THAMMIRIS MOHAMAD EL HAJJ

Método para avaliação do uso de rochas ornamentais em interiores
considerando as exalações de radônio e torônio

São Paulo

2017

THAMMIRIS MOHAMAD EL HAJJ

Método para avaliação do uso de rochas ornamentais em interiores
considerando as exalações de radônio e torônio

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutora em Ciências

São Paulo
2017

THAMMIRIS MOHAMAD EL HAJJ

Método para avaliação do uso de rochas ornamentais em interiores
considerando as exalações de radônio e torônio

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutora em Ciências

Área de Concentração: Engenharia
Mineral

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni
Junior

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 13 de março de 2017.

Assinatura da autora: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

El Hajj, Thamiris

Método para avaliação do uso de rochas ornamentais em interiores considerando as exalações de radônio e torônio / T. El Hajj -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

443 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Radônio 2.Torônio 3.Rochas ornamentais 4.Construção civil 5.Proteção radiológica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

À minha família e aos meus amigos,
pilares da minha existência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Homero Delboni Junior pela orientação e pelo contínuo estímulo transmitido durante todo o trabalho. Admiro muito a forma como lida com as pessoas, sempre com muito respeito e disposição, característica essa digna de um grande professor.

Um agradecimento especial ao Prof. Mauro Gandolla, da École Polytechnique Fédérale de Lausanne, pelas diversas oportunidades fornecidas, aconselhamentos e, principalmente, pela amizade. O seu amor pela pesquisa é contagiante, por isso vou me esforçar continuamente para transmitir aos meus alunos esse sentimento da mesma forma que ele fez comigo desde setembro de 2012.

Ao Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston, responsável pela ignição do trabalho, meu primeiro chefe e quem eu respeito profundamente. Agradeço também pelo financiamento de alguns dos equipamentos necessários para a pesquisa e por conceder a oportunidade do estágio no *Institut de Radiophysique* em Lausanne, Suíça.

À Profa. Dra. Ana Carolina Chierigati agradeço por todas as oportunidades oferecidas, pela amizade e, principalmente, por ter me ajudado a iniciar a vida acadêmica sendo minha orientadora no mestrado em amostragem, área extremamente relevante para a mineração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo suporte financeiro.

Ao Prof. Dr. Henrique Kahn por acreditar no trabalho e me auxiliar durante a pesquisa, além de disponibilizar recursos do LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica para realização de ensaios.

À equipe do LCT pela colaboração, especialmente à Ma. Sheila Schuindt e à Profa. Dra. Carina Ulsen.

Ao Prof. Dr. Renato Moraes pelo apoio com os ensaios, pelas aulas de geologia muito necessárias para o Doutorado e por me apresentar o seu aluno Eduardo Lopes Julião que me ajudou bastante e a quem eu também tenho bastante a agradecer pela disposição apresentada.

À equipe do LSC – Laboratório de Simulação e Controle pela amizade e cooperação, em especial ao Wellington Gomes, Thiago Jatobá e Gabriel Alencar.

À equipe de Petrografia Básica da Petrobras pela ajuda com os ensaios de PDP e interpretação dos resultados, especialmente ao Téc. Leandro Braga, Eng. Glênio Ribeiro e Eng. Dario Cruz.

À equipe do LACASEMIN – Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração pelo suporte ao trabalho, principalmente ao Eng. Diego Diegues Francisca.

À Dra. Márcia Campos e ao Dr. Paulo Sérgio do IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares por serem tão gentis e ajudarem com tanta boa vontade o progresso do meu trabalho.

Aos engenheiros Iramar Tertuliano e Tiago Vieira pela cooperação técnica para a pesquisa e, principalmente, pela amizade.

À equipe do LAPOC/CNEN pela cooperação técnica, em especial ao Dr. Nivaldo Carlos da Silva.

Ao *Institut de Radiophysique* do CHUV em Lausanne, Suíça, por me receber e dividir precioso conhecimento comigo, em especial ao Dr. Sebastien Baechler pelo convite.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Rusilo e à Profa. Dra. Daniela Gomes Horta pela valiosa revisão final do texto e, principalmente, pela amizade.

Ao chefe da divisão de proteção radiológica do Governo Federal da Suíça, o Dr. Christophe Murith pela disposição em cooperar com a análises dos dados desta pesquisa, de acordo com a carta apresentada no Anexo B deste trabalho.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

(Theodore Roosevelt)

RESUMO

Os isótopos do gás radioativo radônio são gerados a partir de qualquer solo ou rocha que contenha urânio e tório na sua composição. Desta forma, rochas ornamentais utilizadas na construção civil são fontes naturais dos isótopos de radônio que podem gerar concentrações em interiores superiores às recomendadas internacionalmente. Visto que o Brasil é um importante produtor e exportador de rochas ornamentais, investigou-se nesta pesquisa: um método de triagem das amostras de baixo custo e eficiente; as correlações entre o *Index* gama e as exalações de radônio e torônio; a influência dos parâmetros físicos da rocha nas exalações; a distância de difusão do Rn-222 nas placas de rocha; a utilização de métodos de redução das exalações de radônio e torônio; associações preferenciais de urânio e tório com outros elementos químicos e as proporções de radônio e torônio nas amostras. Quarenta (40) amostras de rochas ornamentais coletadas no Brasil e na Suíça foram estudadas e submetidas às seguintes análises: fluorescência de raios X, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, análise de lâminas em microscópio, picnometria, umidade, porosidade, permeabilidade, espectrometria gama, análise por ativação neutrônica, microscopia confocal, análise das exalações de radônio e torônio utilizando célula de cintilação, detecção de radioatividade utilizando detector portátil de contaminação e aplicação de impermeabilizante. Análises estatísticas univariadas e multivariadas foram conduzidas com o *software* Statística 13. Os principais resultados das recomendações foram: uso do detector portátil de radiação como método de triagem das amostras selecionadas; uso do valor limite um (1) do *Index* gama para placas de rocha ornamental; adotar 150 Bq/hm² como valor limite de exalação total de radônio; uso de polimento e de substância impermeabilizante como métodos de tratamento superficiais para diminuição das exalações de radônio e torônio; minerais contendo elementos de terras raras apresentaram maior quantidade de U e Th associados; e as proporções de Th/U nas amostras brasileiras (5 a 15) foram maiores do que a média global (3 a 4).

Palavras-chave: Radônio. Torônio. Rochas ornamentais. Construção civil. Proteção radiológica.

ABSTRACT

Radioactive radon gas isotopes are generated from any soil or rock containing uranium and thorium in its composition. Thus, ornamental rocks used in construction are natural sources of radon and can generate indoor concentrations higher than those recommended internationally. As Brazil is an important producer and exporter of ornamental rocks; it was investigated in this research: an inexpensive and efficient way of sorting samples; correlations between gamma Index and the exhalations of radon and thoron; the influence of physical parameters on rock exhalations; Rn-222 diffusion length in rock plates; methods for reducing radon and thoron exhalations; preferential associations of uranium and thorium with other chemical elements and the proportions of radon and thoron in samples. Forty (40) ornamental rocks samples collected in Brazil and Switzerland were studied and submitted to the following analysis: X-ray fluorescence, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, thin section microscope analysis, pycnometry, moisture analysis, porosity, permeability, gamma spectrometry, neutron activation analysis, confocal microscopy, radon and thoron exhalation analysis using scintillation cell, radioactivity detection using a portable contamination detector and application of a waterproofing substance. Univariate and multivariate statistical analysis were conducted with Statistica 13 software. The main results of the recommendations were as follows: use of a portable radiation detector as screening method for the selected samples; adopt gamma Index limit value of one (1) for ornamental rock plates; adopt total radon exhalation limit value of 150 Bq/hm²; use polishing and waterproof substance as surface treatment methods for reducing radon and thoron exhalations rates; minerals containing rare earth elements showed higher amount of associated U and Th; Th/U proportions in Brazilian samples (5 to 15) were higher than the global average (3 to 4).

Keywords: Radon. Thoron. Ornamental rocks. Construction. Radiation protection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Curva representativa do decaimento de um radioisótopo em função do tempo.	48
Figura 2. Alcance de partículas alfa em diferentes materiais (densidades em g/cm ³): (1) Ar = 0,0013; (2) Tecido = 1,0; (3) Alumínio = 2,70; (4) Cobre = 8,96.....	52
Figura 3. Dose anual efetiva de radiação ionizante equivalente para um cidadão americano no ano de 1987.....	54
Figura 4. Dose anual efetiva de radiação ionizante equivalente para um cidadão americano no ano de 2006.....	54
Figura 5. Séries radioativas naturais.	56
Figura 6. Causas comuns de mortes e as mortes devido ao radônio.....	59
Figura 7. Processo de liberação do gás radônio para a atmosfera.	61
Figura 8. Diferença entre exalação e emissão radioativa.....	62
Figura 9. Variabilidade da exalação de gás em função da permabilidade do material.	63
Figura 10. Diagrama esquemático da emanção de Rn.	64
Figura 11. Relação entre o coeficiente de emanção do radônio e o tamanho da partícula.....	66
Figura 12. O efeito da umidade no coeficiente de emanção do Rn para uma amostra de rejeito de moinho de uma mina de urânio.	67
Figura 13. Influência do teor de umidade no coeficiente de exalação específica.....	68
Figura 14. Diagrama esquemático para um exemplo de processo para medição do coeficiente de emanção – circuito fechado.	70
Figura 15. Diagrama esquemático para um exemplo de processo para medição do coeficiente de emanção – circuito aberto.	71
Figura 16. Diferença entre difusão e convecção de gás radônio em uma residência.	76
Figura 17. Diagrama esquemático da técnica que utiliza um acumulador.	91
Figura 18. Diagrama esquemático do uso de duas células de cintilação em modo ativo.	96
Figura 19. Diagrama esquemático do método do carvão ativado.	97

Figura 20. Trecho do gráfico de radionuclídeos.	106
Figura 21. 2013/59/EURATOM e os artigos relacionados ao gás radônio.	112
Figura 22. Minerais estratégicos para a balança comercial do Brasil.....	117
Figura 23. Representação gráfica da participação do setor de rochas ornamentais nas exportações brasileiras.	118
Figura 24. Exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2014 e 2015.	119
Figura 25. Média das exportação de rochas ornamentais brasileiras entre 2014 e 2015.	120
Figura 26. Metodologia proposta.....	121
Figura 27. Ensaios e preparação das amostras.....	123
Figura 28. Localização das amostras brasileiras.....	126
Figura 29. Amostras comercializadas na Suíça.	126
Figura 30. Britador de mandíbulas do LTM-USP.....	128
Figura 31. Britador de rolos do LTM-USP.	128
Figura 32. Lata utilizada para acondicionar o material para a espectrometria gama na CNEN.	129
Figura 33. Pilha alongada.	129
Figura 34. Fluxograma de preparação de amostras.....	130
Figura 35. Peça de 2 x 2 cm – amostra Sodalita.....	135
Figura 36. Balança para determinação da densidade.	136
Figura 37. Plugues para as os ensaios de porosidade e permeabilidade.	138
Figura 38. Matrix cup do porosímetro.....	139
Figura 39. Holder hassler utilizado na medida de porosidade.....	140
Figura 40. (a) Diagrama esquemático com o fluxo de gás no equipamento e (b) Princípio da igualdade das pressões.....	141
Figura 41. PDP-200.....	142
Figura 42. Detector de Ge-hiperpuro da marca CANBERRA, modelo GX 2020.	143
Figura 43. Microscópio confocal utilizado.....	147
Figura 44. Células de cintilação utilizadas nesta pesquisa.	148
Figura 45. Medição da exalação específica.	149
Figura 46. Medidor de fluxo.....	149
Figura 47. Método de análise das amostras com as células de cintilação.	150
Figura 48. Output do programa do RadonMapper.....	151
Figura 49. Fatores de correção para o Rn-220 utilizando a câmara de Lucas.....	152

Figura 50. Monitor de contaminação.	154
Figura 51. Detalhe da película de ZnS do detector portátil de radiação.	155
Figura 52. (A) PEK BIO – impermeabilizante à base de água e (B) esquema de medição da intensidade luminosa refletida.	156
Figura 53. Exemplo de placa dividida em quadrantes para análise com o detector portátil de radiação.	159
Figura 54. Valores de Index gama com as incertezas associadas.	161
Figura 55. Análise de agrupamento elementos quantificados por ativação neutrônica.	162
Figura 56. Correlações de Spearman para as variáveis alfa, beta e gama, Index gama, U, Th-232, K, Rn-222 e Rn-220.	171
Figura 57. Gráfico de regressão das variáveis Index gama e contagem de beta e gama (cps).	172
Figura 58. Gráfico de regressão das variáveis Index gama e contagem de beta e gama (cps) com detalhe para o intervalo de confiança.	173
Figura 59. Gráfico de dispersão das variáveis Index gama e contagem de beta e gama (cps).	174
Figura 60. Gráfico para análise das medições obtidas com o monitor de contaminação e os valores de Index gama.	175
Figura 61. Gráfico para análise das medições obtidas com o monitor de contaminação e os valores de exalação de Rn-total.	177
Figura 62. Dendograma para as variáveis Index gama, Rn-222 e Rn-220.	178
Figura 63. Box plot de variáveis múltiplas para as exalações de Rn-total, Rn-222 e Rn-220.	180
Figura 64. Box plot para Index gama.	181
Figura 65. Correlações de postos de Spearman para Index gama, Rn-total, Rn-222 e Rn-220.	182
Figura 66. Gráfico para análise do Index gama em relação à exalação total de radônio.	183
Figura 67. Gráfico para análise do Index gama em relação à exalação total de Rn-222.	184
Figura 68. Correlações de Spearman para os índices de perigo radiológico e as exalações de radônio.	187

