

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM  
TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (PROTEN)

**EDÍLSON ACCIOLY ROCHA**

**AVALIAÇÃO DA TAXA DE DOSE DEVIDO AOS GRANITOS ORNAMENTAIS  
EM AMBIENTES PÚBLICOS E PRIVADOS NA CIDADE DO  
RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL**

RECIFE  
2012

**AVALIAÇÃO DA TAXA DE DOSE DEVIDO AOS GRANITOS ORNAMENTAIS  
EM AMBIENTES PÚBLICOS E PRIVADOS NA CIDADE DO  
RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL**

**EDÍLSON ACCIOLY ROCHA**

**AVALIAÇÃO DA TAXA DE DOSE DEVIDO AOS GRANITOS ORNAMENTAIS  
EM AMBIENTES PÚBLICOS E PRIVADOS NA CIDADE DO  
RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, como um dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

**ORIENTADOR: PROF. DR. ROMILTON DOS SANTOS AMARAL**

RECIFE  
2012

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- R672a Rocha, Edílson Accioly.  
Avaliação da taxa de dose devido aos granitos ornamentais em ambientes públicos e privados na cidade do Recife – Pernambuco – Brasil / Edílson Accioly Rocha. - Recife: O Autor, 2012.  
77 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2012.  
Inclui Referências Bibliográficas e Glossário.
1. Energia Nuclear. 2. Granito. 3. Rocha ornamental. 4. Monitoramento ambiental. 5. Dosimetria. I. Amaral, Romilton dos Santos. (Orientador). II. Título.

UFPE

612.01448 CDD (22. ed.)

BCTG/2012-125

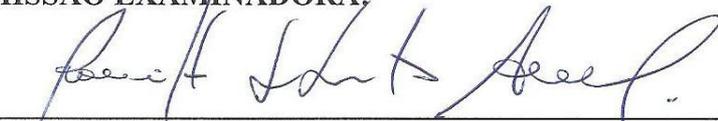
**AVALIAÇÃO DA TAXA DE DOSE DEVIDO AOS GRANITOS  
ORNAMENTAIS EM AMBIENTES PÚBLICOS E PRIVADOS NA  
CIDADE DO RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL**

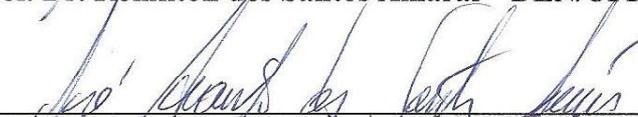
**Edilson Accioly Rocha**

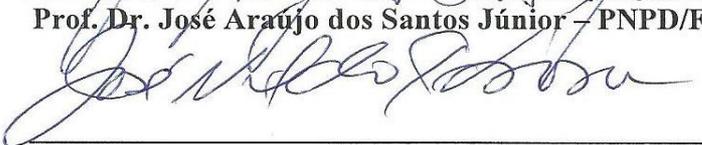
**APROVADA EM: 24.02.2012**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral**

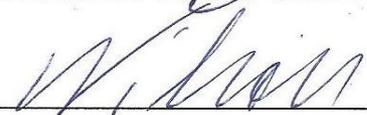
**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral – DEN/UFPE**

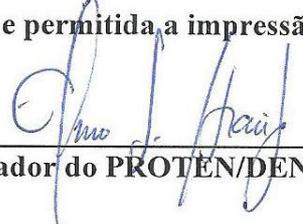
  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior – PNP/FACEPE/CAPES-DEN-UFPE**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Nildo Tabosa – IPA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Frederico Antonio Genezini – CNEN/IPEN-SP**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Wilson Vieira – IFPE e UPE**

**Visto e permitida a impressão**

  
\_\_\_\_\_  
**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**

Dedico às minhas filhas Carolina e Daniele.

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por tudo. Amigo de todas as horas, presença constante em toda e qualquer circunstância.

Ao meu orientador, **Professor Dr. Romilton dos Santos Amaral**, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela constante ajuda em cada etapa desta jornada, pela paciência, tempo dedicado à pesquisa, conhecimento adquirido ao longo do Curso e pela amizade.

Ao meu Coorientador **Professor Dr. Jorge João Ricardo Ferreira Cardoso** (*in memoriam*), que no meio desta jornada foi acolhido por Deus nosso Senhor. Agradeço pelas valiosas lições de Geologia, tempo dedicado à pesquisa e amizade.

Aos membros do Comitê de Acompanhamento: **Professores doutores Rômulo Simões Cezar Menezes** (DEN-UFPE), **José Nildo Tabosa** (IPA), **José Araújo dos Santos Júnior** (PNPD-CAPES/FACEPE-DEN/UFPE), pelo empenho em cooperar para o aperfeiçoamento deste trabalho. Aos **Professores doutores Frederico Antônio Genezini** (IPEN/CNEN/SP), **Cleomacio Miguel da Silva** (DM/UPE), **João Antônio Filho** (UNICAP-DEN/UFPE), **José Wilson Vieira** (UPE-IFPE), pelas participações na banca examinadora (seminário), avaliações e sugestões.

Ao **Professor Dr. Eudice Correia Vilela** (CRCN/CNEN-PE) pelo apoio científico, colocando à disposição os dosímetros termoluminescentes.

À **Universidade Federal de Pernambuco** (UFPE), especialmente ao **Departamento de Energia Nuclear**, pelo apoio, e a **todos os professores** pelo conhecimento adquirido, especialmente ao **Professor Dr. Elmo Silvano de Araújo**, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela contribuição científica, apoio e amizade.

Ao **Professor Me. Suêlto Vita da Silveira** que, por intermédio da **Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco** (FADE), contribuiu financeiramente de forma parcial para a realização deste trabalho.

À **Professora Dra. Helen Jamil Houry**, coordenadora do **Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes** do DEN/UFPE, pelo apoio científico e amizade.

Aos colegas do **Grupo de Radioecologia (RAE)**, pela convivência tranquila e ajuda em muitas ocasiões, bem como a todos os colegas do Departamento de Energia Nuclear, em particular aos colegas do doutorado e do magistério, **professores mestres, Viriato Leal Neto e José de Melo Lima Filho**, pelo estímulo, sugestões e amizade.

Ao **Instituto Federal de Educação de Pernambuco (IFPE)**, pelo apoio e liberação parcial para a realização do doutorado.

Aos **colegas da Coordenação de Química do IFPE**, pelo apoio e incentivo.

Ao engenheiro civil **Ismael Raimundo Lopes**, pela colaboração na construção do desenho em AutoCAD-3D.

Ao técnico em edificações **Ricardo Américo**, pela colaboração na construção do desenho utilizado.

Aos meus **pais, Edson de Almeida Rocha e Gilzete Accioly Rocha**, pela educação, compreensão, amizade e amor.

À **Isalva Barreto Accioly**, tia-irmã, pelo incentivo e colaboração.

À minha esposa **Rejane Pinheiro Rocha**, companheira de todas as horas, meu muito obrigado pela compreensão, amizade e apoio.

Aos meus **irmãos Edilza Maria Accioly Rocha, Edson de Almeida Rocha Junior, Edvaldo Accioly Rocha e Gerson Accioly Rocha** pelo incentivo.

A toda minha **família** pelo apoio e incentivo, em especial ao meu **avô** paterno **Joaquim da Silva Rocha** (*in memoriam*), pelo exemplo de trabalho e caráter, e à minha **avó** materna **Izabel Barreto Accioly** (*in memoriam*), pelo carinho e ternura que sempre me dedicaram.

Às minhas **filhas, Carolina Pinheiro Accioly Rocha e Daniele Pinheiro Accioly Rocha**, por compreenderem a minha ausência em busca desta conquista.

Ao meu **primo Nestor de Medeiros Accioly Neto**, pelo incentivo e apoio na minha formação acadêmica.

Aos **parentes, colegas e amigos** que de uma maneira ou de outra contribuíram para a conclusão deste trabalho, muitas vezes, até mesmo, com um simples gesto de carinho ou uma palavra amiga, meus sinceros agradecimentos.

A **todos que fazem o DEN**, pela acolhida nestes quatro anos.

Quero aportar meu grão de areia  
para a praia do conhecimento humano  
banhada pelo mar da consciência universal.

Juan Ribaut

Esperamos demais para fazer o que precisa ser feito, num mundo que nos dá um dia de cada vez, sem nenhuma garantia do amanhã.

Enquanto lamentamos que a vida é curta, agimos como se tivéssemos à nossa disposição um estoque inesgotável de tempo.

Esperamos demais para dizer as palavras de perdão que devem ser ditas, para pôr de lado os rancores que devem ser expulsos, para expressar gratidão, para dar ânimo, para oferecer consolo.

Esperamos demais para sermos generosos, deixando que a demora diminua a alegria de dar espontaneamente.

Esperamos demais para sermos os pais de nossos filhos pequenos, esquecendo quão curto é o tempo em que eles são pequenos, quão depressa a vida os faz crescer e ir embora.

Esperamos demais para dar carinho aos nossos pais, irmãos e amigos. Quem sabe quão logo será tarde demais?

Esperamos demais para ler os livros, ouvir as músicas, ver os quadros que estão esperando para alargar nossa mente, enriquecer nosso espírito e expandir nossa alma.

Esperamos demais para anunciar as preces que estão esperando para atravessar nossos lábios, para executar as tarefas que estão esperando para serem cumpridas, para demonstrar o amor que talvez não seja mais necessário amanhã.

Esperamos demais nos bastidores, quando a vida tem um papel para desempenharmos no palco.

Deus também está esperando – esperando nós pararmos de esperar.

Esperando nós começamos a fazer “agora” tudo aquilo para o qual este dia e esta vida nos foram dados.

Meus amigos: é hora de viver.

Henry Sobel

# **AValiação DA TAXA DE DOSE DEVIDO AOS GRANITOS ORNAMENTAIS EM AMBIENTES PÚBLICOS E PRIVADOS NA CIDADE DO RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL**

**Autor: Edílson Accioly Rocha**

Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral

## **RESUMO**

A humanidade vem utilizando objetos de granito indiscriminadamente. Sabe-se hoje que o “granito” apresenta radionuclídeos naturais emissores de radiação gama, produzidos pelo decaimento das séries do urânio e do tório acompanhados de  $^{40}\text{K}$ , que quando provocam doses acima do limite internacionalmente aceito pelos órgãos governamentais de  $1,0 \text{ mSv.a}^{-1}$  para pessoas do público, podem causar danos aos seres vivos. O objetivo deste estudo foi avaliar a exposição à radiação gama a que os indivíduos estão expostos, quando presentes em ambientes internos com “granito” ornamental utilizado como material de revestimento em pisos, paredes e também como matéria-prima para vários utensílios, tais como: móveis, objetos de arte e de decoração, encontrados em ambientes públicos e privados da cidade do Recife. Os granitos foram monitorados por meio da utilização de dosímetros termoluminescentes,  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , conhecido comercialmente por TLD-900, que foram fixados nos objetos de estudo e posteriormente lidos no Laboratório de Monitoramento Individual Externo do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE). Com este estudo, espera-se contribuir para o monitoramento ambiental, e naturalmente, para uma utilização mais segura dos objetos construídos com essa matéria-prima. As faixas de taxas de doses anuais detectadas nos granitos ornamentais nas residências, no edifício público, no restaurante, nos laboratórios, no hospital, no hotel e na copa do departamento monitorado, foram de respectivamente: 0,1 a  $18,5 \text{ mSv.a}^{-1}$ ; 1,9 a  $7,5 \text{ mSv.a}^{-1}$ ; 0,2 a  $11,8 \text{ mSv.a}^{-1}$ ; 0,5 a  $8,3 \text{ mSv.a}^{-1}$ ; 1,7 a  $11,6 \text{ mSv.a}^{-1}$ ; 0,4 a  $4,9 \text{ mSv.a}^{-1}$  e de 1,3 a  $6,6 \text{ mSv.a}^{-1}$ . Os resultados obtidos neste estudo revelaram taxas de doses bastante diversificadas e frequentemente superiores aos limites recomendados internacionalmente para pessoas do público, mostrando a necessidade de serem feitas avaliações radiométricas nos granitos ornamentais, antes da sua utilização em ambientes internos. O trabalho foi realizado entre os anos de 2007 e 2011.

**Palavras-chave:** Granito, Rocha Ornamental, Monitoramento Ambiental, Dosimetria.

**DOSE RATE ASSESSMENT DUE TO ORNAMENTAL GRANITES IN PUBLIC  
AND PRIVATE ENVIRONMENTS IN THE CITY OF  
RECIFE-PERNAMBUCO-STATE, BRAZIL, NORTHEAST REGION**

**Author: Edilson Accioly Rocha**

Advisor: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral.

**ABSTRACT**

Mankind has been utilizing granite objects indiscriminately. Nowadays, it is known that "granite" has natural radionuclides, gamma radiation emitters, produced by the decay of the uranium and thorium series, accompanied of  $^{40}\text{K}$ , and when doses above the internationally accepted governmental limit of  $1.0 \text{ mSv.y}^{-1}$  for public persons are emitted, this may be harmful to the human beings. This work aims to assess the gamma radiation exposure to which individuals are exposed, when present in inner environments with ornamental granite, used as finishing material in floors, walls and also as raw-material for objects such as furniture, art and decoration objects, found in public and private environments throughout the city of Recife, Northeast, Brazil. The granites were monitored by means of thermoluminescence dosimeters  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , known commercially as TLD-900, which were fixed in the objects of study and later on read in the External Laboratory of Individual Monitoring of the Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE). With this study, further contribution for the environmental monitoring is expected, and moreover, a safer use of the objects built with this raw-material. The rate bands of annual doses detected in the ornamental granites in the households, public buildings, restaurants, labs, hospitals, in the hotel and kitchen of the monitored department were respectively of  $0.1$  to  $18.5 \text{ mSv.y}^{-1}$ ;  $1.9$  to  $7.5 \text{ mSv.y}^{-1}$ ;  $0.2$  to  $11.8 \text{ mSv.y}^{-1}$ ;  $0.5$  to  $8.3 \text{ mSv.y}^{-1}$ ;  $1.7$  to  $11.6 \text{ mSv.y}^{-1}$ ;  $0.4$  to  $4.9 \text{ mSv.y}^{-1}$  and of  $1.3$  to  $6.6 \text{ mSv.y}^{-1}$ . The results of this study have shown dose rates very dissimilar and frequently superior to the internationally recommended limits for public persons, showing the need of radiometric evaluations in the ornamental granites before their use in inner environments. The work was carried out during the year of 2007 and 2011.

**Keywords:** Granite, Ornamental Rocks, Environmental Monitoring, Dosimetry.

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Processo termoluminescente.....	40
Figura 2: Curva de emissão TL.....	43
Figura 3: Disco contendo 50 dosímetros termoluminescentes (TLD-900).....	45
Figura 4: Leitora de TLD automática “Harshaw”.....	47
Figura 5: Esquema de uma leitora de TLD.....	47
Figura 6: Desenho esquemático de um dos balcões de granito monitorado.....	48
Figura 7: Desenho esquemático da distribuição dos TLDs nos balcões monitorados.....	49
Figura 8: Gráfico da distribuição das taxas de doses anuais das residências monitoradas. .	55
Figura 9: Taxas de doses anuais registradas nos pisos do edifício monitorado. ....	57
Figura 10: Boxplot das taxas de doses anuais nos balcões monitorados.....	62
Figura 11: Boxplot das taxas de doses anuais no hospital monitorado. ....	65
Figura 12: Boxplot das taxas de doses anuais no hotel monitorado. ....	67
Figura 13: Boxplot das taxas de doses anuais na copa de departamento monitorada. ....	69

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1: Minerais que contêm os elementos U, Th e K .....	28
Tabela 2: “Clarkes” do urânio nos principais tipos de rochas magmáticas.....	32
Tabela 3: Concentrações de $^{40}\text{K}$ em rochas, solo e na crosta terrestre .....	34
Tabela 4: Teores dos radioelementos K, U e Th nas principais rochas.....	36
Tabela 5: Fatores de Peso da Radiação .....	38
Tabela 6: Geoposicionamento dos locais monitorados. ....	44
Tabela 7: Doses médias anuais acumuladas nos dosímetros das residências.....	51
Tabela 8: Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nas residências. ....	54
Tabela 9: Registros de taxas de doses em rochas graníticas em diversos locais. ....	55
Tabela 10: Registros das taxas de doses, médias aritméticas e desvios padrões.....	56
Tabela 11: Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nos pisos.....	58
Tabela 12. Doses obtidas nas mesas do restaurante de grande visitação pública.....	59
Tabela 13: Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nas mesas de granito. ....	59
Tabela 14: Doses acumuladas nos dosímetros dos laboratórios A e B .....	61
Tabela 15: Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nos balcões de granito.....	62
Tabela 16: Doses registradas em vários ambientes do hospital.....	63
Tabela 17: Parâmetros estatísticos da distribuição nos diversos ambientes do hospital. ....	64
Tabela 18: Doses obtidas nos diversos ambientes do hotel.....	66
Tabela 19: Parâmetros estatísticos da distribuição de doses dos ambientes do hotel.....	66
Tabela 20: Doses obtidas na pia da copa.....	68
Tabela 21: Parâmetros estatísticos da distribuição de doses da copa de departamento. ....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CRCN	Centro Regional de Ciências Nucleares
TLD	Dosímetro termoluminescente
$^7\text{Be}$ , $^{10}\text{Be}$	Isótopos radioativos do berílio
$^{14}\text{C}$	Isótopo radioativo do carbono
$^{39}\text{Cl}$	Isótopo radioativo do cloro
$^3\text{H}$	Isótopo radioativo do hidrogênio
$^{40}\text{K}$	Potássio 40, elemento químico radioativo
$^{22}\text{Na}$	Isótopo radioativo do sódio
$^{32}\text{P}$ , $^{33}\text{P}$	Isótopos radioativos do fósforo
ppm	Partes por milhão
$^{230}\text{Th}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{234}\text{Th}$	Isótopos radioativos do tório
$^{208}\text{Tl}$	Tálio 208, elemento químico
$^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$	Isótopos radioativos naturais do urânio
$\text{UO}_2$	Uraninita
$\text{UO}_2^{2+}$	Íon uranilo, uranila ou divalente do urânio
$\text{UO}_3$	Uranita ou trióxido de urânio
$^4\alpha_2$	Partícula alfa
$^0\beta_{-1}$	Partícula beta
$\gamma$	Radiação gama

## SUMÁRIO

	Pág.
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	21
2.1 Radioatividade ambiental .....	21
2.2 Granitos .....	23
2.2.1 Radiatividade do granito.....	25
2.2.2 Urânio em rochas.....	31
2.2.3 Tório em rochas .....	33
2.2.4 Potássio em rochas.....	33
2.2.5 Distribuição dos elementos U, Th e K nas rochas .....	35
2.3 Dosimetria pessoal .....	36
2.4 Termoluminescência .....	38
2.5 Dosímetro termoluminescente.....	39
2.6 Dosímetros de CaSO <sub>4</sub> :Dy (TLD-900) .....	41
2.7 Sistema de leitura TLD.....	42
2.7.1 Tratamento térmico dos TLDs.....	42
2.7.2 Curva de emissão termoluminescente .....	43
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	44
3.1 Caracterização da área de estudo.....	44
3.2 Seleção dos pontos de monitoramento e procedimentos legais .....	44
3.3 Localização dos pontos monitorados .....	44
3.4 Dosímetro e métodos utilizados .....	45
3.5 Pré-seleção e calibração dos dosímetros termoluminescentes .....	46
3.6 Tratamento térmico dos dosímetros termoluminescentes .....	46
3.7 Leitura dos dosímetros .....	47
3.8 Objetos monitorados.....	49
3.9 Tratamento estatístico.....	50
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	51
4.1 Monitoramento de cinco residências.....	51
4.2 Monitoramento de um edifício público de grande trânsito de pessoas .....	56

4.3	Monitoramento de um restaurante de grande visitação pública .....	58
4.4	Monitoramento de dois laboratórios de análises clínicas .....	60
4.5	Monitoramento de um hospital de grande porte.....	63
4.6	Monitoramento de um hotel de grande rotatividade .....	65
4.7	Monitoramento de uma copa de departamento .....	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
	<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O uso das rochas pelo ser humano é bastante remoto, seja em armas, seja na construção civil. Esse uso é tão importante que caracterizou etapas da civilização: “Era da Pedra Lascada” e “Era da Pedra Polida”. O simbolismo dessas denominações mostra os estágios evolutivos dos povos.

