobre um antes e depois dos ensaios de alterabilidade, descobrindo se teve um aumento na porosidade e na exalação do gás radônio, a ser demonstrando no fluxograma abaixo para uma melhor compreensão dos ensaios realizados (Figura 6.1):

Figura 6.1. Conjunto de ensaios aplicados, sendo que os conjuntos A e C foram mergulhados somente a face polida aos compostos agressivos e os conjuntos B e D foram mergulhados totalmente as amostras aos compostos.

Para um melhor estudo, as rochas foram separadas em 04 conjuntos denominados A, B, C e D para aplicar os ensaios de alterabilidade e, um conjunto E como fator de referência à resistência dos materiais que não sofrerá ataque de composto agressivos.

Inicialmente, em cada conjunto, foram realizados os ensaios de *densidade aparente*, *porosidade aparente e absorção d'água* e posteriormente a *leitura do gás radônio* antes de iniciar o *ataque químico de compostos agressivos* (HCl e KOH) para cada conjunto de

amostra, posteriormente repetiu os dois primeiros ensaios para descobrir se ocorreu alguma alteração.

Os ensaios de *esforços flexores em quatro pontos* foram comparados com os valores obtidos no conjunto E, que seria o *branco* da amostragem. Por causa desse ensaio é que foi determinado o tamanho e quantidade das amostras de cada rocha, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 15.845 – Parte 7 (2015c).

Além desses apresentados no fluxograma, outros ensaios foram realizados com o objetivo de obter uma melhor compreensão dos resultados, sendo a seguir detalhado cada ensaio realizado e apresentando os resultados.

6.1. Ensaios de alterabilidade química

Para avaliar a resistência da rocha em relação à sua alterabilidade como fator de tempo que irá influenciar na exalação do gás radônio com o aumento de sua porosidade, elaborou-se os ensaios em consulta a algumas literaturas como Aires-Barros (1991), Meyer (2003) e Simão (2003).

6.1.1. Determinação do pH das amostras

Primeiramente, a determinação do pH nas amostras foi realizada para se certificar se os compostos químicos agressivos a serem utilizados reagiriam com a rocha, ensaio realizado de acordo com o item 5.1.3 da ABNT NBR 10.005 (2004).

As concentrações de íons H^+ e OH^- nas soluções aquosas exprimem a acidez e a alcalinidade do composto, sendo que as concentrações iguais desses íons apresentarão uma solução de pH neutra.

A exemplo, uma solução com $pH < 7$ é considerada ácida, significa que os íons de $H^+ > OH^-$; uma solução com $pH > 7$ é considerada básica ou alcalina, significa que os íons de $H^+ < OH^-$.

Para isso, foi separado em um béquer 5g de rocha em partículas que passou na peneira de 9mm para cada amostra. Adicionou-se 96,5mL de água destilada e depois ficou por 5

minutos no agitador magnético, para no término do tempo medir o pH com o medidor de 0,01 unidade da escala de leitura.

As leituras expressas na Tabela 6.1 demonstrando que todas as rochas possuem um pH maior que 7, sendo consideradas básica ou alcalinas ao meio aquoso submetido.

Tabela 6.1. Valores de pH obtido nas amostras.

Material	pH encontrado
PSG	7.68
VL	7.43
CC	7.40
TI	7.08
GI	7.47
Água destilada	6.86

6.1.2. Resistência ao ataque químico de compostos agressivos

Ensaio adaptado a partir da metodologia observada na ABNT NBR 13.818 – anexo H (1997), em Meyer (2003) e Simão (2003), que consiste na aplicação de substâncias, no caso o HCl (ácido clorídrico) e o KOH (hidróxido de potássio), para simular em velocidade acelerada alguns ambientes agressivos à rocha. Essas substâncias foram escolhidas por serem encontradas em produtos domésticos utilizados para a limpeza das rochas no ambiente interno.

Como ácido, utilizou-se o ácido clorídrico de baixa concentração com 3% (v/v) partes em volume preparado a partir do concentrado, densidade igual a $(1,19 \pm 0,01)$ g/cm³, conhecido como ácido muriático, aplicados nos conjuntos A e B.

Como álcalis de alta concentração utilizou-se o hidróxido de potássio com 100 g/L encontrado em sabões em geral, aplicados nos conjuntos C e D.

O ensaio baseou-se em mergulhar 1/3 dos corpos-de-prova para 02 conjuntos (A e C) e imersão total para os outros 02 (B e D), todos com a face polida para baixo, em um recipiente de vidro de borossilicato contendo as substâncias por um período de 96 horas (4 dias), sendo renovadas a substância a cada dois dias.

Para registro de alteração estética nas rochas, as amostras foram digitalizadas antes e depois do ataque químico. Utilizou-se o equipamento modelo Scanjet 200 da empresa HP,

configurando-o com a resolução 600 ppi padrão RGB Colors e área definida de 23 x 2,8 cm, com as imagens digitalizadas sendo salvas na extensão “.JPG”.

6.1.2.1. Resultados e discussões

Devido às amostras serem digitalizadas com as mesmas dimensões, tornou-se possível registrar o antes e depois dos ataques químicos, permitindo uma melhor comparação visual em função da estética da rocha, apesar do objetivo principal é saber a influência desses compostos na rede porosa da rocha.

Em relação ao ataque ao ácido clorídrico (HCl), foi observado a diminuição do brilho e descoloração em todas as amostras, principalmente nos materiais escuros como o diorito Preto São Gabriel (PSG) e o charnokito Verde Labrador (VL).

O conjunto A, ao ser mergulhado em forma parcial com a face polida no ácido, foi observado a percolação do mesmo nos interstícios da rocha no final do ensaio, alcançando a face paralela, quando mergulhado de forma total no conjunto B, a reação foi mais agressiva, sendo observado uma reação imediata nas rochas Preto São Gabriel (PSG) e Verde Labrador (VL) ao colocar o ácido, saindo discretamente bolhas de ar em todos os filetes e, no final do ensaio, uns pozinhos escuros no líquido contendo o ácido, demonstrando que os minerais reagiram e desprenderam da estrutura da rocha.

No caso do diorito Preto São Gabriel (PSG), ao sofrer o ataque do ácido clorídrico (HCl) de forma parcial no conjunto A, a rocha descoloriu totalmente a sua face polida, mudando a sua tonalidade e aparecendo pontos brancos devido ao processo de caulinização nos feldspatos (Figura 6.2). Ao sofrer o ataque de forma parcial, a reação ocorreu de forma mais agressiva, aumentando a área de reação dos pontos brancos, transformando em manchas e alguns casos, observou pequenos vazios no lugar que já foi um mineral (Figura 6.3).

Figura 6.2. Ataque parcial do ácido HCl no diorito Preto São Gabriel do conjunto A.

Figura 6.3. Ataque total do ácido HCl no diorito Preto São Gabriel do conjunto B.

A mesma reação provocando a descoloração foi observado no charnockito Verde Labrador (VL), tanto na forma parcial do conjunto A (Figura 6.4), quanto ao sofrer o ataque do ácido clorídrico (HCl) na forma total no conjunto B (Figura 6.5), sendo o último mais agressivo, perdendo totalmente a tonalidade verde da rocha.

Figura 6.4. Ataque parcial do ácido HCl no charnockito Verde Labrador do conjunto A.

Figura 6.5. Ataque total do ácido HCl no charnockito Verde Labrador do conjunto B.

No caso do monzogranito Cinza Corumbá (CC), o ataque do ácido clorídrico (HCl) provou a perda total do brilho do polimento e manchas de tons amarelos, tanto na forma parcial do conjunto A (Figura 6.6), como na forma total do conjunto B (Figura 6.7).

Figura 6.6. Ataque parcial do ácido HCl no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto A.

Figura 6.7. Ataque total do ácido HCl no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto B.

No pegmatito granítico Timbalada (TI), mesmo sendo um material resinado, não foi eficiente para barrar a percolação do ácido clorídrico (HCl) ao sofrer o ataque de forma parcial no conjunto A (Figura 6.8), sendo que a mesma descoloração também é observada ao sofrer o ataque de forma total no conjunto B (Figura 6.9).

Figura 6.8. Ataque parcial do ácido HCl no pegmatito Timbalada do conjunto A.

Figura 6.9. Ataque total do ácido HCl no pegmatito Timbalada do conjunto B.

No pegmatito granítico Giallita (GI), que é também um material resinado, sofreu a mesma descoloração da cor original como as demais rochas, perdendo o brilho em sua face polida, tanto no conjunto A de forma parcial (Figura 6.10), quanto no conjunto B de forma total (Figura 6.11), ao sofrerem o ataque químico do ácido clorídrico (HCl).

Figura 6.10. Ataque parcial do ácido HCl no pegmatito Giallita do conjunto A.

Figura 6.11. Ataque total do ácido HCl no pegmatito Giallita do conjunto B.

Em relação ao hidróxido de potássio (KOH) ocorreu o inverso em relação à descoloração na textura, obtendo um aumento de brilho parcial e um realce na coloração, principalmente nos tons amarelos, oxidando visivelmente alguns minerais. O diorito Preto São Gabriel (PSG), ao sofrer o ataque de forma parcial no conjunto C (Figura 6.12),

visualmente não teve uma diferença marcante em relação ao ataque total realizado no conjunto D (figura 6.13), aparecendo em ambos uns pontos dourados devido a alteração ocorrida em alguns minerais.

Figura 6.12. Ataque parcial do KOH no diorito Preto São Gabriel do conjunto C.

Figura 6.13. Ataque total do KOH no diorito Preto São Gabriel do conjunto D.

O charnockito Verde Labrador (VL) é uma rocha microfissura, absorvendo o hidróxido de potássio (KOH) em seus interstícios, contribuindo na oxidação dos minerais depois do ataque, sendo observado na forma parcial (Figura 6.14) e total (Figura 6.15).

Figura 6.14. Ataque parcial do KOH no charnockito Verde Labrador do conjunto C.

Figura 6.15. Ataque total do KOH no charnockito Verde Labrador do conjunto D.

No caso do monzogranito Cinza Corumbá (CC), o ataque do hidróxido de potássio (KOH), não alterou sua tonalidade original, tanto na forma parcial (Figura 6.16), quanto na total (Figura 6.17).

Figura 6.16. Ataque parcial do KOH no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto C.

Figura 6.17. Ataque total do KOH no monzogranito Cinza Corumbá do conjunto D.

A mudança na tonalidade de cor foi mais marcante no pegmatito Timbalada (TI) ao sofrer o ataque de hidróxido de potássio, alterando sua cor principal de verde para um tom amarelo e marrom avermelhado, observados no conjunto C (Figura 6.18) e D (Figura 6.19)

Figura 6.18. Ataque parcial do KOH no pegmatito Timbalada do conjunto C.

Figura 6.19. Ataque total do KOH no pegmatito Timbalada do conjunto D.

O pegmatito Giallita (GI), é uma rocha de tonalidade amarela, com minerais oxidados naturalmente, não sendo marcante o ataque do hidróxido de potássio (KOH), clareando um pouco a rocha, como observado no conjunto C (Figura 6.20) e D (Figura 6.21)

Figura 6.20. Ataque parcial do KOH no pegmatito Giallita do conjunto C.

Figura 6.21. Ataque total do KOH no pegmatito Giallita do conjunto D.

Em uma avaliação estética, o ácido clorídrico conhecido como ácido muriático e base de diversos produtos de limpeza é mais danoso à rocha, ao ser comparado com o álcali hidróxido de potássio encontrado em sabões em geral. Recomenda-se evitar o uso desses produtos para a limpeza da rocha, pois afeta seus padrões estéticos e também estruturais, como notado visivelmente em ambos os casos, reagiram com os minerais das rochas.