Figura 69. Gráfico misto de barras e dispersão para verificar a relação entre Raeq e as exalações totais de Rn.	188
Figura 70. Estatística descritiva dos parâmetros físicos das amostras.	194
Figura 71. Gráfico box plot para as densidades das amostras.....	194
Figura 72. Gráfico box plot para a % aparente de poros das amostras.	195
Figura 73. Gráfico box plot para as % umidade em massa e volume (base úmida).	195
Figura 74. Correlações de Spearman para os parâmetros físicos das amostras com as exalações específicas de radônio.	196
Figura 75. Gráficos de regressão para todas as amostras e para as amostras com taxas de exalação superiores ao recomendado.	200
Figura 76. Agrupamento das variáveis de superfície.	206
Figura 77. Perfil 2D – Iragna – superfície polida.	207
Figura 78. Perfil 3D – Iragna – superfície polida.	207
Figura 79. Perfil 3D – Iragna – superfície rugosa.	208
Figura 80. Componentes e seus autovalores.	212
Figura 81. Ortogonalidade entre as variáveis.....	216
Figura 82. Dendograma utilizando as variáveis de rugosidade.	217
Figura 83. (A) Gráfico de bissetriz para Exalação 1 ^{220}Rn e Exalação 2 ^{220}Rn e (B) Gráfico de bissetriz para Exalação 1 ^{222}Rn e Exalação 2 ^{222}Rn	222
Figura 84. Gráfico de bissetriz para as exalações das superfícies mais lisa e mais rugosa de cada amostra, (A) Rn-220 e (B) Rn-222.....	223
Figura 85. Gráfico das diferenças relativas de exalação, para ^{222}Rn	224
Figura 86. Gráfico das diferenças relativas de exalação, para ^{220}Rn	225
Figura 87. Wilcoxon Signed Rank Test para ^{222}Rn entre as superfícies mais e menos rugosas de cada amostra.	226
Figura 88. Teste de hipótese pelo Wilcoxon Signed Rank Test – Rn-222.	227
Figura 89. Wilcoxon Signed Rank Test para ^{220}Rn entre as superfícies mais e menos rugosas de cada amostra.	227
Figura 90. Teste de hipótese pelo Wilcoxon Signed Rank Test – Rn-220.	228
Figura 91. Regressão múltipla para a variável dependente de diferença de exalação e entre as variáveis de superfície selecionadas pela análise fatorial.	230
Figura 92. Gráfico das diferenças relativas de exalação para Rn-222 e Rn-220 após aplicação de PEK BIO.	232

Figura 93. Gráfico de bissetriz para exalações de Rn-total antes e depois da aplicação de PEK BIO.....	233
Figura 94. Gráfico box plot para as exalações de Rn-222 (A) e Rn-220 (B) com e sem PEK BIO.....	234
Figura 95. Wilcoxon Signed Rank Test para Rn-220 entre a superfície com e sem PEK BIO.....	234
Figura 96. Wilcoxon Signed Rank Test para Rn-222 entre a superfície com e sem PEK BIO.....	234
Figura 97. Amostra após a aplicação do PEK BIO.....	235
Figura 98. Agrupamento realizado com os resultados das análises químicas.	243
Figura 99. Gráfico QAPF.....	249
Figura 100. Análise de agrupamento elementos quantificados por ativação neutrônica.	255
Figura 101. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 1.....	256
Figura 102. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 2.....	256
Figura 103. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 3.....	257
Figura 104. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 4.....	257
Figura 105. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 5.....	257
Figura 106. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 6.....	258
Figura 107. EDS 2 – Branco Cristal – ponto 1.....	258
Figura 108. EDS 2 – Branco Cristal – ponto 2.....	258
Figura 109. EDS 2 – Branco Cristal – ponto 3.....	259
Figura 110. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 1.....	259
Figura 111. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 3.....	259
Figura 112. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 4.....	260
Figura 113. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 5.....	260
Figura 114. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 6.....	260
Figura 115. EDS 1 – Basaltite – ponto 1.	261
Figura 116. EDS 1 – Basaltite – ponto 2.	261
Figura 117. EDS 1 – Basaltite – ponto 3.	262
Figura 118. EDS 1 – Basaltite – ponto 4.	262
Figura 119. EDS 1 – Basaltite – ponto 5.	262
Figura 120. EDS 1 – Capão Bonito GM – ponto 1.....	263
Figura 121. EDS 1 – Capão Bonito GM– ponto 3.....	263

Figura 122. EDS 1 – Capão Bonito GM – ponto 4.....	264
Figura 123. EDS 2 – Capão Bonito GM – ponto 1.....	264
Figura 124. EDS 2 – Capão Bonito GM – ponto 3.....	264
Figura 125. EDS 2 – Capão Bonito GM – ponto 4.....	265
Figura 126. EDS 1 – Iragna– ponto 1.....	265
Figura 127. EDS 1 – Iragna– ponto 4.....	266
Figura 128. EDS 1 – Iragna– ponto 4.....	266
Figura 129. EDS 1 – Iragna– ponto 6.....	266
Figura 130. EDS 2 – Iragna– ponto 1.....	267
Figura 131. EDS 2 – Iragna– ponto 2.....	267
Figura 132. EDS 3 – Iragna– ponto 1.....	267
Figura 133. EDS 3 – Iragna– ponto 3.....	268
Figura 134. EDS 3 – Iragna– ponto 4.....	268
Figura 135. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 1.....	269
Figura 136. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 6.....	269
Figura 137. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 7.....	269
Figura 138. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 8.....	270
Figura 139. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 9.....	270
Figura 140. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 1.....	270
Figura 141. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 6.....	271
Figura 142. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 7.....	271
Figura 143. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 8.....	271
Figura 144. EDS 1 – Capão Bonito – ponto 1.	272
Figura 145. EDS 1 – Capão Bonito – ponto 3.	272
Figura 146. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 1.	273
Figura 147. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 5.	273
Figura 148. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 6.	273
Figura 149. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 7.	274
Figura 150. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 8.	274
Figura 151. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 1.	274
Figura 152. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 3.	275
Figura 153. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 4.	275
Figura 154. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 5.	275
Figura 155. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 6.	276

Figura 156. EDS 1 – For di Pesco – ponto 1.....	276
Figura 157. EDS 1 – For di Pesco – ponto 3.....	277
Figura 158. EDS 1 – Cinza Novo Mundo – ponto 1.....	277
Figura 159. EDS 1 – Cinza Novo Mundo – ponto 2.....	278
Figura 160. EDS 1 – Cinza Novo Mundo – ponto 3.....	278
Figura 161. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 1.....	279
Figura 162. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 2.....	279
Figura 163. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 3.....	279
Figura 164. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 4.....	280
Figura 165. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 5.....	280
Figura 166. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 6.....	280
Figura 167. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 1.....	281
Figura 168. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 2.....	281
Figura 169. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 3.....	281
Figura 170. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 1.....	282
Figura 171. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 2.....	282
Figura 172. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 3.....	283
Figura 173. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 4.....	283
Figura 174. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 2.....	284
Figura 175. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 3.....	284
Figura 176. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 4.....	284
Figura 177. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 6.....	285
Figura 178. EDS 2 – Rosso Lucido – ponto 1.....	285
Figura 179. EDS 2 – Rosso Lucido – ponto 4.....	285
Figura 180. EDS 2 – Rosso Lucido – ponto 5.....	286
Figura 181. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 1.....	286
Figura 182. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 2.....	287
Figura 183. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 3.....	287
Figura 184. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 4.....	287
Figura 185. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 5.....	288
Figura 186. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 6.....	288
Figura 187. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 1.....	288
Figura 188. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 2.....	289
Figura 189. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 3.....	289

Figura 190. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 4.	289
Figura 191. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 5.	290
Figura 192. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 6.	290
Figura 193. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 1.	291
Figura 194. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 2.	291
Figura 195. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 3.	291
Figura 196. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 4.	292
Figura 197. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 5.	292
Figura 198. EDS 1 – Sodalita – ponto 1.	293
Figura 199. EDS 1 – Sodalita – ponto 2.	293
Figura 200. EDS 1 – Blinder Vermelho Claro – ponto 1.	294
Figura 201. EDS 1 – Blinder Vermelho Claro – ponto 2.	294
Figura 202. EDS 1 – Blinder Vermelho Claro – ponto 3.	294
Figura 203. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 1.	295
Figura 204. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 2.	295
Figura 205. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 3.	296
Figura 206. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 4.	296
Figura 207. EDS 2 – Cinza Corumbá – ponto 1.	296
Figura 208. EDS 2 – Cinza Corumbá – ponto 2.	297
Figura 209. EDS 3 – Cinza Corumbá – ponto 1.	297
Figura 210. EDS 3 – Cinza Corumbá – ponto 2.	297
Figura 211. EDS 3 – Cinza Corumbá – ponto 3.	298
Figura 212. EDS 1 – Marrom SP– ponto 1.	298
Figura 213. EDS 1 – Marrom SP– ponto 2.	299
Figura 214. EDS 1 – Marrom SP– ponto 3.	299
Figura 215. EDS 2 – Marrom SP– ponto 1.	299
Figura 216. EDS 2 – Marrom SP– ponto 2.	300
Figura 217. EDS 2 – Marrom SP– ponto 3.	300
Figura 218. EDS 2 – Marrom SP– ponto 4.	300
Figura 219. Gráfico da relação entre Th/U e Rn-220/Rn-222 nas amostras estudadas.	302
Figura 220. Gráfico de dispersão dos valores de Th-232 e Rn-220 das amostras estudadas.	304
Figura 221. Gráfico dos teores de Ra nas amostras estudadas.	305

Figura 222. Dendograma em relação ao Index e exalação de radônio.	307
Figura 223. Dendograma em relação às atividades de Ra-226, Th-232 e K-40..	308
Figura 224. Fluxograma do método proposto para aprovação do uso de um lote de amostras de rocha ornamental em interiores.	310
Figura 225. Exemplo de dendograma.	330
Figura 226. Exemplo de box plot.	331
Figura 227. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ - Capão Bonito – superfície polida.	337
Figura 228. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ - Capão Bonito – superfície cortada.	338
Figura 229. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Basaltite – superfície rugosa.	338
Figura 230. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Cristal – superfície polida.	339
Figura 231. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Cristal – superfície rugosa.	340
Figura 232. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Flor di Pesco – superfície polida.	340
Figura 233. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Rosso Lucido – superfície polida.	341
Figura 234. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Suíça – superfície rugosa.	342
Figura 235. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Sodalita – superfície polida.	342
Figura 236. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Lusera Fiamatta – superfície cortada.	343
Figura 237. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Lusera Fiamatta – superfície rugosa.	344
Figura 238. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Pietra Lavica – superfície rugosa.	344
Figura 239. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Rosa Capri – superfície polida.	345
Figura 240. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Rosa Capri – superfície rugosa.	346

Figura 241. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Siena – superfície polida.	346
Figura 242. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Siena – superfície rugosa.....	347
Figura 243. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Maracujá – superfície polida.....	348
Figura 244. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Maracujá – superfície rugosa.	348
Figura 245. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Vermelho Bragança – superfície polida.....	349
Figura 246. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Vermelho Bragança – superfície rugosa.	350
Figura 247. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Azul Bahia Escuro – superfície polida.	350
Figura 248. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Azul Bahia Escuro – superfície corte.....	351
Figura 249. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Cinza Corumbá – superfície polida.....	352
Figura 250. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Cinza Corumbá – superfície rugosa.	352
Figura 251. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Café Imperial – superfície polida.....	353
Figura 252. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Café Imperial – superfície rugosa.	354
Figura 253. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Pietra Lavica (1) – superfície rugosa.	355
Figura 254. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Azul Bahia – superfície polida.	356
Figura 255. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Azul Bahia – superfície corte.....	356
Figura 256. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Vermelho Jacarandá – superfície polida.	357
Figura 257. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Vermelho Jacarandá – superfície rugosa.....	358

Figura 258. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Onsernone Lucido – superfície polida.	358
Figura 259. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Onsernone Lucido – superfície rugosa.....	359
Figura 260. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Cinza Castelo – superfície polida.	360
Figura 261. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Cinza Castelo – superfície rugosa.....	360
Figura 262. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Verde Pavão – superfície rugosa.....	361
Figura 263. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Verde Pavão – superfície polida.	362
Figura 264. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Café Imperial Claro– superfície corte.....	362
Figura 265. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Café Imperial Claro– superfície polida.	363
Figura 266. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Cinza Novo Mundo – superfície polida.	364
Figura 267. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Cinza Novo Mundo – superfície corte.....	364
Figura 268. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Blinder Vermelho Claro – superfície corte.	365
Figura 269. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Blinder Cinza Escuro– superfície corte.....	366
Figura 270. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Basaltite– superfície corte.	366
Figura 271. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Bege Ipanema – superfície rugosa.	367
Figura 272. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Ceará – superfície polida.	368
Figura 273. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Ceará – superfície corte.	368
Figura 274. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Marfim – superfície polida.	369

Figura 275. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Marfim – superfície rugosa.	370
Figura 276. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Suíça – superfície corte.	370
Figura 277. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Marrom São Paulo – superfície corte.	371
Figura 278. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Mônaco Light – superfície polida.	372
Figura 279. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Pietra de Jerusalém – superfície polida.	372
Figura 280. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Pietra de Jerusalém – superfície rugosa.	373
Figura 281. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Rosso Lucido– superfície corte.	374
Figura 282. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Verde Ubatuba– superfície polida.	374
Figura 283. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Verde Ubatuba– superfície rugosa.	375
Figura 284. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Capão Bonito GM – superfície polida.	376
Figura 285. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Bege Dunas – superfície polida.	376
Figura 286. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Bege Dunas – superfície polida com PEK BIO.	377
Figura 287. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Juparaná Gold – superfície polida.	378
Figura 288. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Juparaná Gold – superfície polida com PEK BIO.	378
Figura 289. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Barroco Juruena – superfície polida.	379
Figura 290. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Barroco Juruena – superfície polida com PEK BIO.	380
Figura 291. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Preto Absoluto – superfície polida.	380

Figura 292. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Preto Absoluto – superfície polida com PEK BIO.	381
Figura 293. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Cinza Novo Mundo – superfície polida com PEK BIO.	382
Figura 294. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Lusera Fiammata – superfície polida com PEK BIO.	382
Figura 295. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Capão Bonito – superfície polida com PEK BIO.	383
Figura 296. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Branco Cristal – superfície polida com PEK BIO.	384
Figura 297. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Verde Maritaca – superfície polida com PEK BIO.	384
Figura 298. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Verde Maritaca – superfície polida.....	385
Figura 299. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m ³ – Rosso Lucido – superfície polida com PEK BIO.....	386
Figura 300. Amostra e perfil – Azul Bahia – superfície mais rugosa.	388
Figura 301. Amostra e perfil – Azul Bahia – superfície menos rugosa.	388
Figura 302. Amostra e perfil – Azul Bahia Escuro – superfície mais rugosa.	388
Figura 303. Amostra e perfil – Azul Bahia Escuro – superfície menos rugosa.	389
Figura 304. Amostra e perfil – Basaltite– superfície menos rugosa.	389
Figura 305. Amostra e perfil – Basaltite– superfície mais rugosa.....	389
Figura 306. Amostra e perfil – Bege Ipanema.	390
Figura 307. Amostra e perfil – Blinder Cinza Escuro.....	390
Figura 308. Amostra e perfil – Blinder Vermelho Claro.	390
Figura 309. Amostra e perfil – Branco Ceará– superfície menos rugosa.	391
Figura 310. Amostra e perfil – Branco Ceará– superfície mais rugosa.	391
Figura 311. Amostra e perfil – Branco Cristal– superfície mais rugosa.....	391
Figura 312. Amostra e perfil – Branco Cristal– superfície mais rugosa.....	392
Figura 313. Amostra e perfil – Branco Marfim– superfície menos rugosa.....	392
Figura 314. Amostra e perfil – Branco Marfim– superfície mais rugosa.	392
Figura 315. Amostra e perfil – Branco Siena– superfície menos rugosa.....	393
Figura 316. Amostra e perfil – Branco Siena– superfície mais rugosa.....	393
Figura 317. Amostra e perfil – Branco Suíça– superfície mais rugosa.....	393