Durante esses milhares de anos o uso das rochas foi ganhando outras finalidades, devido ao aprimoramento das técnicas e os novos conhecimentos acerca do material. De facas e peças pontiagudas, as rochas passaram para fundações, cimento, concreto, pisos e revestimentos. Entretanto, apesar de todas as possibilidades de uso que as rochas podem oferecer, cada uma tem um perfil e um desempenho, fatores que dependem da origem, formação e composição. Por ser um material formado pelo arranjo de um ou mais tipos de minerais, mesmo entre as rochas de uma mesma jazida, pode haver diferenças na composição, cor e resistência (COELHO et al., 2005).

Efetivamente, a segunda metade do século XX pode ser considerada como a nova idade da pedra, constituindo o período de sua maior utilização e da melhoria dos métodos de extração e beneficiamento, bem como acabamento, uso e aplicações das rochas ornamentais.

Percebe-se uma crescente substituição da madeira, que outrora substituiu a pedra bruta e trabalhada, por mármore e granitos, nos mais variados elementos arquitetônicos e mobiliários domésticos, funcionais e decorativos (NEVES, 2005).

Os “granitos” são classificados por nomes comerciais, origem geográfica, geológica e composições minerais específicas. Entretanto, raramente possuem classificações de acordo com a concentração de substâncias radioativas. Esse é um tema relevante, uma vez que as rochas graníticas são reconhecidas cientificamente por apresentarem na constituição teores de radionuclídeos naturais, tais como: urânio ( $^{238}\text{U}$ ), tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e potássio ( $^{40}\text{K}$ ), acima da média encontrada nos outros minerais.

O uso crescente de objetos ornamentais de granito em ambientes internos, onde a presença humana é muito frequente, como por exemplo, em quartos, banheiros, salas, cozinhas e demais dependências dos domicílios, e também em ambientes como escritórios, hospitais, escolas, igrejas, aeroportos, rodoviárias, museus, restaurantes e outros locais, ou

mesmo, constituindo a fachada externa de grandes conjuntos arquitetônicos em várias partes do mundo, tem levado o homem a ter maior contato e proximidade com os granitos ornamentais (polidos) e com os níveis de radioatividade dessas rochas.

A produção e o uso de rochas ornamentais no Brasil apresentaram crescimento notável nas últimas décadas, sendo utilizadas amplamente para revestimentos externos de prédios, pisos, paredes, mesas, pias etc. Neste sentido, destaca-se a importância das classes dos granitos, que são consideradas as rochas ornamentais comercialmente mais importantes, visto que, além de apresentarem beleza visual, são mais resistentes (inclusive a ataques químicos e desgaste abrasivo), não perdendo o brilho de polimento durante longos anos (VARGAS, 2001).

A radiação gama proveniente de alguns elementos naturais, caracterizados por possuírem meia-vida da ordem da idade da Terra, representa a principal fonte terrestre de irradiação externa para o corpo humano. Os menores níveis de radiação estão geralmente associados às rochas sedimentares e os mais elevados às rochas ígneas, principalmente aos granitos. Uma das exceções são as rochas fosfatadas que apresentam teores elevados. As concentrações de urânio, tório e potássio estão diretamente relacionadas com a composição mineralógica e as características petrológicas das rochas graníticas. Desse modo, variações dessas características produzem alterações expressivas nos diagramas de concentrações, devido às sequências individuais de diferenciação para os vários tipos de granitos comerciais existentes (ANJOS et al., 2005).

A grande diversificação do uso do granito está levando o homem a receber uma dose de radiação adicional, em razão da composição mineralógica desses materiais ornamentais, que apresentam na maioria radionuclídeos naturais emissores de radiação gama, que pode ser danosa à saúde humana, quando os níveis se apresentam superiores à radiação natural.

Dessa forma, fez-se necessário avaliar os níveis reais de exposição à radiação gama a que a população está exposta, de acordo com os preceitos da dosimetria pessoal, que é determinar a exposição à radiação recebida pelo usuário em um determinado período de tempo. A aplicação é exigida para operadores de equipamentos emissores de radiação em clínicas radiológicas, tanto odontológicas como médicas, indústrias, laboratórios etc. A radiação ionizante absorvida fora dos limites admissíveis poderá acarretar danos biológicos

e, portanto, deve ser precisamente monitorada. O dosímetro individual é a maneira mais utilizada para detectar exposições em operadores, pois é composto por pastilha sensível à radiação ionizante e permite avaliar se a dose de radiação está ou não acima dos níveis de restrição. Logo se entende que os resultados obtidos neste estudo são de grande interesse para a monitoração radiológica ambiental, pois, como já foi citado, o granito é largamente utilizado na ornamentação e revestimento de interiores e fachadas de conjuntos arquitetônicos. Esse interesse tem-se tornado tão expressivo que vários países da Europa e da Ásia têm imposto barreiras para a comercialização de granitos brasileiros, porque nossas rochas ornamentais raramente são avaliadas com relação aos níveis da radiação (ANJOS et al., 2005).

A motivação para este estudo surgiu após o monitoramento radiométrico de todas as pedreiras ativas de granito do estado de Pernambuco, observando-se taxas de doses nos granitos variando de  $0,28 \text{ mSv.a}^{-1}$  a  $2,36 \text{ mSv.a}^{-1}$  (ROCHA, 2007). Os resultados foram preocupantes, porque o limite de dose recomendado pelos órgãos de proteção radiológica internacionalmente é de um  $1 \text{ mSv.a}^{-1}$  para pessoa do público, ou seja, para as pessoas que não são trabalhadores da área nuclear.

Dentro deste enfoque, serão apresentados neste estudo os resultados do monitoramento de uma grande quantidade de amostras de granitos ornamentais, encontrados em diversos ambientes públicos e privados da cidade do Recife. Certamente que se passando a monitorar os granitos ornamentais presentes nos diversos ambientes, principalmente, os blocos de granito antes da extração nas frentes de lavras, estará se reduzindo a probabilidade de riscos à exposição radioativa decorrente de uma eventual concentração anômala de radionuclídeos nos granitos ornamentais.

Este trabalho de pesquisa tem o objetivo de proporcionar informações seguras aos usuários de granitos ornamentais, quanto à natureza radiológica dos granitos, avaliando os níveis reais de exposição à radiação gama a que os usuários dessa matéria-prima estão expostos, tendo em vista que não se tem conhecimento de trabalhos que tenham avaliado os riscos associados à utilização de granitos ornamentais nos interiores dos diversos ambientes públicos e privados.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Radioatividade ambiental

Radioatividade natural pode ser definida como transformações nucleares espontâneas que resultam na formação de novos elementos. Essas transformações são causadas principalmente por emissões de partículas alfa ( $\alpha$ ) ou beta ( $\beta$ ), e podem ou não ser acompanhada por radiação gama ( $\gamma$ ) (CEMBER, 1996). O homem sempre conviveu com a radioatividade. Ela existe desde a formação do Universo e pode ser detectada na atmosfera, na superfície da Terra, nas rochas, na água e nos vegetais, assim como em todos os organismos vivos. Nas rochas e solos são encontrados vários elementos radioativos como os das séries naturais do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , e o  $^{40}\text{K}$ , Entre outros. Além disso, os raios cósmicos, ao interagirem com os elementos que compõem a atmosfera, produzem continuamente radioisótopos, tais como  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ , entre outros (MANAHAM, 1994).

Admite-se que a exposição à radiação ionizante, por menor que seja, pode causar danos aos seres humanos. Entretanto, a exposição a algum tipo de radiação é inevitável, por causa das fontes naturais presentes no meio ambiente. Para a maioria da população, a dose recebida em razão da radiação natural excede àquela proveniente das fontes artificiais. A taxa de dose efetiva média individual em termos mundiais é de  $2,4 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$  graças a radiação natural, cerca de  $1,0 \text{ mSv}$  provém de procedimentos médicos de diagnóstico e apenas  $2\cdot 10^{-4} \text{ mSv}$  são derivados da produção de energia em centrais nucleares (EISENBUD; GESELL, 1997).

Apesar de ser a distribuição de radionuclídeos naturais na crosta terrestre aproximadamente uniforme, existem regiões onde os teores desses nuclídeos são mais elevados que o normal. A concentração de certos radionuclídeos em um determinado meio ocorre em razão da especificidade das propriedades químicas, pois alguns elementos são mais solúveis ou têm maior mobilidade que outros. Deve-se observar, entretanto, que o comportamento químico muda à medida que os átomos radioativos de um determinado

elemento decaem produzindo átomos de outra espécie química. Essa transformação afeta o comportamento dos radionuclídeos no meio ambiente.

A elevada radioatividade em determinadas regiões é causada por anomalias na distribuição dos elementos primordiais urânio e tório. Esses elementos têm longas meias-vidas e fazem parte dos minerais e rochas formadas no interior da Crosta Terrestre e que servem como fontes de radioatividade, principalmente quando situados próximos à superfície.

Algumas rochas tendem a acumular elementos primordiais, de modo que ambientes compostos por essas rochas são locais de elevada radioatividade natural. Como exemplos têm-se o granito e a fosforita (COWART; BURNETT, 1994). Em virtude da precipitação, tanto o urânio como o tório e seus produtos de decaimento são encontrados em fosforitas, apatitas ou mesmo óxidos nesses mesmos depósitos.

No Brasil, as áreas que apresentam elevados níveis de radioatividade ambiental são, entre outras, a região das minas de urânio e tório no Planalto de Poços de Caldas, em Minas Gerais, e as praias de areias monazíticas de Guarapari, no Espírito Santo, onde os níveis de radiação podem ser até dez vezes mais elevados, que aqueles normalmente encontrados na natureza (ANJOS et al, 2005). Além dessas áreas, há ocorrência na região da fosforita, em Paulista-PE, no Nordeste brasileiro (AMARAL, 1987), as reservas de urânio de Itaitaia, no Ceará (RIBEIRO et al, 2008), Caeteté, na Bahia (MATOS, E. C.; ALCÂNTARA, J.R.; RUBINI, L. A., 2003) e o Agreste de Pernambuco, monitorando uma rocha cálcio silicática anfíbolítica na cidade de Buíque (SANTOS JÚNIOR, et al., 2006). Em estudos monitorando residências da região da fosforita de Pernambuco, por meio de dosímetros termoluminescentes, foram encontradas taxas de doses efetivas que variaram de 0,70 mSv.a<sup>-1</sup> a 1,15 mSv.a<sup>-1</sup>, com taxa de dose média de 0,89 mSv.a<sup>-1</sup>, observando-se que os valores encontrados nesta região foram da mesma ordem dos valores obtidos nas residências de Poços de Caldas segundo Vasconcelos et al. (1986) apud Lima et al (1999), ambos com taxas de doses médias dentro do limite aceito internacionalmente para pessoas do público de 1 mSv.a<sup>-1</sup>, estabelecido pelos órgãos de proteção radiológica.

## 2.2 Granitos

Do ponto de vista petrográfico, o granito é definido como uma rocha plutônica constituída fundamentalmente de quartzo, feldspatos e micas. Entre os minerais máficos (escuros), os anfibólios e os piroxênios são encontrados com maior frequência no granito, especialmente os anfibólios.

Segundo o setor industrial de rochas ornamentais e de revestimento, o termo “granito” designa, incorretamente, um amplo conjunto de rochas silicáticas, abrangendo monzonitos, granodioritos, charnockitos, sienitos, dioritos, diabásios/basaltos e os próprios granitos (ABIROCHAS, 2004). A composição mineralógica dos “granitos” é definida por associações muito variáveis de quartzo, feldspato, micas (biotita e moscovita), anfibólios (sobretudo hornblenda), piroxênios (aegirina, augita e hiperstênio) e olivina. Alguns desses constituintes podem estar ausentes em determinadas associações mineralógicas, anotando-se também diversos minerais acessórios em proporções bem mais reduzidas. Quartzo, feldspatos, micas e anfibólios são os minerais dominantes nas rochas graníticas e granitóides (ANJOS et al., 2005).

O quartzo é um dos minerais mais abundantes da Terra, tem alta resistência mecânica e baixa reatividade química. Sua fórmula básica é  $\text{SiO}_2$ , mas pode ter composição variada, o que causa uma grande variedade de coloração.

O grupo de minerais mica inclui diversos minerais proximamente relacionados, do grupo dos filossilicatos, que têm a divisão basal altamente perfeita. Todos são cristais monoclinicos, com tendência para pseudo-hexagonal, e são similares na composição química. A divisão altamente perfeita, que é a característica mais proeminente da mica, é explicada pela disposição hexagonal dos átomos ao longo de planos sucessivamente paralelos.

Os feldspatos são os minerais mais abundantes, representando quase metade do volume da Crosta Terrestre. O feldspato potássico é a principal fonte de  $^{40}\text{K}$ . Os feldspatos formam um grupo extenso de aluminossilicatos de potássio, sódio, cálcio ou, às vezes, bário. São componentes importantes de muitas rochas ígneas e metamórficas. Têm cor que pode variar desde branco até diferentes tonalidades de rosa, amarelo, verde ou vermelho. Outro grupo de minerais que compõe o granito é a mica, a qual inclui diversos minerais

proximamente relacionados ao grupo dos filossilicatos que têm a divisão basal altamente perfeita. Alguns minerais desse grupo são: biotita, moscovita, pepidolita, flogopita, zinnwaldita e margarita (KRAUSKOPF, 1979).

Os anfibólios são classificados como minerais máficos (escuros), com predominância das cores preta, parda ou verde. Origina-se das rochas eruptivas e metamórficas, encontrado também nas rochas ígneas básicas. Os anfibólios são silicatos de ferro e de magnésio, importante na formação de alguns solos utilizados com intensidade na agricultura brasileira, por ser rico em elementos essenciais às plantas, principalmente cálcio e magnésio.

Os verdadeiros granitos são exemplos importantes de rochas que apresentam na constituição enriquecimento natural de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , quando comparados com outros tipos de rochas. Dessa forma, as concentrações desses elementos radioativos estão correlacionadas com as respectivas composições minerais e características petrológicas gerais (ANJOS et al., 2005). Urânio e tório são normalmente encontrados em alguns minerais presentes nas rochas ígneas e metamórficas, tais como zircão e alanita. Outros minerais altamente radioativos, como a monazita, uraninita, torita e pirocloro são bem frequentes na natureza, entretanto, eles não são, geralmente, constituintes típicos das rochas graníticas.

Comumente observa-se que diferentes granitos são comercializados com o mesmo nome. Esse problema de identificação também ocorre nas zonas de extração ou frentes de lavra. Por vezes, blocos de granitos mostrando pequenas heterogeneidades por causa da distribuição dos grãos, e que são extraídos da mesma área de mineração (em alguns casos do mesmo afloramento<sup>1</sup> ou maciço), são classificados com diferentes nomes comerciais, embora a composição mineral básica não tenha sido alterada.

No trabalho intitulado Radiatividade Natural em Granitos Comerciais Brasileiros (ANJOS et al., 2005), foram analisadas 108 amostras de diferentes tipos de granitos comerciais coletadas diretamente com produtores de dez estados brasileiros: Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Rondônia, Ceará, Pernambuco, Goiás, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná.

---

<sup>1</sup> Parte de um maciço ou camada de rocha, ou de minério, que chega à superfície do solo, pela irrupção, ou pelo desnudamento de um capeamento preexistente.