6.2. Ensaios tecnológicos de caracterização

São ensaios previstos na NBR 15.845 (ABNT, 2015b, 2015c) referentes as partes 2 e 7 de caracterização das propriedades físicas da rocha, objetivando obter parâmetros da resistência da rocha depois de sofrer os ataques químicos do ácido clorídrico e hidróxido de potássio que influencia de forma direta na exalação do gás radônio. Esses ensaios foram realizados no Laboratório da Construção Civil – LCC do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade São Paulo – IAU/USP.

6.2.1. Índices Físicos

Chamados de índices físicos na literatura, são as propriedades de massa específica aparente seca e saturada, porosidade aparente e absorção d'água que refletem a presença de micro-descontinuidades nas rochas, as quais propiciam e facilitam a percolação de fluídos que conduzem a problemas de manchamentos e deterioração nas rochas.

Essas propriedades também podem ser correlacionadas com poros ou fraturas, os quais facilitariam à percolação de fluídos e como consequência a difusão de gás radônio. Neste caso, a porosidade aparente que representa o volume de espaços vazios de uma rocha é um índice importante, pois auxilia no entendimento da emissão do gás radônio para a atmosfera ou o seu aprisionamento.

Na norma ABNT NBR 15.845 (2015b) é prescrita a utilização de 10 corpos-de-prova com dimensões entre 5 cm e 7 cm retirados do maciço rochoso, mas como o objetivo é avaliar o produto final que irá para as edificações (pois essas rochas ao serem beneficiadas e transformadas em chapas podem perder suas características iniciais) e também aproveitar o

corpo-de-prova para outros ensaios, são utilizadas amostras com 2 cm de espessura por 25 cm de comprimento e 3 cm de largura retiradas de chapas polidas, no caso dos pegmatitos Timbalada (TI) e Giallita (GI) estão teladas e resinadas, no formato que são comercializadas.

Os corpos foram lavados em água corrente e secos em estufa ventilada por aproximadamente 24 h à 70° C.

Após esse tempo, os corpos foram retirados da estufa e resfriados a temperatura ambiente e pesados individualmente na balança de precisão de 0,01 g, obtendo-se o peso seco (massa **A**).

Em seguida, foi efetuada a imersão e saturação dos corpos-de-prova em água destilada de 1/3 da altura das amostras na bandeja. Após 4 h, é acrescentado água destilada até 2/3 da altura e após mais 4 h é complementado a submersão, depois é deixado por um período de 40 h repousando na água.

Após esse período, os corpos foram retirados da água e secos superficialmente e pesados ao ar, determinando-se, assim, o peso saturado (massa **B**). Depois foram pesados novamente em balança hidrostática, suspensos em um recipiente contendo água, obtendo-se assim o peso submerso (massa **C**).

Os cálculos para cada corpo de prova seguiram as equações abaixo e, ao final, foram calculadas as médias aritméticas para cada tipo de amostra:

Massa específica aparente seca (densidade aparente): $A / (B - C)$ (kg/m³)

Massa específica aparente saturada: $B / (B - C)$ (kg/m³)

Porosidade aparente: $(B - A) / (B - C) \times 100$ (%)

Absorção d'água aparente: $(B - A) / A \times 100$ (%)

6.2.1.1. Resultados e discussões

Apesar de serem rochas graníticas, elas possuem uma diversidade geológica que irá afetar nos resultados e mostrará suas diferenças entre si ao serem comparadas umas com as outras.

Na Tabela 6.2 é apresentada a média dos resultados dos índices físicos para cada um dos 05 conjuntos (A, B, C, D e E) antes de sofrerem o ataque de composto químico agressivo, apresentando índices coerentes e sem discrepância de uma mesma rocha em cada conjunto,

inclusive para os pegmatitos que possuem tendência a ter variações em uma chapa de rocha devido à sua formação com minerais crescidos e com fissuras preenchidas.

Tabela 6.2. Síntese dos resultados dos índices físicos de cada conjunto.

Amostra	Massa específica aparente seca (kg/m³)					Massa específica aparente saturada (kg/m³)				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
PSG	2.997	2.995	2.996	2.984	2.992	3.001	2.999	2.998	2.987	2.995
VL	2.673	2.672	2.672	2.673	2.670	2.680	2.679	2.679	2.679	2.676
CC	2.685	2.680	2.681	2.681	2.679	2.692	2.687	2.689	2.688	2.686
TI	2.611	2.605	2.608	2.606	2.608	2.617	2.612	2.615	2.613	2.615
GI	2.578	2.579	2.579	2.576	2.578	2.593	2.593	2.594	2.591	2.591
Amostra	Porosidade aparente (%)					Absorção d'água (%)				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
PSG	0,33	0,32	0,26	0,30	0,30	0,11	0,11	0,09	0,10	0,10
VL	0,71	0,71	0,73	0,64	0,63	0,27	0,26	0,28	0,24	0,24
CC	0,71	0,71	0,75	0,72	0,73	0,27	0,27	0,28	0,27	0,27
TI	0,63	0,70	0,67	0,73	0,69	0,24	0,27	0,26	0,28	0,27
GI	1,52	1,46	1,46	1,53	1,37	0,59	0,57	0,57	0,59	0,53

A rocha monzogranito Cinza Corumbá (CC) é a que apresenta uma melhor homogeneidade em sua textura, refletindo nos valores obtidos dos índices físicos em cada conjunto, pois é a que apresenta a menor variação ao ser dividida em conjunto entre as cinco rochas com diferenciação de 0,04% para a porosidade e 0,01% ponto para a absorção d'água, seguido pelo diorito Preto São Gabriel (PSG) que também possui uma textura homogênea com diferenciação de 0,07% para porosidade e 0,02% para absorção d'água.

O charnockito Verde Labrador (VL), apesar de sua textura apresentar homogeneidade, possui sua variação principalmente relativo à porosidade e absorção d'água aproximado do pegmatito Timbalada (TI), com uma diferenciação de 0,09% para a porosidade e 0,03% para a absorção d'água. É um material com granulação grossa e apresenta minerais com muita microfissura, os quais as fissuras nos minerais são visíveis a *olho nu*, visto que depois do ataque de composto químico agressivo, essas microfissuras se abriram ao ligarem entre si devida as micros-descontinuidades fissurais se interligarem. Como consequência, perdeu 4 amostras devido à quebra, sendo o material que mais perdeu amostra, seguindo pelo GI que perdeu duas e pelo TI e PSG que perderam apenas uma de cada.

Os pegmatitos não possuem uma textura homogênea, logo era previsto obterem uma maior variação entre si ao comparar os conjuntos, com o Timbalada (TI) demonstrando uma diferenciação de 0,10% para a porosidade e 0,04% para a absorção d'água e o Giallita (GI) a rocha que possui essa maior variação entre os presentes, sendo 0,15% para a porosidade e 0,06% para a absorção d'água.

A norma ABNT NBR 15844 (2015a) traz uma tabela com os pré-requisitos para as rochas graníticas, elaborada de acordo com a média dos valores das rochas estudadas por Frazão, Dozzi e Queiroz (2013). Destaca-se assim, que todas as rochas estão acima da média em relação à densidade aparente, mas relativa a porosidade e absorção d'água que deveriam estar abaixo dos valores, a rocha pegmatítica Giallita (GI) ultrapassa esses valores, visto essas informações na Tabela 6.3 que também encontra os valores obtidos por essas rochas ao serem ensaiadas na forma de cubo durante a pesquisa de Amaral (2011).

Tabela 6.3. Comparação da média dos resultados dos índices físicos das rochas estudadas.

Amostra	Densidade Aparente (kg/m ³)			Porosidade aparente (%)			Absorção d'água (%)		
	Filete	Cubo*	NBR**	Filete	Cubo*	NBR**	Filete	Cubo*	NBR**
PSG	2.993	2.997	2.550	0,30	0,56	1	0,10	0,19	0,40
VL	2.672	2.657	2.550	0,68	0,81	1	0,26	0,30	0,40
CC	2.681	2.683	2.550	0,72	0,78	1	0,27	0,29	0,40
TI	2.608	2.617	2.550	0,68	0,89	1	0,26	0,34	0,40
GI	2.578	2.589	2.550	1,47	1,45	1	0,57	0,56	0,40

Fonte: * Amaral (2011) ** NBR 15844 (ABNT, 2015a)

Os valores encontrados de massa específica aparente revelam nítidas diferenças entre as rochas ígneas estudadas, sendo que o hiperstênio diorito Preto São Gabriel (PSG) exibe um valor bem mais elevado em relação às demais como os fornecidos pelos charnockito Verde Labrador (VL) e monzogranito Cinza Corumbá (CC), que por sua vez, exibem valores intermediários um pouco acima dos valores exibidos pelos pegmatitos Timbalada e Giallita.

Os valores relativos à densidade aparente das rochas refletem a sua mineralogia, onde rochas com maior porcentagem de minerais máficos tradicionalmente pesados tendem a exibir massa específica mais elevada.

Ao comparar os valores obtidos em Amaral (2011) e o atual, não ocorreu uma diferença significativa, demonstrando que os maciços rochosos que foram retirados cada rocha apresentaram ter uma formação ampla bastante homogênea, preservando as características do material, pois as amostras utilizadas para o estudo atual já vieram do avanço da lavra.

Como se pode ver, a diferença de valores entre as duas amostragens, onde uma é retirada da chapa e a outro de blocos do maciço rochoso, não demonstram alterações a serem consideradas expressivas pelos autores nas propriedades em relação aos índices físicos nessas rochas, mesmo comparando aos materiais Timbalada (TI) e Giallita (GI) que são resinados e, teoricamente deveriam obter uma menor absorção de água, certificando a confiabilidade do

método empregado ao utilizar filetes retirados da chapa ao contrário do que a norma recomenda.

A correlação entre a porosidade e absorção d'água pode ser dada pelo grau de microfissuramentos das rochas relacionadas às características petrográficas inerentes a estas, tais como heterogeneidade textural, relações de contatos inter-minerais, comportamento microfissural e presença de minerais específicos de determinadas rochas.

A maior parte do conjunto de rochas analisadas apresenta resultados de porosidade e absorção d'água inferiores aos valores médios das rochas ornamentais brasileiras e exigidos pela ABNT NBR 15844 (2015), ou seja, menores que 1% para porosidade e que os 0,4% para absorção d'água.

Neste grupo se incluem o hiperstênio diorito Preto São Gabriel (PSG), o charnockito Verde Labrador (VL), o monzogranito Cinza Corumbá (CC) e o pegmatito granítico Timbalada (TI). O pegmatito granítico Giallita (GI) apresenta os índices acima dos referidos valores.

É visto uma diferença de valores relativo à absorção d'água e porosidade entre as rochas hiperstênio diorito Preto São Gabriel (PSG), charnockito Verde Labrador (VL) e pegmatito granítico Timbalada (TI) ao serem comparados com o ensaio realizado na forma de cubo (retirado do maciço rochoso) com a dos filetes (rochas beneficiadas). Diferença de valores não observados quando condiz com a densidade aparente, demonstrando coerência nos resultados.

Essa diferença se dá, teoricamente, devido os filetes sofrerem alterações micro-estruturais para serem transformadas em chapas polidas no processo de beneficiamento e alguns casos podem apresentar com os valores superiores em relação ao cubo.