Figura 318. Amostra e perfil – Branco Suíça– superfície menos rugosa.....	394
Figura 319. Amostra e perfil – Café Imperial Claro – superfície mais rugosa.	394
Figura 320. Amostra e perfil – Café Imperial Claro – superfície menos rugosa.	394
Figura 321. Amostra e perfil – Café Imperial – superfície menos rugosa.....	395
Figura 322. Amostra e perfil – Café Imperial – superfície mais rugosa.	395
Figura 323. Amostra e perfil – Capão Bonito – superfície mais rugosa.....	395
Figura 324. Amostra e perfil – Capão Bonito – superfície menos rugosa.	396
Figura 325. Amostra e perfil – Capão Bonito GM.....	396
Figura 326. Amostra e perfil – Cinza Castelo– superfície menos rugosa.	396
Figura 327. Amostra e perfil – Cinza Castelo– superfície mais rugosa.	397
Figura 328. Amostra e perfil – Cinza Corumbá– superfície menos rugosa.	397
Figura 329. Amostra e perfil – Cinza Corumbá– superfície mais rugosa.	397
Figura 330. Amostra e perfil – Cinza Novo Mundo – superfície menos rugosa.....	398
Figura 331. Amostra e perfil – Cinza Novo Mundo – superfície mais rugosa.....	398
Figura 332. Amostra e perfil – Flor di Pesco.	398
Figura 333. Amostra e perfil – Iragua – superfície menos rugosa.....	399
Figura 334. Amostra e perfil – Iragua – superfície mais rugosa.	399
Figura 335. Amostra e perfil – Lusera Fiammata – superfície menos rugosa.	399
Figura 336. Amostra e perfil – Lusera Fiammata – superfície mais rugosa.	400
Figura 337. Amostra e perfil – Maracujá – superfície menos rugosa.	400
Figura 338. Amostra e perfil – Maracujá – superfície menos rugosa.	400
Figura 339. Amostra e perfil – Marrom São Paulo.	401
Figura 340. Amostra e perfil – Mônaco Light.....	401
Figura 341. Amostra e perfil – Onsernone Lucido – superfície menos rugosa.....	401
Figura 342. Amostra e perfil – Onsernone Lucido – superfície mais rugosa.	402
Figura 343. Amostra e perfil – Pietra de Jerusalém – superfície menos rugosa.	402
Figura 344. Amostra e perfil – Pietra de Jerusalém – superfície mais rugosa.....	402
Figura 345. Amostra e perfil – Pietra Lavica (1).	403
Figura 346. Amostra e perfil – Pietra Lavica.....	403
Figura 347. Amostra e perfil – Rosa Capri – superfície menos rugosa.	403
Figura 348. Amostra e perfil – Rosa Capri – superfície mais rugosa.	404
Figura 349. Amostra e perfil – Rosso Lucido – superfície mais rugosa.....	404
Figura 350. Amostra e perfil – Rosso Lucido – superfície menos rugosa.	404
Figura 351. Amostra e perfil – Sodalita.	405

Figura 352. Amostra e perfil – Verde Pavão – superfície menos rugosa.	405
Figura 353. Amostra e perfil – Verde Pavão – superfície mais rugosa.....	405
Figura 354. Amostra e perfil – Verde Ubatuba – superfície mais rugosa.	406
Figura 355. Amostra e perfil – Verde Ubatuba – superfície menos rugosa.	406
Figura 356. Amostra e perfil – Vermelho Bragança – superfície mais rugosa.....	406
Figura 357. Amostra e perfil – Vermelho Bragança – superfície menos rugosa.....	407
Figura 358. Amostra e perfil – Vermelho Jacarandá – superfície menos rugosa. ...	407
Figura 359. Amostra e perfil – Vermelho Jacarandá – superfície mais rugosa.	407
Figura 360. Calibração do RadonMapper para o Rn-222.....	442
Figura 361. Calibração do RadonMapper para o Rn-220.....	443

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físico-químicas relevantes dos isótopos ^{222}Rn , ^{220}Rn e ^{219}Rn	57
Tabela 2. Distância percorrida pelos isótopos de ^{222}Rn e ^{220}Rn durante o recuo do decaimento dos precursores em diferentes meios.	64
Tabela 3. Sumário das técnicas comuns de medição de radônio.	99
Tabela 4. Utilização e categorias para materiais de construção considerando o index.	110
Tabela 5. Participação do setor de rochas ornamentais no total brasileiro de exportações.....	118
Tabela 6. Identificação das amostras.....	125
Tabela 7. Eficiência nuclídeos CoMo 170.	155
Tabela 8. Resultados monitor de contaminação (CoMo), cor predominante das amostras e origem.....	158
Tabela 9. Cálculo do Index a partir das espectrometrias gama.....	160
Tabela 10. Composição química obtida por ativação neutrônica.	163
Tabela 11. Sumário dos resultados das exalações dos gases Rn-222 e Rn-220 das amostras de rocha ornamental.....	165
Tabela 12. Sumário das concentrações específicas em Bq/hm ² para as superfícies mais lisas de cada amostra – total, Rn-220 e Rn-222.....	166
Tabela 13. Concentrações específicas e tempo limite para atingir os limites da OMS e da UE.	168
Tabela 14. Variáveis analisadas para o objetivo 1 e 2.	170
Tabela 15. Índices de perigo radiológicos calculados para as amostras estudadas.	186
Tabela 16. Volume de sólidos e massas das amostras submetidas aos ensaios de porosidade e permeabilidade.	190
Tabela 17. Resultados dos ensaios de porosidade e permeabilidade.	190
Tabela 18. Distâncias de difusão calculadas para Rn-222 e Rn-220.....	192
Tabela 19. Resultados dos parâmetros físicos das rochas.	193

Tabela 20. Diferença entre as exalações das superfícies das rochas em relação à rugosidade – Rn-total, Rn-222 e Rn-220.....	199
Tabela 21. Diferença entre as exalações de Rn-total, Rn-222 e Rn-220 das superfícies das rochas em relação à rugosidade para as amostras que exalam acima de 150 Bq/hm ² de Rn -total.	200
Tabela 22. Parâmetros obtidos superfícies menos rugosas – parte I.....	202
Tabela 23. Parâmetros obtidos superfícies menos rugosas – parte II.....	203
Tabela 24. Parâmetros obtidos superfícies mais rugosas – parte I.....	204
Tabela 25. Parâmetros obtidos superfícies mais rugosas – parte II.....	205
Tabela 26. Matriz de correlação de Spearman.....	210
Tabela 27. Variância combinada dos parâmetros.	211
Tabela 28. Matriz de componentes rotacionada.....	215
Tabela 29. Teste KMO e Esfericidade de Bartlett.	216
Tabela 30. Matriz de correlação para as variáveis de exalação, para as superfícies lisas.	219
Tabela 31. Matriz de correlação para as variáveis de exalação, para as superfícies rugosas.	219
Tabela 32. Matriz de correlação para as variáveis de exalação 1, para as superfícies lisas e rugosas.	220
Tabela 33. Matriz de correlação para as variáveis de exalação 2, para as superfícies lisas e rugosas.	220
Tabela 34. Exalações 1 e 2 paara as superfícies mais e menos rugosas.....	221
Tabela 35. Diferenças relativas das variáveis de superfície escolhidas pela análise de fatorial.	229
Tabela 36. Diferença entre as exalações das superfícies das rochas em relação à aplicação de PEK BIO – Rn-total, Rn-222 e Rn-220.....	233
Tabela 37. Intesidade luminosa refletida antes e depois da aplicação do impermeabilizante.	236
Tabela 38. Análises químicas por fluorescência de raios X – parte I.	239
Tabela 39. Análises químicas por fluorescência de raios X – parte II.	240
Tabela 40. Siglas das litologias utilizadas no agrupamento das amostras.....	243
Tabela 41. Sumário resultados DRX – parte I.	245
Tabela 42. Sumário resultados DRX – parte II.	246
Tabela 43. Petrografia – parte I.....	250

Tabela 44. Petrografia – parte II.....	251
Tabela 45. Petrografia – parte III.....	252
Tabela 46. Correlações das concentrações de Spearman, obtidas por ativação neutrônica, de U, Th e K com as dos demais elementos.	254
Tabela 47. Proporções de Th/U e Rn-220/Rn-222 nas amostras.....	301
Tabela 48. Média do teor de Ra nas amostras estudadas.	304
Tabela 49. Siglas das litologias utilizadas no agrupamento das amostras.....	306
Tabela 50. Concentração específica em Bq/hm ² – Capão Bonito – superfície polida.	337
Tabela 51. Concentração específica em Bq/hm ² – Capão Bonito – superfície cortada.	337
Tabela 52. Concentração específica em Bq/hm ² – Basaltite – superfície rugosa. ...	338
Tabela 53. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Cristal – superfície polida.	339
Tabela 54. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Cristal – superfície rugosa.	339
Tabela 55. Concentração específica em Bq/hm ² – Flor di Pesco – superfície polida.	340
Tabela 56. Concentração específica em Bq/hm ² – Rosso Lucido – superfície polida.	341
Tabela 57. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Suíça– superfície rugosa.	341
Tabela 58. Concentração específica em Bq/hm ² – Sodalita – superfície polida.....	342
Tabela 59. Concentração específica em Bq/hm ² – Lusera Fiamatta – superfície cortada.	343
Tabela 60. Concentração específica em Bq/hm ² – Lusera Fiamatta – superfície rugosa.	343
Tabela 61. Concentração específica em Bq/hm ² – Pietra Lavica – superfície rugosa.	344
Tabela 62. Concentração específica em Bq/hm ² – Rosa Capri – superfície polida.	345
Tabela 63. Concentração específica em Bq/hm ² – Rosa Capri – superfície rugosa.	345
Tabela 64. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Siena – superfície polida.	346

Tabela 65. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Siena – superfície rugosa.	347
Tabela 66. Concentração específica em Bq/hm ² – Maracujá – superfície polida....	347
Tabela 67. Concentração específica em Bq/hm ² – Maracujá – superfície rugosa. .	348
Tabela 68. Concentração específica em Bq/hm ² – Vermelho Bragança – superfície polida.....	349
Tabela 69. Concentração específica em Bq/hm ² – Vermelho Bragança – superfície rugosa.	349
Tabela 70. Concentração específica em Bq/hm ² – Azul Bahia Escuro – superfície polida.....	350
Tabela 71. Concentração específica em Bq/hm ² – Azul Bahia Escuro – superfície corte.	351
Tabela 72. Concentração específica em Bq/hm ² – Cinza Corumbá – superfície polida.	351
Tabela 73. Concentração específica em Bq/hm ² – Cinza Corumbá – superfície rugosa.	352
Tabela 74. Concentração específica em Bq/hm ² – Café Imperial – superfície polida.	353
Tabela 75. Concentração específica em Bq/hm ² – Café Imperial – superfície rugosa.	353
Tabela 76. Concentração específica em Bq/hm ² – Iragua – superfície polida.	354
Tabela 77. Concentração específica em Bq/hm ² – Iragua – superfície rugosa.	354
Tabela 78. Concentração específica em Bq/hm ² – Pietra Lavica (1) – superfície rugosa.	355
Tabela 79. Concentração específica em Bq/hm ² – Azul Bahia – superfície polida.	355
Tabela 80. Concentração específica em Bq/hm ² – Azul Bahia – superfície corte. ...	356
Tabela 81. Concentração específica em Bq/hm ² – Vermelho Jacarandá – superfície polida.....	357
Tabela 82. Concentração específica em Bq/hm ² – Vermelho Jacarandá – superfície rugosa.	357
Tabela 83. Concentração específica em Bq/hm ² – Onsernone Lucido – superfície polida.....	358
Tabela 84. Concentração específica em Bq/hm ² – Onsernone Lucido – superfície rugosa.	359

Tabela 85. Concentração específica em Bq/hm ² – Cinza Castelo – superfície polida.	359
Tabela 86. Concentração específica em Bq/hm ² – Cinza Castelo – superfície rugosa.	360
Tabela 87. Concentração específica em Bq/hm ² – Verde Pavão – superfície rugosa.	361
Tabela 88. Concentração específica em Bq/hm ² – Verde Pavão – superfície polida.	361
Tabela 89. Concentração específica em Bq/hm ² – Café Imperial Claro – superfície corte.	362
Tabela 90. Concentração específica em Bq/hm ² – Café Imperial Claro – superfície polida.....	363
Tabela 91. Concentração específica em Bq/hm ² – Cinza Novo Mundo – superfície polida.....	363
Tabela 92. Concentração específica em Bq/hm ² – Cinza Novo Mundo – superfície corte.	364
Tabela 93. Concentração específica em Bq/hm ² – Blinder Vermelho Claro – superfície corte.	365
Tabela 94. Concentração específica em Bq/hm ² – Blinder Cinza Escuro – superfície corte.	365
Tabela 95. Concentração específica em Bq/hm ² – Basaltite – superfície corte.	366
Tabela 96. Concentração específica em Bq/hm ² – Bege Ipanema – superfície rugosa.	367
Tabela 97. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Ceará – superfície polida.	367
Tabela 98. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Ceará – superfície corte.	368
Tabela 99. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Marfim – superfície polida.	369
Tabela 100. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Marfim – superfície rugosa.	369
Tabela 101. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Suíça – superfície corte.	370

Tabela 102. Concentração específica em Bq/hm ² – Marrom São Paulo – superfície corte.	371
Tabela 103. Concentração específica em Bq/hm ² – Mônaco Light – superfície polida.	371
Tabela 104. Concentração específica em Bq/hm ² – Pietra de Jerusalém – superfície polida.....	372
Tabela 105. Concentração específica em Bq/hm ² – Pietra de Jerusalém – superfície rugosa.	373
Tabela 106. Concentração específica em Bq/hm ² – Rosso Lucido– superfície corte.	373
Tabela 107. Concentração específica em Bq/hm ² – Verde Ubatuba – superfície polida.	374
Tabela 108. Concentração específica em Bq/hm ² – Verde Ubatuba – superfície rugosa.	375
Tabela 109. Concentração específica em Bq/hm ² – Capão Bonito GM – superfície polida.....	375
Tabela 110. Concentração específica em Bq/hm ² – Bege Dunas – superfície polida.	376
Tabela 111. Concentração específica em Bq/hm ² – Bege Dunas – superfície polida com PEK BIO.	377
Tabela 112. Concentração específica em Bq/hm ² – Juparaná Gold – superfície polida.	377
Tabela 113. Concentração específica em Bq/hm ² – Juparaná Gold – superfície polida com PEK BIO.	378
Tabela 114. Concentração específica em Bq/hm ² – Barroco Juruena – superfície polida.....	379
Tabela 115. Concentração específica em Bq/hm ² – Barroco Juruena – superfície polida com PEK BIO.....	379
Tabela 116. Concentração específica em Bq/hm ² – Preto Absoluto – superfície polida.	380
Tabela 117. Concentração específica em Bq/hm ² – Preto Absoluto – superfície polida com PEK BIO.	381
Tabela 118. Concentração específica em Bq/hm ² – Cinza Novo Mundo – superfície polida com PEK BIO.....	381

Tabela 119. Concentração específica em Bq/hm ² – Lusera Fiammata – superfície polida com PEK BIO.....	382
Tabela 120. Concentração específica em Bq/hm ² – Capão Bonito – superfície polida com PEK BIO.	383
Tabela 121. Concentração específica em Bq/hm ² – Branco Cristal – superfície polida com PEK BIO.	383
Tabela 122. Concentração específica em Bq/hm ² – Verde Maritaca – superfície polida com PEK BIO.	384
Tabela 123. Concentração específica em Bq/hm ² – Verde Maritaca – superfície polida.	385
Tabela 124. Concentração específica em Bq/hm ² – Rosso Lucido – superfície polida com PEK BIO.	385
Tabela 125. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte I.	409
Tabela 126. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte II.	410
Tabela 127. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte III.	410
Tabela 128. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte IV.....	411

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AANI – Análise por Ativação Neutrônica Instrumental.