Observou-se que apenas uma variedade de granito ornamental de Pernambuco, o Marrom Imperial, foi estudada pelos pesquisadores fluminenses. Daí achou-se pertinente investigarem-se todas as outras variedades de rochas graníticas do estado de Pernambuco, pois o estudo das concentrações de radionuclídeos em rochas graníticas é importante, por se tratar de um problema radiológico, visto que a presença de elementos radioativos proporciona um aumento nos níveis de radiação quando essas rochas são utilizadas na construção civil. Esse último fato tem proporcionado uma preocupação crescente no setor de comércio de rochas ornamentais, pois tem sido observado aumento no número de solicitações de diagnósticos radiológicos de granitos como condição para a comercialização no mercado internacional. Dessa forma, torna-se necessário que o mercado brasileiro também se adapte às normas para que não sofra restrições na exportação e continue competitivo no mercado internacional de rochas ornamentais. Também seria interessante que o próprio mercado interno passasse a adotar essas normas como um dos diagnósticos de qualidade ambiental urbana.

### **2.2.1 Radiatividade do granito**

As rochas são classificadas em sedimentares, metamórficas e magmáticas, de acordo com a formação geológica. Rochas ígneas ou magmáticas formam-se pela cristalização do magma, uma massa de rocha fundida que se originou em profundidade na crosta e no manto superior da Terra. Quando o resfriamento dessas rochas ocorre no interior da Crosta Terrestre, o produto resultante é uma rocha do tipo ígnea intrusiva ou plutônica, mas se o magma chegar à superfície, a rocha resultante será do tipo ígnea extrusiva ou vulcânica. O granito, uma das rochas ígneas mais abundantes na Crosta Terrestre contém, cerca de 70% de sílica, sendo composta essencialmente por quartzo, ortoclásio e quantidades mais baixas de plagioclásio e micas (NESTH / UFMG, 2008). Sua composição é variada, pois pode haver formação de diferentes rochas ígneas em diferentes “momentos geológicos”. Quantidades traço (vestígios) de materiais radioativos são encontradas em quase todas as rochas. A atividade radioativa em rochas sedimentares e sedimentos metamorfisados é mais alta que em rochas ígneas ou outros tipos de rochas

metamórficas. Entretanto, as rochas graníticas (ígneas) representam uma exceção, por apresentar afinidade por radioisótopos naturais.

O potássio-40, a família radioativa do urânio-238 e do tório-232, são os principais radioelementos contribuintes para a radioatividade natural das rochas. São litófilos e estão mais concentrados nas rochas ígneas ácidas do que nas rochas intermediárias, básicas e ultrabásicas (SAPUCAIA, 2004). Em cada uma dessas séries, seus membros são emissores alfas e/ou beta e muitos desses também são emissores gama. O fato de as meias-vidas desses radioisótopos “pai” serem da ordem da idade da síntese solar faz com que eles ainda sejam encontrados nas rochas terrestres. Além disso, essas meias-vidas são bem maiores do que as meias-vidas dos outros membros em cada uma das séries, de modo que o equilíbrio radioativo secular é obtido nas três séries, no equilíbrio secular todos os membros da série têm a mesma atividade radiativa.

A radioatividade das rochas ígneas apresenta considerável variação em função das características químicas, mineralógicas, petrológicas e estruturais. A abundância de urânio e tório nas rochas ígneas depende da concentração inicial desses radionuclídeos, sobretudo da história pós-cristalização das rochas, pois pode ocorrer frequentemente, no momento da cristalização do magma, incorporação de minerais ricos em elementos radioativos. A radioatividade das rochas magmáticas provém de três fontes: minerais acessórios moderadamente radioativos; minerais essenciais fracamente radioativos; material radioativo localizado entre os grãos e em defeitos estruturais do cristal (FERREIRA, 2008).

Entre as rochas ornamentais e de revestimento, os granitos merecem especial destaque em termos de radioatividade natural, por apresentarem como já foi citado, maior afinidade com elementos como  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , do que os mármore e quartzitos, por exemplo. As emissões radioativas devido à série do urânio e o potássio em mármore equivalem a cerca de um décimo daquela que é encontrada em granitos, ao passo que a emissão de radiação devido ao tório em mármore é praticamente a mesma que nos granitos (CHELLAPA, 2003 apud BAÊTA, 2004).

Sabe-se atualmente que muitos materiais de construção, principalmente os que utilizam matéria-prima de origem geológica (brita, areia, cerâmica, rochas de revestimento, cimento etc.), podem apresentar teores anômalos de radioatividade, caso possuam na composição minerais radioativos ou apresentem afinidade com radioisótopos, tais como o

$^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e o  $^{40}\text{K}$  e seus radionuclídeos descendentes (BAÊTA, 2004). Essas evidências foram também comprovadas em estudos realizados por Rocha (2007), após realizar o monitoramento das frentes de lavras das pedreiras de granito do estado de Pernambuco, registrando valores de taxas de doses de radiação gama de até  $2,36 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ . Especial atenção merece o elemento  $^{222}\text{Rn}$ , gás inerte e radioativo proveniente do decaimento do  $^{226}\text{Ra}$ , da série do  $^{238}\text{U}$ , por ser emissor das partículas alfa e, como gás nobre, espalha-se rapidamente por todo o ambiente, tendo uma meia-vida de 3,8 dias. Ele e os descendentes são considerados os maiores responsáveis pela exposição da população à radiação natural. O aprisionamento cada vez mais efetivo do radônio aos ambientes agrava esse problema, devido ao selamento tanto nas regiões de clima frio, como nas de clima tropical, para a manutenção de aclimatização artificial (SILVA et al, 1997).

A composição mineralógica dos “granitos” é definida por associações muito variáveis de quartzo, feldspato, micas (biotita e moscovita), anfibólios (sobretudo hornblenda), piroxênios (aegirina, augita e hiperstênio) e olivina. Alguns desses constituintes podem estar ausentes em determinadas associações mineralógicas, anotando-se também diversos minerais acessórios em proporções bem mais reduzidas (menores que 1%). Quartzo, feldspatos, micas e anfibólios são os minerais predominantes nas rochas graníticas e granitóides (ANJOS et al., 2005).

No mercado de rochas para revestimento, o termo granito tem significado muito menos rígido, mais abrangente, pois serve para denominar rochas cristalinas de composição e origem das mais diversas, onde se incluem granitos “*stricto sensu*”, granitos gnáissicos, migmatitos, gabros, diabásicos, anortositos, piroxenitos etc. Em consonância com os objetivos do estudo foi adotado neste trabalho o conceito comercial de granito, ressaltando-se a profunda discordância com os preceitos da classificação petrográfica.

Urânio e tório são normalmente encontrados em alguns minerais acessórios (concentrações menores que 1%) presentes nas rochas ígneas e metamórficas, tais como zircão e allanita (ANJOS et al., 2005). Outros minerais altamente radioativos como a monazita, uraninita, torita e pirocloro são também frequentes na natureza, sendo a monazita um mineral de pegmatitos graníticos. A uraninita e a torita ocorrem tanto em pegmatitos graníticos como em diques de quartzo, e o pirocloro associado a sienitos alcalinos (rocha granitóide). Tanto a concentração de tório quanto à de urânio tende a ser mais elevada em

rochas félsicas claras e aumenta ainda mais com o aumento da “acidez” da rocha, sendo as maiores concentrações desses elementos observadas em pegmatitos. O potássio presente nas rochas também aumenta com a “acidez” e é normalmente encontrado em feldspato potássico, como microclina e ortoclásio, ou em micas, como moscovita e biotita. Rochas que não possuem esses minerais na composição possuem uma concentração de potássio muito baixa. Nas rochas metamórficas, a distribuição desses elementos dependerá do protólito de origem da rocha atual. As rochas sedimentares geralmente refletem o conteúdo dos elementos da rocha fonte. Se a rocha fonte apresentar composição granítica, onde são altos os teores de K, U e Th, possivelmente os sedimentos terão altos teores desses elementos. O potássio é um elemento muito frequente nos minerais, principalmente nos alumino-silicatos como os feldspato-potássicos e as micas. O conteúdo de  $K_2O$  nas rochas graníticas varia de 0,5% a 8% (FERREIRA, 2008).

Quanto à mobilidade, o urânio tende a ser altamente móvel perto da superfície da rocha, enquanto o tório é um elemento de baixa mobilidade. Assim, o urânio pode ser facilmente oxidado por soluções aquosas e ser removido dos granitos e pegmatitos por lixiviação, e redepositado em sedimentos distantes da rocha de origem.

Os minerais acessórios são os principais responsáveis pela radioatividade das rochas. Entre os diversos minerais pode-se citar o zircão, esfeno, apatita, allanita, xenotímio e a monazita. Raramente são encontrados a uranotorita, torianita, euxenita, torita e pirocloro. Na Tabela 1, são apresentados os minerais mais comuns que têm na composição os elementos urânio, tório e potássio.

**Tabela 1:** Minerais que contêm os elementos U, Th e K (KEAREY et al., 2003).

Elemento	Mineral
Potássio	Ortoclásio e microclina [ $KAlSi_3O_8$ ] Muscovita [ $(H_2KAl(SiO_4)_3$ ] Alunita [ $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ ] Silvita, carnalita [ $KCl, MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ]
Tório	Monazita [(Ce,La,Y,Th) $PO_4$ ] Thorianita [(Th,U) $O_2$ ] Thorita, uranotorita [ $ThSiO_4 + U$ ]
Urânio	Uraninita [óxido de U, Pb, Ra + Th, terras-raras] Carnotita [ $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$ ] Gummita (uraninita alterada)

É recente em todo o mundo a preocupação em se estudar os efeitos das emissões radioativas provenientes das rochas de revestimento e dos demais materiais de construção. Silva et al.(1997) realizaram medidas de dosagem de radioatividade (alfa e gama) em amostras de rochas ornamentais brasileiras, utilizadas como revestimento em Belém do Pará, e desaconselharam o uso dos materiais “Lilás Tropical” e “Café Imperial”. Entretanto, o mercado de rochas ornamentais brasileiro só começou a se preocupar com essa questão a partir da recusa de compradores chineses em aceitar um bloco do sienito “Marrom Guaíba” (ou “Roxo Gaucho”), exportado para aquele país em 2001, alegando que apresentava uma dosagem de radioatividade superior ao limite ali adotado.

Outro alerta dos riscos da utilização do uso do granito foi dado quando da publicação por Tzortzis et al.(2003) de um artigo com resultados de medições de dose de radiação gama em granitos importados, comercializados no Chipre, onde um granito brasileiro (“Café Brown”) apresentava valores superiores à dose limite adotada de 1 mSv/ano, para uma exposição de 8h/dia. Recentemente, Anjos et al. (2004) realizaram medições gamaespectrométricas em 95 diferentes tipos de granitos brasileiros, calculando a dose para cada um deles, obtendo valores diferentes daqueles encontrados por Tzortzis et al. (2003) para as mesmas rochas brasileiras. Entretanto, em nenhuma das rochas ensaiadas foram encontrados valores superiores à dose limite adotado de 1 mSv.a<sup>-1</sup>

Desde então diversos outros pesquisadores observaram que os verdadeiros granitos são exemplos importantes de rochas que apresentam teores elevados de <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th e <sup>40</sup>K, quando comparados com outros tipos de rochas e que as concentrações destes elementos radioativos estão correlacionadas com as respectivas composições minerais e características petrológicas gerais. No trabalho de Salas et al. (2005), foram analisadas 100 diferentes variedades de granitos comercializados em Belo Horizonte, oriundos das pedreiras do próprio estado de Minas Gerais e do Espírito Santo. As 100 amostras foram analisadas por diversas técnicas: autorradiografia, microscopia óptica, difractometria e análises químicas diversas, tais como: espectrometria de raios-X, fluorescência de raios-X, ativação neutrônica, gravimetria, eletrônica e microanálise de sonda, determinando, assim, a dosagem radioativa do granito comercializado na cidade de Belo Horizonte. A autorradiografia dessas amostras revelaram a presença de monozito, allanita e zircão. Já as análises químicas, revelaram concentrações de urânio e tório na faixa de 30 a 130 ppm. As

doses encontradas por Salas et al. (2005), mencionadas, ficaram na faixa de 0,11 a 0,34 mSv.a<sup>-1</sup>, abaixo do limite internacional padrão aceitável de 1,0 mSv.a<sup>-1</sup> para pessoa do público.

Das amostras analisadas 23 continham excesso de U e Th (60 ppm), nessas amostras foram identificados: SiO<sub>2</sub> (59,7-76,5 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11,7-15,6 %), K<sub>2</sub>O (3,8-7,4 %), Na<sub>2</sub>O (1,91-4,52 %) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1-8 %). Outros óxidos analisados foram o CaO, MgO e TiO<sub>2</sub>, que apresentaram concentrações menores que 1,33%. Estudos realizados recentemente na Grécia por Pavlidou (2006), utilizando 16 amostras de diferentes tipos de granitos utilizados como material de construção, importados do Brasil e da Espanha, revelaram níveis de doses acima do limite recomendado. Foram encontradas concentrações de <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th e <sup>40</sup>K da ordem de 64 Bq.kg<sup>-1</sup>, 81 Bq.kg<sup>-1</sup> e 1104 Bq.kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

Em outro estudo, realizado por Tzortzis (2003), utilizando amostras de uma variedade de piso granítico pulverizado da Ilha de Chipre, nas proximidades da Turquia, constatou-se, por meio de espectrometria gama de alta resolução, que as concentrações de radionuclídeos são ainda mais elevadas, pois as concentrações de <sup>232</sup>Th variaram de 1 a 906 Bq.kg<sup>-1</sup>, as de <sup>238</sup>U de 1 a 588 Bq.kg<sup>-1</sup>, enquanto as de <sup>40</sup>K foram de 50 Bq.kg<sup>-1</sup> a 1606 Bq.kg<sup>-1</sup>, com as taxas de doses no interior das construções na faixa de 0,02 a 2,97 mSv.a<sup>-1</sup>. Uma das maiores concentrações de <sup>232</sup>Th e <sup>226</sup>Ra em granitos, utilizados como material de construção, foram encontradas em estudos realizados por Soratin e Steger (1979), na Áustria. O estudo revelou uma concentração média de <sup>232</sup>Th de 24,6 Bq.kg<sup>-1</sup>, com valores variando de 16 Bq.kg<sup>-1</sup> a 185,9 Bq.kg<sup>-1</sup> e uma concentração média de 55,4 Bq.kg<sup>-1</sup> de <sup>226</sup>Ra, com valores variando entre 9,7 Bq.kg<sup>-1</sup> e 117,2 Bq.kg<sup>-1</sup>.

Estudos realizados por El-Shershaby (2002) no nordeste do deserto do Egito, analisando 50 amostras do granito de Gable Gattar II por meio de espectrometria gama, utilizando um detector de germânio hiperpuro, revelaram que as concentrações de <sup>238</sup>U e <sup>232</sup>Th variaram de 165 Bq.kg<sup>-1</sup> a 27851 Bq.kg<sup>-1</sup> e 71 Bq.kg<sup>-1</sup> a 274 Bq.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Observou-se também que as atividades de <sup>40</sup>K variam somente ligeiramente (1048 Bq.kg<sup>-1</sup> a 1230 Bq.kg<sup>-1</sup>). Outra pesquisa também utilizando espectrometria gama foi realizada por Ajayi e Kuforiji (2000) nos estados de Ondo e Ekiti na Nigéria. A natureza radiativa do granito foi mais uma vez mensurada, dessa vez por meio de um detector de iodeto de sódio (NaI), revelando atividade de <sup>40</sup>K em torno de 4,75

Bq.kg<sup>-1</sup> enquanto para o <sup>238</sup>U foi encontrado o valor de 13,38 Bq.kg<sup>-1</sup> e para o <sup>232</sup>Th eles encontraram 3,31 Bq.kg<sup>-1</sup>.

Em estudo recente, Osmanlioglu (2006), após analisar 40 amostras de granitos da Turquia, por meio de espectrometria gama utilizando um detector de germânio hiperpuro, obteve valores médios das concentrações de <sup>238</sup>U igual a 15,9 Bq.kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th igual a 33,8 Bq.kg<sup>-1</sup> e de <sup>40</sup>K equivalentes a 359 Bq.kg<sup>-1</sup>. A taxa de dose devido à atividade mais elevada não excedeu a dose de 0,4 mSv.a<sup>-1</sup>, bem abaixo do limite de dose admissível para pessoas do público, segundo recomendações internacionais. Em outro estudo, realizado dessa vez por El-Arabi (2007), analisando 49 amostras graníticas do Egito, classificados por ele como granitos novos e velhos, obteve valores de doses para área externa ao local de estudo variando de 0,04 mSv.a<sup>-1</sup> a 30,37 mSv.a<sup>-1</sup>.

Resultados semelhantes aos encontrados por Tzortzis (2003) foram obtidos por Rocha (2007), ao monitorar blocos graníticos das pedreiras ativas de granito do estado de Pernambuco, encontrando valores de dose variando de 0,28 a 2,36 mSv.a<sup>-1</sup>.

### **2.2.2 Urânio em rochas**

Principalmente por causa do baixo Clarke<sup>2</sup> global (2,5 ppm) (KRAUSKOPF, 1979), o urânio tende a concentrar-se na fase final da diferenciação magmática, principalmente em pegmatitos graníticos, onde ocorre em um grande número de minerais.

Com base nesse comportamento, apresenta-se a Tabela 2, que mostra os clarkes específicos em algumas rochas magmáticas e sedimentares.

---

<sup>2</sup> Clarke é o teor médio de um elemento químico na crosta continental.

**Tabela 2:** “Clarkes” do urânio nos principais tipos de rochas magmáticas, segundo diferentes autores em Wedepohl (1978).