Destaque-se o monzogranito Cinza Corumbá (CC) como a rocha que mais resistiu a essas alterações micro-estruturais devido ao processo de beneficiamento. Mas, as rochas em alguns casos são resinadas na face polida, como o pegmatito granítico Giallita (GI) que possui a maior absorção d'água e porosidade aparente nesse grupo, permitindo que a resina seja absorvida além de sua face, adentrando na rocha, diminuindo os vazios da rocha não somente em uma das faces e mantendo os valores ao comparar entre o filete (com resina) e o cubo (sem resina).

Na Tabela 6.4 são apresentados os resultados obtidos depois do ataque de compostos químicos agressivos, demonstrando as alterações dessas rochas ao alterar os valores iniciais dos índices físicos.

Tabela 6.4. Resultados dos índices físicos após ataque químico de compostos químicos.

Amostra	Massa específica aparente seca (kg/m³)				Massa específica aparente saturada (kg/m³)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
PSG	2.977	2.970	2.992	2.978	2.985	2.978	2.994	2.982
VL	2.662	2.656	2.670	2.671	2.671	2.666	2.677	2.677
CC	2.675	2.667	2.677	2.678	2.683	2.676	2.685	2.686
TI	2.604	2.595	2.598	2.605	2.612	2.605	2.607	2.613
GI	2.570	2.565	2.573	2.570	2.586	2.583	2.588	2.586
Amostra	Porosidade aparente (%)				Absorção d'água (%)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
PSG	0,78	0,78	0,25	0,42	0,26	0,26	0,08	0,14
VL	0,90	0,99	0,64	0,60	0,34	0,37	0,24	0,22
CC	0,82	0,94	0,76	0,74	0,31	0,35	0,28	0,28
TI	0,73	0,94	0,90	0,72	0,28	0,36	0,35	0,28
GI	1,56	1,76	1,50	1,56	0,61	0,69	0,58	0,61

Essas alterações são melhores visualizadas nos gráficos da Figura 6.22 ao comparar os resultados entre os índices físicos da rocha sã e depois do ataque, em que todas as rochas perderam massa depois do ataque, principalmente ao sofrerem ataque do HCl de forma total, sendo submerso totalmente no composto.

Figura 6.22. Comparação dos valores de densidade aparente obtidos.

No caso da porosidade e absorção d'água que são valores que se correlacionam, as rochas demonstraram um aumento de valores ao sofrerem ataque do ácido clorídrico (HCl), principalmente ao serem submersas de forma total no ácido do conjunto B.

Destaca-se que todas as rochas perderam sua coloração ao serem mergulhadas no ácido clorídrico. O diorito Preto São Gabriel (PSG), rocha com maior quantidade de minerais máficos, perdeu maior quantidade de massa no ataque do ácido HCl e teve uma mudança de cor bastante visível, logo sofreu uma maior lixiviação em sua constituição cristalina.

No caso ao ataque de hidróxido de potássio (KOH), esses valores de porosidade e absorção d'água praticamente se mantêm em algumas rochas ou diminui, provavelmente incorporando-se na estrutura cristalina da rocha ao reagir com os minerais constituintes.

Isso demonstra que dependendo do tipo de composto químico agindo na rocha, esse pode aumentar a rede porosa ao lixiviar os minerais ou diminuir, ao incorporar ou fechar a rede micro-porosa dependendo da alterabilidade sofrida dos minerais constituintes das rochas.

Essas observações podem ser demonstradas ao visualizar os gráficos das Figuras 6.23 e 6.24.

Figura 6.23. Comparação dos valores de porosidade aparente obtidos.

Figura 6.24. Comparação dos valores de absorção d'água aparente obtidos.

Logo, as rochas são mais vulneráveis ao ataque do ácido clorídrico (HCl), perdendo maior quantidade de massa, obtendo maior aumento de porosidade e absorção d'água ao comparar com o ataque do hidróxido de potássio (KOH), além disso, é visto que esteticamente altera totalmente a coloração da rocha. No caso do KOH, o aumento da coloração amarela indica que aconteceu uma oxidação e incorporação do álcali na rocha, influenciando principalmente na porosidade, ao invés de lixiviar, como no caso do HCl que aumentou a rede porosa nas amostras estudadas.

6.2.2. Determinação da resistência à esforços flexores

Tem como objetivo quantificar os esforços flexores que as rochas podem ser submetidas, se refletindo num importante dado acerca do dimensionamento de placas (relação comprimento vs. largura vs. espessura) a ser usada e, no caso, é para a comparação se as rochas diminuem sua resistência depois de serem submetidas ao ataque químico.

O ensaio realizado é o de flexão por carregamento em quatro pontos, baseado na norma ABNT NBR 15.845 (2015c), utilizando as amostras do índice físico, realizado no LCC – IAU/USP e consiste em preparar 10 corpos-de-prova com a largura de 1,5 vez a espessura

do material e o vão de 10 vezes a espessura, sendo que, o comprimento dos corpos-de-prova deve exceder o tamanho do vão em no mínimo 3 cm e no máximo 5 cm para cada extremidade, assim, utilizados as dimensões de 3 cm por 25 cm com 2 cm de espessura aproximadamente para todos os ensaios aqui descritos.

A superfície com o acabamento de polimento foi colocada na situação de flexão. Para cada rocha, 5 corpos-de-prova foram colocados na estufa por 48 h à 70° C e 5 saturados em água imerso na bandeja por 48 h para a posterior realização do ensaio seguindo a norma.

Utiliza-se uma prensa hidráulica para aplicar força com uma taxa de carregamento menor que 4 MPa/min até a ocorrência da ruptura do corpo-de-prova.

O valor da tensão de ruptura é calculado pela seguinte expressão (Equação 6.1):

$$\sigma_f = 3 P L / 4 b d^2 \quad \text{(Equação 6.1)}$$

Sendo que:

σ_f é o valor numérico do módulo de ruptura;

P é a força de ruptura (KN);

L é a distância entre os cutelos inferiores (m);

b é a largura do corpo de prova (m);

d^2 é a espessura do corpo-de-prova (m).

6.2.2.1. Resultados e discussões

A resistência à flexão na rocha exprime sua plasticidade e, depende da orientação de sua estrutura ao ser aplicado às forças e também da sua textura, pois quanto maior a granulação dos minerais, essa terá uma tendência de apresentar uma menor quantidade de planos de fraquezas que ocorre geralmente nos contatos dos minerais.

As rochas ensaiadas não apresentam uma orientação expressiva em sua estrutura e possuem uma granulação diferenciada entre si.

É notado no ensaio uma tendência das rochas na condição seca de obter uma maior resistência em relação à condição de saturada (Tabela 6.5)

Tabela 6.5. Resultado dos ensaios de esforços flexores por carregamento em 4 pontos em MPa:

Conjunto	Condição	PSG	VL	CC	TI	GI
A (HCl parcial)	Seca	12,1	3,1	9	15,7	7,3
	Saturada	9,6	4,1	6,6	13,3	5,3
	Média	10,85	3,6	7,8	14,5	6,3
B (HCl total)	Seca	9,3	3,8	11	13,3	4,7
	Saturada	6,9	2,3	8,7	13,2	3,5
	Média	8,1	3,05	9,85	13,25	4,1
C (KOH parcial)	Seca	6,8	5,9	9,9	15,9	5,2
	Saturada	7,9	5,5	9,6	12,7	4,4
	Média	7,35	5,7	9,75	14,3	4,8
D (KOH total)	Seca	7,9	5,9	12,3	15,6	5,4
	Saturada	7,7	5,1	9,7	11,5	3,8
	Média	7,8	5,5	11	13,55	4,6
E (Branco)	Seca	14,1	5,8	11,1	14,2	6,8
	Saturada	12,7	4,3	8,4	12,1	5,7
	Média	13,4	5,05	9,75	13,15	6,25

A norma prevê uma resistência a ser considerada de 8 MPa como requisito básico no caso das rochas graníticas, nas amostras estudadas, ao considerar o conjunto E (Branco) que não sofreu ataque químico, apenas duas de cinco não alcançaram esse valor, que seriam o charnockito Verde Labrador (VL), que é um material bem fissurado, e o pegmatito Giallita (GI), uma rocha heterogênea que apresenta diversas fraturas visíveis e preenchida por resina.

Logo, as rochas que obtiveram uma maior resistência, referenciando o Conjunto E, é o pegmatito Timbalada (TI) que é um material com sua estrutura alterada por ser resinado e telado, o diorito Preto São Gabriel (PSG) seguido pelo monzogranito Cinza Corumbá (CC). O pegmatito Giallita (GI) que também é um material resinado e telado obteve uma resistência menor que o TI devido ser um material mais fraturado ao ser comparado e com maiores índices de absorção d'água. O charnockito Verde Labrador (VL) foi o material que apresentou a menor resistência entre todos rompendo nos contatos dos minerais que apresentam com fissuras passíveis de serem vistas sem ajuda de lente de aumento.

Essas rochas ao sofrerem o ataque químico perderam a resistência como demonstrado na Figura 6.25.

Figura 6.25. Comparação dos valores dos esforços flexores por carregamento em 4 pontos obtidos.

O ataque do ácido clorídrico (HCl) foi mais impactante para o diorito Verde Labrador (VL) e no monzogranito Cinza Corumbá (CC), lembrando que esse ácido foi o que proporcionou o maior aumento nas porosidades da rocha em relação ao ataque do álcali hidróxido de potássio (KOH), que impactou mais o diorito Preto São Gabriel (PSG).

Essa diminuição na resistência acontece devido o ataque de compostos químico agressivo alterar a estrutura da rocha, interligando ou abrindo as microfissuras ao lixiviar os minerais, aumentando a porosidade da rocha. Como observa-se na Figura 6.26, o fator porosidade do material está correlacionado diretamente na resistência da rocha, que sofreram mudanças depois do ataque e, o pegmatito Timbalada (TI) demonstrou ser a rocha que mais resistiu sobre a influência desses dois compostos.

Figura 6.26. Comparação dos valores dos esforços flexores por carregamento em 4 pontos versus porosidade.

6.3. Ensaios de caracterização radiométrica

Compreende um conjunto de ensaios que determinou o quanto a rocha influencia na adição do nível de radônio em um determinado ambiente, antes e depois do ataque químico de compostos agressivos, dando continuidade aos trabalhos de mestrado do referido autor da Tese (Amaral, 2011), Amaral *et al.* (2012) e Arthur *et al.* (2013), salientando não existir uma norma utilizada no Brasil para esses ensaios.

6.3.1. Determinação do U, Th e ^{40}K

Existem três isótopos naturais do gás radônio (^{219}Rn , ^{220}Rn e ^{222}Rn) gerados por uma série de decaimento radioativo proveniente dos radionuclídeos ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th e, o método da espectrometria gama, segundo Duarte (2002), tem como propósito identificar e quantificar os elementos (U, Th e ^{40}K) com base nas propriedades radioativas desses elementos, determinando suas concentrações em ppm nas amostras.

O preparo de cada amostra consiste em seleção, quebra e pulverização em um moinho oscilante de panela de ágata até atingir 200 mesh e colocado posteriormente em uma cápsula cilíndrica de alumínio contendo 70 gr do material na forma de pó, esperando o prazo de 30 dias para atingir o equilíbrio radioativo secular na série do urânio.

Posteriormente é feita a quantificação no espectrômetro de raios gama, formado por um sensor e circuitos eletrônicos que separam a radiação incidente no cristal em componentes de energia durante a interação entre a radiação gama emitida por uma fonte radioativa e um cristal cintilador de NaI(Tl), produzindo pulsos de pequena amplitude no ânodo de uma fotomultiplicadora e amplificando ao conectar ao amplificador que envia os sinais para uma placa no microcomputador, convertendo em dados através do software Maestro II, da EG & G – ORTEC. (BONOTTO, 1996; DUARTE e BONOTTO, 2000).