AEDE – *Annual Effective Dose Equivalent*.

AGDE – *Annual Gonadal Dose Equivalent*.

Bq – Becquerel.

CENPES – Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello.

Ci – Curie.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear.

CRPQ – Centro do Reator de Pesquisas.

DNA – *Deoxyribonucleic Acid*.

DRX – Difração de Raios X.

EC – *European Commission*.

EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X.

ELCR – *Excess Life Time Cancer Risk*.

EPA – *Environmental Protection Agency*.

ETR – Elementos de Terras Raras.

EUA – Estados Unidos da América.

IAEA – *International Atomic Energy Agency*.

ICDD – *International Centre for Diffraction Data*.

ICRP – *International Commission on Radiological Protection*

IGC – Instituto de Geociências da USP.

IRA – *Institut de Radiophysique*.

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

IUGS – *International Union of Geological Sciences*.

LACASEMIN – Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração.

LAPOC – Laboratório de Poços de Caldas.

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica.

LTM – Laboratório de Tratamento de Minérios da USP.

LRA – Laboratório de Radiometria Ambiental.

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

NORM – *Naturally Occurring Radioactive Materials*.

NCRP – *National Council on Radiation Protection.*

OMS – Organização Mundial da Saúde.

ONU – Organização das Nações Unidas.

OSHA – *Occupational Safety and Health Administration.*

PAN-ISCD- *PANalytical Inorganic Crystal Structure Database.*

SBPR – Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica.

STAR – Sistema para Teste em Atmosferas com Radônio.

UE – União Europeia.

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

WHO – *World Health Organization.*

LISTA DE SÍMBOLOS

λ – constante de decaimento.

$A(t)$ – atividade de uma amostra em um tempo t .

$n(t)$ – número de átomos radioativos em um tempo t .

t – tempo de medição.

n_0 – número de átomos radioativos em $t = 0$.

$T_{1/2}$ – tempo de meia-vida de um radioisótopo.

$\langle R \rangle$ – valor médio do alcance da partícula alfa.

E – energia.

D_{MA} – coeficiente de difusão molecular no ar.

D_{MW} – coeficiente de difusão molecular na água.

E_R – coeficiente de emanção.

R – atividade de rádio no material por unidade de massa.

ρ_B – densidade *bulk* do material.

V – volume.

C – concentração de radônio.

M – massa.

v – taxa de fluxo.

N_{eq} – número de contagem de picos de ^{214}Pb e ^{214}Bi em equilíbrio.

N_0 – número de contagem de picos de ^{214}Pb e ^{214}Bi na condição inicial.

f – densidade de fluxo.

D_M – coeficiente de difusão molecular.

∇C – gradiente da concentração de atividade do radônio.

n_T – porosidade.

τ – tortuosidade.

Z – profundidade.

L_r – distância de difusão de radônio.

D_r – coeficiente efetivo de difusão.

J_m – taxa mássica de exalação.

λ_e – constante efetiva de decaimento considerando perdas.

m – fração dos poros preenchidos com água.

t_U – teor de urânio no minério.
 w – massa de rejeito.
 D – coeficiente de difusão do radônio na matriz.
 t_e – tempo de saturação do radônio na câmara.
 A – área.
 N – taxa líquida de contagem (descontando o fundo).
 t_c – tempo de contagem.
 ϵ – eficiência de contagem do sistema.
 I – intensidade dos raios gama.
 μ - fator de atenuação.
 e – espessura do material absorvedor.
 C_e – taxa específica de exalação.
 ρ_g – densidade de grãos do material.
 R_{eq} – atividade de rádio equivalente.
 H_{in} – índice de perigo interno.
 H_{ex} – índice de perigo externo.
 D_{ab} – dose absorvida.
 $AGDE$ – dose equivalente gonadal anual.
 $AEDE$ – dose efetiva anual equivalente.
 $ELCR$ – risco de câncer por excesso de tempo de vida.
 S_q – raiz quadrada da área média.
 S_{sk} – assimetria.
 S_{mr} – razão de material a uma altura específica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	42
1.1. OBJETIVO	45
1.1.1. Objetivos específicos.....	45
1.2. JUSTIFICATIVA	46
2. REVISÃO DA LITERATURA	47
2.1. RADIOATIVIDADE	47
2.1.1. Constante de decaimento λ	47
2.1.2. Atividade de uma amostra em um dado instante $A(t)$	47
2.1.3. Meia-vida do radioisótopo – $T_{1/2}$	49
2.2. RADIAÇÕES IONIZANTES.....	50
2.2.1. Consequências biológicas da interação das radiações ionizantes com a matéria	50
2.3. RADIAÇÕES NUCLEARES	51
2.3.1. Radiação alfa ou partícula alfa	51
2.3.1.1 Interação das partículas alfa com a matéria.....	52
2.3.2. Radiação beta ou partícula beta	53
2.3.3. Radiação gama	53
2.4. FONTES NATURAIS E ARTIFICIAIS DE RADIAÇÃO IONIZANTES.....	53
2.4.1. Séries radioativas naturais.....	55
2.4.2. Radônio e torônio.....	57
2.5. NORM – “NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE MATERIALS”	59
2.6. EXALAÇÃO, EMANAÇÃO E EMISSÃO.....	60
2.6.1. Exalação versus emanação.....	60
2.6.2. Exalação versus emissão	61
2.7. COEFICIENTE DE EMANAÇÃO.....	63
2.7.1. Fatores que podem afetar a emanação de radônio	65
2.7.1.1 Distribuição do elemento rádio, distribuição granulométrica e formato das partículas	65
2.7.1.2 Umidade.....	66
2.7.2. Coeficiente de emanação para materiais naturais	68

2.7.2.1	Materiais de construção	69
2.7.3.	 Medição do coeficiente de emissão de radônio	70
2.8.	COEFICIENTE DE DIFUSÃO	73
2.8.1.	 Medição do coeficiente de difusão	77
2.9.	FLUXO DE EXALAÇÃO	78
2.9.1.	 Taxa mássica de exalação.....	79
2.9.2.	 Estimativa das variáveis que afetam o fluxo de exalação de radônio	80
2.9.2.1	Coeficiente de emissão (E_R)	80
2.9.3.	 Coeficiente de difusão (D_r)	81
2.9.4.	 Concentração de atividade do rádio (R).....	82
2.10.	MEDIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO E DA DENSIDADE DE FLUXO DE EXALAÇÃO.....	83
2.10.1.	 Medição da concentração de radônio	83
2.10.1.1	Detectores de barreira de superfície e nuclear track detectors	86
2.10.1.2	Detectores de barreira de superfície (estado sólido)	86
2.10.1.3	Células de cintilação.....	87
2.10.1.4	Método das cargas elétricas (electret).....	88
2.10.1.5	Carvão ativado	89
2.10.1.6	Câmara de ionização.....	90
2.10.2.	 Medição da densidade de fluxo de exalação	90
2.10.2.1	Acumulador	90
2.10.2.2	Modelo para interpretação dos dados de concentração.....	93
2.10.2.3	Método de fluxo contínuo	95
2.10.2.4	Adsorção	96
2.10.3.	 Sumário das técnicas de medição de radônio.....	98
2.11.	MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE GÁS RADÔNIO NO SOLO.....	100
2.12.	MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	101
2.13.	CALIBRAÇÃO E INCERTEZAS	102
2.14.	ESPECTROMETRIA GAMA	105

2.14.1.	Interações dos raios gama com a matéria	106
2.15.	LEGISLAÇÃO	108
2.15.1.	Índices de perigo radiológico.....	113
2.15.2.	Brasil	116
2.16.	PANORAMA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS NO BRASIL.....	117
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	121
3.1.	AMOSTRAS	124
3.2.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	127
3.2.1.	Cominuição.....	127
3.2.2.	Homogeneização e quartejamento	128
3.3.	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	130
3.3.1.	Fluorescência de raios X – FRX	130
3.3.2.	Difração de raios X – DRX	131
3.3.3.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	132
3.3.4.	Descrição das lâminas petrográficas	133
3.3.5.	Densidade e umidade.....	134
3.3.6.	Porosidade e permeabilidade das rochas.....	138
3.3.6.1	Adsorção gasosa (nitrogênio grau comercial)	138
3.3.6.2	Permeabilidade por decaimento de pulso	141
3.4.	CÁLCULO DO INDEX E QUANTIFICAÇÃO DE URÂNIO E TÓRIO.....	142
3.4.1.	Determinação das atividades de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{40}K por espectrometria gama	142
3.4.2.	Análise por ativação neutrônica	144
3.5.	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS ROCHAS	145
3.5.1.	Interferometria	145
3.5.2.	Microscopia confocal.....	146
3.6.	EXALAÇÃO DE RADÔNIO	147
3.6.1.	Detector portátil de radiação total	154
3.6.2.	Impermeabilizante de rocha	156
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	157
4.1.	IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE TRIAGEM (OBJETIVO 1).....	157
4.1.1.	Prólogo – objetivo 1	157
4.1.2.	Detector portátil de radiação total	158

4.1.3.	Espectrometria gama	160
4.1.4.	Ativação neutrônica	162
4.1.5.	Análises das concentrações específicas de radônio.....	164
4.1.6.	Análise estatística objetivo 1	169
4.1.6.1	Hipóteses	171
4.2.	CORRELAÇÃO ENTRE INDEX GAMA E EXALAÇÕES DE RN-222 E RN-220 (OBJETIVO 2).....	179
4.2.1.	Prólogo – objetivo 2	179
4.2.2.	Análise estatística objetivo 2	179
4.2.2.1	Hipótese	179
4.2.3.	Análise dos índices de perigo radiológico.....	185
4.3.	CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS FÍSICOS DAS ROCHAS E AS EXALAÇÕES DE RADÔNIO E TORÔNIO (OBJETIVO 3)	189
4.3.1.	Prólogo – objetivo 3	189
4.3.2.	Resultados porosidade e permeabilidade PDP	190
4.3.2.1	Hipótese	190
4.3.3.	Densidade, porcentagem aparente de poros e umidade	193
4.4.	CORRELAÇÕES ENTRE A RUGOSIDADE E AS EXALAÇÕES DE RN-222 E RN-220 (OBJETIVO 4)	197
4.4.1.	Prólogo – objetivo 4	197
4.4.1.1	Hipótese	197
4.4.2.	Diferença entre as exalações das superfícies mais e menos rugosas	198
4.4.1.	Parâmetros de superfície obtidos.....	201
4.4.2.	Análise Estatística.....	208
4.4.3.	Análise fatorial (data reduction).....	209
4.4.4.	Análise das variáveis de exalação	218
4.4.5.	Análise entre rugosidade e exalação.....	222
4.4.5.1	Teste não paramétrico	225
4.5.	MÉTODO ALTERNATIVO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL EM RELAÇÃO À EXALAÇÃO DE RADÔNIO (OBJETIVO 5)	231
4.5.1.	Prólogo – objetivo 5	231

4.5.1.1	Hipótese	231
4.5.2.	Diferença entre as exalações das superfícies antes e depois da aplicação de impermeabilizante	232
4.6.	ASSOCIAÇÃO MINERALÓGICA DE U E TH E PROPORÇÕES ENTRE OS ISÓTOPOS DE RADÔNIO (OBJETIVO 6)	237
4.6.1.	Prólogo – objetivo 6	237
4.6.2.	Caracterização mineralógica.....	238
4.6.3.	Análises químicas por fluorescência de raios X	238
4.6.4.	Difração de raios X.....	244
4.6.5.	Petrografia	247
4.6.6.	MEV.....	253
4.6.7.	Análise estatística objetivo 6	301
4.7.	MÉTODO PROPOSTO	309
5.	CONCLUSÕES.....	311
	REFERÊNCIAS.....	313
	APÊNDICES	325
	ANEXOS	412

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a segurança ocupacional e ambiental aumentou substancialmente nos últimos cinquenta anos. Dentre os problemas a serem citados estão: ruído, vibrações, gases tóxicos, poeiras, agentes químicos e radiações (VIEIRA *et al.*, 2009; HALEY; O'ROURKE, 2016; REINERT, 2016). Estas últimas podem ser subdivididas entre radiações ionizantes e não ionizantes.

As radiações alfa, beta e gama são exemplos de radiações ionizantes, ou seja, têm energia superior à ligação dos elétrons de um átomo. Essas radiações são provenientes de núcleos atômicos muito energéticos que contêm excesso de partículas ou de carga que são emitidas em consequência da tentativa de estabilização de alguns elementos (UNSCEAR, 1993).

Existem três famílias ou séries radioativas naturais, são elas: série do urânio (^{238}U decaindo até o ^{206}Pb estável), série do actínio (^{235}U decaindo até o ^{207}Pb estável) e a série do tório (^{232}Th decaindo até o ^{208}Pb estável). As três séries têm como elemento intermediário o gás radônio, cada um deles com uma massa atômica distinta (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn). Os três isótopos são gases inertes na temperatura ambiente e são emissores de partículas alfa. Assim, por serem derivados do urânio e do tório, os solos emanam naturalmente esses gases radioativos em concentrações variáveis dependendo da localização (KROPAT *et al.*, 2015).