<b>ROCHAS MAGMÁTICAS (ppm)</b>				
	<b>ULTRABÁSICA</b>	<b>BÁSICAS</b>	<b>INTERMÉDIAS</b>	<b>ÁCIDAS</b>
<b>MIN</b>	0,003	0,5	1,8	3,5
<b>MÁX</b>	0,03	0,6	4,0	6,0
<b>ROCHAS SEDIMENTARES (ppm)</b>				
	<b>FOLHELHOS</b>	<b>CALCÁRIO</b>	<b>ARENITOS</b>	
	3,7	2,2	0,45	
	3,7	2,0	1,02	

O urânio é encontrado em rochas graníticas e solos por todo o mundo. Os núcleos de  $^{238}\text{U}$  existente hoje correspondem à metade da concentração da existente no momento da formação da Terra, em razão da elevada meia-vida, que é da ordem da idade do Planeta Terra. Por esse motivo, a quantidade de urânio existente nas rochas e nos solos permanece, praticamente, constante (RODRIGUES, M.; DIAS, F., 2008). O urânio ocorre na Crosta Terrestre na forma de  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ , nos percentuais de 99,27% de  $^{238}\text{U}$  para 0,72% de  $^{235}\text{U}$ . Ele participa nas rochas da Crosta Terrestre como elemento traço com uma concentração média de 2,7 ppm na costa continental e 0,9 ppm na crosta oceânica. Ele apresenta duas valências  $\text{U}^{+6}$ , que em associação com complexos do tipo  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  formam diversos minerais solúveis, e na forma reduzida  $\text{U}^{4+}$ , está contido geralmente nos minerais insolúveis. O urânio pode ser encontrado nas rochas através de diversas mineralogias, em minerais à base de óxidos, a uranita; como silicatos, uranotorita, na forma primária, em minerais como a monazita, o xenotímio e o zircão; na forma de traços em outros minerais. Pela espectrometria gama, o urânio é detectado pelas emissões gama do decaimento do  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Pb}$  membros da série do  $^{238}\text{U}$ , sendo que essa determinação do urânio, neste caso, pressupõe existir equilíbrio radioativo na referida série. Por sua baixa abundância isotópica, o  $^{235}\text{U}$  e sua série não contribuem significativamente para a radiação gama quando comparada a série do  $^{238}\text{U}$ , (SAPUCAIA, 2004).

### 2.2.3 Tório em rochas

O tório é encontrado em quantidades pequenas na maioria das rochas e solos, onde é aproximadamente três vezes mais abundante do que o urânio e é tão comum quanto o chumbo. O solo contém geralmente uma média de 5,8 ppm de tório, ele ocorre em diversos minerais, sendo o mais comum o mineral de terra rara, monazita ( $\text{CePO}_4$ ), que contém até 12% de óxido de tório. Existem depósitos substanciais em vários países (KRAUSKOPF, 1979).

Em estado natural, o tório contém apenas o radioisótopo  $^{232}\text{Th}$  (100%). O tório também aparece como um elemento traço na Crosta Terrestre com uma concentração média de 5,8 ppm na crosta continental e 2,7 ppm na crosta oceânica. Ele ocorre nos estados de valência  $\text{Th}^{4+}$  e  $\text{Th}^{3+}$ , sendo raros na natureza e instáveis em ambiente aquoso. Nas rochas, o tório pode estar presente na alanita, na monazita, no xenotímio e no zircão com teores maiores de 1000 ppm. Devido à semelhança geoquímica do tório com elementos como o zircônio (Zr), háfnio (Hf), cério (Ce) e também o urânio, nos minerais que contêm estes elementos também pode ser encontrado Th por substituição iônica com ocorrência do tipo: Zr por Th, em minerais de zircão; Hf ou Ce ou Th, na maioria dos minerais de terras-raras; e U por Th, em minerais de urânio (SAPUCAIA, 2004).

Pela espectrometria gama, o tório nas rochas é detectado pelas emissões gama do decaimento do  $^{228}\text{Ac}$  e  $^{208}\text{Tl}$ . A determinação do tório por esse método pressupõe, portanto, o equilíbrio radioativo dos membros da série.

### 2.2.4 Potássio em rochas

Dos oito isótopos do potássio, apenas o  $^{40}\text{K}$  é instável, com meia-vida física de  $1,3 \times 10^9$  anos, meia-vida biológica de 30 dias, abundância natural de 0,0117%, emissor gama com energia aproximada de 1,46 MeV, probabilidade de emissão gama de 10,7% e tem atividade específica de  $31 \text{ kBq.kg}^{-1}$  ( $836 \text{ pCi.g}^{-1}$ ) (EISENBUD, GESELL, 1997). O potássio está contido em rochas típicas em uma faixa que varia de 0,3 até 4,5%, frequentemente encontrado em basaltos, areias e em rochas graníticas normalmente com

teores consideráveis. A Tabela 3 apresenta limites de concentrações de  $^{40}\text{K}$  em rochas típicas, no solo e na crosta terrestre.

Conforme observado na tabela abaixo, as rochas graníticas são as que apresentam maiores teores de  $^{40}\text{K}$  (superior a 4,0%). Teores próximos a esse, podem ser encontrados em outros tipos de rochas (0,3% a 4,5%). A Tabela 3 mostra as concentrações de  $^{40}\text{K}$  em rochas, solo e na crosta terrestre.

**Tabela 3:** Concentrações de  $^{40}\text{K}$  em rochas, solo e na crosta terrestre - Eisenbud, 1997.

TIPO DE ROCHA		[C %]	A (Bq.kg <sup>-1</sup> )
<b>Ígneas</b>	Basalto (média da crosta)	0,8	300
	Máfica	0,3 a 1,1	70 a 400
	Granito (média da crosta)	> 4,0	> 1.000
<b>Sedimentares</b>	Xisto arenoso	2,7	800
	Carbonáticas	0,3	70
	Demais rochas	0,3 a 4,5	70 a 1.500
	Crosta continental (média)	2,8	850
	Solo	1,5	400

O potássio é definido como um dos componentes principais da crosta terrestre, com concentração média de 2,5% na crosta continental e 0,4% na crosta oceânica (FOWLER, 1990). Os principais minerais à base de potássio são: os feldspatos potássicos, principalmente o ortoclásio e o microclina, com aproximadamente 13% de potássio; as micas, biotita e a moscovita, com aproximadamente 8 % de potássio. Conseqüentemente, as rochas ácidas, como os granitos, sienitos, sienogranitos e leucogranitos, apresentam altos teores de potássio, situação contrária das rochas básicas (gabros, peridotitos, etc.). Ao contrário do urânio e do tório, o potássio é um elemento muito frequente nos minerais, principalmente nos alumino-silicatos como os feldspatos potássicos e as micas (SAPUCAIA, 2004).

### 2.2.5 Distribuição dos elementos U, Th e K nas rochas

Os elementos K, U e Th mostram um relativo aumento em seus teores quando aumenta o teor de sílica nas rochas ígneas, além de uma considerável variação em função das características químicas, mineralógicas, petrológicas e estruturais (DICKSON; SCOTT, 1997). A abundância desses elementos (principalmente o urânio e o tório) nas principais rochas ígneas, tanto básicas como ácidas, fundamenta-se em alguns fatores como o teor de sílica, idade relativa e posição dentro de um único pluton. Desta forma, os teores desses elementos nas rochas ígneas podem ter diversas origens: nos minerais acessórios; entre os grãos; e em defeitos estruturais dos minerais. Nas rochas metamórficas, a distribuição desses elementos dependerá do protólito de origem da rocha atual. As rochas sedimentares geralmente refletem o conteúdo dos elementos da rocha fonte. Se a rocha fonte apresentar composição granítica, onde são altos os teores de K, U e Th, possivelmente os sedimentos terão altos teores desses elementos. Normalmente, nos sedimentos arenosos o teor de urânio é menor que 1 ppm em razão da facilidade de lixiviação. Nos folhelhos, o urânio é fixado na matéria orgânica, atingindo concentrações médias de 40 ppm segundo Vasconcellos et al. (1994) apud Lima et al (1999).

É importante salientar que as concentrações de minerais radioativos poderão apresentar-se em quantidades anômalas nos granitos, pois no momento da fusão das rochas metamórficas para a formação das rochas magmáticas, onde se enquadram os granitos, pode haver uma deposição elevada de minerais com altos teores de radionuclídeos, que serão fixados no granito no momento do resfriamento do magma, devido ao movimento natural de elevação das camadas mais profundas da Terra, garantindo assim a solidificação do magma e a formação natural do granito.

A Tabela 4 sumariza as concentrações médias dos elementos U, Th e K, nas principais rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

**Tabela 4:** Teores dos radioelementos K, U e Th nas principais rochas (RYBACH, 1988).

<b>Tipo de Rocha</b>	<b>K (%)</b>	<b>U ppm</b>	<b>Th ppm</b>
<b>Rochas Ígneas</b>			
Granito / Riolito	3,6	3,9	16,0
Granodiorito / Dacito	2,6	2,3	9,0
Diorito	1,1	1,7	7,0
Quartzo - diorito			
Gabo / basalto	0,4	0,5	1,6
Peridotito	0,006	0,02	0,006
<b>Rocha Metamórfica</b>			
Migmatito	4,0	2,7	18,5
Granito gnáissico	3,1	4,9	13,10
Granulito	1,8	1,0	4,4
Filito	1,8	2,0	5,9
<b>Rochas Sedimentares</b>			
Arenito	0,9	0,6	1,8
Grauvaca	1,3	2,0	7,0
Calcário	0,3	2,0	1,5
Folhelho	2,3	1,5	5,0

1% ----- 10.000 ppm

### 2.3 Dosimetria pessoal

A dosimetria pessoal tem como finalidade determinar o nível de doses de radiação recebida pelo usuário como decorrência de seu trabalho (MCKEEVER et al., 1985). Como exemplos têm-se os técnicos em radioterapia, pessoas que trabalham com reatores nucleares, em embarcações movidas à energia nuclear, entre outros. A dosimetria pessoal é uma medida de grande responsabilidade, pois permite uma indicação das condições de funcionamento da aparelhagem utilizada, bem como serve para orientação médica em casos

de acidentes de sobre-exposição. Uma dosagem elevada pode indicar também a maneira incorreta de trabalho, aparelhagem ou instalações com problemas de blindagem.

O limiar de dose de cada trabalhador está descrito nos limites de segurança; esses níveis são baseados nas recomendações da ICRP (International Commission on Radiological Protection). Em dosimetria é importante o conhecimento de algumas grandezas. A seguir é apresentada a definição de dose equivalente utilizada na dosimetria de acordo com a ICRP-60:

A dose equivalente (H) é definida como:

$$H = D \cdot W_R \cdot N$$

A unidade é o J/kg, que corresponde a 1 sievert (1 Sv).

Onde D é a dose,  $W_R$  é um fator de ponderação, atribuído a diferentes tipos de radiações, por exemplo: igual a 1 para radiações beta, gama, e raios-X e 20 para partículas alfa) e N é um fator que leva em conta outros fatores que influenciam a dose absorvida (geometria de irradiação, fator de distribuição do radioisótopo dentro do corpo etc.), sendo 1 para a maioria das aplicações. Usando o fator de ponderação  $W_R$  é possível relacionar os riscos da radiação para diferentes partes do corpo e prever os efeitos de radiações de naturezas diferentes.

O fator de ponderação é função da transferência linear de energia, geralmente expressa em keV/mm, tendo a água como meio de referência. O fator de ponderação é utilizado apenas para aplicações rotineiras de proteção radiológica e não deve ser utilizado para avaliar os efeitos biológicos de exposições acidentais. A unidade da dose equivalente é o sievert (Sv), que corresponde a 1 joule por quilograma (J/kg). Também pode ser expressa em rem (roentgen equivalent man), em desuso. Vale a relação: 1 Sv = 100 rem.

Em radioproteção também é utilizada a dose equivalente efetiva, que leva em conta as diferentes partes do corpo através de um fator  $W_T$ , além do fator de qualidade da radiação. Os valores desses fatores correspondentes a cada parte do corpo são tabelados em normas de radioproteção da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) na ICRP-60 e podem ser encontrados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Fatores de Peso da Radiação,  $W_R$ 

<b>Tipos e faixas de Energia</b>	<b>Fatores de peso da radiação, <math>W_R</math></b>
Fótons de todas as energias	1
Elétrons e muons, de todas as energias	1
Nêutrons, energia < 10 eV	5
10 keV a 100 keV	10
>100 keV a 2 MeV	20
>2 MeV a 20 MeV	10
>20 MeV	5
Prótons, exceto os de recuo, energia > 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

As principais áreas de uso de materiais dosimétricos incluem Dosimetria Pessoal, Dosimetria Ambiental, Dosimetria Clínica e Dosimetria de Altas Doses (MCKEEVER, 1985).

A determinação experimental de doses é em geral realizada utilizando-se um simulador do corpo humano, geralmente a água, por ser um dos principais componentes dos tecidos do corpo humano (exceto pulmões e ossos). Detectores de radiação são colocados dentro do simulador, em várias profundidades com relação ao plano de incidência do feixe. Os valores de dose medidos em várias profundidades e para vários tamanhos de campos de irradiação são compilados em tabelas de dose relativa que servem de referência para o cálculo da dose nas tarefas rotineiras da radioterapia. A Portaria nº 4, de 11 de abril de 1994, da Secretária de Segurança e Saúde do Trabalho do Ministério do Trabalho, estabeleceu que os limites de tolerância para Radiações Ionizantes são os que constam na norma da CNEN de Diretrizes Básicas de Radioproteção.

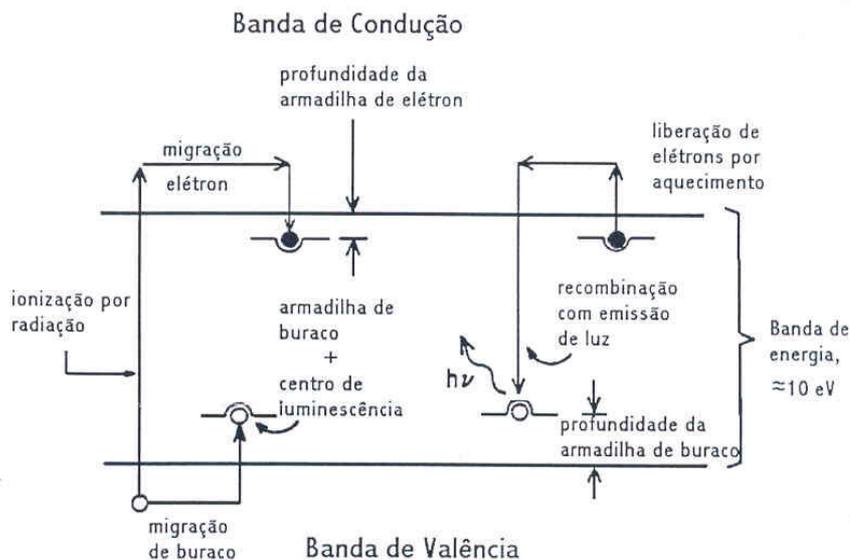
## **2.4 Termoluminescência**

Alguns materiais, quando aquecidos, após serem expostos à radiação ionizante apresentam a propriedade de emitir luz. Esse fenômeno é conhecido como termoluminescência e o material que apresenta essa característica é denominado material termoluminescente (TL).

O fenômeno da termoluminescência é conhecido há bastante tempo. Em 1663, Robert Boyle já notificava à “Royal Society”, em Londres, haver observado a emissão de luz por um diamante, quando fora aquecido no escuro (SCHARMANN et al., 1981). A partir de então, um grande número de cientistas, alguns famosos, como Henry Becquerel, passaram a trabalhar com o fenômeno e, em 1904, Marie Curie observou que as propriedades TL dos cristais podiam ser restauradas expondo-os à radiação do rádio (MCKEEVER et al., 1985). Entre 1930 e 1940, Urbach realizou trabalhos experimentais e teóricos com termoluminescência (SCHARMANN et al., 1981). Em 1945, Randall e Wikins desenvolveram um primeiro modelo que permitiu cálculos quantitativos da cinética termoluminescente. Posteriormente, foram desenvolvidos outros modelos, baseados no de Randall e Wikins, na tentativa de ajustar melhor a teoria aos resultados experimentais.

## **2.5 Dosímetro termoluminescente**

A luminescência é a emissão de luz por um material após ter absorvido energia eletromagnética (radiação ionizante ou luz ultravioleta). Dependendo do tempo decorrido entre a excitação e a emissão da luz, a luminescência pode ser classificada em fluorescência ou fosforescência. Um processo no qual o tempo é menor que  $10^{-8}$  s é classificado como fluorescência, enquanto processos com valores de tempo da ordem de alguns segundos são classificados como fosforescência (CHEN, MCKEEVER, 1997). Fatores que retardam a emissão da luz, aumentando o tempo característico de emissão como, por exemplo, a presença de impurezas ou de defeitos, que formam armadilhas onde os portadores de carga podem ser aprisionados impedindo determinadas transições entre níveis de energia. A formação das armadilhas em um cristal pode ser mais bem compreendida através do modelo de bandas. Na Figura 1 é apresentado o esquema do processo termoluminescente.



**Figura 1:** Processo termoluminescente (MORAES et al., 1999).

A aplicação da termoluminescência à dosimetria das radiações ionizantes data de 1940, quando o número de trabalhadores expostos a essas radiações aumentou e foram iniciados esforços no sentido de se desenvolver novos tipos de dosímetros. Entre os pioneiros da dosimetria termoluminescente, os mais importantes foram, inquestionavelmente, Daniels, a partir de 1953, e Cameron, a partir de 1961, com pesquisas sobre o uso do fluoreto de lítio (LiF) como dosímetro (CAMPOS, 1998).

Muitos compostos cerâmicos possuem propriedades termoluminescentes. Entretanto, um material termoluminescente só pode ser utilizado como dosímetro se combinar algumas características específicas. Essa exigência limita bastante o número dos materiais TL passíveis de emprego na dosimetria das radiações. Segundo Campos (1998), como características específicas que um dosímetro termoluminescente deve apresentar podem ser citadas as seguintes: alta concentração de elétrons ou buracos e alta eficiência de emissão de luz associada com o processo de recombinação; estabilidade de armadilhamento dos elétrons ou buracos nas armadilhas à temperatura em que o material vai ser utilizado (decaimento térmico); um espectro de emissão TL dentro da sensibilidade da fotomultiplicadora para evitar interferência da emissão incandescente, infravermelha, do próprio equipamento de medida. O recomendado é um espectro com comprimentos de onda entre 300 e 500nm; temperatura do pico principal entre 180 e 250<sup>0</sup>C; uma curva de emissão simples, de preferência com um único pico, para maior facilidade de operação e

interpretação da leitura; fácil tratamento térmico de reutilização; resistência a diversos fatores ambientais, tais como luz, umidade, solventes orgânicos, poluição e gases; uma resposta que varie linearmente para um amplo intervalo de dose absorvida; baixo custo e facilidade de obtenção. Obviamente, é difícil encontrar todas essas características em um único material detector. Os dosímetros TL comumente utilizados apresentam, quando muito, um compromisso razoável entre as características citadas (CAMPOS, 1998).