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o espectrômetro de raios gama do Laboratório de Isótopos e Hidroquímica – LABIDRO, pertencente ao Departamento de Pesquisa Mineral do Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” - DPM/IGCE/UNESP de Rio Claro - SP.

6.3.1.1. Resultados e discussões

Destaca-se que o elemento radioativo de maior interesse nessa pesquisa é o Urânio, por ser o principal responsável em sua série de decaimento a produzir o gás radônio, com os valores obtidos demonstrados na Tabela 6.6:

Tabela 6.6. Concentrações de U, Th e K nas amostras estudadas.

Amostras	K(%)	Th (ppm)	U (ppm)
PSG	1,47	15,14	0,55
VL	8,61	29,72	0,43
CC	8,89	70,71	12,46
TI	4,17	1,66	16,71
GI	8,43	6,74	17,20

A concentração do elemento radioativo U varia de 0,55 à 17,20 ppm nas rochas presentes estudadas, de 1,66 à 70,71 ppm para o Th e 1,47 à 8,89 para o K.

Essa variação reflete na diferente natureza genética de cada rocha devido ao grau de evolução e composição mineralógica nas rochas estudadas, sendo que minerais como zircão, allanita, titanita e apatita são encontrados na literatura como detentores de elementos radioativos da família do U como demonstra a tabela 6.7.

Tabela 6.7. Teor de urânio em minerais de rochas ígneas.

Mineral	U (ppm)
Quartzo	1,7
Feldspatos	2,7
Biotita	8,1
Muscovita	2,8
Hornblenda	0,2 – 60
Piroxênio	0,1 – 50
Olivina	0,05
Alanita	30 – 1000
Apatita	10 – 100
Epídoto	20 – 200
Granada	6 – 30
Huttonita	3 – 7 x 10 ⁴
Magnetita e opacos	1 – 30
Monazita	500 – 3000
Titanita	10 – 700
Xenótima	300 – 4 x 10 ⁴
Zircão	100 – 6000

Fonte: Pertlik *et al.*(1974).

O monzogranito Cinza Corumbá (CC) possui teor de U na ordem de 12,46 ppm e corresponde a rocha com as maiores porcentagens de minerais detentores de elementos radioativos como zircão (0,4%), allanita (0,1%) e titanita (1,0%), além de apatita (1,0%).

O diorito Preto São Gabriel (PSG) e o charnockito Verde Labrador (VL) possui apenas traços de minerais detentores de elementos radioativos como zircão, mostrando coerência no resultado.

Os pegmatitos graníticos Timbalada (TI) e Giallita (GI) apresentaram baixos teores de Th e elevados teores de U.

6.3.2. Leitura do ^{222}Rn nas rochas

Para a leitura do gás radônio nas rochas ornamentais podem ser utilizadas duas técnicas, a detecção passiva (detectores plásticos) e a detecção ativa (equipamentos de medição instantânea). Cabe como referência em rochas ornamentais, Moura (2005) utilizando o método de detecção passiva, Amaral (2011) e Azevedo (2013) utilizando o método de detecção ativa.

Nesse estudo foi adotado o método de detecção ativa devido a obter melhores resultados com os dados fornecidos simultaneamente e ser menos propenso a erros, em relação a detecção passiva que exige a contagem manual no microscópio dos traços em filtros realçados depois de um ataque químico, como feito no caso dos detectores plásticos. Esse método é continuação dos estudos do referido autor (AMARAL *et al.* 2012).

O dispositivo AlphaGUARD, fabricado pela empresa Genitron, foi usado para a quantificação do radônio. É um espectrômetro alfa constituído de uma câmara de pulso otimizado de ionização, em que o gás se difunde para uma câmara cilíndrica contendo um filtro de fibra de vidro, retendo todos os produtos do decaimento do radônio.

Os sinais ou pulsos são quantificados e digitalizados ao sair da câmara. O centro do eletrodo lê taxas de ionização como pulsos, que são processados por uma unidade de pré-amplificador muito sensível, em que três canais independentes em uma rede de processamento digital tornam possível diferenciar de forma eficiente entre os eventos alfa reais e vários eventos de interferência, medir as concentrações de radônio e avaliar as suas concentrações elevadas (BALCÁZAR *et al.* 2002).

O dispositivo foi configurado para fazer medições em tempo real, a cada minuto.

As amostras foram limpas em um pano embebido em álcool, e colocados num forno a 70° C durante aproximadamente 24 horas, para remover a umidade provocada pela limpeza.

Após a remoção do forno, foram condicionadas para o transporte até o LABIDRO do DPM/IGCE/UNESP de Rio Claro.

As amostras foram confinadas em frascos de vidro Pirex® de borossilicato de 19 L, vedada com uma rolha de borracha acoplada a um sistema de válvulas, permitindo criar um sistema de vácuo. O ar foi sugado em um vácuo de até 450 mmHg (limite de segurança estabelecido, abaixo do limite do fabricante de 650 mmHg para evitar a implosão), depois fechando as válvulas e assim não permitindo a entrada de ar ou a sua fuga.

Depois de 25 dias, o sistema foi ligado ao dispositivo AlphaGUARD para realizar a medição das amostras conforme a rotina descrita em Amaral *et al.* (2012) e Arthur *et al.* (2013) registrando os dados em uma planilha.

Esse período de dias foi escolhido devido à analogia de um determinado tempo em que um ambiente possa ficar fechado no período de férias de seus usuários, alcançando assim uma maior concentração de radônio exalado nas amostras.

6.3.2.1. Resultados e discussões

Esse método foi utilizado na tentativa de executar inicialmente uma curva de calibração ao medir o radônio exalado nas rochas por um período de tempo de 5, 10, 15 e 25 dias na tentativa de encontrar um equilíbrio radioativo secular em um conjunto de 10 amostras de rochas.

Na teoria, a emanção do radônio pelas leis da física torna-se constante ao encontrar o equilíbrio radioativo entre Ra e Rn e, 25 dias seria um período de tempo em que a quantidade de radônio exalado se tornaria constante nas amostras. Com a curva de calibração permitiria medir a atividade de radônio em qualquer rocha em um período de tempo mais curto, bastaria lançar posteriormente essa medida na curva de calibração para descobrir-se a quantidade em um período de tempo a ser estipulado.

Mas descobriu-se que parte do radônio encontrado nas rochas, ao ser emanado, fica retido em sua estrutura e a outra parte que exala alcança o exterior da rocha, não achando esse equilíbrio no ambiente externo, logo, a exalação do gás radônio na rocha proveniente dessa emanção se diferencia e não se torna uma constante como na teoria.

Sabendo disso, adotou-se o período de 25 dias como referência para o confinamento das amostras, que foram medidas antes e depois do ataque dos compostos químicos com o objetivo de verificar uma interferência na porosidade da rocha e ver a influência dessa alterabilidade na exalação do gás radônio.

Os resultados na tabela 6.8 demonstram essa influência do ataque de compostos químicos nas rochas estudadas, onde a alterabilidade que as rochas sofrem no decorrer do seu uso afetam diretamente na exalação do gás radônio devido principalmente na alteração de sua porosidade.

Tabela 6.8. Valores médios obtidos em Bq/m³ do radônio exalado das amostras.

Amostra/ Conjunto	A	A+ HCl Parcial	B	B+HCl Total	C	C+KOH Parcial	D	D+KOH Total
PSG	0	10	7	27	15	10,67	14,33	13
VL	7,33	10,33	5,67	12	14,33	9	21,33	6,33
CC	21,33	243,67	71,33	151	139,73	73,67	113	116,67
TI	943	809	1560	790,33	838,33	630,33	870	795
GI	2660	3373,33	1456,67	1360	1373,33	2576,67	1326,67	1760

Os pegmatitos GI e TI são as rochas que mais exalam Rn seguidos pelo monzogranito CC, sendo que a rocha Giallita foi a que mais exalou depois dos ataques de compostos químicos.

Os valores obtidos pelo diorito PSG e charnokito VL são baixos, podendo ser considerados praticamente iguais e, ao serem lançados graficamente na presença de todas as rochas estudadas, praticamente desaparecem no gráfico. Esse fato está ligado diretamente a concentração de U ppm encontrado em cada rocha. Rochas com maiores porcentagens de Urânio em sua composição produzem mais o gás radônio, logo, possuirá uma maior tendência natural de exalar o radônio em maior quantidade (Figura. 6.27).

Figura 6.27. Comparação entre o Rn exalado com a concentração de U em cada amostra.

Assim como é nítida a presença do U em relação à atividade de Rn exalado, também é nítido que a concentração de U com a atividade de Rn exalado em cada rocha não é proporcional, como exemplo ao comparar o monzogranito CC (12,46 U ppm) com os pegmatitos TI (16,71 U ppm) e GI (17,20 U ppm), nota-se claramente que parte do radônio proveniente do U não foi exalado, ficou retido na estrutura cristalina da rocha, pois se fosse proporcional o monzogranito Cinza Corumbá estaria exalando valores parecidos com os dos pegmatitos.

Logo, além do teor de U nas rochas, o acesso do radônio na rede microporosa também influencia de forma direta, sendo a responsável por apresentar essas diferenças de valores entre a primeira e a segunda medição de cada conjunto. O gás emanado no interior da rocha precisa passar por barreiras para alcançar o exterior, que se diferenciam nos diferentes tipos litológicos devido às suas características intrínsecas quer texturais ou estruturais.

Essa influência da rede microporosa (porosidade) é melhor observada ao serem representados graficamente, sendo separadas as rochas PSG, VL e CC do TI e GI para facilitar na compreensão dos resultados devido os diferentes valores de exalação do gás radônio (Figura. 6.28).

Figura. 6.28. Relação entre porosidade e exalação do gás radônio.

As rochas que sofreram ataques de ácido clorídrico (HCl) tiveram um aumento de porosidade, isso refletiu diretamente na exalação do gás radônio, com um aumento a ser considerado e, no caso do hidróxido de potássio (KOH), aconteceu ao contrário. Ao correlacionar a porosidade antes e depois do ataque com a atividade do Rn, demonstra que além do teor de urânio na rocha, a porosidade seria o segundo fator de influência na exalação do gás radônio.

Como exemplo, as rochas que possuem uma maior porosidade e acompanhada com o seu teor de U possuem a tendência de exalar mais radônio, como no caso do pegmatito Giallita (GI). A rocha diorito Preto São Gabriel (PSG) possui uma porosidade menor que a rocha charnockito Verde Labrador (VL), mas possuem um teor parecido de U, no caso, o VL exalou mais radônio, sendo que depois do ataque o aumento na porosidade do PSG fez consequentemente aumentar sua exalação de radônio. O mesmo fato é visto nas rochas que tiveram um aumento da porosidade depois do ataque teve a tendência de aumentar a exalação (Figura 6.29).

Figura 6.29. Exalação do gás radônio antes e depois do ataque.

Na Figura 6.29, percebe-se que as rochas PSG, VL e CC tiveram o aumento na exalação do gás radônio após sofrer ataque do ácido HCl, fato interligado com o aumento de sua porosidade, resalta que essas rochas possuem textura homogênea. Essas rochas, sobre o ataque do álcali KOH, demonstraram em sua maioria diminuir a quantidade de radônio exalado devido a tendência de diminuir ou manter a porosidade da rocha, o qual pode incorporar ao invés de lixiviar para abrir caminho ajudando no escape do gás.