A inalação do gás radônio e dos produtos do seu decaimento é um perigo para a saúde. As partículas alfa provenientes do decaimento radioativo atingem o tecido do pulmão e causam danos que podem levar ao desenvolvimento de câncer pulmonar (GRAY *et al.*, 2009). A maior parte do ^{222}Rn é exalada antes de decair, entretanto, a maior parte da dose radioativa vem dos produtos do decaimento que são inalados por meio da poeira e se alojam nos tecidos pulmonares (UNSCEAR, 1988). Estes radionuclídeos decaem rapidamente e continuam o processo de danificar o tecido do pulmão (EPA, 2014).

O estudo da proteção ao radônio é multidisciplinar, envolvendo desde conceitos químicos e físicos das radiações, aspectos geológicos e de engenharia até, inclusive, médicos.

A Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization* - WHO), órgão da Organização das Nações Unidas (ONU) afirma, no documento final do seu *International Radon Project* (ZEEB, 2007), que o radônio é a segunda maior causa de câncer de pulmão no mundo, atrás apenas do cigarro. O câncer de pulmão é uma doença agressiva, em média apenas 20% dos diagnosticados sobrevivem mais de cinco anos após a doença constatada (WHO, 2009).

Conforme a exposição ao radônio aumenta, as chances de se desenvolver câncer de pulmão também aumentam. Uma publicação do *American Journal of Epidemiology*, *The Iowa Radon Lung Cancer Study* (EPA, 2014), afirma que a probabilidade de se desenvolver câncer de pulmão aumenta 50% para uma pessoa exposta diariamente a concentrações acima de 4 pCi/L, equivalente a 148 Bq/m³. Ainda assim essa concentração é encontrada, segundo a EPA, em uma a cada quinze casas dos EUA. Os efeitos do radônio, além disso, podem se somar aos do cigarro (EPA, 2014).

^{238}U e ^{232}Th são os elementos pais das séries de decaimentos nas quais estão os principais isótopos de radônio. Estes dois elementos (^{238}U e ^{232}Th) e os produtos de seus decaimentos formam minerais ligando-se a outros elementos, e estão naturalmente dispersos na crosta terrestre, sendo, por exemplo, cerca de mil vezes mais comuns que o ouro. No subsolo, esses elementos irão decair, formando novos elementos, novos minerais e, conseqüentemente gerarão radônio em algum momento.

Os minerais geradores de radônio não estão uniformemente distribuídos pela crosta terrestre, e sendo assim há lugares onde são mais abundantes e lugares em que são praticamente inexistentes. Desta forma, não são todas as partes do globo que terão altos índices de emissão deste gás, e, logicamente também, haverá regiões em que estes índices serão potencializados.

Apesar de ser clara a existência de uma relação entre a formação do terreno e os problemas com radônio, o número de variáveis geológicas envolvidas é enorme. Por conta disso, ainda não é possível estimar com precisão quanto desse elemento há em um determinado lugar. Para fins de previsão, é possível medir os níveis do radônio em construções existentes espalhadas pelos países, ou mesmo medir no subsolo em diferentes locais, e a partir desses dados levantar quais regiões são mais problemáticas. Estes resultados são úteis para as autoridades, e podem ser utilizados para decidir onde focar as campanhas de mitigação para esta ameaça (UNSCEAR, 1994).

Estudos no Brasil ainda são incipientes, mas um projeto coordenado pelo governo do Estado de Minas Gerais estudou a região do Planalto de Poços de Caldas nos anos 2011 e 2012. O resultado da pesquisa, publicado em 2013, mostrou a média da concentração de radônio em ambientes internos para as casas amostradas superior a 100 Bq/m³. O mesmo estudo também correlacionou a quantidade de casos de câncer na região com a dose de radiação natural que a população é exposta e concluiu que o número de casos de câncer masculino no Planalto de Poços de Caldas é o decimo primeiro do *ranking* de municípios do Brasil e décimo nono em relação ao número de casos de câncer feminino (ANTONIAZZI *et al.*, 2013).

Um dos fatores prejudiciais aos estudos no solo e no interior das casas é o fato de que a rocha geradora de radônio não está necessariamente no subsolo. Grande parte das construções é feita ou revestida por material rochoso e este também deve ser estudado, pois não são poucos os minerais de construção civil e rochas ornamentais exaladores de radônio. A quantidade de radônio exalado destes materiais depende dos seguintes fatores: concentração de rádio nas partículas, densidade, tamanho dos grãos, volume dos poros e a umidade do material (SAS *et al.*, 2013).

A literatura distingue os três principais mecanismos de transporte e entrada de radônio nos ambientes internos, quais sejam convecção via rachaduras e aberturas da construção; difusão e exalação a partir do solo; e exalação dos materiais de construção (TSAPALOV *et al.*, 2014). Esta pesquisa aborda a exalação de gás radônio a partir de materiais construção, especificamente rochas ornamentais.

1.1. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é propor um método para avaliação do uso de rochas ornamentais em interiores, considerando as exalações de radônio e torônio.

1.1.1. Objetivos específicos

1. Implementar um método de triagem (*screening*) de baixo custo e eficiente de rochas ornamentais selecionadas levando em consideração não só a atividade de concentração de rádio, tório e potássio, mas também as concentrações de radônio e torônio exalados das rochas.
2. Verificar a correlação entre o *Index* gama da legislação europeia com as exalações de radônio e torônio, para as amostras selecionadas.
3. Verificar as correlações dos parâmetros físicos da rocha (volume de poros, densidade e umidade) com as exalações de radônio e torônio e calcular a distância de difusão do radônio nas placas de rochas, utilizando a permeabilidade, para as amostras selecionadas.
4. Correlacionar a rugosidade das amostras com a exalação total de radônio e torônio, de forma a avaliar o polimento como um modo de tratamento superficial para diminuição da exalação de radônio e torônio, em amostras selecionadas.
5. Testar uma forma de tratamento superficial complementar ao polimento em rochas ornamentais para possibilitar o uso destas em interiores, em relação às exalações de radônio e torônio.
6. Investigar uma associação preferencial de urânio e tório com outros elementos químicos em rochas ornamentais e analisar as proporções de radônio e torônio em amostras de rochas ornamentais selecionadas.

1.2. JUSTIFICATIVA

Os riscos para a saúde humana, representados por radiação ionizante, são bem conhecidos. Os isótopos de radônio são gases radioativos que exalam de rochas e solos e tendem a se concentrar em espaços fechados como minas subterrâneas ou casas. Este mesmo gás é o responsável pela maior parcela da dose de radiação ionizante natural recebida pela população. Estudos recentes na Europa, América do Norte e Ásia mostraram uma forte evidência de que muitos casos de câncer de pulmão foram causados pela exposição da população ao gás radônio em ambientes internos (WHO, 2009).

A proporção de câncer pulmonar atribuída ao radônio é estimada entre 3 e 14% dependendo da média da concentração de radônio no país analisado e dos métodos de cálculo. As análises indicam que o risco de desenvolver câncer de pulmão aumenta proporcionalmente à exposição ao radônio. Radônio é a segunda maior causa de câncer de pulmão depois do cigarro, e a maior parte dos casos de câncer de pulmão foi atribuída ao efeito combinado do cigarro e da exposição ao radônio (WHO, 2009). Gray *et al.* (2009) mostrou que, no Reino Unido, 1100 mortes por ano são relacionadas à exposição ao radônio e em 85% destes casos as concentrações são abaixo de 100 Bq/m³. Adicionalmente, este estudo aponta que a relação entre custo e benefício de ações governamentais de prevenção de doenças geradas pela exposição ao gás é maior quando estas políticas públicas são endereçadas a fumantes.

Visto que o Brasil carece de legislação sobre o assunto, este trabalho serve de subsídio para o país regulamentar níveis de referência nacionais, tendo por base características de rochas ornamentais produzidas e comercializadas no Brasil e exportadas. O estudo ainda contribui para antecipar demandas de certificação de rochas ornamentais e materiais de construção brasileiros destinados à exportação, conforme legislação de países importadores.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. RADIOATIVIDADE

2.1.1. Constante de decaimento λ

As transições nucleares, em elementos radioativos de mesma espécie e contidos numa amostra, ocorrem de forma aleatória. Porém, para um grande número de átomos, o número de transformações por segundo é proporcional ao número de átomos que estão por se transformar naquele instante (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Assim, a probabilidade de decaimento por átomo de uma amostra, por segundo, é constante, independente de quanto tempo ele tem de existência. Esta probabilidade de decaimento por átomo por segundo é denominada de constante de decaimento λ e é característica de cada radionuclídeo (TAUHATA *et al.*, 2013).

2.1.2. Atividade de uma amostra em um dado instante $A(t)$

A taxa de mudanças dos átomos instáveis em um determinado instante é denominada de Atividade (A) e está apresentada na Equação 1.

$$1. A(t) = \frac{dn(t)}{dt} = -\lambda n(t)$$

Em que,

$n(t)$ - número de átomos radioativos, sendo obtido em função da massa do isótopo contido na amostra.

λ - constante de decaimento.

$A(t)$ - atividade de uma amostra.

A Equação 2 é o resultado da integração da equação diferencial apresentada na Equação 1, sendo n_0 o número de átomos radioativos existentes na amostra no instante $t = 0$. A Equação 5 mostra a fórmula final para cálculo da atividade de uma amostra (L'ANNUNZIATA, 2013).

$$2. n(t) = n_0 e^{-\lambda \cdot t}$$

$$3. A(t) = \lambda n(t) = \lambda n_0 e^{-\lambda \cdot t}$$

$$4. A_0 = \lambda n_0$$

$$5. A(t) = A_0 e^{-\lambda \cdot t}$$

A partir da Equação 5, nota-se que a atividade de uma amostra depende do valor inicial da atividade no instante zero (A_0) e é uma função exponencial decrescente em relação ao tempo (Figura 1).

Figura 1. Curva representativa do decaimento de um radioisótopo em função do tempo.

Fonte: Adaptado de L'Annunziata, 2013.

A unidade do Sistema Internacional de atividade de uma fonte é medida em unidades de transformações por segundo, denominada *Becquerel* (Bq). A unidade Curie (Ci) ainda está em uso em equipamentos antigos ou produzidos em alguns países (como os Estados Unidos). A unidade Ci se baseia no número de transformações por segundo em um grama de ^{226}Ra que vale $3,7 \times 10^{10}$ transformações por segundo. Portanto, 1 Ci é igual a $3,7 \times 10^{10}$ Bq (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

O efeito biológico das radiações não pode ser avaliado utilizando a atividade radioativa de um material, por isso outras grandezas são utilizadas, que correspondem à energia por massa (J/kg). Assim, a dose radioativa absorvida, por exemplo, é expressa pela unidade Gray que também corresponde a Joules por quilograma, já a dose equivalente se trata da dose absorvida corrigida por fatores adimensionais que dependem da interação da energia com cada tecido e esta é expressa em Sv (Sievert) (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

2.1.3. Meia-vida do radioisótopo – $T_{1/2}$

A meia-vida de um radioisótopo é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzida à metade da atividade inicial. A Equação 6 mostra o cálculo da meia-vida.

$$6. T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Em que,

λ - constante de decaimento.

$T_{1/2}$ - tempo de meia-vida.

2.2. RADIAÇÕES IONIZANTES

Ao interagir com a matéria, os diferentes tipos de radiação podem produzir variados efeitos que podem ser simplesmente a sensação de cor, a percepção de uma mensagem codificada e manipulada em áudio e vídeo numa televisão, a sensação de calor provocada por feixes de lasers, o aquecimento de alimentos num forno de micro-ondas, uma imagem obtida numa chapa radiográfica ou então, a produção de íons e elétrons livres devido à ionização (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

As radiações são denominadas de ionizantes quando produzem íons, radicais e elétrons livres na matéria com que interagiu. A ionização se deve ao fato de as radiações possuírem energia alta o suficiente para quebrar as ligações químicas ou expulsar elétrons dos átomos após colisões (CNEN, 2013b). O item 2.3 exemplifica a origem dessas radiações.

2.2.1. Consequências biológicas da interação das radiações ionizantes com a matéria

A ionização de um material biológico ocorre quando a energia da radiação é superior à energia de ligação dos elétrons aos átomos desses elementos. A transformação de uma molécula específica que pode ser, por exemplo, água, proteína, açúcar ou DNA, pela ação das radiações leva a consequências que devem ser analisadas em função do papel biológico desempenhado pela molécula atingida (CNEN, 2013b).

Se as moléculas alteradas compõem uma célula, esta pode sofrer as consequências de suas alterações, direta ou indiretamente, com a produção de radicais livres, íons ou elétrons. Entre danos celulares, os mais importantes são aqueles relacionados à molécula do DNA (TAUHATA *et al.*, 2013).

As lesões à molécula do DNA podem ser reparadas pelas células do corpo humano por meio da ação das enzimas. Se o reparo é eficiente e em tempo curto, o DNA pode voltar à sua composição original, sem consequências posteriores. Porém, o reparo pode ter erros e dar origem a mutações na sequência de bases ou rearranjos mais grosseiros, podendo levar à morte reprodutiva da célula ou a alterações no material genético das células sobreviventes, com consequências em longo prazo, como um possível câncer (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

2.3. RADIAÇÕES NUCLEARES

Segundo L'Annunziata (2013), radiação nuclear é o nome dado às partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna, para atingir a estabilidade. Nos itens 2.3.1 ao 2.3.3 estão apresentados os tipos de radiações.

2.3.1. Radiação alfa ou partícula alfa

A emissão de partículas alfa ocorre em um dos processos de estabilização de um núcleo com excesso de energia. Uma partícula alfa é constituída por dois prótons e dois nêutrons (núcleo de ^4He) e pela energia associada a eles (CNEN, 2013a).

As modificações nucleares após um decaimento alfa podem ser descritas pela Equação 7.

2.3.1.1 Interação das partículas alfa com a matéria

Segundo Tauhata (2013), a penetração das partículas alfa é muito reduzida, incapaz de ultrapassar a espessura da pele humana. O valor do alcance de uma partícula alfa no ar (densidade estimada de 0,0013 g/cm³) pode ser estimado pela Equação 8 para a faixa de energia de 3 a 7 MeV, a qual abrange quase o total dos valores de energia das partículas alfa naturais (TAUHATA *et al.*, 2013). A Figura 2 mostra como seria feito o cálculo para outros meios de propagação.

$$8. \langle R \rangle = 0,318 \cdot E^{\frac{3}{2}}$$

Em que,

$\langle R \rangle$ - valor médio do alcance em cm.

E - energia da partícula alfa em MeV.

Figura 2. Alcance de partículas alfa em diferentes materiais (densidades em g/cm³): (1) Ar = 0,0013; (2) Tecido = 1,0; (3) Alumínio = 2,70; (4) Cobre = 8,96.

Fonte: Tauhata, 2013.

2.3.2. Radiação beta ou partícula beta

A emissão de partículas beta ocorre como forma de estabilização de núcleos atômicos que contêm excesso de nêutrons em relação a prótons ou excesso de prótons no núcleo (CNEN, 2013a).