A natureza nos fornece alguns materiais cerâmicos adequados para aplicação em termoluminescência, o BeO, o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o CaF<sub>2</sub> (fluorita), mas muitos materiais requerem a adição de impurezas para a criação de armadilhas e centros luminescentes. Isso faz com que o número de materiais TL aumente, uma vez que podem ser utilizados diferentes tipos de dopantes. Os materiais mais populares produzidos em laboratório são: LiF:Mg,Ti; LiF:Mg,P,Cu; CaF<sub>2</sub>:Mn; CaF<sub>2</sub>:Dy; CaSO<sub>4</sub>:Dy; CaSO<sub>4</sub>:Mn; Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Mn; Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu; MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Dy.

O uso de isótopos permite ampliar as aplicações dos materiais, por exemplo, a utilização dos isótopos naturais do lítio, o <sup>6</sup>Li e o <sup>7</sup>Li, cujas secções de choque para nêutrons térmicos são 940 e 0,04b (barn)<sup>3</sup>, respectivamente. Essa grande diferença na secção de choque leva a uma diferença similar na sensibilidade do <sup>6</sup>LiF e <sup>7</sup>LiF como detector para a dosimetria de nêutrons (CAMPOS, 1998).

## 2.6 Dosímetros de CaSO<sub>4</sub>:Dy (TLD-900)

Atualmente, esses dosímetros são os materiais termoluminescentes mais utilizados no Brasil no monitoramento ambiental, por possuírem excelentes propriedades dosimétricas e por ser, segundo Yang (2002), um dos materiais TL mais sensíveis já avaliados. Esses detectores são utilizados em diversas práticas envolvendo radiação ionizante, por exemplo, a dosimetria pessoal, sobretudo para a dosimetria da radiação gama.

---

<sup>3</sup> 1b = 10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>

## **2.7 Sistema de leitura TLD**

O aparelho usado para aquecer o detector TLD e medir a luz termoluminescente emitida é chamado leitor ou leitora termoluminescente. Esse aparelho, disponível comercialmente, é constituído basicamente de um dispositivo para aquecer o detector e uma fotomultiplicadora para captar a luz emitida e amplificar o sinal relativo.

### **2.7.1 Tratamento térmico dos TLDs**

O material termoluminescente pode ser reutilizado para novas medidas de dose de radiação, mediante um tratamento térmico (tratamento térmico de pré-irradiação), o que os tornam economicamente viável no monitoramento ambiental e nos demais. O tratamento térmico dos dosímetros tem por objetivo devolver ao material as propriedades termoluminescentes (TL) que ele possuía antes de ser exposto à radiação ionizante. O tratamento térmico corresponde ao aquecimento do cristal TL, até uma dada temperatura, seguida de resfriamento. O objetivo desse tratamento térmico é restabelecer a estrutura original do dosímetro termoluminescente. A sensibilidade do cristal TL é influenciada por esse tratamento térmico, mas a variação na sensibilidade do material TL depende da duração e da temperatura do tratamento a que ele tenha sido submetido. É necessário adotar-se tratamento térmico padrão para se obter resultados reproduzíveis.

Abaixo estão os termos utilizados no tratamento térmico dos dosímetros termoluminescentes e os respectivos significados:

**I-** Taxa de aquecimento: corresponde ao aumento de temperatura do dosímetro por unidade de tempo.

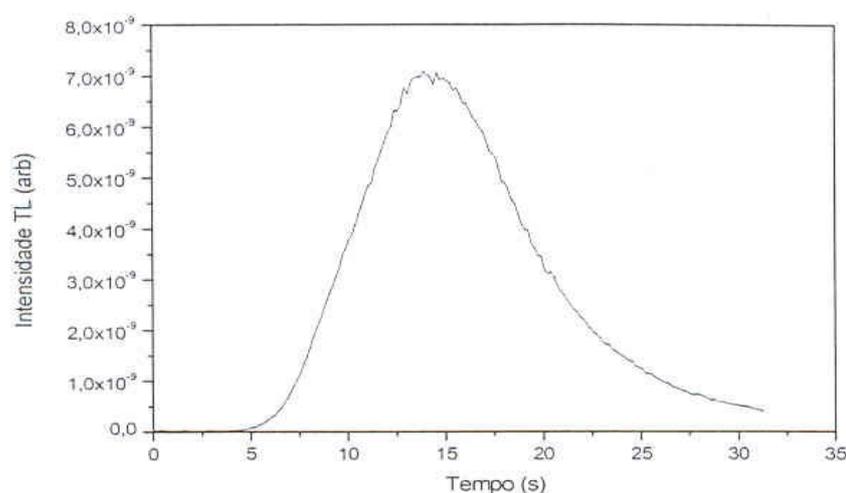
**II-** Temperatura máxima: temperatura na qual o dosímetro pode ser submetido para que toda a energia seja liberada e as propriedades físico-químicas não sejam afetadas.

**III-** Tempo de processamento: intervalo de tempo em que é efetuada a leitura do dosímetro.

## 2.7.2 Curva de emissão termoluminescente

A curva de emissão caracteriza material termoluminescente. Ela relaciona a luz emitida pelo policristal, em função da temperatura ou do tempo de aquecimento. Na Figura 2, pode-se observar uma dessas curvas, mas algumas vezes elas apresentam mais de um pico. Cada um deles está associado a uma determinada armadilha, que pode ser de elétrons ou buracos de profundidade, caracterizado pela temperatura onde ocorre o máximo de emissão. A formação de um pico de emissão TL está relacionada com a probabilidade de escape do elétron, ou buraco, da armadilha correspondente. Ou seja, quando a temperatura do material é menor que a do pico considerado, poucos portadores de carga (elétrons ou buracos) são liberados, e a luz emitida é fraca. Aquecendo-se o cristal, a probabilidade de escape aumenta, causando aumento da emissão, que é máxima na temperatura do pico. A intensidade decresce, em seguida, devido à redução de portadores de carga armadilhados.

A forma da curva de emissão depende dos tipos de armadilhas e dos centros de luminescência existentes no cristal, da razão de aquecimento e do aparelho detector utilizado. A presença de mais de um pico na curva revela a existência de mais de um tipo de armadilha. A Figura 2, exemplifica a curva de emissão TL dos detectores  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e Teflon.



**Figura 2:** Curva de emissão TL típica dos detectores  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (TLD-900) (MORAES et al, 1999).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na cidade do Recife, no interior de diversos ambientes públicos e privados: um hospital, um restaurante, um hotel, uma copa de departamento, dois laboratórios de análises clínicas, um edifício público muito extenso e em cinco residências da cidade.

#### 3.2 Seleção dos pontos de monitoramento e procedimentos legais

Inicialmente foi feito levantamento de ambientes que apresentavam granitos nos interiores, com presença constante de grande número de pessoas. Escolhidos os locais, foram realizadas consultas prévias aos proprietários das residências e encaminhados ofícios do Departamento de Energia Nuclear às empresas que se pretendia monitorar, no intuito de obter-se autorização para a realização do monitoramento ambiental.

#### 3.3 Localização dos pontos monitorados

Na Tabela 6, são apresentadas as coordenadas geográficas dos pontos monitorados.

**Tabela 6:** Geoposicionamento dos locais monitorados.

LOCAIS MONITORADOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
	LATITUDE (SUL)	LONGITUDE (WGr)
Residência 1	7° 57,17'	34° 53,17'
Residência 2	8° 1,91'	34° 55,25'
Residência 3	8° 2,58'	34° 56,72'
Residência 4	8° 2,25'	34° 56,12'
Residência 5	8° 1,50'	34° 57,65'
Hospital	8° 3,86'	34° 53,61'
Hotel	8° 7,52'	34° 53,84'
Restaurante	8° 2,74'	34° 56,88'
Extensa área de grande visitação pública	8° 7,00'	34° 55,00'
Copa de departamento	8° 3,46'	34° 57,31'
Laboratório de análises clínicas A	8° 3,46'	34° 53,96'
Laboratório de análises clínicas B	8° 3,46'	34° 53,96'

Na Tabela 6, encontra-se o geoposicionamento das cinco residências investigadas, que foram enumeradas de 1 a 5 para facilitar a identificação, o mesmo procedimento foi adotado para os laboratórios monitorados, que receberam denominações A e B, respectivamente. As coordenadas foram expressas em graus com precisão de minuto, com duas casas décimas, sistema adotado pelo GPS utilizado e que foi mantido para evitar erros de interpretação na localização dos pontos.

### 3.4 Dosímetro e métodos utilizados

Os granitos ornamentais foram monitorados por meio da utilização de dosímetros termoluminescentes (TLDs) de sulfato de cálcio dopado com disprósio ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ), conhecido comercialmente por TLD-900, fabricado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN, SP), medindo 6,0mm de diâmetro e 0,8mm de espessura.

As pastilhas foram cedidas pelo Laboratório de Monitoramento Individual Externo (LMIE) do CRCN-NE/CNEN para a realização deste estudo. Na Figura 3, são apresentadas 50 pastilhas de sulfato de cálcio dopadas com disprósio inseridas no disco da leitora de TLDs, ladeadas por uma lupa e uma pinça utilizada no manuseio das referidas pastilhas.



**Figura 3:** Disco contendo 50 TLD-900, ladeado por instrumentos utilizados no manuseio.

### 3.5 Pré-seleção e calibração dos dosímetros termoluminescentes

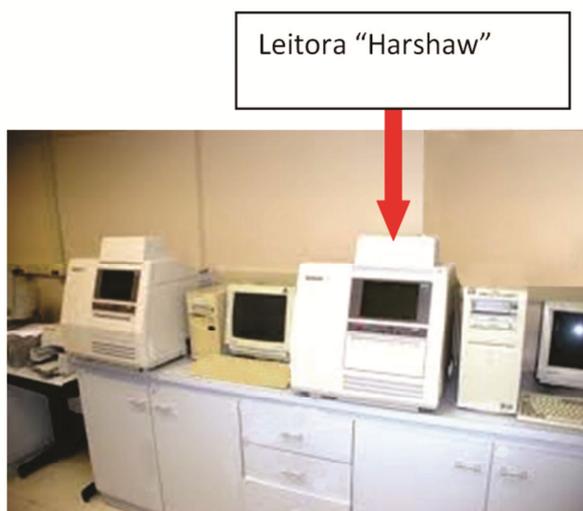
Os dosímetros foram inicialmente pré-selecionados para este estudo no LMIE, para que se pudesse obter um fator resposta satisfatório para cada um deles. Para isso os dosímetros foram individualmente calibrados, utilizando-se procedimento padrão adotado no Laboratório de Termoluminescência do CRCN-NE/CNEN. Consiste em irradiá-los, expondo-os a uma fonte gama com um valor de kerma no ar igual a 5 mGy. Para a irradiação dos dosímetros foi utilizada uma fonte padrão  $^{137}\text{Cs}$ , marca J.L.Shepherd & Associats, modelo 28-8A, série 10354, com atividade de 12 Ci (444 GBq) em 13.05.2003 e energia de aproximadamente 662 keV. Esse procedimento foi repetido três vezes. No final de todas as irradiações, os dosímetros foram analisados numa leitora automática interligada a um sistema informatizado de análise. Os testes de homogeneidade apresentaram desvio padrão máximo de 5% para o lote de dosímetros selecionados para o estudo, valor bastante aceitável, considerando-se as flutuações inerentes a todo o processo de fabricação, aquecimento, irradiação e leitura das pastilhas.

### 3.6 Tratamento térmico dos dosímetros termoluminescentes

Os dosímetros termoluminescentes necessitam receber pré-tratamento térmico antes da sua reutilização. O pré-tratamento térmico tem o objetivo de anular os dosímetros, ou seja, liberar as energias armazenadas no monitoramento anterior, zerando os registros de doses anteriores e restabelecendo os armadilhamentos. O pré-tratamento térmico dos dosímetros utilizados neste estudo foi realizado no LMIE do CRCN/NE, em um forno automático PTW-Freiburg, modelo TLDO, fabricado pela Bicron, onde as pastilhas dosimétricas foram aquecidas por aproximadamente 10 minutos a 300°C. Em seguida, foram retiradas do forno, voltando lentamente à temperatura ambiente. Os dosímetros termoluminescentes, durante todo o processo de utilização, recebem outros tratamentos térmicos.

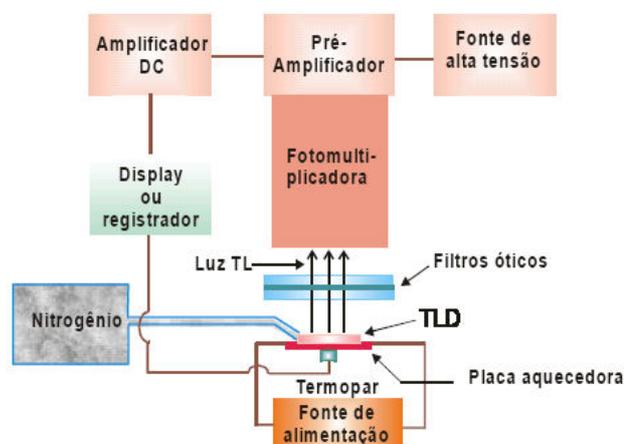
### 3.7 Leitura dos dosímetros

Os dosímetros foram inseridos numa leitora automática “Harshaw Nuclear Systems”, modelo 5.500, série 9705139, pertencente ao CRCN-NE/CNEN, que forneceu os relatórios. A leitora, que pode ser observada na Figura 4, avalia a dose em função da emissão de luz.



**Figura 4:** Leitora de TLD automática “Harshaw” interligada ao microcomputador.

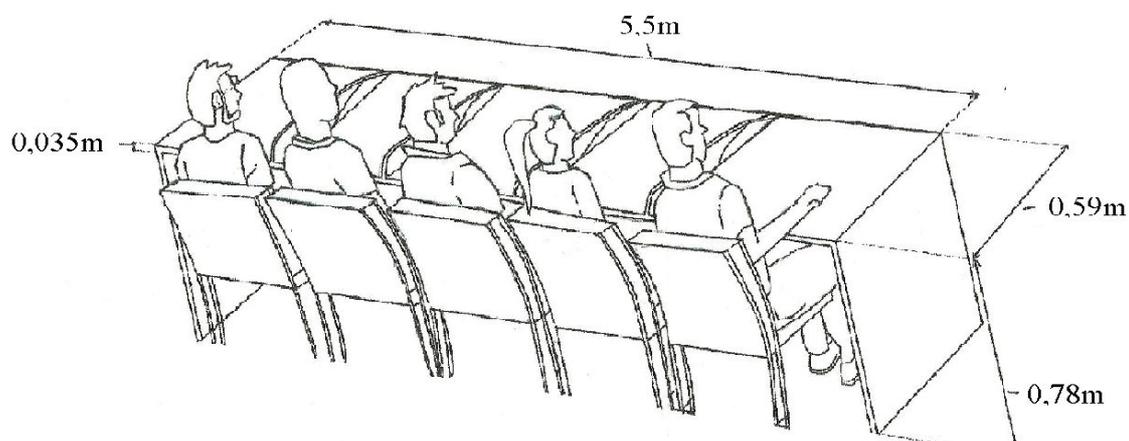
A leitora é composta por um sistema que faz aquecimento controlado, transformando o sinal luminoso em sinal elétrico amplificado, conforme esquema apresentado na Figura 5.



**Figura 5:** Esquema de uma leitora de TLD (CAMPOS, 1998).

Após a leitura, os dosímetros receberam novo tratamento térmico no mesmo forno automático, sendo aquecidos às mesmas temperaturas e intervalos de tempo mencionados, para eliminar toda a radiação recebida. Depois disso, os dosímetros foram enumerados e plastificados com filme PVC transparente, usando-se uma seladora elétrica do LMIE, para protegê-los da umidade, poeira e da poluição atmosférica. Em seguida, levados ao campo, foram afixados com fita e etiqueta de identificação, informando tratar-se de material de pesquisa do Departamento de Energia Nuclear (DEN). Na etiqueta, constava também o nome do pesquisador responsável, bem como o número do telefone do Departamento para contato e possível devolução de algum desses dosímetros que porventura se descolasse do objeto de estudo.

A distribuição dos TLDs nas placas de granito foi feita de forma sistemática, tendo-se o cuidado de fixá-los nos objetos de granito, em pontos de maior proximidade dos usuários, com o objetivo de se detectar o nível de exposição gama a que os indivíduos estavam submetidos. Na Figura 6, é apresentado desenho esquemático de um dos objetos monitorados (balcão de recepção coletivo), onde se encontram cinco recepcionistas.

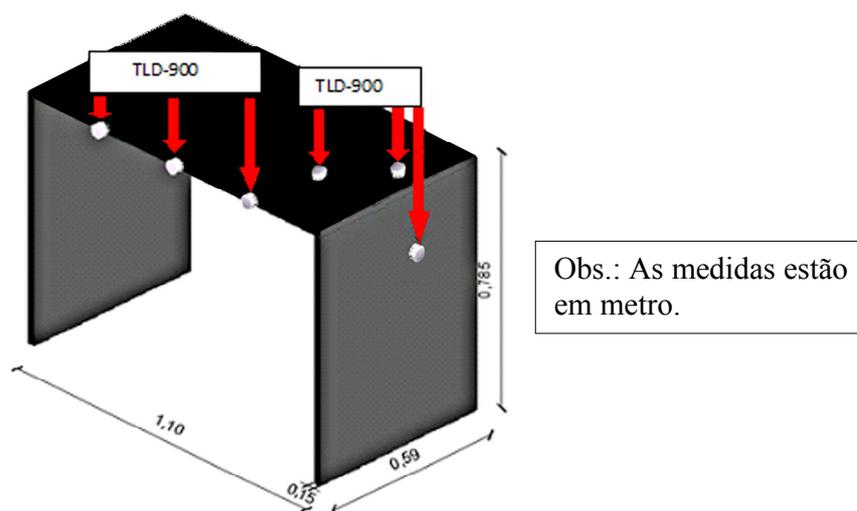


**Figura 6:** Desenho esquemático de um dos balcões de granito monitorado.

### 3.8 Objetos monitorados

Os dosímetros termoluminescentes foram distribuídos em diferentes locais e objetos de granito encontrados na cidade do Recife e também na Região Metropolitana: quatro mesas redondas de granito de um restaurante de grande visitação pública utilizadas pelos frequentadores; formadas por um tampo de 1m de diâmetro com 0,02m de espessura e medindo 0,74m de altura; dois balcões de recepção encontrados em dois laboratórios de análises clínicas, medindo: 5,5m de comprimento, 0,78m de altura, 0,59m de largura e 0,035m de espessura. Uma pia e paredes internas revestidas em granito no banheiro de um hotel de grande rotatividade; paredes internas de diversas salas e balcão de recepção de um hospital de grande movimento de pessoas; uma cama de casal; um bar de drinques e uma mesa de jantar de uma das residências; balcões de pia de banheiros e balcões de pias de cozinha de três outras residências, além de uma varanda em granito de um apartamento e o piso de um edificio público de grande visitação, que recebe, em média, mais de cinco milhões de pessoas por ano, segundo dados de um órgão oficial.