Os pegmatitos Timbalada (TI) e Giallita (GI) se comportaram de maneira diferenciada das demais rochas e entre si. A rocha Timbalada (TI) diminui a quantidade de radônio exalado depois dos ataques dos compostos químicos, independente do aumento da sua porosidade. O pegmatito Giallita (GI) aumentou sua porosidade depois do ataque em todos os conjuntos, sendo que, apenas o Conjunto B que sofreu ataque de HCl total, não aumentou a atividade de radônio.

Os ataques químicos podem lixiviar ou acrescentar massa, no caso de lixiviar aumentará a rede microporosa da rocha ao interligar, mas nesse processo também pode levar parte dos elementos radioativos, e os pegmatitos, por serem rochas que apresentam fraturas intergrãos nos minerais e não possuir uma textura homogênea, distribuindo os minerais de forma diferenciada em sua face, diferenciam no padrão de exalação do gás radônio ao serem comparadas com as outras rochas que possuem textura homogênea.

O diorito Preto São Gabriel (PSG) descoloriu sobre o ataque de HCl, perdeu massa e aumentou sua porosidade e absorção d'água, fatores que influenciaram no aumento referente a exalação do gás radônio. No caso ao sofrer ataque do KOH diminuiu sua exalação de Rn, percebe que sua porosidade diminui e manteve a massa. O mesmo fato ocorreu com o charnoktio Verde Labrador (VL).

No caso do monzogranito Cinza Corumbá, é notado que parte do radônio fica retido em sua estrutura e, ao sofrer o ataque de HCl aumentou sua porosidade influenciando

diretamente em sua exalação do gás radônio, no Conjunto A passou de 0,71% de porosidade e 21 Bq/m³ de Rn para 0,82% e 243,67 Bq/m²; no Conjunto B passou de 0,71% de porosidade e 71,33 Bq/m³ de Rn para 0,94% e 151 Bq/m². No caso ao sofrer ataque do KOH, sua exalação caiu assim como sua porosidade manteve.

O pegmatito Timbalada não manteve a tendência das demais rochas, apesar de um aumento na porosidade nos Conjuntos A, B e C, não teve um aumento na exalação do gás radônio. O pegmatito Giallita aumentou sua exalação assim também sua porosidade ao sofrer os ataques.

6.4. Aplicação dos dados

Como é visto que parte do gás radioativo Radônio fica retido na estrutura da rocha, através da *Determinação do U e Th* e da *Determinação da emanção do gás ²²²Rn* é possível realizar certas considerações, como o *coeficiente de exalação do radônio* por cada material, descobrindo o quanto de Rn é gerado, o quanto fica em parte retido na rocha em relação ao exalado, descobrindo assim a eficiência que cada rocha possui ao exalar o Rn.

Também é possível simular o quanto pode acumular no ambiente por meio da sua *influência de adição do nível do radônio em um ambiente*, visto que as medidas obtidas em laboratório são de Rn concentrado.

6.4.1. Coeficiente de exalação do radônio

Consiste em caracterizar a radioatividade natural em razão do ²³⁸U (gênese do ²²²Rn) nos materiais estudados através do cálculo de geração total do radônio emanado, permitindo assim estabelecer o quanto de radônio gerado vai para o ar e o quanto fica retido na estrutura das rochas, descobrindo a eficiência de emanção por cada no ambiente construído.

A eficiência de emanção é definida por Wanty, Lawrence & Gundersen (1992) a partir da equação 6.2:

$$E = \frac{(^{222}\text{Rn})_{\text{ar}}}{(^{222}\text{Rn})_{\text{ar}} + (^{222}\text{Rn})_{\text{material}}} \quad (\text{Equação 6.2})$$

Wanty *et al.* (1992) consideraram que o fator de eficiência de emanção **E** é sempre menor que 0,5, e ao atingir este nível o material estaria exalando todo o gás radônio produzido. Para rochas, rotineiramente este fator se situa abaixo de 0,3, valor este que indicaria que a exalação é de aproximadamente a metade do gás ^{222}Rn gerado pela rocha.

Com o teor de U (ppm) é estimado a atividade ^{226}Ra (Bq/kg) através do fator de conversão **12,34**, que pelas condições de equilíbrio secular radioativo, equivale à mesma proporção de ^{222}Rn gerado pelos materiais a partir de seu pai ^{226}Ra .

O valor obtido do radônio exalado no ar em Bq/m³ (*determinação da emanção do gás ^{222}Rn em laboratório*) é transformado para Bq/kg usando a equação $[\text{Rn}] \times V/m$, sendo que $V=19$ L (volume de ar interno do garrafão) e m é a massa da amostra (kg).

6.4.1.1. Resultados e discussões

A eficiência de exalação do gás radônio na rocha é dada pelo coeficiente do radônio exalado versus o emanado. Apesar dos teores de U e exalação do ^{222}Rn serem diferenciados entres as rochas, é possível notar que rochas com baixíssimos teores de U possuem a mesma eficiência ou maior que as rochas com altos teores.

Na Tabela 6.9 é demonstrado esse fato. As rochas diorito Preto São Gabriel (PSG) e charnockito Verde Labrador (VL) possuem um maior coeficiente **E** do que a rocha monzogranito Cinza Corumbá (CC), que possui expressivamente maior quantidade de U. Em alguns casos, sendo possível comparar essa eficiência com as rochas que mais exalaram o gás radônio, os pegmatitos graníticos Timbalada (TI) e Giallita (GI). Esse fato está ligado com a porosidade do monzogranito Cinza Corumbá (CC) ser relativa com o diorito Preto São Gabriel (PSG) e superior com a do charnockito Verde Labrador (VL) e, os dos pegmatitos Timbalada (TI) e Giallita (GI) serem proporcionais as rochas PSG e VL.

Tabela 6.9. Eficiência de exalação do gás radônio.

A (HCl parcial)	U ppm	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)*	E ²²²Rn	E ²²²Rn*	B (HCl total)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)*	E	E*
PSG	0,55	0	10	0,000	0,007	PSG	7	27	0,005	0,018
VL	0,43	7,33	10,33	0,008	0,011	VL	5,67	12	0,006	0,013
CC	12,46	21,33	243,67	0,001	0,007	CC	71,33	151	0,002	0,005
TI	16,71	943	809	0,022	0,019	TI	1560	790,33	0,037	0,019
GI	17,2	2660	3373,33	0,060	0,075	GI	1456,67	1360	0,034	0,032
C (KOH parcial)	U ppm	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)*	E ²²²Rn	E ²²²Rn*	D (KOH total)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)*	E	E*
PSG	0,55	15	10,67	0,010	0,007	PSG	14,33	13	0,010	0,009
VL	0,43	14,33	9	0,015	0,010	VL	21,33	6,33	0,022	0,007
CC	12,46	139,73	73,67	0,004	0,002	CC	113	116,67	0,003	0,004
TI	16,71	838,33	630,33	0,020	0,015	TI	870	795	0,021	0,019
GI	17,2	1373,33	2576,67	0,032	0,059	GI	1326,67	1760	0,031	0,041

* valores obtidos depois de sofrerem ataque químico de compostos agressivos.

Logo, é comprovado que a porosidade interfere diretamente na exalação do gás radônio e, as rochas, ao serem submetidas a fatores de alterabilidade, podem aumentar a sua eficiência de Exalação devido ao aumento de sua porosidade. Teoria apresentada na tese sendo comprovada ao observar os valores obtidos na tabela 6.9, pois as rochas que sofreram ataque químico de ácido clorídrico em quase totalidade aumentaram consideravelmente os seus valores relativos à porosidade, logo o Fator **E** (eficiência de exalação do Rn) aumentou como consequência.

As rochas que sofreram ataques de KOH não obtiveram uma mudança significativa em sua porosidade, em alguns casos até diminui, logo é notado um decréscimo no Fator **E**.

Assim, ressalta o cuidado à conservação dessas rochas ao serem aplicadas principalmente como pisos, pois o radônio retido na rocha irá escapar com maior facilidade caso a rede microporosa aumente, aumentando consequentemente sua eficiência em exalar o gás radônio. Como exemplo desse fato, o monzogranito Cinza Corumbá, que apesar de ser a rocha que possui baixos valores de **E**, devido a quantidade de U que possui, um simples aumento em sua porosidade já irá aumentar de forma significativa sua contribuição na adição do gás radônio no ambiente.

6.4.2. Influência de adição do nível do radônio em um ambiente interno

Através dos valores da exalação do gás ^{222}Rn de cada material obtidos em laboratório, é possível inserir esses dados em um ambiente para simular as possíveis adições e níveis de radônio em um ambiente interno, conforme visto no trabalho de Amaral *et al.* (2012).

Para essa simulação, a sequência dos cálculos se inicia pela conversão do radônio exalado no ar por cada material em Bq/m^3 para Bq/kg através da equação:

$$^{222}\text{Rn} (\text{Bq/kg}) = \frac{(^{222}\text{Rn})\text{Bq/m}^3 \times V}{\text{peso da amostra (kg)}} \quad (\text{Equação 6.3})$$

Onde:

V = volume de ar interno do garrafão (19 L).

A equação utilizada para avaliação do gás ^{222}Rn acumulado no ambiente é expressa como:

$$\text{Rn}_{\text{Amb}} = \frac{\text{Qtd Bq/m}^3 \times F2}{F1} = \text{Bq/m}^3 \quad (\text{Equação 6.4})$$

Onde:

Qtd Bq/m^3 é a quantidade de ^{222}Rn exalado por cada material;

$F1$ é o fator de dissipação de ar;

$F2$ é o fator de amplificação do material utilizado.

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

$$F1 = \frac{V_{\text{ar Amb}}}{V_{\text{ar Gar}}} \quad (\text{Equação 6.5})$$

Onde:

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

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

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

$$F2 = \frac{A_{\text{Apl}}}{A_{\text{Mon}}} \quad (\text{Equação 6.6})$$

Onde:

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

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

Os resultados obtidos em Bq/m^3 permite descobrir se estão abaixo do limite de 100 Bq/m^3 sugerido pela WHO (2009).

6.4.2.1. Resultados e discussões

A rocha ornamental em uma edificação encontra diversas aplicações, como o seu uso para pisos, rodapés, soleiras, batentes e revestimentos de paredes, assim como tampo de mesas, bancadas e lavatórios.

Muitas vezes é utilizada como um único tipo de material ou compondo combinações entre diferentes tipos de rochas para alcançar um ambiente diferenciado.

As variáveis a serem consideradas para a simulação consistem na quantidade de material aplicado como rocha ornamental, no volume de ar interno do ambiente construído, na quantidade de radônio exalado pela rocha e na ventilação natural que seria a troca de ar interno com o ambiente externo (que está desconsiderada no presente estudo), onde ambientes mais abertos como varandas teriam maior dispersão do que ambientes mais fechados, como escritórios, onde existiria certa blindagem de ar, ou seja, menores taxas de renovação do ar.

Como visto, o aumento na eficiência de exalação do gás radônio contribuirá com um aumento na adição desse gás no ambiente construído, logo, o fator de alterabilidade da rocha devido ao tempo de uso deve ser acrescentado.

Os valores obtidos do gás radônio em laboratório está concentrado em um ambiente de 19 L. Logo, pela regra da proporcionalidade, aonde tem um ambiente de 19 L com X de amostra e Y de resultado, através de uma regra de três composta é possível determinar o que

representa esse Y de resultado em um ambiente maior, como de uma residência e com valores variados de material aplicado.

No primeiro caso, procura-se demonstrar o que esses valores de exalação do gás radônio obtido em cada amostra no laboratório significam ao serem colocados em um ambiente interno de 80 m² com pé direito de 2,80 m, sendo considerado 80 m² aplicado na forma de piso por cada material, lembrando que fatores como renovação do ar interno são desconsiderados por não possuir parâmetros que permita aplicar nesse caso (Tabela 6.10).