Quando existe, no núcleo, excesso de nêutrons em relação a prótons, a estabilização ocorre por meio da emissão de uma partícula negativa, um elétron, resultante da conversão de um nêutron em um próton. Esta partícula é chamada de beta negativa ou, simplesmente, partícula beta (CNEN, 2013a).

No caso de existir excesso de cargas positivas (prótons), o núcleo emite partículas beta positivas, ou pósitrons para se estabilizar. Esta partícula é resultante da conversão de um próton em um nêutron (CNEN, 2013a).

2.3.3. Radiação gama

Núcleos que ainda permanecem com excesso de energia após emissão de partículas alfa ou beta, emitem esse excesso em forma de onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, denominada radiação gama (CNEN, 2013a).

2.4. FONTES NATURAIS E ARTIFICIAIS DE RADIAÇÃO IONIZANTES

O NCRP – Conselho Nacional de Proteção Radiológica dos Estados Unidos calculou a dose a qual um cidadão norte americano foi exposto no ano de 1987 para diferentes tipos de radiações ionizantes. A Figura 3 mostra o resultado da pesquisa em que é possível observar que a parcela correspondente ao elemento radônio é expressiva, visto que representa 55% da dose efetiva (BOLUS, 2013). A Figura 4

mostra os resultados do estudo da dose efetiva anual para o ano de 2006, em que observa-se que a contribuição individual do radônio, embora tenha reduzido, continua expressiva (37%).

Figura 3. Dose anual efetiva de radiação ionizante equivalente para um cidadão americano no ano de 1987.

Fonte: Adaptado de Bolus, 2013.

Figura 4. Dose anual efetiva de radiação ionizante equivalente para um cidadão americano no ano de 2006.

Fonte: Adaptado de Bolus, 2013.

A maior parte da taxa de dose de radioatividade natural é devido às cadeias de decaimento radioativo do ^{238}U (55,8%), ^{232}Th (14%), juntamente com a do ^{40}K (13,8%) (UNSCEAR, 1993).

O relatório NCRP 160 enfatiza o fato de que a exposição média da população geral dos Estados Unidos à radiação ionizante aumentou de 3,6 mSv na década de 1980 para 6,2 mSv em 2006. Embora as taxas de radiação ionizante natural mantiveram-se estáveis ao longo deste tempo, o gás radônio ainda é o agente primário de preocupação ligada à exposição natural (NCRP, 2009).

2.4.1. Séries radioativas naturais

No estudo da radioatividade, constatou-se que existem apenas três séries ou famílias radioativas naturais conhecidas como: série do urânio, série do actínio e série do tório. As três séries terminam em isótopos estáveis do chumbo, respectivamente, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb (Figura 5).

Na Figura 5 pode-se notar que há três isótopos naturais do radônio: ^{222}Rn , membro da série de decaimento do urânio, ^{220}Rn , membro da série de decaimento do tório e o ^{219}Rn , membro da série de decaimento do actínio. No caso do isótopo do radônio proveniente da série do actínio, a sua meia-vida é curta (apenas 3,98 s), enquanto o ^{220}Rn apresenta meia-vida intermediária (54,5 s) e o ^{222}Rn apresenta meia-vida de 3,8 dias, a maior entre os isótopos de Rn.

Os isótopos naturais de urânio, U^{238} , U^{235} e U^{234} têm abundância isotópica de 99,274%, 0,720% e 0,0057%, respectivamente, enquanto que o isótopo natural Th^{232} apresenta abundância de 100%. Desta forma, os isótopos mais relevantes de radônio são o ^{222}Rn e o ^{220}Rn tendo em vista tanto a abundância dos seus precursores na crosta quanto as suas meias vidas (CAMARGO, 1994).

Figura 5. Séries radioativas naturais.

Fonte: Adaptado de CNEN, 2013a.

A Tabela 1 mostra características físico-químicas relevantes dos isótopos do radônio (IAEA, 2010).

Tabela 1. Propriedades físico-químicas relevantes dos isótopos ^{222}Rn , ^{220}Rn e ^{219}Rn .

Parâmetro	Símbolo	^{222}Rn	^{220}Rn	^{219}Rn
Meia vida	$T_{1/2}$	3,82 d	55,8 s	3,98 s
Constante de decaimento	λ	$2,098 \times 10^6/\text{s}$	$1,242 \times 10^{-2}/\text{s}$	$1,242 \times 10^{-1}/\text{s}$
Energia média de formação	E_{α}	86 keV	103 keV	104 keV
Coefficiente de difusão no ar	D_{MA}	$1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficiente de difusão na água	D_{MW}	$1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$		

Fonte: IAEA, 2010.

2.4.2. Radônio e torônio

Dentre dos radionuclídeos descendentes do ^{238}U destaca-se o ^{226}Ra , que possui uma meia-vida de 1600 anos, e que, por emissão alfa forma o ^{222}Rn , o radônio, de meia-vida de 3,82 dias. Seus descendentes são o ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po , todos com meias-vidas muito curtas. Na série do ^{232}Th ocorre um processo semelhante de decaimento, com o ^{220}Rn , também chamado de “torônio”, de meia-vida de 55 s e seus descendentes, ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl e ^{212}Po (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Todas as rochas contêm alguma quantidade de urânio e tório em sua composição, embora a maioria contenha apenas pequenas quantidades (entre 1 e 3 ppm) de urânio. Rochas se quebram mecânica e quimicamente para formar solos na superfície do planeta, sendo que, em geral, a quantidade de urânio do solo é a mesma da rocha que o formou (USGS, 1992).

Como consequência dos decaimentos, estas rochas ou solos contêm também os radionuclídeos pertencentes às famílias radioativas. Como o radônio e o torônio são gasosos, em temperatura e pressão ambiente, ambientes construídos por materiais como cerâmica, revestimento de pedra, granito, argamassa, concreto, gesso, entre outros, ocorre o fenômeno natural da emanção destes gases radioativos (TAUHATA *et al.*, 2013).

Como o radônio e o torônio possuem peso atômico elevado, suas concentrações são maiores em níveis próximos do solo, devido à decantação

gravitacional. Assim, juntamente com os gases componentes do ar, o homem e os animais respiram gases e aerossóis radioativos. Devido às meias-vidas curtas dos radionuclídeos descendentes do radônio e do torônio, compatíveis com o tempo de metabolismo, a maioria dos radionuclídeos incorporados por inalação ou ingestão decai no interior de seus organismos, irradiando os órgãos e tecidos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) estimou a média do número de casos de câncer de pulmão (21.000) causados por radônio que levaram pacientes à morte nos Estados Unidos para o período entre 1999 e 2001. Este número comparado com o número médio de mortes totais para o mesmo período (1999 e 2001) fornecido pelo Centro de Prevenção e Controle de Doenças dos Estados Unidos (2.448.017) mostra que 1% das mortes que aconteceram naquele período foi devido ao radônio (EPA, 2012). Estes dados estão ilustrados na Figura 6.

No Brasil, ainda não há dados sobre doenças relacionadas à exposição ao radônio. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estabeleceu o nível máximo de ação (concentração a partir da qual é necessário implantar medidas de controle) da concentração de radônio em residências de 300 Bq/m³. No entanto, há uma tendência em vários países em estabelecer o nível de ação em 100 Bq/m³, devido à grande quantidade de tempo que uma pessoa passa em sua residência. Inclusive, a própria OMS recomenda a mudança do nível de ação para 100 Bq/m³. Ngachin *et al.* (2008) afirmam que as pessoas passam 80% do seu tempo em ambientes fechados o que justifica a intenção da OMS de reduzir o nível de ação. Por ser um gás inerte, a melhor medida de prevenção e controle é a ventilação dos ambientes em que a concentração é alta (GALLELLI *et al.*, 1998).

Atualmente, a importância do torônio nas medições vem crescendo e o reconhecimento e interesse em medir as concentrações de torônio em ambientes internos também. Em alguns casos, a concentração de torônio pode até superar a do radônio e sua origem é comprovadamente devida aos materiais de construção, uma vez que, em função da sua distância pequena de difusão, ele não pode ser proveniente do solo (UJIC *et al.*, 2008).

Figura 6. Causas comuns de mortes e as mortes devido ao radônio.

(*) média entre os anos 1999 e 2001 nos Estados Unidos.

Fonte: EPA, 2012.

Prasad *et al.* (2012) monitoraram os níveis de concentração de nove residências selecionadas no Japão. Em algumas residências, onde materiais de construção naturalmente radioativos foram utilizados, as concentrações de torônio foram sistematicamente maiores que as de radônio. Vale ainda ressaltar que não há níveis de referência internacionais para o gás torônio, apenas para o radônio. Além disso, o isótopo ^{219}Rn advindo do ^{235}U é negligenciado pela literatura como fonte significativa de radônio em ambientes devido à abundância isotópica do ^{235}U ser de 0,7207% em massa (SENFTLE *et al.*, 1957) e por causa da meia-vida do ^{219}Rn ser muito curta em comparação com os outros isótopos (apenas 4 s).

2.5. NORM – “NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE MATERIALS”

Resíduos provenientes da mineração e beneficiamento de minérios de urânio, assim como muitos outros produtos da indústria extrativa (por exemplo, o fosfogesso da indústria do fosfato, resíduos da produção de areia, além das indústrias do petróleo, gás natural e carvão) contêm elementos radioativos gerados a partir das séries radioativas naturais do urânio e/ou do tório. Assim, esses materiais são chamados de naturalmente radioativos (NORM).

A análise dos materiais naturalmente radioativos envolve a diferenciação entre os conceitos exalação, emanação e emissão que estão apresentados no item 2.6.

2.6. EXALAÇÃO, EMANAÇÃO E EMISSÃO

2.6.1. Exalação *versus* emanação

Um assunto importante que envolve os materiais naturalmente radioativos é a liberação de isótopos do gás radônio na atmosfera. Como se pode observar na Figura 7, há uma diferença entre emanação e exalação do gás. A emanação é a quantidade de átomos de radônio formados a partir do decaimento do elemento rádio que escapa dos grãos para os espaços intersticiais dos mesmos. Já a exalação é um fluxo de massa, neste caso, composto por radionuclídeos que foram transportados para a superfície e exalados para a atmosfera, ou seja, é o fluxo de massa de radônio que chega à atmosfera, mensurado em $\text{Bq/m}^2\text{s}$ (IAEA, 2010).

Devido à difusão e convecção do gás, o radônio pode ser exalado dos espaços dos poros para o ar. Esta exalação de radônio depende das características do material, como a espessura, a estrutura interna e a umidade contida na amostra (SAS *et al.*, 2013).

A quantidade de radônio disponível para transporte para a superfície é proporcional a quantidade de rádio (precursor imediato) presente na amostra e é dada pela taxa de produção de radônio por unidade de volume do material residual (P), conforme Equação 9 (AWHIDA *et al.*, 2016; IAEA, 2010). Portanto, a diferença entre a emanação e a exalação é a quantidade efetiva de gás que consegue chegar à atmosfera, devido aos parâmetros físicos do material, por exemplo, volume de poros abertos.

Figura 7. Processo de liberação do gás radônio para a atmosfera.

Fonte: Adaptado de IAEA, 2010.

$$9. P = \lambda E_R R \rho_b \quad (Bq/m^3 s)$$

Em que,

λ - constante de decaimento para o radônio (s^{-1}).

E_R - coeficiente de emanção (adimensional).

R - atividade de rádio no material por unidade massa (Bq/kg).

ρ_b - densidade do material (kg/m^3).

2.6.2. Exalação versus emissão

A diferença entre exalação e emissão pode ser entendida a partir da Figura 8, cujo lado esquerdo apresenta o fluxo mássico de exalação de gás e o direito as radiações alfa, beta e gama sendo emitidas a partir do material.

É importante destacar que a exalação de gás depende dos parâmetros físicos da rocha, como permeabilidade, volume de poros, densidade, umidade e rugosidade

da superfície. Por outro lado, as emissões de um mesmo material variam apenas com a massa. Para uma correta avaliação das placas de rocha, devem ser considerados os parâmetros mencionados anteriormente.

A Figura 9 exemplifica a variabilidade da exalação de gás dependendo da permeabilidade da matriz. Assim como a permeabilidade afeta a exalação, os outros parâmetros físicos também exercem influência na exalação. Portanto, deve-se levar em consideração os parâmetros individuais e a influência da combinação de um ou mais para entender se essas combinações são ou não antagonistas.

Figura 8. Diferença entre exalação e emissão radioativa.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 9. Variabilidade da exalação de gás em função da permeabilidade do material.

Fonte: Adaptado de USGS, 1992.

2.7. COEFICIENTE DE EMANAÇÃO

O coeficiente de emanação é definido como a fração de átomos de radônio gerados que escapam da fase sólida na qual eles são formados e se tornam livres para migrar através do meio. O coeficiente de emanação também é conhecido como fração de emanação ou poder de emanação (IAEA, 2010; HASSAN *et al.*, 2011).

Em geral, é aceito que o radônio escapa de um grão como resultado da distância percorrida pelo radônio (recoio ou *recoil*) devido à energia de decaimento do seu precursor, o rádio. Como a distância que um átomo pode percorrer devido à energia de decaimento é pequena em sólidos, usualmente menor que 0,05 μm , a maioria dos átomos provenientes de decaimento se mantém dentro dos grãos de minerais (IAEA, 2010).

A maior parte do radônio produzido dentro de um grão mineral permanece incorporado no grão, sendo que apenas 10 a 50% escapa para entrar no espaço dos

poros. Se a água estiver presente no espaço dos poros, o átomo de radônio pode ocupar mais facilmente o espaço entre os poros. Se o espaço dos poros estiver seco, o átomo de radônio pode disparar através do poro e incorporar-se a outro grão onde ele não pode se mover (USGS, 1992).

Movimentos adicionais dos átomos de radônio que ficam presos nos grãos dos minerais não contribuem significativamente para a liberação do gás devido ao pequeno coeficiente de difusão dos minerais, 10^{-25} a 10^{-27} m²/s. Se a distância percorrida terminar fora do grão ou em um poro aberto, o radônio pode migrar por entre os grãos (LARA, 2013), como pode ser observado na Tabela 2 e na Figura 10.

Tabela 2. Distância percorrida pelos isótopos de ²²²Rn e ²²⁰Rn durante o recuo do decaimento dos precursores em diferentes meios.

Meio de Propagação	Densidade (g/cm ³)	Distância Projetada (nm)	
		²²² Rn	²²⁰ Rn
Ar	1,58 x 10 ⁻³	53 x 10 ³	60 x 10 ³
Água	1,00	77	87
Quartzo (SiO ₂)	2,65	34	38

Fonte: Adaptado de IAEA, 2010.

Figura 10. Diagrama esquemático da emissão de Rn.

Fonte: Adaptado de IAEA, 2010.