Na Figura 7, é apresentado o “mapa” (esquema) de distribuição dos TLDs em um dos cinco gabinetes do balcão de recepção apresentado na Figura 6, dando uma ideia real da distribuídos os dosímetros nos gabinetes encontrados nos laboratórios de análises clínicas monitorados. Nos objetos procurou-se posicionar os dosímetros em pontos mais próximos dos seus usuários.



**Figura 7:** Esquema de distribuição dos TLDs no balcão de recepção.

### 3.9 Tratamento estatístico

Para cada objeto monitorado foi obtida a média aritmética das taxas de doses, os respectivos desvios padrões, bem como a mediana das taxas de doses, considerada pelos radioecologistas de todo o mundo como a medida de tendência central que melhor representa o conjunto dos resultados obtidos. A utilização da média aritmética como valor mais representativo seria totalmente inadequada, devido à discrepância entre os valores encontrados. Em estudos radiológicos dessa natureza, não existem procedimentos estatísticos utilizados para reduzir os efeitos dos valores anômalos sobre a média aritmética. Sendo assim, para atenuar as flutuações estatísticas causadas pelos valores anômalos, utiliza-se a média geométrica ou a mediana como valor mais representativo do conjunto de dados obtidos (TOLEDO; OVALLE, 1983).

Com a análise estatística e organização dos dados obtidos neste estudo, foi possível, para cada um dos conjuntos de resultados encontrados, identificar os valores das taxas de doses mínimas e máximas, bem como calcular as medidas de tendência centrais mais significativas para o estudo (as medianas), podendo-se, assim, avaliar os níveis de emissão gama nos diversos ambientes monitorados.

A mediana, medida de tendência central mais representativa dos resultados obtidos em estudo de natureza geológica como este, foi comparada em cada um dos ambientes monitorados com o valor de referência de taxas de dose limite de  $1 \text{ mSv.a}^{-1}$ , estabelecido para pessoa do público pela ICRP-60. Com os resultados da estatística descritiva, e com os valores dos primeiros e segundos quartis calculados, foi possível construir vários diagramas de caixa, obtendo-se com esses diagramas para cada um dos ambientes monitorados na Região Metropolitana da cidade do Recife, um sumário completo dos dados, onde se pode ter uma ideia da dispersão das doses, da assimetria, dos valores mínimos e máximos encontrados e da mediana em uma só representação gráfica.

Os parâmetros estatísticos encontrados em cada uma das áreas monitoradas, também foram organizados em tabelas e figuras e estão disponibilizados nos resultados a seguir, para auxiliar na interpretação e discussão dos mesmos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada objeto monitorado foi obtida a média aritmética das taxas de doses, os respectivos desvios padrões, bem como a mediana das taxas de doses, considerada pelos radioecologistas de todo o mundo como a medida de tendência central que representa melhor o conjunto dos resultados obtidos. A utilização da média aritmética como valor mais representativo seria totalmente inadequada, devido à discrepância entre os valores encontrados. Em estudos radiológicos desta natureza não existem procedimentos estatísticos utilizados para reduzir os efeitos dos valores discrepantes (“outliers”) sobre a média aritmética. Sendo assim, para atenuar as flutuações estatísticas causadas pelos valores discrepantes, utiliza-se a média geométrica ou a mediana como valor mais representativo do conjunto de dados obtidos (TOLEDO; OVALLE, 1983).

### 4.1 Monitoramento das residências

Na Tabela 7, são encontrados os registros das leituras obtidas nos objetos monitorados em cada uma das cinco residências, as taxas de doses, médias aritméticas e os respectivos desvios padrões.

**Tabela 7:** Doses médias anuais acumuladas nos dosímetros (TLD-900) nas residências.

Residência	Objeto	Nº leitura	Taxa de dose (mSv.a <sup>-1</sup> )	
			Unitária	Média ± Desvio padrão
1	1	1	1,2	1,6 ± 0,6
		2	2,1	
		3	2,2	
		4	0,4	
		5	1,8	
		6	1,6	
		7	2,0	
	2	8	0,7	1,7 ± 0,5
		9	2,4	
		10	1,3	
		11	1,7	
		12	1,9	
		13	1,8	
		14	1,9	

Continuação da Tabela 7.

		15	0,1	
		16	2,9	
		17	<LD	
	3	18	2,2	1,7 ± 0,9
		19	1,5	
		20	1,6	
		21	1,9	
		22	1,7	
	1	23	1,7	1,8 ± 0,1
		24	1,9	
		25	1,7	
	2	26	2,2	
		27	3,4	
	2	28	2,8	2,9 ± 0,6
		29	2,5	
		30	3,8	
	2	31	6,2	
		32	1,4	
		33	1,2	
		34	1,2	
	3	35	3,5	2,9 ± 1,9
		36	1,1	
		37	6,0	
		38	2,3	
		39	3,4	
	3	40	1,1	
	único	41	0,4	
		42	2,7	1,1 ± 0,9
		43	0,2	
		44	1,1	
		45	2,5	
		46	2,0	
		47	2,5	
		48	2,5	
	4	49	5,1	
	único	50	2,3	2,6 ± 1,0
		51	3,3	
		52	2,3	
		53	1,0	
		54	1,7	
		55	3,7	

		56	2,2	
		57	2,7	
		58	2,7	
		59	12,7	
5	único	60	12,0	10,0 ± 5,6
		61	12,5	
		62	13,4	
		63	18,5	
		64	13,7	

As taxas de doses apresentadas na Tabela 7 variaram desde valor abaixo do limite de detecção dos dosímetros até 18,5 mSv.a<sup>-1</sup>, com média aritmética variando de 1,1 a 10,0 mSv.a<sup>-1</sup>. A residência cinco, que teve um objeto monitorado, apresentou uma das suas taxas de doses com valor próximo a 2 mSv.a<sup>-1</sup> e duas outras próximo a 3 mSv.a<sup>-1</sup>. Esses valores foram obtidos em pastilhas dosimétricas próximas a um mesmo ponto de observação no objeto monitorado e naturalmente sobre a influência da pluma gama gerada. Observou-se ainda nessa residência, uma discrepância nos valores das taxas de doses registradas. Certamente, os resultados foram decorrentes da grande heterogeneidade da rocha granítica, visivelmente observada no objeto de estudo. Entretanto, por se tratar de um estudo de natureza geológica é mais recomendado em termos de proteção radiológica, utilizar-se a mediana como medida de tendência central mais representativa das amostras, pelos motivos já mencionados. A mediana das taxas de doses das residências apresentou valor igual a 2,2 mSv.a<sup>-1</sup>.

Considerando-se o limite máximo permitido para a exposição de pessoas do público igual a 1 mSv.a<sup>-1</sup>, observa-se na Tabela 7 que 57 dessas, ou seja, 89,1% das taxas de doses reveladas no presente estudo ficaram acima do limite estabelecido. Apenas sete dessas medidas (10,9%) foram inferiores ao limite afixado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP-60, 1991). Ainda nessa mesma tabela também se observa que todas as médias das taxas de doses foram superiores ao limite máximo mencionado. Isto significa que houve predominância de granitos com elevada concentração de radionuclídeos nas residências monitoradas, comprovado também na Tabela 8, onde se observa que o valor da mediana é também superior a 1 mSv.a<sup>-1</sup>, o que segundo a literatura é muito peculiar entre as rochas graníticas devido à origem e à formação geológica.

Variação nos valores das doses em uma mesma peça ou ambiente ocorrem devido: a distribuição aleatória dos minerais radioativos no granito, às dimensões diminutas dos

dosímetros (6mm de diâmetro, 0,8mm de espessura e área de 28,8mm<sup>2</sup>), associada a grande redução da influência da radiação que decresce com o aumento da distância da fonte, ou seja, decresce com  $1/r^2$ , onde “r” é a distância da fonte.

Os valores das taxas de doses apresentados na Tabela 7 encontram-se na mesma faixa daqueles determinados por Bonotto et al (2009), exceto para seis dessas taxas de doses que foram superiores ao valor máximo encontrado de 7,2 mSv.a<sup>-1</sup>, quando estudaram granitos oriundos do estado de Rondônia. Os resultados apresentados na Tabela 7 estão também de acordo com outros estudos já mencionados anteriormente. Os valores das taxas de doses obtidas nas residências monitoradas, no presente estudo, foram provenientes de diversos tipos de granitos ornamentais, que não foram classificados geologicamente, porque deveriam ser realizadas análises destrutivas das amostras. Mas isso não seria possível, pois os objetos de estudo pertenciam a terceiros e também pelo fato de que este não foi o objetivo do presente estudo.

A Tabela 8 apresenta a estatística descritiva para os resultados obtidos na monitoração dos utensílios de granito. Os valores médios das taxas de doses anuais, para os diferentes objetos monitorados nas cinco residências, variaram do valor abaixo do limite de detecção do dosímetro até um valor máximo de 18,5 mSv.a<sup>-1</sup>, com uma média de 3,2 mSv.a<sup>-1</sup> e mediana de 2,2 mSv.a<sup>-1</sup>.

**Tabela 8:** Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nas residências.

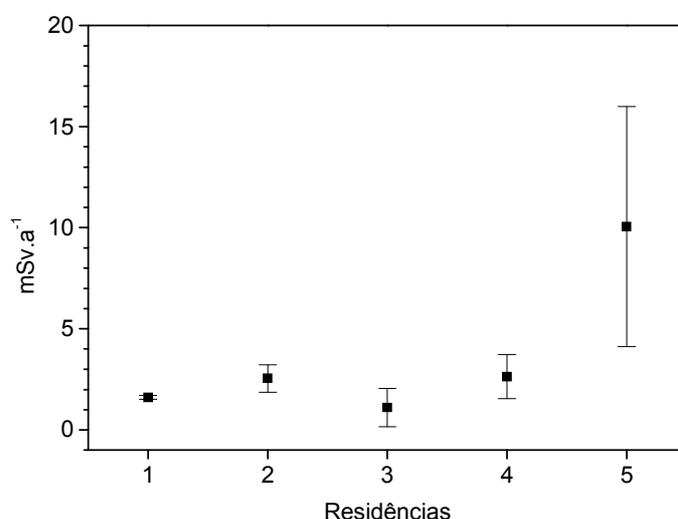
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	TAXA DE DOSE
	(mSv.a <sup>-1</sup> )
Total de leituras	64
Média aritmética	3,2 ± 3,6
Mediana	2,2
Mínimo-Máximo	<LD -18,5

LD = limite de detecção

Os valores encontrados no monitoramento das residências atestam que os níveis de radiatividade dos granitos investigados são superiores aos recomendados pela ICRP-60 para pessoa do público, muito embora os riscos inerentes à exposição aos granitos são atenuados pelo baixo tempo de exposição dos indivíduos, pois, segundo um dos princípios da proteção

radiológica, quanto menor o tempo de exposição à fonte radioativa, menores são os riscos associados à exposição.

Na Figura 8 encontram-se as médias e dispersões para as taxas de doses obtidas no monitoramento das cinco residências. Observa-se pelos dados descritos nesta figura que as residências de número um e três apresentaram praticamente a mesma média para taxa de dose. Com as residências dois e quatro, muito embora apresentando valores de taxas de doses superiores à primeira, ocorreu a mesma coisa. Na residência cinco, foram obtidas as maiores taxas de doses médias anuais, como indica o gráfico abaixo.



**Figura 8:** Gráfico da distribuição das taxas de doses anuais nas residências monitoradas.

Na Tabela 10, são apresentados os registros de alguns estudos realizados em três estados brasileiros e em dois países comparados com o presente estudo.

**Tabela 9:** Registros de taxas de doses em rochas graníticas em diversos locais.

LOCAL DE ESTUDO	FAIXA DE TAXA DE DOSE (mSv.a <sup>-1</sup> )	REFERÊNCIAS
Egito	0,04 - 30,37	El-Arabi (2007)
Pernambuco-Brasil	<LD - 18,5	Presente estudo
Pernambuco-Brasil	0,28 - 2,36	Rocha (2007)
Minas Gerais-Brasil	0,11 - 0,34	Salas et al (2004)
Rondônia-Brasil	0,45 - 7,19	Bonotto et al (09)
Ilha de Chipre	0,02 - 2,97	Tzortizis (2003)

LD = limite de detecção

Na Tabela 9, são revelados os registros de taxas de doses em granitos ornamentais encontrados em diversos locais. Observa-se que as referidas taxas de doses atingiram valor de até  $30,7 \text{ mSv.a}^{-1}$  nos granitos do Egito, nos granitos do estado de Rondônia-Brasil as taxas de doses foram de até  $7,19 \text{ mSv.a}^{-1}$ , enquanto os granitos das residências monitoradas em Pernambuco apresentaram taxas de doses variando de valores abaixo do limite de detecção até  $18,5 \text{ mSv.a}^{-1}$ . Enquanto os granitos na Ilha de Chipre, apresentaram taxas de doses variando de  $0,02$  a  $2,97 \text{ mSv.a}^{-1}$ . Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram a possibilidade dos granitos ornamentais apresentarem taxas de doses devido à radiação gama acima do limite recomendado pelos órgãos de proteção radiológica.

#### 4.2 Monitoramento de um edifício público de grande trânsito de pessoas

As pesquisas iniciadas em 2008 e concluídas em 2010, envolvendo a avaliação radiométrica das exposições nos pisos 1 e 2 da extensa área interna do edifício público monitorado, foram registradas na Tabela 10, tomando-se como base uma exposição de 40h semanais para os trabalhadores do edifício público.

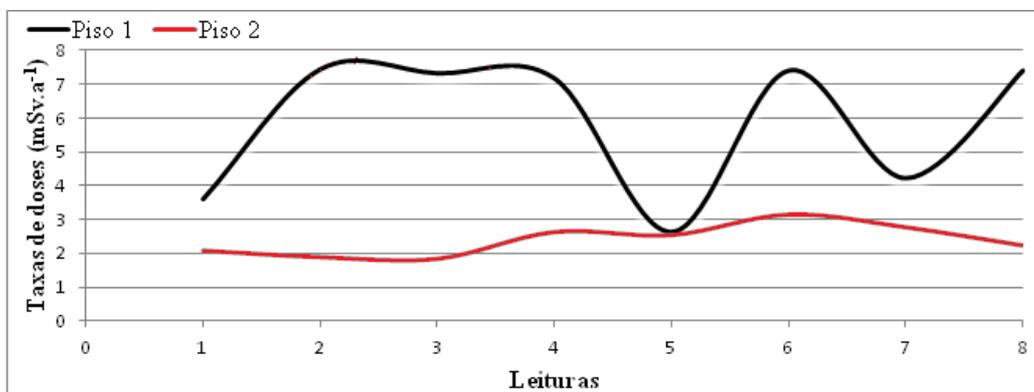
**Tabela 10:** Registros das taxas de doses, médias aritméticas e desvios padrões, obtidos em cada um dos pisos do edifício monitorado.

Local	Taxa de dose ( $\text{mSv.a}^{-1}$ )	Média $\pm$ Desvio
Piso 1	3,6	$5,9 \pm 1,9$
	7,5	
	7,3	
	7,2	
	2,6	
	7,4	
	4,2	
	7,4	
Piso 2	2,1	$2,4 \pm 0,4$
	1,9	
	1,9	
	2,6	
	2,5	
	3,1	
	2,8	
	2,2	

As taxas de doses, apresentadas na Tabela 10, variaram de 1,9 a 7,5 mSv.a<sup>-1</sup> e as médias aritméticas de 2,4 a 5,9 mSv.a<sup>-1</sup>. Considerando-se o limite máximo permitido para exposição de pessoas do público, observa-se na tabela mencionada que 100% das taxas de doses ficaram acima desse limite.

Na Figura 9, são apresentadas as taxas de doses registradas nos pisos do edifício monitorado. Observa-se pelos dados descritos na referida figura, que o piso 1 (térreo) apresentou as maiores taxas de doses, caracterizando uma variedade de granito com maior predominância de radionuclídeos emissores de radiação gama. No entanto, o granito do piso 2 (1º andar) apresentou taxas de doses inferiores as registradas no piso 1, com valores bastante diversificados. Foi nesse piso onde ocorreu a menor dispersão das taxas de doses.

Na Figura 9 pode-se melhor observar que as medidas de taxas de doses no piso 2 foram inferiores ao piso 1, onde a taxa de dose média registrada foi de 5,9 mSv.a<sup>-1</sup>. Esse valor apesar de alto é ainda considerado moderado para esse tipo de rocha, porque El-Arabi et al (2007) no Egito, registraram taxas de doses superiores a 30 mSv.a<sup>-1</sup> para as rochas graníticas.



**Figura 9:** Taxas de doses anuais registradas nos pisos do edifício monitorado.

Na Tabela 11, encontram-se os parâmetros estatísticos da distribuição de doses dos pisos 1 e 2 do edifício público. Esses parâmetros encontram-se na mesma faixa de taxas de doses das determinadas por Tzortzis et al (2003).