Tabela 6.10. Valores convertidos para o ambiente interno.

Coni.	Preto São Gabriel				Verde Labrador			
	Rn da amostra (Bq/m ³)	Rn no ambiente (Bq/m ³)	Rn da amostra (Bq/m ³)*	Rn no ambiente (Bq/m ³)*	Rn da amostra (Bq/m ³)	Rn no ambiente (Bq/m ³)	Rn da amostra (Bq/m ³)*	Rn no ambiente (Bq/m ³)*
A	0	0	10	0,90	7,33	0,66	10,33	0,93
B	7	0,63	27	2,44	5,67	0,51	12	1,09
C	15	1,36	10,67	0,96	14,33	1,30	9	0,81
D	14,33	1,30	13	1,18	21,33	1,93	6,33	0,57
Coni.	Cinza Corumbá				Timbalada			
	Rn da amostra (Bq/m ³)	Rn no ambiente (Bq/m ³)	Rn da amostra (Bq/m ³)*	Rn no ambiente (Bq/m ³)*	Rn da amostra (Bq/m ³)	Rn no ambiente (Bq/m ³)	Rn da amostra (Bq/m ³)*	Rn no ambiente (Bq/m ³)*
A	21,33	1,93	243,67	22,05	943	85,32	809	73,19
B	71,33	6,45	151	13,66	1560	141,14	790,33	71,51
C	139,73	12,64	73,67	6,66	838,33	75,85	630,33	57,03
D	113	10,22	116,67	10,56	870	78,71	795	71,93
Coni.	Giallita							
	Rn da amostra (Bq/m ³)	Rn no ambiente (Bq/m ³)	Rn da amostra (Bq/m ³)*	Rn no ambiente (Bq/m ³)*				
A	2660	240,67	3373,33	305,20				
B	1456,67	131,79	1360	123,04				
C	1373,33	124,25	2576,67	233,13				
D	1326,67	120,03	1760	159,24				

* Valores obtidos após o ataque químico.

A WHO (2009) recomenda valores limites de até 100 Bq/m³ de concentração do gás radônio no ambiente interno e a EPA (2003) recomenda valores abaixo de 148 Bq/m³, nesse caso as rochas diorito Preto São Gabriel (PSG), charnockito Verde Labrador (VL) e monzogranito Cinza Corumbá (CC) atenderiam esse requisito caso fossem assentados como

pisos, mesmo aplicando o fator tempo devido sua reação a produtos de limpeza (ataque químico dos compostos HCl e KOH).

No caso do pegmatito Timbalada (TI), a sua exalação se aproxima desses valores e serve de alerta pois pode ser somado ao radônio encontrado naturalmente no solo e na estrutura do ambiente, adicionando de forma significativa o nível de radônio no ar do ambiente.

O pegmatito Giallita é a única rocha que ultrapassa os valores recomendados pela WHO (2009) e alguns casos da EPA (2003), independente ou não da ação do tempo.

A variação na adição do Rn por rochas ornamentais no ambiente construído também está ligada à quantidade de material aplicado no ambiente, como exemplo ao simular um ambiente de 9 m² com 2,80 m de altura revestido com 25 m² de material rochoso e, simular esse mesmo ambiente com apenas 2 m² de material, nota-se uma diferença significativa em relação a contribuição de cada material no ambiente, tomando como base os dados do conjunto A (tabela 6.11).

Tabela 6.11. Comparação da influência relativa à quantidade do material aplicado no ambiente.

Amostras (Conjunto A)	Área (m ²)	Qtd. Material aplicado (m ²)	Rn no ambiente (Bq/m ³)	Rn no ambiente (Bq/m ³)*
PSG	9	25	0,00	2,51
VL	9	25	1,84	2,60
CC	9	25	5,36	61,24
TI	9	25	237,00	203,32
GI	9	25	668,52	847,79
Amostras (Conjunto A)	Área (m ²)	Qtd. Material aplicado (m ²)	Rn no ambiente (Bq/m ³)	Rn no ambiente (Bq/m ³)*
PSG	9	2	0,00	0,20
VL	9	2	0,15	0,21
CC	9	2	0,43	4,90
TI	9	2	18,96	16,27
GI	9	2	53,48	67,82

* Valores obtidos após o ataque químico.

O monzogranito Cinza Corumbá (CC) ao ser aplicado em grande quantidade no interior de um ambiente, aumentou a sua influência na adição do Rn depois de sofrer ataques do HCl, mas nota-se que esse valor é aproximado a do Pegmatito Giallita (GI) com uma quantidade bem menor de material.

Quando se concentra um material em maior quantidade no ambiente, a tendência é aumentar a sua influência relativa à adição do Rn no interior do ambiente construído, fato demonstrado nesse estudo. Logo, não basta apenas saber se a rocha possui ou não radônio, pois é a quantidade de material aplicado que irá determinar o nível de radioatividade no interior do ambiente, além disso, o descuido na manutenção da rocha poderá contribuir ainda mais para esse aumento na exalação do gás radônio.

Alerta-se para rochas que ultrapassam valores de aproximadamente 1000 Bq/m² quando medido em laboratório, pois mesmo sendo aplicadas em quantidades menores no ambiente construído, possuem um valor significativo que possa ser somado a outros valores, provenientes de outras fontes de radônio além da rocha ornamental, ultrapassando os níveis aceitáveis por mecanismos internacionais como a WHO (2009) e a EPA (2003).

Sendo assim, é de conhecimento que não é somente a rocha que contribui para o acúmulo do gás radônio, outros materiais como o próprio concreto podem contribuir para alcançar níveis altos de radônio no ambiente construído, demonstrando a importância do estudo da radioatividade natural nos materiais utilizados na construção civil.

7. Considerações finais e conclusão

Como principal conclusão da Tese, as rochas podem aumentar a sua exalação do gás radônio para o ambiente, liberando parte que ficava retido, devido ao uso de produtos de limpeza a base do ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de potássio (KOH).

Esse fato comprova-se ao demonstrar que parte do radônio emanado, que está retido na estrutura cristalina da rocha por causa da rede microporosa não ser comunicante, consegue ser libertado e exalado para o ambiente devido ao aumento da comunicação entre os poros, provocado por compostos químicos agressivos utilizados como princípio ativo nos produtos para limpeza do ambiente, sendo que ao reagirem com os minerais conseguem interligá-los.

Como consequência, a rocha com o seu decorrer do tempo de uso poderá contribuir com o aumento da concentração do gás radônio no interior do ambiente e, a exalação do gás poderá causar futuras implicações na saúde do usuário (contaminação do radônio).

Logo, o potencial de exalação do gás retido dentro da rocha poderá aumentar quando acontece um aumento consecutivo da comunicação de sua rede microporosa, provocado através de produtos de limpeza e da abertura superficial dos poros através do desgaste com o uso (atrito).

Este estudo demonstra que a difusão e consequente exalação do gás radônio estão diretamente relacionadas às propriedades texturais inerentes a cada rocha, com ênfase para a granulação e para a intensidade e natureza do microfissuramento, que conduzem ao maior ou menor desenvolvimento da rede microporosa, controladora da difusão do gás radônio e, associado ao teor de urânio que indica uma maior ou menor produção do gás radônio em seu interior, acrescentando-se o fator tempo de uso, o qual indica a resistência da rocha na questão de sua alterabilidade com o meio que está inserida, influenciando diretamente nessa dinâmica de exalação do gás radônio nas rochas ornamentais.

Os estudos de alterabilidade apresentados comprovaram que as rochas sobre o ataque químicos de compostos agressivos, ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de potássio (KOH), influenciaram diretamente na comunicação da rede microporosa, alterando a porosidade da rocha e, como consequência, influenciando na exalação do gás radônio.

O ácido clorídrico (HCl) foi o composto químico mais agressivo na rocha ao comparar-se com o hidróxido de potássio (KOH), logo, produtos de limpeza com o ácido clorídrico em sua constituição poderá aumentar a exalação do gás nas rochas ornamentais com o aumento da porosidade.

As rochas sobre o ataque do ácido clorídrico (HCl) perderam sua função estética com o descoloramento da cor natural dos minerais, perdeu massa, aumentou a porosidade e consequentemente a exalação do gás radônio em sua maioria, demonstrando um aumento na eficiência de exalação (Fator E). Logo, otimizou a exalação do gás radônio emanado que antes ficava retida e, contribuiu para o aumento da adição do gás radônio no interior do ambiente construído.

A rocha diorito Preto São Gabriel (PSG) foi a que mais sofreu alterabilidade ao ácido clorídrico (HCl), ao pegar como referências a diminuição de massa, a alteração da cor natural, o aumento da porosidade e resistência aos esforços flexores por carregamento em 4 pontos, sendo seguida pelo pegmatito granítico Giallita (GI), charnockito Verde Labrador (VL), monzogranito Cinza Corumbá (CC) e pegmatito granítico Timbalada (TI). Em relação a exalação do gás radônio, tirando o pegmatito granítico Timbalada (TI), todas aumentaram a sua exalação do gás radônio, destacando o monzogranito Cinza Corumbá (CC) que mais obteve o aumento ao comparar com a sua exalação original.

Produtos de limpeza, com o álcali hidróxido de potássio em sua constituição, poderá aumentar ou diminuir a exalação do gás radônio nas rochas ornamentais, dependendo da composição textural e mineralógica da rocha, o qual influenciará na reação química podendo bloquear a rede microporosa ao ligar-se com os elementos químicos constituintes dos minerais, logo influenciando na exalação.

As rochas sobre ataque de KOH esteticamente tiveram um aumento na coloração amarela, como consequência em sua maioria interferiu na porosidade da rocha, diminuindo ou aumentando a eficiência de exalação do gás radônio na rocha em pequena escala, fato ocorrido devido reagir com os minerais constituintes da rocha e provavelmente incorporando na rocha, demonstrando que cada rocha será um estudo de caso.

Em relação ao hidróxido de potássio (KOH), o monzogranito Cinza Corumbá (CC) foi a rocha que mais resistiu ao ataque, no geral, as rochas não sofreram grandes alterações na porosidade e absorção d'água, influenciando menos no requisito da exalação do gás radônio. Esteticamente, o pegmatito granítico Timbalada (TI) foi a rocha que mais teve alteração da sua coloração original ao sofrer ataque do hidróxido de potássio e, em relação a resistência aos esforços flexores, o diorito Preto São Gabriel (PSG) e o pegmatito granítico Giallita (GI) foram as rochas que diminuíram suas resistências depois do ataque. Ao comparar a exalação do gás radônio posterior ao ataque de KOH, em sua maioria obtiveram uma diminuição ou exalação praticamente igual, menos no pegmatito granítico Giallita (GI), que teve um aumento em todos os casos.

O estudo de caracterização radiométrica, que compreende a quantificação do radônio exalado, o teor de urânio e a porosidade da rocha, antes e depois de ataque químico de compostos agressivos, realizado nas rochas comprovam a presença do gás radônio, que em parte exala e outra fica retida em sua estrutura cristalina, além do potencial de contaminação de cada rocha ao ser utilizado no interior de um ambiente, podendo exalar mais ou menos radônio com o tempo de uso.

Ao comparar a quantidade de urânio em cada rocha com a quantidade de radônio exalado por esta, nota-se que algumas rochas não exalam de forma proporcional ao serem comparadas entre si, comprovando que a taxa de escape do gás ^{222}Rn das rochas é bastante ínfima quando comparada à quantidade total de ^{222}Rn gerado pelas rochas e o aumento na porosidade irá influenciar nesse escape.