2.7.1. Fatores que podem afetar a emissão de radônio

As variações encontradas nos coeficientes de emissão e os efeitos complexos causados pelas características da rocha matriz, como a mineralogia do minério de urânio e o seu teor, a distribuição granulométrica do material e a umidade, têm sido descritas qualitativamente por alguns modelos. Na prática, o coeficiente de emissão precisa ser medido para cada material que está sendo estudado (IAEA, 2010). Os efeitos dos fatores mencionados acima estão brevemente descritos nas próximas seções.

2.7.1.1 Distribuição do elemento rádio, distribuição granulométrica e formato das partículas

O tamanho da partícula e o seu formato determinam, em parte, a quantidade dos elementos urânio e rádio que está perto o suficiente da superfície da partícula para permitir que o radônio escape através dos poros intersticiais (IAEA, 2010).

A Figura 11 mostra que, se o elemento urânio estivesse uniformemente distribuído pela partícula, o coeficiente de emissão seria inversamente proporcional ao diâmetro da partícula, se este for maior que 0,1 μm . Por outro lado, se o urânio estivesse distribuído principalmente na superfície do grão, o coeficiente de emissão seria constante independente do diâmetro da partícula (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Figura 11. Relação entre o coeficiente de emissão do radônio e o tamanho da partícula.

Fonte: Adaptado de Ishimori *et al.*, 2013.

2.7.1.2 Umidade

A umidade tem um efeito significativo sobre o coeficiente de emissão. Isto acontece porque as distâncias de decaimento percorridas típicas para o meio aquoso são muito menores que para o ar (USGS, 1992). A Figura 12 mostra este efeito para um tipo de rejeito de beneficiamento de uma mina de urânio.

Em resíduos secos, o coeficiente de emissão é relativamente baixo porque a maior parte dos átomos que escapa acaba presa em partículas adjacentes. Para valores crescentes de umidade, os poros contêm progressivamente mais água e um átomo decaindo tem grandes chances de terminar o processo em um destes poros preenchidos com água.

Figura 12. O efeito da umidade no coeficiente de emissão do Rn para uma amostra de rejeito de moinho de uma mina de urânio.

Fonte: Adaptado de Ishimori *et al.*, 2013.

Para maiores níveis de umidade (> 5% em volume), poucos átomos conseguem penetrar em partículas adjacentes e o coeficiente de emissão permanece quase constante perto do nível de saturação. Em geral, coeficientes de emissão em resíduos saturados são de duas a seis vezes maiores que em resíduos secos. O maior valor de coeficiente de emissão corresponde aos resíduos com menores tamanhos de partículas (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Um estudo realizado na Hungria (SAS *et al.*, 2013) com argilas utilizadas para confecção de tijolos demonstrou a dependência da exalação de radônio em relação ao teor de umidade; este comportamento foi determinado como resultado da secagem gradual.

Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 13, que mostra claramente a dependência entre o conteúdo de umidade e a exalação específica. Na faixa de umidade entre 0 a 5%, a exalação de radônio duplica em relação à inicial, pois os átomos de radônio que acabariam aprisionados no grão adjacente agora são impedidos pela água e são eventualmente liberados para a superfície devido à baixa solubilidade em água (Tabela 2). Acima dos 5% de umidade, uma tendência quase linear crescente pode ser observada até o teor de 25% quando o fator emissão chegou a $45,0 \pm 0,9\%$, valor aproximadamente três vezes maior do que o valor inicial ($17,0 \pm 0,5\%$), após os 25% de umidade, a inibição da difusão é observada devido à diminuição do contato com a atmosfera livre (SAS *et al.*, 2013).

Figura 13. Influência do teor de umidade no coeficiente de exalação específica.

Fonte: Adaptado de SAS *et al.*, 2013.

2.7.2. Coeficiente de emissão para materiais naturais

Um grande número de estudos tem reportado taxas de emissão de radônio para materiais naturais incluindo minérios de urânio, rejeitos de usinas de beneficiamento, rochas, solos e minerais (NIKOLOV *et al.*, 2014; SAHU, *et al.*, 2014).

No caso específico de minérios de urânio de alto teor, os minerais de urânio se apresentam, geralmente, em estruturas bandadas largas ou em grãos grandes, os quais são normalmente associados a baixos coeficientes de emanção. Por outro lado, estes minérios de alto teor têm sido expostos a doses de radiação muito grandes e isso pode levar a maiores coeficientes de emanção devido ao dano causado ao retículo cristalino pela radiação. Assim, minérios de urânio de alto teor podem afetar o coeficiente de emanção de materiais britados por causa destes dois efeitos que competem entre si (ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.7.2.1 Materiais de construção

O conhecimento da radioatividade natural de materiais de construção e estudos do comportamento do radônio tornou-se foco de atenção na avaliação da exposição da população. A contribuição de ^{235}U para exposição à radiação é insignificante, porque a razão de $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ é inferior a 1%. Os seres humanos estão expostos à radiação principalmente devido à inalação de radônio e de seus produtos de decaimento de curta duração. Tem sido demonstrado que a taxa de dose dentro de moradias aumenta quando materiais de construção com elevada radioatividade natural são usados para as respectivas construções (AHMAD; HUSSAIN 1997, STOULOS; MAMOLOPOULOU; PAPASTEFANOU, 2003).

A exalação de radônio de materiais de construção está associada com a presença do rádio (^{226}Ra) e com o seu precursor urânio (^{238}U). Na verdade, como já apresentado anteriormente, seres humanos gastam 80% do seu tempo em ambientes fechados e a inalação de radônio e de seus produtos de decaimento (especialmente ^{218}Po e ^{214}Po ligados a aerossóis) constitui um perigo significativo de radiação para os pulmões. Em espaços mal ventilados, a concentração de radônio pode chegar a níveis de grande preocupação, por isso, devem ser tomadas precauções (NGACHIN *et al.*, 2008).

2.7.3. Medição do coeficiente de emanção de radônio

O coeficiente de emanção pode ser medido de duas formas: a combinação de medidas de rádio e radônio, e espectrometria gama em diferentes condições.

O primeiro método consiste em colocar a amostra em um recipiente cilíndrico fechado por mais de quatro semanas para garantir que o equilíbrio radioativo entre ^{222}Rn e ^{226}Ra seja atingido. Depois disso, a atividade total do radônio que foi liberado ao ar a partir da amostra é avaliada pela concentração de radônio e pelo volume efetivo do sistema de medição. A Figura 14 mostra o diagrama esquemático para essa configuração (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Figura 14. Diagrama esquemático para um exemplo de processo para medição do coeficiente de emanção – circuito fechado.

Fonte: Adaptado de Ishimori *et al.*, 2013.

O volume efetivo é determinado considerando os seguintes volumes: o da câmara fechada, o de qualquer material dentro da câmara, o dos tubos do sistema de medição e o do monitor de radônio. A atividade total de rádio da amostra pode ser determinada de várias formas, por exemplo, por meio de espectrometria alfa, espectrometria gama, espectrometria por cintilação líquida e espectrometria mássica (ISHIMORI *et al.*, 2013).

O coeficiente de emanção é calculado pela Equação 10.

$$10. E_R = \frac{VC}{MR}$$

Em que,

E_R - coeficiente de emanção (adimensional).

V - volume efetivo (m^3).

C - concentração de radônio (Bq/m^3).

M - massa total da amostra (kg).

R - concentração de atividade de rádio (Bq/kg).

Outra abordagem usada para medições de rádio em equilíbrio radioativo com o radônio é o método de fluxo contínuo, conforme Figura 15 .

Figura 15. Diagrama esquemático para um exemplo de processo para medição do coeficiente de emanção – circuito aberto.

Fonte: Adaptado de Ishimori *et al.*, 2013.

Neste caso, considera-se como volume efetivo o volume da câmara descontando o volume dos materiais em seu interior. Além disso, apenas algumas horas para a medição de radônio podem ser requeridas porque o estado de equilíbrio é imediatamente estabelecido pela ventilação. Para concentrações nulas ou muito baixas de radônio do ambiente externo, o coeficiente de emanção pode ser calculado pela Equação 11.

$$11. E_R = \frac{(\nu + \lambda V)C}{\lambda MR}$$

Em que,

E_R - coeficiente de emanção (adimensional).

ν - taxa de fluxo (m^3/s).

λ - constante de decaimento do ^{222}Rn (s^{-1}).

V - volume efetivo (m^3).

C - concentração de radônio (Bq/m^3).

M - massa total da amostra (kg).

R - concentração da atividade do rádio (Bq/kg).

O método de espectrometria gama exige que a amostra esteja selada em um recipiente. Os raios gama emitidos pelo elemento ^{214}Pb ou ^{214}Bi são medidos várias vezes antes e depois do equilíbrio radioativo se estabelecer entre ^{226}Ra e os produtos de seu decaimento.

Assume-se que a atividade do radônio e a dos produtos de seu decaimento são iguais. A espectrometria gama é um método útil e não destrutivo que utiliza medidas indiretas de radionuclídeos precursores e é uma prática comumente aplicada para isótopos do elemento rádio. Além do mais, calibração pode não ser necessária, pois esse método utiliza contagem relativa.

Neste caso, o coeficiente de emanção é calculado pela Equação 12.

$$12. E_R = \frac{N_{eq} - N_o}{N_{eq}}$$

Em que,

E_R - coeficiente de emanção.

N_{eq} - número correspondente à contagem específica dos picos de ^{214}Pb e ^{214}Bi na condição de equilíbrio.

N_0 - número correspondente à contagem específica dos picos de ^{214}Pb e ^{214}Bi na condição inicial.

A análise de múltiplos picos, por exemplo, 295 keV (^{214}Pb), 352 keV (^{214}Pb), 609 keV (^{214}Bi) e 1120 keV (^{214}Bi) aumenta a precisão da análise.

A preparação da amostra para análise deve conter uma etapa de liberação do radônio dos poros da amostra. No caso de uma amostra mantida fechada em um recipiente por um longo período antes da análise, os elementos produtos do decaimento do radônio presos nos grãos da amostra também podem causar imprecisão.

Portanto, é comum deixar aberto o recipiente em que a amostra está acondicionada por várias horas ou não utilizar os dados das medições que correspondem às primeiras horas. Isto só vale para amostras não muito espessas. Se a contagem de ^{214}Pb ou ^{214}Bi atingir o equilíbrio em um mês após o início das medições, os resultados devem ser corrigidos levando em consideração estimativas sobre possíveis vazamentos.

2.8. COEFICIENTE DE DIFUSÃO

O coeficiente molecular de difusão do radônio é definido pela primeira lei de Fick, a qual preconiza que a densidade de fluxo é linearmente proporcional ao seu gradiente de concentração (Equação 13) (TSAPALOV *et al.*, 2014).

$$13. \quad f = -D_M \nabla C$$

Em que,

f - densidade de fluxo ($\text{Bq/m}^2\text{s}$).

D_M - coeficiente de difusão molecular (m^2/s).

∇C - gradiente da concentração de atividade do radônio (Bq/m^4).

O sinal negativo da Equação 13 advém do fato que a difusão do radônio acontece de concentrações altas para baixas. O coeficiente molecular de difusão do radônio no ar (D_{MA}) e na água (D_{MW}) são aproximadamente 1×10^{-5} e $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente (vide Tabela 1, página 57). Estes valores podem substituir o fator D_M na Equação 13 (CATALANO *et al.*, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Em meios com baixa porosidade, como solos, o radônio se move por difusão pelos poros entre as partículas do solo. A taxa de movimento ou taxa de fluxo do radônio através do solo deve ser menor do que em um meio homogêneo, como ar puro, por duas razões, apresentadas a seguir.

- Menor volume livre (porosidade, n).
- Fluxo tortuoso pelo caminho entre as partículas (tortuosidade, τ).

Considerando os fatores mencionados anteriormente, a densidade de fluxo do radônio por um meio com porosidade de média a baixa é dada pela Equação 14.

$$14. f = -n_s \tau D_M \nabla C$$

Em que,

n_s - porosidade do meio.

τ - coeficiente de tortuosidade, que é igual a 1 para uma solução pura e é tipicamente menor que 1 em solos (por exemplo, um valor típico para τ é 0,66 para um volume fechado com esferas uniformes).

f - densidade de fluxo ($\text{Bq}/\text{m}^2\text{s}$).

D_M - coeficiente de difusão molecular (m^2/s).

∇C - gradiente da concentração de atividade do radônio nos poros intersticiais (Bq/m⁴).

Os termos τ e D_M frequentemente aparecem juntos para definir o coeficiente de difusão do meio poroso, como apresentado na Equação 15.

$$15. D = \tau D_M$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 14, encontra-se a Equação 16.

$$16. f = -n_s D \nabla C$$

O fator $n_s D$ pode ser representado pela notação D_E que se refere ao coeficiente de difusão efetivo do radônio no solo. O coeficiente de difusão no solo depende principalmente dos seguintes fatores: tamanho dos poros, umidade e grau e método de compactação do material.

Devido à grande diferença do fator D_M no ar e na água, a umidade geralmente é o fator dominante sobre os outros fatores físicos. Consequentemente, algumas pesquisas têm estudado a dependência entre o coeficiente de difusão e a umidade para diferentes tipos de solos. Estes estudos comumente demonstram que o coeficiente de difusão do radônio no solo é seriamente comprometido quando a umidade atinge certo valor limite que depende do volume de poros abertos. Por exemplo, Prasad *et al.* (2012) demonstraram que o coeficiente de difusão do gás no solo diminuiu potencialmente com o aumento da quantidade de água nos poros para um território no Japão, onde o coeficiente de saturação da água muda com as estações do ano.

O efeito da umidade de saturação no coeficiente de difusão pode ser explicado qualitativamente. Para solos secos, o coeficiente de difusão pode ser calculado como $D = \tau D_{MA}$. Quando a umidade é baixa, a difusão de radônio não é influenciada pela

presença de pequenas quantidades de água que formam filmes pouco espessos e descontínuos sobre as partículas do solo, e assim esta equação ainda se aplica.

Para valores maiores de umidade, água livre aparece nos espaços intersticiais entre partículas, assim, os átomos de radônio devem seguir por um caminho maior acompanhando os poros completos de ar ou, alternativamente, alguns podem se difundir através da água (JOHNER; SURBECK, 2001; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Nesta região, o coeficiente de difusão não é determinado unicamente pela porcentagem da umidade em peso, mas depende de como as fases de água e ar estão espacialmente distribuídas. Conforme os poros atingem completa saturação, o coeficiente de difusão se aproxima do valor dado por $D = \tau D_{MW}$. Nas regiões intermediárias, o coeficiente de difusão é melhor determinado experimentalmente, embora as relações empíricas e os modelos matemáticos de distribuição dos poros também possam ser utilizados.

A importância do estudo do coeficiente de difusão é justificada por estudos sobre transporte de radônio a partir do solo, que mostram que o principal fenômeno estudado é a convecção, enquanto a difusão é normalmente negligenciada (COLLIGNAN; POWAGA, 2014). A Figura 16 mostra a diferenciação entre difusão e convecção para o gás radônio.