**Tabela 11:** Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nos pisos.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	TAXA DE DOSE
	(mSv.a <sup>-1</sup> )
Total de leituras	16
Média aritmética	4,1 ± 2,3
Mediana	2,9
Mínimo-Máximo	1,9 - 7,5

Na Tabela 11, observa-se ainda que a mediana das taxas de doses produzidas pelos pisos monitorados foi igual a 2,9 mSv.a<sup>-1</sup>, quase três vezes superior ao limite recomendado pela ICRP-60 para pessoa do público. Todavia, essa exposição não representou risco para os transeuntes da referida área pública, por causa do baixo tempo de exposição. Não se pode dizer o mesmo para os trabalhadores locais.

### 4.3 Monitoramento de um restaurante de grande visitação pública

Na Tabela 12, encontram-se registradas as médias aritméticas das taxas de doses e os respectivos desvios padrões, com os resultados ajustados para dose anual, das quatro mesas monitoradas no restaurante da cidade do Recife.

As placas de granito das mesas redondas, com superfície de 1m de diâmetro e 0,02m de espessura, medindo 0,74m de altura, foram monitoradas e avaliadas radiometricamente, por meio da utilização de um lote de pastilhas dosimétricas termoluminescentes (TLD-900), constituído por treze pastilhas usadas para monitorar as mesas periodicamente. A utilização repetida dessas pastilhas, afixadas às mesas, possibilitou a realização de 22 leituras ao longo de todo o monitoramento.

**Tabela 12.** Doses obtidas nas mesas do restaurante de grande visitação pública

Mesa	Taxa de dose (mSv.a <sup>-1</sup> ) Média ± Desvio	
	Média	Desvio
1	2,0	1,5
2	3,9	3,5
3	1,4	1,7
4	4,7	5,0

As médias das taxas de doses apresentadas na Tabela 13 variaram de 1,4 a 4,7 mSv.a<sup>-1</sup>, sendo que a média das mesas do restaurante foi igual a 3,0 mSv.a<sup>-1</sup>. Observa-se que todas as médias das taxas de dose nas superfícies das mesas monitoradas ficaram acima do limite. Todavia, por causa do reduzido tempo de exposição dos frequentadores do restaurante, tempo gasto nas refeições, bem como o tempo utilizado pelos garçons para servi-los, as doses registradas não representaram riscos para as pessoas.

Os valores apresentados na Tabela 12 encontram-se na mesma faixa daqueles determinados por El-Arabi (2007), no Egito. Na ocasião, para 49 amostras de rochas graníticas, o autor encontrou taxas de doses variando de 0,04 até 30,4 mSv.a<sup>-1</sup>. Os granitos podem apresentar níveis de radiação gama superiores a 30 mSv.a<sup>-1</sup>, capaz de gerar riscos à saúde dos usuários.

Na Tabela 13, são encontrados os parâmetros estatísticos para as mesas de granito e observa-se que a mediana foi igual a 2,2 mSv.a<sup>-1</sup>.

**Tabela 13:** Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nas mesas de granito.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	TAXA DE DOSE
	(mSv.a <sup>-1</sup> )
Total de leituras	22
Média aritmética	3,0 ± 2,9
Mediana	2,2
Mínimo-Máximo	<LD - 11,8

LD = limite de detecção

Os valores encontrados no monitoramento das mesas do restaurante atestam que os níveis de radiatividade dos granitos investigados são superiores aos recomendados para

pessoa do público pela ICRP-60. Mas os riscos inerentes à exposição aos granitos foram atenuados pelo reduzido tempo de exposição dos indivíduos às mesas, utilizadas eventualmente para as refeições.

#### **4.4 Monitoramento de dois laboratórios de análises clínicas**

Outros locais investigados foram os laboratórios de análises clínicas, por apresentarem balcões de granitos em sua recepção e grande movimento de pessoas. Verificou-se que em alguns momentos apresentavam mais de 20 pessoas aguardando atendimento por período total de tempo, desde o primeiro atendimento até o momento da coleta da amostra, de aproximadamente 1h, estando essas pessoas a uma distância dos balcões de granito que variava de 1,5m até 6m.

Em relação aos funcionários do local, foi considerado quarenta e quatro horas de exposição semanal aos balcões de granito. Pode-se observar, na Tabela 15, que os balcões monitorados tiveram os valores de taxas de doses anuais variando do limite de detecção até  $8,3 \text{ mSv.a}^{-1}$ , para os diferentes pontos avaliados radiometricamente.

Observa-se que o segundo balcão de recepção do laboratório “A”, da Tabela 15, apresentou em média valores de taxas de doses ligeiramente inferiores aos encontrados no primeiro balcão. Os registros das taxas de doses encontradas mostram que o granito do balcão 1, do laboratório “B”, apresentou taxas de doses ainda mais elevadas do que os dois primeiros balcões do laboratório “A”. Essas diferenças provavelmente são provenientes das diferentes origens dos granitos, apresentando diferentes concentrações de radionuclídeos. Ainda nesta Tabela 15, as taxas de doses do balcão 2, do laboratório “B”, apresentaram taxas de doses médias próximas ao do balcão 1 do mesmo laboratório, mas superior também aos dois outros balcões monitorados no laboratório “A”.

As taxas de doses equivalentes anuais, encontradas na Tabela 14, apresentaram média aritmética de  $3,6 \text{ mSv.a}^{-1}$ . Os valores das taxas de doses encontram-se na mesma faixa daquelas determinadas por Tzortzis et al (2003).

**Tabela 14:** Doses acumuladas nos dosímetros dos laboratórios A e B

Laboratório	Balcão	Nº leitura	Taxa de dose (mSv.a <sup>-1</sup> )	
			Unitária	Média ± Desvio padrão
A	1	1	2,9	3,5 ± 1,8
		2	3,0	
		3	1,7	
		4	3,5	
		5	3,8	
		6	3,8	
		7	1,8	
		8	1,5	
		9	1,7	
		10	4,6	
		11	4,5	
		12	4,6	
		13	7,9	
	2	1	4,4	2,8 ± 1,6
		2	0,5	
		3	0,5	
		4	4,6	
		5	4,6	
		6	1,7	
		7	3,6	
		8	2,6	
		9	3,1	
B	1	1	2,7	3,6 ± 1,6
		2	2,3	
		3	4,0	
		4	3,2	
		5	2,8	
		6	6,8	
	2	1	3,1	4,5 ± 2,1
		2	1,5	
		3	<LD	
		4	4,2	
		5	6,3	
6	8,3			
7	4,2			
8	5,1			
9	3,4			

LD = limite de detecção.

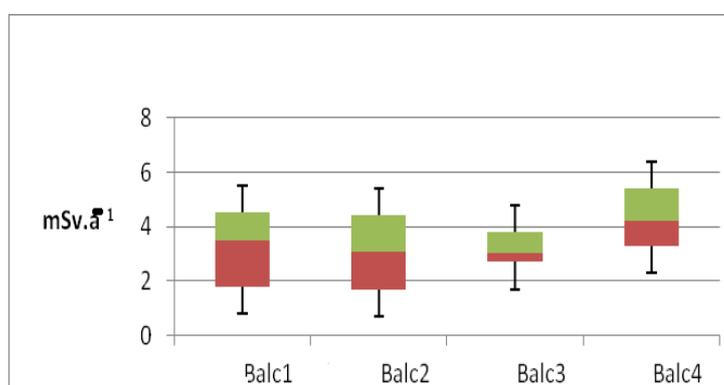
Na Tabela 15, são encontrados os parâmetros estatísticos para os balcões de granito, monitorados nos dois laboratórios de análises clínicas. Observa-se, na Tabela 15, que a média das taxas de doses é próxima da mediana.

**Tabela 15:** Parâmetros estatísticos da distribuição de doses nos balcões de granito.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	TAXA DE DOSE
	(mSv.a <sup>-1</sup> )
Total de leituras	37
Média aritmética	3,6 ± 1,8
Mediana	3,4
Mínimo-Máximo	<LD – 8,3

LD = limite de detecção

Na Figura 10 são apresentadas as taxas de doses mínimas e máximas, as medianas, o 1º e 3º quartil, além de mostrar as dispersões das taxas de doses obtidas no monitoramento dos quatro balcões de granito monitorados nos laboratórios. Observa-se, pelos dados descritos, na Figura 10, que os balcões dois e três apresentaram médias de taxas de doses aproximadas, o mesmo ocorrendo com os balcões um e dois. Embora o primeiro apresente valor de taxas de doses superiores aos balcões dois e três, todos os balcões apresentaram taxas de doses menores do que as registradas no balcão quatro, que apresentou mediana de taxas de doses igual a 4,5 mSv.a<sup>-1</sup>.



**Figura 10:** Boxplot das taxas de doses anuais nos balcões monitorados.

#### 4.5 Monitoramento de um hospital de grande porte

Na Tabela 16, são encontrados os registros das leituras obtidas nos objetos estudados, em cada um dos quatro ambientes monitorados no hospital, ou seja, as taxas de doses, médias aritméticas e os respectivos desvios padrões.

**Tabela 16:** Doses registradas em vários ambientes do hospital.

Local	Objeto	Nº leitura	Taxa de dose (mSv.a <sup>-1</sup> )	
			Unitária	Média ± Desvio padrão
Recepção	Balcão	1	6,0	5,2 ± 2,9
		2	5,7	
		3	2,7	
		4	4,4	
		5	2,8	
		6	11,6	
		7	3,3	
		8	<LD	
	Paredes	1	2,2	2,5 ± 0,4
		2	2,3	
		3	2,6	
		4	2,1	
		5	1,9	
		6	3,0	
		7	3,2	
		8	<LD	
Salas de Espera	(1) Paredes	1	2,7	2,6 ± 1,3
		2	2,0	
		3	1,7	
		4	5,5	
		5	2,0	
		6	1,9	
	(2) Paredes	1	4,5	3,4 ± 1,5
		2	6,0	
		3	4,0	
		4	2,2	
		5	2,0	
		6	2,0	
		7	<LD	
	Banheiro	Paredes	1	3,2
2			2,3	
3			2,8	
4			2,2	
5			2,0	
6			<LD	

LD = limite de detecção.

As taxas de doses, apresentadas na Tabela 16, variaram de valores abaixo do limite de detecção a 11,6 mSv.a<sup>-1</sup>, com média aritmética variando de 2,5 a 5,2 mSv.a<sup>-1</sup>, e mediana de 2,7 mSv.a<sup>-1</sup>. Observa-se, na Tabela 17, que 100% das taxas de doses reveladas nos diversos ambientes e balcões monitorados no hospital, excluindo-se aquelas que estão abaixo do limite de detecção, apresentaram valores superiores aos recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP-60, 1991).

Os valores médios e mesmo os individuais das taxas de doses apresentados na Tabela 16, encontram-se na mesma faixa daqueles determinados por Bonotto et al (2009), exceto apenas para uma dessas medidas, que apresentou valor superior ao máximo encontrado, que foi de 7,2 mSv.a<sup>-1</sup>, quando estudaram granitos de Rondônia. Os resultados, apresentados na Tabela 16, são compatíveis com os estudos apresentados anteriormente, que mostram ser possível que os granitos ornamentais apresentem níveis de radiação gama superiores a 30 mSv.a<sup>-1</sup>, capazes de gerar riscos à saúde.

Na Tabela 17, é apresentada a estatística descritiva para os resultados obtidos na monitoração dos utensílios de granito encontrados no hospital. Para a estimativa da taxa de dose foi levada em consideração uma exposição anual de duas mil horas, com base no disposto pela ICRP-60. Os valores médios das taxas de doses anuais para os diferentes objetos monitorados variaram de valor abaixo do limite de detecção até o valor máximo de 11,6 mSv.a<sup>-1</sup>, com uma média de 3,3 mSv.a<sup>-1</sup>, e mediana de 2,7 mSv.a<sup>-1</sup>.

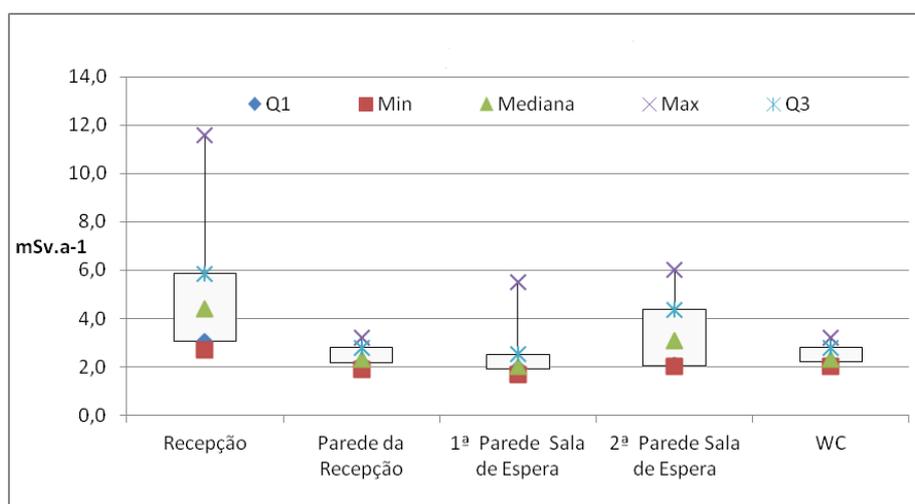
**Tabela 17:** Parâmetros estatísticos da distribuição nos diversos ambientes do hospital.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	TAXA DE DOSE
	(mSv.a <sup>-1</sup> )
Total de leituras	35
Média aritmética	3,3 ± 2,0
Mediana	2,7
Mínimo-Máximo	<LD – 11,6

LD = limite de detecção

A Figura 11 é o diagrama de Box e Whisker das taxas de doses registradas nos diversos ambientes monitorados no hospital. Revela os valores das taxas de doses mínimas, máximas e as medianas, bem como mostram as medidas das dispersões de taxas de doses

nesses ambientes. Observa-se, pelos dados descritos na Figura 14, que o balcão de recepção do hospital apresentou a maior mediana das taxas de doses, divergindo na reprodutibilidade dos dados e dos valores obtidos para as taxas de doses mínimas, máximas e das medidas das dispersões das taxas de doses nos demais ambientes monitorados no hospital. Excluindo-se a recepção e a 2ª parede da sala de espera, todas as demais áreas monitoradas no hospital apresentaram praticamente a mesma medida de dispersão das taxas de doses, por terem taxas de doses mínimas e máximas com valores proximais e todas elas apresentaram medianas com valores superiores aos recomendados pela ICRP-60 para pessoa do público.



**Figura 11:** Boxplot das taxas de doses anuais no hospital monitorado.

#### 4.6 Monitoramento de um hotel de grande rotatividade

Na Tabela 18, são encontrados os registros das leituras dos ambientes monitorados no hotel, as taxas de doses, médias aritméticas e os respectivos desvios padrões. As taxas de doses apresentadas variaram, para os dois ambientes investigados (recepção e banheiro), de 0,4 a 4,9 mSv.a<sup>-1</sup> e as médias aritméticas de 1,4 a 4,1 mSv.a<sup>-1</sup>.

Considerando-se o limite máximo permitido para exposição de pessoas do público, observa-se nessa tabela que 60% das taxas de doses registradas ficaram acima do limite estabelecido. Mas os dados representativos para o cálculo da dose (média das taxas de

doses) foram superiores ao limite máximo recomendado. Isso significa que houve predominância de granitos com elevada concentração de radionuclídeos no hotel.

**Tabela 18:** Doses obtidas nos diversos ambientes do hotel

Local	Leitura	Taxa Dose (mSv.a <sup>-1</sup> )	Média ± Desvio
Recepção	1	4,9	4,1 ± 0,8
	2	3,3	
banheiro	1	1,0	1,4 ± 0,8
	2	0,4	
	3	1,9	
	4	2,6	
	5	2,1	
	6	2,2	
	7	0,8	
	8	0,4	

Na Tabela 19, são encontrados os parâmetros estatísticos da distribuição de doses nos diversos ambientes monitorados no hotel. Observa-se também o total de leituras realizadas, bem como a faixa de doses reveladas no monitoramento dos ambientes investigados no hotel.

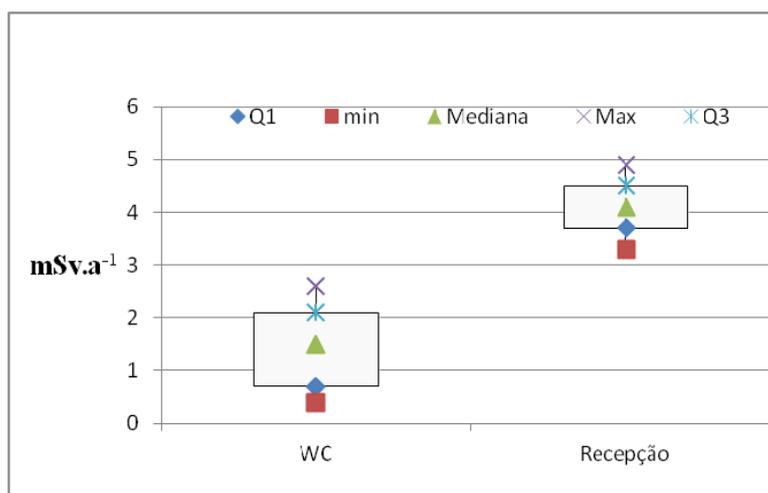
**Tabela 19:** Parâmetros estatísticos da distribuição de doses dos ambientes do hotel.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	TAXA DE DOSE
	(mSv.a <sup>-1</sup> )
Total de leituras	10
Média aritmética	2,0 ± 1,3
Mediana	2,0
Mínimo-Máximo	0,4 – 4,9

A Figura 12 é o Boxplot das taxas de doses registradas no balcão de recepção do hotel monitorado, com as respectivas taxas de dose mínima, máxima, mediana, 1º e 3º quartil, podendo-se observar as medidas das dispersões registradas. Observa-se, pelos dados

descritos na Figura 12, que o balcão de recepção do hotel apresentou as maiores taxas de doses, caracterizando uma variedade de granito com maior predominância de radionuclídeos emissores de radiação gama. Embora os granitos investigados aparentassem, pelo aspecto visual, serem oriundos de uma mesma pedreira, o que naturalmente não significa que, necessariamente teriam que apresentar os mesmos níveis de doses, uma vez que, granitos de mesma pedreira ou mesmo da mesma frente de lavra, podem conter eventualmente teores de radionuclídeos diferentes, apresentando até mesmo, em alguns casos, concentrações de radionuclídeos anômalas (ROCHA, 2007).