Além da quantidade de rocha aplicada, da sua taxa de exalação do gás radônio na rocha, bem como do volume de ar do ambiente levando em consideração a ventilação (troca de ar externo/interno), deverá acrescentar o fator alterabilidade nas condicionantes que contribuem na adição do nível de atividade do radônio no interior do ambiente, pois como comprovado na Tese, com o passar do tempo a rocha poderá exalar maior quantidade de gás radônio devido ao aumento em sua eficiência de exalação do gás radônio que fica retido na rocha provocado por um aumento em sua porosidade.

Conclui-se que as rochas com baixa exalação do gás radônio, mas com concentrações consideráveis de U em sua estrutura, podem se tornar potencialmente perigosas com o decorrer do tempo de uso dependendo dos seus padrões de alterabilidade, devido influenciar diretamente na porosidade da rocha que possui como consequência o aumento do escape do gás radônio para o interior do ambiente.

Essa conclusão se deve ao fato de que a rocha que mais exalou o gás radônio, entre as estudadas, é consequentemente a rocha que possui o maior teor de U, referenciando o pegmatito granítico Giallita (GI). Mas, depois de sofrerem ataque químico, destaque-se ao monzogranito Cinza Corumbá (CC) que aumentou praticamente em 12 vezes sua exalação depois do ataque químico do ácido clorídrico (HCl), apresentando um teor de urânio um pouco abaixo em relação ao Giallita, podendo contribuir de forma significativa para o aumento do nível do radônio no ambiente.

Em termos gerais, os materiais analisados apresentam baixos teores de elementos radioativos U, Th e ^{40}K , não sendo fonte de minério e nem potencial contaminação ligada diretamente com esses elementos.

Para a caracterização radiométrica em rochas ornamentais recomenda-se um estudo sobre a quantificação de elementos radioativos para interligar coma quantificação de radônio liberado no ar, pois parte do gás fica retido dentro da estrutura do material, assim como parte da energia radioativa gerada, podendo ser liberada posteriormente em maior quantidade, realçando a importância desse estudo ao pensar em um efeito acumulativo sobre a radiação no indivíduo. Além disso, estudos sobre a resistência da rocha em função de seu padrão de alterabilidade deve-se acrescentado, pois influenciará diretamente na porosidade da rocha.

Como discutido na Tese, a qualidade de vida de um indivíduo em um ambiente está relacionada a diversos fatores, os quais incluem a qualidade do ar interior. Diversas fontes de poluição foram apresentadas no decorrer da tese e entre elas o gás radônio, que é exalado naturalmente das rochas ornamentais. Logo, as rochas ornamentais, ao contribuírem de forma considerável com a adição do nível do gás radônio no interior de um ambiente, estão interferindo diretamente na qualidade de vida do usuário, podendo originar doenças cancerígenas conforme pesquisas apresentadas, sendo a caracterização radiométrica utilizada nesse trabalho uma forma de prevenção neste caso.

Ressalta-se que não é só a rocha que irá contribuir com a adição do radônio no ambiente, e sim, qualquer material de origem pétrea como o concreto, além do solo e da água, demonstrando a importância de caracterizar os materiais construtivos e impor valores com níveis aceitáveis de radiação, fato que não ocorre no setor da construção civil na atualidade.

Fato também que se fizeste um estudo amplo sobre a radioatividade nos materiais construtivos poderia estar prevenindo o surgimento de algumas doenças devido ao tempo de exposição a um ambiente contaminado que o indivíduo fica sem ter o conhecimento.

Este estudo demonstra a importância de conhecer e caracterizar o material que será utilizado para compor um ambiente, pois causam contaminação por vias respiratórias, realçando também a importância do estudo do ar interior, buscando melhorias em relação com a renovação do ar, que irá influenciar na qualidade de vida oferecida nesses ambientes.

Este trabalho de ciência multidisciplinar é um importante passo para o IAU-USP, contribuindo para conscientizar e inserir dentro da arquitetura, assim como na construção civil, a importância de conhecer os materiais construtivos e a sua relação com o ambiente construído principalmente ao relacionar na qualidade do ar do ambiente com a qualidade de vida do usuário.

8. Referências Bibliográficas

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. *Radioatividade natural em materiais rochosos*. Informe 18/2008. Disponível em: www.abirochas.com.br. Acesso em: 01 Agosto de 2016.

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. *Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento em 2012*. Informe 01/2013a. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br>. Acesso em: 01 Agosto de 2016.

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. *Exportações estaduais de rochas ornamentais e de revestimento em 2012*. Informe 02/2013b. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br>. Acesso em: 01 Agosto de 2016.

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. *Balanço das exportação e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2013*. Informe 01/2014. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br>. Acesso em: 01 Agosto de 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11.272: Água mineral e de mesa –Determinação da radioatividade (cintilometria) – Método de ensaio*. São Paulo, 1990.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13.818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios*. São Paulo, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma Brasileira NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação*. São Paulo, 2004a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma Brasileira NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. São Paulo, 2004b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Norma Brasileira NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. São Paulo, 2004c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.844: Rochas para revestimento – Requisitos para granitos*. São Paulo, 2010a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.845: Rochas para revestimento – Métodos de Ensaio*. São Paulo, 2010b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12.042: Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão – Método de ensaio*. São Paulo, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.012: Rochas para revestimento de edificações – Terminologia*. São Paulo, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.844: Rochas para revestimento – Requisitos para granitos*. São Paulo, 2015a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.845: Rochas para revestimento – Parte 2 Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção d'água*. São Paulo, 2015b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.845: Rochas para revestimento – Parte 7 Determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos*. São Paulo, 2015c.

AIRES-BARROS, L. *Alteração e alterabilidade de rochas*. Instituto Nacional de Investigação Científica, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 384p., 1991.

AMARAL, P. G. Q. *Caracterização radiométrica e de exalação de radônio em rochas ornamentais silicáticas beneficiadas no estado do Espírito Santo*. Dissertação (mestrado), UNESP – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 193p., 2011.

AMARAL, P. G. Q., GALEMBECK, T. M. B., BONOTTO, D. M., ARTUR, A. C. *Uranium distribution and radon exhalation from Brazilian dimension stones*. Applied Radiation and Isotopes. 70: 808-817, 2012.

ANTONIAZZI, B. N.; SILVA, N. C.; CUNHA, T. N.; OTERO, U. B. *Projeto Planalto Poços de Caldas: pesquisa câncer e radiação natural: incidência e comportamento de risco*. Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais, Belo Horizonte: ESP-MG, 200 p., 2013

ARTHUR, A. C., BONOTTO, D. M., AMARAL, P. G. Q., GALEMBECK, T. M. B. *Metodologia para a quantificação da exalação do gás radônio em rochas ornamentais*. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 32, n.1, p. 166-180, 2013.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E1465-08: Standard Practice for Radon Control Options for the Design and Construction of New Low-Rise Residential Buildings*. United State of America, 2008.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E1760-09: Standard Guide for Unrestricted Disposition of Bulk Materials Containing Residual Amounts of Radioactivity*. United State of America, 2009.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *C629-10: Standard specification for Slate Dimension Stone*. United State of America, 2010a.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D6327-10: Standard Test Method for Determination of Radon Decay Product Concentration and Working Level in Indoor Atmospheres by Active Sampling on a Filter*. United State of America, 2010b.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *C615-11: Standard specification for Granite Dimension Stone*. United State of America, 2011.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E2121-13: Standard Practice for Installing Radon Mitigation Systems in Existing Low-Rise Residential Buildings*. United State of America, 2013.

AZEVEDO, L. R. P. *Emanação de radônio em rochas ornamentais e para revestimento do estado do Ceará, Brasil*. 2013. 185 f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2013.

AZEVEDO, L. R. P.; ARTUR, A. C.; BONOTTO, D. M.; NOGUEIRA NETO, J. A. *Caracterização petrográfica, de índices físicos e da exalação de radônio em rochas ornamentais do Estado do Ceará, Brasil*. Geociências (São Paulo. Online), v. 34, p. 423-440, 2015.

BALCÁZAR, M.; LÓPEZ, A.; STREIL, T.; CHÁVEZ, A. *Radon leakage assessment in a controlled radon laboratory*. Geofísica Internacional. Distrito Federal, México, vol. 41, n. 3, p. 281-284, julho-setembro, 2002

BONOTTO, D.M. *Comportamento Hidrogeoquímico do ^{222}Rn e Isótopos de ^{238}U e ^{234}U sob Condições Controladas em Laboratório e em Sistemas Naturais*. Tese (Livre Docência), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 223 p, 1996.

BONOTTO, D.M. ^{222}Rn , ^{220}Rn and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil. Journal of Environmental Radioactivity, v. 132, p. 21-30, 2014.

BRASIL - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Resolução CONAMA nº 3*. 28 de junho de 1990. Disponível em:

http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_1990_003.pdf.

Acessado em: 03 de Agosto de 2016.

BRASIL - MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Portaria GM/MS nº 3.523*. 28 de agosto de 1998.

Disponível em: http://www.saude.mg.gov.br/images/documentos/PORTARIA_3523.pdf.

Acessado em: 03 de Agosto de 2016.

BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento*. In: RT33 - Relatório Técnico 33. Projeto Estal – Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia, Ministério de Minas e Energia, 101 p, 2009.

CHEN, J. *A Review of Radon Doses*. Radiation Protection Management. Volume 22, No. 4, 27-31 p, 2005.

CHIODI, C.F. *Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais*. Série de Estudos e Documentos, 28. Rio de Janeiro: CNPq/CETEM, 75p, 1995.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. CNEN-NN-3.01:2014, 22 pp, 2014.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSO MINERAL. *Folhas SF. 23/24 Rio de Janeiro/Vitória*. Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro, 708p., 1983.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSO MINERAL. *Folhas SE. 24 Rio Doce*. Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro, 548p., 1987.

DERBEZ, M.; BERTHINEAU, B.; COCHET, V.; LETHROSNE, M.; PIGNON, C.; RIBERON, J.; KIRCHNER, S. *Indoor air quality and comfort in seven newly built, energy-efficient houses in France*. In: Building and Environment. V. 72, Pages 173–187, February 2014.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. *Economia Mineral do Brasil*. Coord. Rodrigues, A. F. da S., Brasília, DF, 2009.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. *Sumário Mineral 2011*. Coord. Lima, T. M.; Neves, C. A. R., Brasília, DF, 2012.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. *Sumário Mineral 2015*. Coord. Lima, T. M.; Neves, C. A. R., Brasília, DF, 2016.

- DUARTE, C. R. & BONOTTO, D.M. *Calibração em energia e concentração de espectrômetro gama para análise de U, Th e K*. GEOCIÊNCIAS; 19(2): 313-319, 2000.
- DUARTE, R. M. *Radioelementos naturais na área do projeto Rio Preto (GO)*. 169 f. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 2002.
- EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Ventilation and Air Quality in Offices*. Air and Radiation (6609J), July 1990, 4p., 1990.
- EPA – UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Assessment of risks from radon in homes*. Washington, D.C., 99 p., 2003.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Consumer's guide to radon reduction – how to fix your home*. EPA 402/k-10/005. Washington, D.C., 20 p., March, 2013.
- FAURE, G. *Principles and applications of geochemistry: a comprehensive textbook for geology students*. Upper Saddle River: Prentice Hall, XV, 600p., 1988.
- FRASCÁ, M. H. B. O. *Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento*. Tese (doutorado), IG-USP. 264p., 2003.
- FRASCÁ, M. H. B. O. *Rochas ornamentais e para Revestimento: Variedades, Propriedades, Usos e Conservação*. In: A Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais e para Revestimento no Estado de São Paulo, IPT, São Paulo. 153 – 191p., 2004
- FRAZÃO, E. B. & FARJALLAT, J. E. S. *Características Tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento*. Atas do 1º Congr. Internacional da Pedra Natura. Lisboa, Portugal, 1995.47-58p., 1995.
- FRAZÃO, E.B. & FARJALLAT, J.E.S. *Proposta de especificação para rochas silicáticas de revestimento*. In: VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, Anais, SP: ABGE, v.1., 369-380 p., 1996.
- FRAZÃO, E. B. *Tecnologia de rochas na construção civil*. São Paulo: ABGE. 132 pp., 2002.
- FRAZÃO, E.B.; DOZZI, L.F.S.; QUEIROZ, F.C. *Característica tecnológicas de algumas rochas silicatadas utilizadas como revestimento*. In: Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental, 14, 2013, Rio de Janeiro, Anais. Pág. 1-9. São Paulo: ABGE, 2013.
- FRONT MATTER. *Health Effects of Exposure to Radon: Time for Reassessment?* Washington, DC: The National Academies Press, 1999.