O granito do banheiro do hotel apresentou taxas de doses inferiores às registradas na recepção, com valores menores e bastante diversificados, revelando uma grande dispersão das taxas de doses, caracterizando um tipo de rocha granítica com teores variados de radionuclídeos gama emissores.



**Figura 12:** Boxplot das taxas de doses anuais no hotel monitorado.

Na Figura 12 observa-se também que o banheiro do hotel apresenta taxas de doses anuais baixas, quando comparada com as taxas de doses registradas na recepção, onde a taxa média registrada foi de  $4,1 \text{ mSv.a}^{-1}$ . Todos os valores encontrados no monitoramento do hotel estão de acordo com resultados encontrados em outros estudos mencionados anteriormente. A taxa de dose encontrada na recepção do hotel foi elevada para a exposição de pessoas do público, segundo os órgãos de proteção radiológica (ICRP-60, 1991).

Entretanto, não representa risco para os indivíduos, devido ao baixo tempo de exposição ao granito presente no ambiente.

#### 4.7 Monitoramento de uma copa de departamento

A copa de Departamento é um ambiente utilizado por alunos, funcionários (técnicos administrativos e professores) e visitantes. Nesse ambiente pode-se fazer refeições, lanches, tomar cafezinhos e beber água. A Tabela 20 mostra os registros das leituras do balcão da pia monitorado na copa do departamento, as taxas de doses, médias aritméticas e os respectivos desvios padrões.

**Tabela 20:** Doses obtidas na pia da copa

Objeto	Leitura	Taxa Dose (mSv.a <sup>-1</sup> )	Média ± Desvio
Balcão da Pia	1	1,3	3,1 ± 1,7
	2	<LD	
	3	6,6	
	4	2,3	
	5	2,1	
	6	3,1	
	7	3,1	
	8	3,1	

LD = limite de detecção.

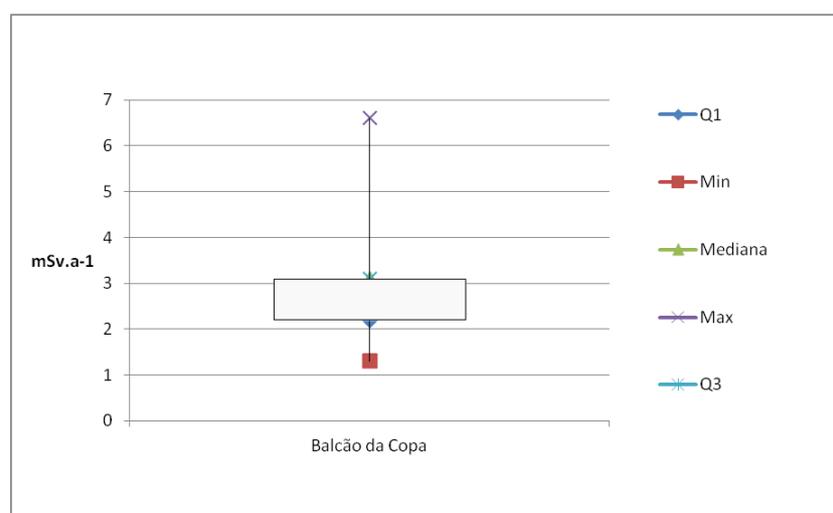
Na Tabela 21, são encontrados os parâmetros estatísticos da distribuição de doses do balcão da pia do departamento monitorado. Nela também se encontra o registro total das leituras realizadas, bem como a faixa de dose (mínima e máxima) revelada no monitoramento do ambiente investigado.

**Tabela 21:** Parâmetros estatísticos da distribuição de doses da copa de departamento.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	TAXA DE DOSE
	(mSv.a <sup>-1</sup> )
Total de leituras	8
Média aritmética	3,0 ± 1,7
Mediana	3,1
Mínimo-Máximo	<LD – 6,6

LD = limite de detecção.

Na Figura 13, é apresentada a taxa de dose mínima e máxima, a mediana, os valores dos quartis, além de mostrar a medida da dispersão de doses obtidas no monitoramento da copa de departamento monitorado. Observa-se, pelos dados descritos na Figura 16, que o balcão da copa apresentou medianas de taxas de doses muito próxima da média aritmética das taxas de doses registradas e baixa dispersão de taxas de doses, o que aponta para uma homogeneidade na distribuição dos radionuclídeos no granito que constitui o objeto de estudo. Nesse caso, o valor mediano das taxas de doses registradas também foi considerado alto para a exposição de indivíduo do público, segundo a ICRP-60. Mas o tempo de exposição é baixo para os usuários.

**Figura 13:** Boxplot das taxas de doses anuais na copa de departamento monitorada.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

(1) Devido à possibilidade de serem encontradas anomalias radiométricas nos granitos ornamentais, há necessidade de uma avaliação prévia dessas rochas antes da sua utilização.

(2) De um modo geral, os granitos monitorados apresentam taxas de doses variadas, e frequentemente superiores a  $1 \text{ mSv.a}^{-1}$ , que é o limite recomendado para pessoas do público pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP-60).

(3) A exposição próxima e por tempo prolongado aos objetos de granito pode representar riscos às pessoas, quando a rocha possuir concentrações anômalas de radionuclídeos.

(4) Não é recomendada a utilização de granitos, que não tenham sido avaliados radiometricamente, no revestimento de pisos e paredes ou como móveis e utensílios, principalmente em ambientes fechados e de permanência prolongada, onde também haverá acúmulo de gás radônio emanado dos granitos, contribuindo ainda mais com o aumento da radioatividade ambiental.

(5) Os blocos de granito devem ser monitorados nos locais de extração, para evitar-se a comercialização de granitos com anomalias radiométricas.

(6) Com a utilização de medidas de proteção radiológica para os usuários de granitos ornamentais, se estará contribuindo para a proteção radiológica brasileira, uma vez que a partir de então os granitos ornamentais passarão a receber uma certificação radiométrica antes da utilização em residências e demais ambientes internos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS, 2004. Catálogo de rochas ornamentais do Brasil. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acesso em: 24 Set. 2006.

AJAYI, I.R.; KUFORJI, O.O. Natural radioactivity measurements in rock samples of Ondo and Ekiti states in Nigeria. **Radiation Measurements**. v. 33, p. 13-16, 2001.

AMARAL, R. S. **Determinação de urânio na fosforita por meio de medidas radiométricas e análise por ativação**. 1987. 109 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1987.

ANJOS, R. M.; VEIGA, R.; SOARES, T.; SANTOS, A. N. A.; AGUIAR, J. G.; FRASCA, M. H. B. O.; BRAGE, J. A. P.; UZÊDA, D.; MANGIAL, L.; FACURE, A.; MOSQUERA, B.; CARVALHO, C.; GOMES, P. R. S. Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. **Radiation Measurements**. v. 39, p. 245-253, 2005.

BAÊTA, R.M. (2004) Caracterização petrográfica, faciológica e tecnológica das rochas ornamentais do complexo alcalino de tunas/pr. CURITIBA. 160 P. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Paraná.

BONOTTO, D.; LEITE JÚNIOR, W.B.; PAYOLLA, B.L. Dose de exposição radiométrica de granitos do estado de Rondônia, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.27(3), São Paulo, 2009.

CAMPOS, L. L. Termoluminescência de materiais e sua aplicação em dosimetria da radiação. *Cerâmica*. v. 44, n. 290, p. 240- 251, 1998.

CEMBER, H. Introduction to health physics. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1996., 733 p.

CHEN, R.; MCKEEVER, S.W.S. **Theory of thermoluminescence and related phenomena**. Singapura: World Scientific Publishing Co., 1997.

COELHO, X.; FERREIRA, M. G. V. X.; CARVALHO FILHO, A. C. Rochas para revestimento de fachadas: a importância do detalhe construtivo. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 5, 2005, Recife. Anais. Recife: PPGEMinas/SBG, 13 a 15 novembro de 2005. p. 146-160.

COWART, J.B.; BURNETT, W.C The distribution of uranium and thorium decay-series radionuclides in the environment – a review. *Journal of Environmental Quality*, v. 23, p. 651-662, 1994.

DICKSON, B. L. AND SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-rays surveys - adding the geochemical factors, *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): p.187–200, (1997).

EISENBUD, M.; GESELL, T. *Environmental Radioactivity: From natural, industrial, and military sources*. New York: Academic Press, 1997. 656 p.

EL-ARABI, A.M.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications. ***Radiation Measurements***. v. 42, p. 94-100, 2007.

EL-SHERSHABY, A. Study of radioactivity levels in granite of Gable Gattar II in the north eastern desert of Egypt. ***Applied Radiation and Isotopes***.v. 57, p. 131-135, 2002.

FERREIRA, A.O. **Distribuição de radionuclídeos em um afloramento de sedimentos permianos da formação iratí na bacia do Paraná**. Londrina, 2008. 110f. Dissertação (Mestrado em Física) Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programas de Pós-Graduação em Física.

FOWLER, C. M. R., *The solid Earth - An introduction to global geophysics*, Cambridge University Press, 1990.

HARSHAW-BICRON, OPERATOR'S MANUAL, Model 5500 Automated TLD Reader Publication n° 5500- 0- O 0399-001 Release Date March 17, 1999.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION.  
Radiation Protection: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication n° 60 (Oxford: Pergamon Press) (1990).

KEAREY, P.; BROOKS, M. AND HILL, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*, Blackwell Publishing Company, 2003.

KRAUSKOPF, B. K. *Introduction to Geochemistry*. Tokyo - Sydney: McGraw-Hill, 1979. 617 p.

LIMA, R.A.; AMARAL, R.S.; CARVALHO, R.N.; MAZZILLI, B.P. Avaliação da exposição gama em residências da região fosfática do Nordeste do Brasil, 1999. 3 p.

MANAHAM, S. E. Environmental Chemistry. 6 ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994. 811 p.

MATOS, E. C.; ALCÂNTARA, J.R.; RUBINI, L. A. Província uranífera de Lagoa Real - garantia de fornecimento de concentrado de urânio(dua) para as necessidades brasileiras. **Revista de Geologia**, Fortaleza-CE, v. 16, n. 2, 2003.

MCKEEVER, S. W. S. 1985. **Thermoluminescence of Solids**. Cambridge University Press, p. 8.

MORAES, C. V. 1999. **Avaliação da Resposta de Dose de um Dosímetro individual Multi-Filtro para Radiações X e Gama**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto – Departamento de Física e Matemática, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.

NESTH - NÚCLEO DE ESTUDOS SOBRE O TRABALHO HUMANO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS: **Mineração e Desenvolvimento Sustentável em Tenente Ananias - Rio Grande do Norte**. 2008.

Disponível em: <[http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/Tenente\\_Ananias.pdf](http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/Tenente_Ananias.pdf)>.

Acesso em: 15 Abr. 2009.

NEVES, R. Projeto de peças em mármore e granitos. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 5, 2005, Recife. Anais. Recife: PPGEMinas/SBG, 13 a 15 novembro de 2005. p. 136-145.

OKUNO, E. CALDAS, I. L., CHOW, C. Física para Ciências Biológicas e Biomédicas. São Paulo, Ed. Harper & Row do Brasil, p. 2-10, 1982.

OSMANLIOGLU, A. E. Natural radioactivity and evaluation of effective dose equivalente of granites in turkey. **Radiation Protection Dosimetry**. v. 121, p. 325-329, 2006.

PAVLIDOU, S.; KORONEOS, A.; PAPASTEFANOU, C.; CHRISTOFIDES, G.; STOULOS, S.; VAVELIDES, M. Natural radioactivity of granites used as building materials. **Journal of Environmental Radioactivity**. v. p. 89, 48-60, 2006.

RIBEIRO, V.A.L.; AFONSO, J.C.; WILDHAGEN, G.R.S.; CUNHA, J.W.S.D. Extração líquido - líquido de urânio (VI) do colofanito de Itataia (Santa Quitéria, Ceará) por extratantes orgânicos em presença de ácido fosfórico. Disponível em: <<http://quimicanova.sbgq.org.br/qn/No%20Prelo/NT/NT07552.pdf>>. Acesso em: 16 Dez. 2008.

ROCHA, E. A. **Avaliação da exposição externa à radiação gama dos trabalhadores de pedreiras de rochas graníticas ornamentais de Pernambuco**. Recife, 2007. 66f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco.

RODRIGUES, M.; DIAS, F.; “Física na nossa vida-12”, Portugal – Cidade do Porto - Porto Editora, 2008. 280p.

RYBACH, L. Amount and significance of radioactivity at sources in sediments, Ed. Technip.Referências Bibliográficas, 1998. 72p.

SALAS, H.T.; NALINI JR, H.A.; MENDES, J.C. Radioactivity dosage evaluation of Brazilian ornamental granitic rocks based on chemical data, with mineralogical and lithological characterization. **Environ Geol** v. 49, p. 520-526, 2006.

SANTOS JÚNIOR, J. A., CARDOSO, J. J. R. F., SILVA, C. M., SILVEIRA, S. V., AMARAL, R. S. Determination of radionuclides in the environment using gamma-spectrometry, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 269, p. 451-455, (2006).

SAPUCAIA, N.S. **Diferenciação litológica, teores de potássio, urânio e tório e taxa de produção de calor radiogênico do embasamento cristalino de bacias de Camamu e Almada**. Salvador, 2004. 72f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2004.

SCHARMANN, A. 1981. “History”, in **Applied Thermoluminescence Dosimetry Lectures of course held at Ispra**. Italy. Eds. M. Oberhofer, A. Scharmann, Bristol, England, Adom Hilger.

SILVA, L.M.C., SANTOS, M.D., ALENCAR, B.V., GOUVEA, V.A., BINNS, D.A.C., FERREIRA, L.S., SANTOS, I.V.D. (1997) Dosimetria alfa-gama de rochas usadas como revestimento na construção civil. In: 5º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 1997, São Paulo. Anais, v.1.p.410-412

SORATIN, H.; STEGER, F. Natural radioactivity of building materials in Austria. **Radiation Protection Dosimetry**. v. 7, p. 59-60, 1979.

TOLEDO, G. L.; OVALLE, I. I. Estatística Básica. 2 ed. São Paulo: Atlas, 1983. 459 p.  
WEDEPOHL, K.H. Handbook of Geochemistry. v. II/5. Berlin: New York: Springer, 1978. p. irreg.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H. Determination of thorium, uranium and potassium elemental concentrations in surface soils in Cyprus. **Journal of Environmental Radioactivity**. v. 77, p. 325-338, 2004.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H.; CHRISTOFIDES, S.; CHRISTODOULIDES, G. Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic rocks. **Radiation Measurements**. v. 37, p. 221-229, 2003.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H.; CHRISTOFIDES, S.; CHRISTODOULIDES, G. Gamma-ray measurements and dose rates in commercially-used tiling rocks (granites). *Environmental Radioactivity*. v. 70, p. 223-235, 2003.

VARGAS, T.; MOTOKI, A.; NEVES, J.L.P. Rochas ornamentais do Brasil, seu modo de ocorrência geológica, variedade tipológica, exploração comercial e utilidades como materiais nobres de construção. **Revista de Geociência**, 2-2, p. 119-132. Instituto de Geociência – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2001.

WEDEPOHL, K.H. **Handbook of Geochemistry**. v. II/5. Berlin - New York: Springer, 1978. Paginação irregular.

YANG, J.S.; Kim, D.Y.; Kim, J.L.; Chang, S.Y.; Nam, Y.M.; Park, J.W. Thermoluminescence characteristics of embedded CaSO<sub>4</sub>:Dy TLD. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 100: p. 337-340 (2002).

## GLOSSÁRIO

### DIFERENCIAÇÃO MAGMÁTICA

É a formação de rochas à medida que o magma vai se movimentando e se resfriando.

### LIMITE DE DETECÇÃO (LD)

O limite de detecção é a menor quantidade de um componente que pode ser determinada, levando-se em consideração o “background Compton” ou experimento branco, ou seja, a radiação de fundo (AMARAL, 1994).

### MINERAL

Composto inorgânico natural com propriedades físicas, químicas e cristalinas definidas.

### ROCHA

Qualquer agregado ou massa de matéria mineral formada naturalmente, coerente ou não, constituindo uma parte essencial e mensurável da Crosta Terrestre.

### ROCHAS FÉLSICAS

Apresenta teor de minerais félsicos superior a 75% (principalmente quartzo, ortoclase e plagioclase). As rochas com mais de 90% de minerais félsicos na composição são também designadas leucocráticas, palavra que significa de cor clara.

### ROCHA MAGMÁTICA OU ÍGNEA

É a rocha produzida pelo resfriamento (solidificação) do magma. Essa rocha por ser derivada do magma recebe também a denominação de rocha magmática.

## ROCHA METAMÓRFICA

Rocha que se forma por recristalização parcial ou total de uma rocha pré-existente, formando-se novos minerais e novas texturas, podendo ou não ocorrer fusão da rocha original, em resposta a mudanças pronunciadas de temperatura, pressão e/ou ambientes químicos em profundidade.

## ROCHA PLUTÔNICA

Mesmo que rocha intrusiva: é formada em condições de confinamento, isto é, em regiões profundas da Crosta Terrestre. São formadas devido à lenta cristalização de um magma em profundidade. Como, em geral, o seu arrefecimento é lento, ocorre a cristalização de todos os seus minerais. Normalmente, essas rochas apresentam uma estrutura maciça e são, em geral, granulares, com textura granulosa, ocupando grandes espaços. São exemplos de rochas plutônicas o gabro, o diorito e o granito.

## ROCHA SEDIMENTAR

Rocha formada pela deposição de sedimentos transportados pela água, pelo ar ou por geleiras, entre outros.