GIACONI, W.J. *Perfil atual da indústria de Rochas Ornamentais no Município de Cachoeiro de Itapemirim (ES)*. Dissertação de mestrado. Unicamp - Campinas, SP, 91p., 1998.

GOBBO, L. A.; MELLO, I.S. DE C.; QUEIRÓZ, F. C.; FRASCÁ, M. H. B. O. *Aproveitamento de Resíduos Industriais*. In: A Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais e para Revestimento no Estado de São Paulo. Ed. Páginas & Letras Editora e Gráfica Ltda. Publicação IPT 2995. 129-152p., 2004.

GODISH, THAD. *Air Quality*. Lewis : Chelsea, 422p., 1991.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. *Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.

HALL EJ, GEARD CR, BRENNER DJ. *Risk of breast cancer in ataxia telangiectasia*. N Engl J Med 326:1358–9, 1992.

HUDA, WALTER. *Review of radiologic physics*. Editora Lippincott Williams & Wilkins. 3ª Edição. 255 pp., 2010.

ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Protection against radon at home and works*. Oxford: ICRP Publ, v. 23, n. 2, 65f., 1993.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation, People and the Environment*. IAEA/PI/A.75 / 04-00391. Austria, February 2004, 85 pp., 2004.

JONES, A.P. *Asthma and domestic air quality*. Social Science and Medicine 47(6), 755-764, 1998.

JONES, A.P. *Indoor air quality and health*. In: Atmospheric Environment 33 (1999) 4535-4564, 1999.

KAPLAN, IRVING. *Física nuclear*. Tradução: Goldemberg, José; Goldemberg, Clóvis. 2ª Edição. Rio de Janeiro. Editora Guanabara Dois, 1983.

LARA, E.; ROCHA, Z.; SANTOS, T. O.; RIOS, F. J.; OLIVEIRA, A. H. *Soil features and indoor radon concentration prediction: radon in soil gas, pedology, permeability and ²²⁶Ra content*. Radiation Protection Dosimetry, v. 01, p. 01-04, 2015.

MEYER, A. P. *A influência da petrografia no comportamento tecnológico de rochas ornamentais do Complexo Socorro (SP) e Maciço Pedra Branca (MG)*. Dissertação (Mestrado), UNESP – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 139 p., 2003.

MILNER, J.; SHRUBSOLE, C.; DAS, P.; JONES, B.; RIDLEY, I.; CHALABI, Z.; HAMILTON, I.; ARMSTRONG, B.; DAVIES, M.; WILKINSON, P. *Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study*. BMJ 2014;348:f7493, 2014.

MIESBCN – FUNDACIO MIES VAN DER ROHE BARCELONA. *Documentation*. In: The Pavilion. Barcelona, Espanha, 2015. Disponível em: <http://miesbcn.com/the-pavilion/>. Acesso em: 01 de Novembro de 2016.

MONTANI, C. *XXV Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2014: Congiuntura internazionale, Produzione, Scambi, Consumi, Tecnologie, Beni strumentali, Schede dei Paesi leader*. Carrara: Aldus. 233 p., 2014.

MOREIRA-NORDEMANN, L.M. *Etude de la vitesse d'alteration des roches au moyer de l'uranium utilize comme traceur naturel. Application a deux bassins du nordest du Bresil*. Tese (Doctorat d' E' tat), Universite' Pierre et Marie Curie, Paris, 162 pp., 1977.

MOREIRA, R. *Arquitetos e designers apostam em rochas ornamentais brasileiras*. Arquitetura e Design, Jornal Joseense, São José dos Campos - SP, 23 de Janeiro de 2016. Disponível em: <http://jornaljoseensenews.com.br/portal/arquitetos-e-designers-apostam-em-rochas-ornamentais-brasileiras/>. Acessado em: 01 de Novembro de 2016.

MOURA, C. L. *Radioatividade natural e emissão de ^{222}Rn em rochas ornamentais provenientes de diferentes séries magmáticas utilizadas como revestimento interno*. Tese (Doutorado), UNESP - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 195 p., 2005.

MOURA, C. M. (IN MEMORIAM); ARTUR, A.C.; BONOTTO, M.B.; GUEDES, S.; MARTINELLI, C. D. *Natural radioactivity and radon exhalation rate in Brazilian igneous rocks*. Applied Radiation and Isotopes. 69:1094–1099., 2011.

MURPHY, K. *What's Lurking in Your Countertop? The New York Times*. Publicado em: Julho 24, 2008. Disponível em:

http://www.nytimes.com/2008/07/24/garden/24granite.html?pagewanted=1&_r=1&sq=radon&st=cse&scp=1. Acesso em: 31/05/2011

NAVARRO, F. C. *Influência da petrografia sobre a anisotropia da resistência à compressão uniaxial e da dilatação térmica linear de rochas para revestimento*. Tese (Doutorado), UNESP - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 221 p., 2006.

PABLOS, J. M.; SICHIERI, E. P. *Study to Reuse an Industrial Solid Waste Generated by Foundry Sands*. Journal of Materials Science and Engineering, v. 4, p. 1-12, 2010.

PATÓN, V. *El nacimiento de una técnica*. Tectónica Cerramientos Pesados: Aplacados y Panales – Envolventes (II). Barcelona, 4-11 p., 1995.

PAULO, S. R. *Dosimetria Ambiental de ^{222}Rn e filhos: Medida da Eficiência Absoluta do CR-39 Levando-se em Conta os Efeitos do Plate-Out e Fatores Ambientais*. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, 380 f., 1991.

PERTLIK, F., ROGER, J.J.N., ADAMS, J.A.S. *Uranium*. In: Wedepohl, K.H. (Ed.), *Handbook of Geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, p. 92.0192.08., 1974.

PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., JORDAN, T. H. *Para entender a Terra*. Bookman Ed., 4ª ed., 656 p., 2006.

PRIKRYL, R. & SMITH, B. J. (eds). *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society, London, Special Publications, 271 p., 2007.

ROGERS, J. J. W.; ADAMS, J. A. S. *Thorium*. In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) – *Handbook of Geochemistry*. New York: Springer-Verlag, v. 4, cap. 90., 1969.

SABADINI, M. S. *Os distritos industriais como modelo de crescimento endógeno: o caso do segmento de rochas ornamentais (mármore e granito) no município de Cachoeiro de Itapemirim (ES)*. Dissertação de Mestrado. UFES, Vitória, ES, Brasil, 193 p., 1998.

SALAS, H. T.; NALINI Jr., H. A.; MENDES, J. C. *Radioatividade em rochas ornamentais do Brasil*. In: F.W.H. Vidal, M.A.A.B. Lima (Eds.), *Anais IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste*. Fortaleza – CE, p. 68-73., 2003.

SALIM, L. A.; BONOTTO, D. M. *Thoron and radon activity concentration in mineral waters of spas from southeastern Brazil*. *Environmental Earth Sciences* (Print), v. 73, p. 5619-5630, 2015.

SANTOS, C. E. L. *Determinação dos Processos de Enriquecimento e das Concentrações de Radônio em Minas Subterrâneas de Fluorita e Carvão do Estado de Santa Catarina: Critério para Avaliação dos Riscos Radiológicos*. Dissertação (Mestrado), Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 137f., 2008.

SIEGESMUND, S.; SNETHLAGE, R. *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Springer Ed., 4ª ed., N.Y., 552 p., 2011.

SIMÃO, J. A. R. S. *Rochas ígneas como pedra ornamental – causas, condicionantes e mecanismos de alteração. Implicação tecnológicas*. Tese de Doutorado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 182 p., 2003.

SINDIMÁRMORE – SINDICATO DOS TRABALHADORES DO MÁRMORE, GRANITO E CALCÁRIO DO ES. *Quem Somos*. 2012a Disponível em: www.sindimarmore.com.br/quemsomos. Acessado em: 01/07/12.

SINDIMÁRMORE – SINDICATO DOS TRABALHADORES DO MÁRMORE, GRANITO E CALCÁRIO DO ES. *Seis meses, oito óbitos*. 2012b. Disponível em: www.sindimarmore.com.br/ver-noticia/46/SEIS-MESES_-OITO-%C3%93BITOS. Acessado em: 01/07/12.

SINDIROCHAS – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS, CAL E CALCÁRIO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. *História do Sindirochas*. 2012. Disponível em: http://www.sindirochas.com.br/hist_sindirochas.html. Acessado em: 01/07/12. 2012.

STRECKEISEN, A. *To each plutonic rock its proper name*. Earth-Science Reviews, 12: 1-33, 1976.

TEIXEIRA, WILSON *et al.* *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000, 2ª reimpressão, 568 pp., 2003.

TIPPLER, P.A. *Física para cientistas e engenheiros*. LTC Editora, Rio de Janeiro, V. III, 6ª edição, 267 pp., 2009.

TURIEL, I.; HOLLOWELL, C. D.; MIKSCH, R. R.; RUDY, J. V.; YOUNG, R. A.; COYE, M. J. *The effects of reduced ventilation on indoor air quality in an office building*. Atmospheric Environment. Vol. 17. pp 51 - 64., 1983.

ULBRICH, H. H. G. J., GOMES, C. B. *Alkaline rocks from continental Brazil*. Earth Sci. Rev. 17, 135–154, 1981.

VALLERO, D. A. *Fundamentals of air pollution*. Ed. Elsevier. 4 Edição. 967 pp., 2008.

WANTY, R.B., LAWRENCE, E.P., GUNDERSEN, L.C.S. *A theoretical model for the flux of radon from rock to groundwater*. In: A.E. Gattes, L.C.S. Gundersen (Eds.), Geologic controls of radon. Geological Society of America: Boulder, CO, 1992.

WHO - World Health Organization. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 110 pp., 2009.

WHO - World Health Organization. *Selected Pollutants: Who Guidelines for Indoor Air Quality*. 2010.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Environmental and occupational cancers*. Fact sheet nº. 350. March, 2011. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs350/en/>. Acessado em: 03 de Agosto de 2015.

WINKLER, E. M. *Stone: Properties, Durability in Man's Environment*. Springer-Verlag, N.Y., 321p., 1973.

Temas como a qualidade do ar interior relacionada à qualidade de vida do usuário, à radioatividade natural, o perigo do gás radioativo radônio no interior do ambiente construído e às rochas ornamentais como composição e uso na arquitetura são discutidos na presente Tese de Doutorado, realçando a importância de conhecer o material que irá compor o interior do ambiente afim de prevenir futuros danos à saúde da edificação e dos usuários, facilitando assim o entendimento desses materiais e como interfere na qualidade do ambiente construído.