Figura 16. Diferença entre difusão e convecção de gás radônio em uma residência.

Fonte: Collignan e Powaga (2014).

Já para amostras com espessura muito pequena, se comparada à distância de difusão do radônio, o coeficiente de difusão pode ser ignorado, pois apenas o conteúdo de ^{226}Ra , o coeficiente de emanção e a massa da amostra têm influência na taxa de exalação. Isto significa que todo radônio consegue ser exalado da matriz e a vazão mássica de exalação de radônio pode ser determinada (SAS *et al.*, 2015).

2.8.1. Medição do coeficiente de difusão

Muitos métodos estão disponíveis para medir o coeficiente de difusão do radônio em diferentes materiais, como óleos, materiais de construção, materiais naturalmente radioativos, entre outros. Alguns desses métodos se baseiam em amostras e outros se baseiam em medições *in situ* (CATALANO *et al.*, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

A exposição de pessoas a altas concentrações de gás radônio é preocupante, portanto, deve-se priorizar medidas que possam ser realizadas quando possível no próprio local (*in situ*) (UNSCEAR, 1994).

O método de medição *in situ* mais comum é conduzido em diversas profundidades no solo, por meio de uma sonda acoplada a um monitor de radônio. Assim, é possível gerar um perfil das concentrações de radônio associadas a cada profundidade. Os dados coletados em diferentes profundidades podem ser ajustados de acordo com a Equação 17 (ISHIMORI *et al.*, 2013).

$$_{17.} \quad C(z) = C_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{z}{L_r}} \right)$$

Em que,

C (z) - concentração de radônio na profundidade z (Bq/m³).

C_{∞} - concentração obtida na maior profundidade que é possível acessar com a sonda ($>2\text{m}$) (Bq/m^3).

Z - profundidade (m).

L_r - distância de difusão do radônio (m).

Os parâmetros C_{∞} e L_r são obtidos a partir da regressão dos dados coletados. A partir do valor de L_r obtido da regressão, o coeficiente de difusão é calculado pela Equação 18.

$$18. D_r = \lambda L_r^2$$

Medidas diretas do coeficiente efetivo de difusão (produto da porosidade e do coeficiente de difusão) podem ser importantes para prever o fluxo de radônio, especialmente se as informações das concentrações de radônio em maiores profundidades estiverem disponíveis. Este pode ser estimado diretamente a partir da técnica que utiliza um acumulador que será explicada nas próximas seções (CATALANO *et al.*, 2015).

2.9. FLUXO DE EXALAÇÃO

Segundo Stajic e Nikezic (2015), a quantidade de atividade de radônio liberada por unidade de tempo, por unidade de área de uma amostra, é denominada taxa de exalação superficial de radônio.

Esta corresponde a uma densidade de fluxo de exalação, denotada pela letra f , que descreve a liberação de radônio para uma área específica ($\text{Bq/m}^2\text{s}$). A taxa total de liberação de radônio, ou o fluxo total de exalação, F (Bq/s), para um material naturalmente radioativo, é obtida pela multiplicação da média da densidade de fluxo de exalação pela área total. As variáveis que influenciam diretamente a densidade de fluxo de exalação são apresentadas a seguir (ISHIMORI *et al.*, 2013).

- R - concentração da atividade do rádio no material (Bq/kg).
- ρ_b - densidade do meio (kg/m³).
- E_R - coeficiente de emanção (adimensional).
- D - coeficiente de difusão do radônio (m²/s).
- Z - espessura do material de cobertura (m).

Os valores destes parâmetros são obtidos geralmente por medições diretas. Se alguma das informações anteriormente citadas não estiver disponível, devem-se procurar valores padrão ou estimar os valores destas variáveis (ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.9.1. Taxa mássica de exalação

A taxa mássica de exalação é definida como a atividade de radônio liberada ao ar por unidade de tempo e é medida por meio do enclausuramento da amostra em uma câmara fechada. O monitoramento do aumento da concentração de radônio na câmara é feito em intervalos regulares de tempo. Tipicamente, uma amostra de 350 a 500 g é colocada em uma câmara metálica estanque conectada a um monitor contínuo de ²²²Rn. A concentração de radônio C (t) em um tempo t, a partir do fechamento da câmara, aumenta de acordo com a Equação 19 (TOKONAMI, 2011; ISHIMORI *et al.*, 2013).

$$19. C = \frac{J_m M}{V \lambda_e} [1 - e^{-\lambda_e t}] + C_0 e^{-\lambda_e t}$$

Em que,

J_m - taxa mássica de exalação (Bq/kg h).

C₀ - concentração de radônio presente na câmara no tempo t=0 (Bq/m³).

M - massa seca total da amostra (kg).

V - volume efetivo (volume da câmara + volume do monitor de ^{222}Rn – volume da amostra) (m^3).

λ_e - taxa efetiva de decaimento do ^{222}Rn que consiste na soma da taxa de perda (caso exista) e a constante de decaimento do ^{222}Rn (s^{-1}).

t - tempo de medição.

Mediante ajuste de mínimos quadrados dos dados à fórmula, a taxa mássica (J_m) pode ser obtida a partir dos parâmetros ajustados e da massa seca (M) da amostra. A massa seca é estimada pela secagem da amostra na temperatura de 110 °C até a massa atingir um valor constante (TOKONAMI, 2011; ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.9.2. Estimativa das variáveis que afetam o fluxo de exalação de radônio

2.9.2.1 Coeficiente de emanação (E_R)

Assim como mostrado na Figura 12, página 67, o grau de saturação tem um efeito relevante no coeficiente de emanação de um material. Entretanto, existem alguns casos em que se espera que o coeficiente de emanação de alguns materiais seja significativamente menor.

A Equação 20 relaciona o coeficiente de emanação na condição seca com a umidade.

$$20. E_R = E_0 [1 + 1,85(1 - \exp(-18,8m))]$$

Em que,

E_R - coeficiente de emanção.

E_0 - coeficiente de emanção de radônio na condição seca.

m - fração dos poros preenchidos com água.

De acordo com resultados empíricos, os coeficientes de emanção para ^{220}Rn são geralmente menores que aqueles para o ^{222}Rn (ISHIMORI *et al.*, 2013; TOKONAMI, 2011).

2.9.3. Coeficiente de difusão (D_r)

O coeficiente de difusão D_r também é bastante sensível a mudanças nos níveis de umidade. Muitas correlações foram desenvolvidas para tentar atrelar uma variável à outra, por exemplo, a Equação 21 que foi desenvolvida por Rogers e Nielson (1991).

$$21. D_r = D_{MA} n_T \exp(-6mn_T - 6m^{14n_T})$$

Em que,

D_{MA} - coeficiente de difusão molecular do radônio no ar (m^2/s).

n_T - porosidade total que pode ser estimada por $n_T = 1 - (\rho_b / \rho_g)$.

ρ_b - densidade da matriz.

ρ_g - densidade dos grãos na matriz ($\sim 2700 \text{ kg/m}^3$).

m - fração dos poros preenchidos com água, que é dado por $m = (\rho_b \theta_d) / (100 \rho_w n_T)$.

θ_d - porcentagem da umidade em relação à base seca (em peso).

ρ_w - densidade da água (kg/m^3).

2.9.4. Concentração de atividade do rádio (R)

Na maior parte dos casos, a concentração de atividade do rádio na matriz de material original estará em equilíbrio com o seu precursor. Portanto, na ausência de outros dados, a concentração de rádio pode ser estimada pelo teor do material original e, além disso, poderão ser considerados qualquer diluição ou enriquecimento acontecido na usina.

Por exemplo, para o caso de um rejeito de uma usina de concentração de urânio, após o processamento do minério, quase todo o ^{226}Ra estará presente no rejeito. Existe certa diluição nas lamas que são descarregadas na barragem de rejeitos devido aos produtos químicos utilizados no processo. Como resultado, a concentração de ^{226}Ra na pilha de concentrado será menor do que a do minério original (CNEN, 2005).

Se uma recuperação em massa w (massa de rejeito em kg gerada para 1 kg de minério processado) for aplicada, então uma estimativa grosseira da concentração de rádio no rejeito pode ser calculada a partir do teor do minério. Sabe-se que minérios com teor de 1% de urânio têm uma taxa de emissão de $1,24 \times 10^5$ Bq/kg (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Assim, a Equação 22 mostra como a concentração de atividade do elemento rádio (R) pode ser estimada (ISHIMORI *et al.*, 2013).

$$22. \quad R = \frac{1,24 \times 10^5 t_U}{w}$$

Em que,

t_U - teor de urânio no minério.

w - massa de rejeito em kg para 1 kg de minério processado.

2.10. MEDIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO E DA DENSIDADE DE FLUXO DE EXALAÇÃO

Segundo Ishimori *et al.* (2013), é necessário compreender primeiro as metodologias de medição da concentração de radônio antes de estudar as metodologias para determinação da densidade de fluxo.

A teoria que embasa as medições de fluxo de radônio é, em grande parte, comum para várias técnicas de campo. Em termos práticos, existem dois métodos de medição. O primeiro consiste em um recipiente (também chamado de câmara) de um tamanho adequado que é posicionado com a abertura na superfície do material e a concentração é medida (tanto na fase aumento quanto na fase de estabilização). O segundo método é aplicável para medições em solo e consiste em uma haste oca que é inserida na superfície. Para ambas as metodologias, câmara ou haste, o aumento da concentração de radônio é medido para um intervalo de tempo específico (SINGH; SAHOO; BAJWA, 2016)

A seleção do método de medição da concentração de gás radônio depende de vários fatores, por exemplo, da disponibilidade de recursos, da disponibilidade de equipamentos, do escopo do projeto, das características físicas do local estudado, dos níveis prováveis de radônio a serem medidos e da disponibilidade de tempo (ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.1. Medição da concentração de radônio

O radônio é um gás inodoro, incolor e inerte; e seus isótopos têm uma meia-vida relativamente curta. Não existe tipo algum de espectrometria, tanto química ou de massa, com sensibilidade suficiente para medir a sua concentração. Consequentemente, esta deve ser determinada utilizando técnicas que dependem das

propriedades radioativas do radônio e dos produtos de seu decaimento (L'ANNUNZIATA, 2013).

A série radioativa natural do ^{222}Rn termina em chumbo estável ^{206}Pb . Mesmo que existam várias técnicas para a detecção de ^{222}Rn e os produtos de seu decaimento, a maior parte delas usa detecção de partículas alfa provenientes do ^{222}Rn , ^{218}Po e ^{214}Po ou uma combinação de qualquer um desses elementos; ou detecção de raios gama provenientes do decaimento radioativo dos elementos ^{214}Pb ou ^{214}Bi (L'ANNUNZIATA, 2013).

Uma consideração importante sobre a seleção do método é se ele deve ou não ser capaz de distinguir entre ^{222}Rn e ^{220}Rn . Algumas técnicas de detecção, como espectrometria alfa ou gama, têm essa característica inerente ao método, já os *nuclear track detectors* não possuem essa característica. Neste último método citado, os isótopos do radônio só podem ser distinguidos através de acessórios específicos do equipamento, como uma membrana específica para ^{220}Rn (ISHIMORI *et al.*, 2013).

As técnicas de medição podem ser classificadas com base nos requisitos energéticos. Detectores passivos não necessitam de uma fonte de energia e geralmente dependem da difusão do radônio através de um pequeno espaço ou filtro para uma câmara de detecção. Equipamentos ativos requerem uma forma de energia elétrica para operar bombas, detectores ou ambos; ou para criar um potencial elétrico para aumentar a eficiência de coleta do detector (ISHIMORI *et al.*, 2013).

A coleta de radônio e os métodos de medição também podem ser classificados como modo instantâneo, modo semi-integrativo (também conhecido como medições contínuas em tempo real ou *online*) e modo completamente integrativo (também conhecido como média no tempo ou integrador de tempo) (ISHIMORI *et al.*, 2013). Os modos de medição são detalhados a seguir.

Modo instantâneo: uma amostra de gás é retirada em um intervalo de tempo pequeno. A amostra pode ser armazenada para uma posterior medida de radônio (por exemplo, se a amostra foi tirada de um frasco de cintilação previamente esvaziado), ou pode ter as medições de radônio feitas imediatamente. Um exemplo de novidade

deste método é um modo de operação chamado de “*sniffer*” que alguns equipamentos de medição de radônio usam. Neste modo o radônio está tipicamente presente com aumento mínimo de seus produtos de decaimento (devido ao intervalo de tempo pequeno). Este método permite que um grande número de medidas seja feito em um período curto de tempo (SAKODA; MEISENBERG; TSCHIERSCH, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Modo semi-integrativo: a amostragem e a contagem são feitas simultaneamente, e as concentrações de radônio são avaliadas em intervalos de tempo regulares. Geralmente, a amostragem acontece por um período de alguns minutos a algumas horas, dependendo no arranjo do sistema de medição. A coleta de amostras pode acontecer tanto por difusão quanto utilizando-se de uma bomba. A detecção pode acontecer por espectrometria alfa, câmara de ionização ou pela técnica de contagem de alfas. Um exemplo de um sistema semi-integrativo é a célula de cintilação que trabalha com fluxo. Estes métodos são usados para obter informações sobre mudanças rápidas de concentrações de radônio em um dado ambiente. Além disso, este sistema é preferível aos sistemas instantâneos devido à sensibilidade superior, à diminuição dos erros sistemáticos e à habilidade de medir as diferenças de concentração em um dia inteiro (SAKODA; MEISENBERG; TSCHIERSCH, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Modo completamente integrativo: este modo de medida fornece uma concentração integrada de radônio para o período de tempo da amostragem (tipicamente da ordem de semanas ou meses). As técnicas de amostragem que operam neste modo devem manter um registro integrado de cada partícula alfa que contribui para a medida média. Após serem retirados do local de amostragem, deve-se manter informações da exposição até a análise. Os métodos passivos são úteis para obter médias de longo prazo de concentrações baixas de radônio. Tais métodos também têm a vantagem de possibilitar um grande número de medidas de locais extensos a um custo relativamente pequeno. Exemplos destes métodos incluem *nuclear track detectors*, método que utiliza cargas elétricas (*electrets*), e coleta de radônio em carvão ativado com posterior medição utilizando câmaras de ionização (ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.1.1 Detectores de barreira de superfície e *nuclear track detectors*

Nuclear track detectors são detectores de radônio que têm como características serem passivos, integrativos, leves e relativamente baratos. A operação é baseada no uso de um filme de um material específico, como nitrato de celulose, policarbonato ou carbonato de alil diglicol (CR39). As partículas alfa deixam uma trilha de danos microscópicos no filme, este “caminho” é chamado de *track*. Após o tempo de exposição, o filme é mergulhado em uma solução alcalina (tipicamente NaOH ou KOH) para aumentar o tamanho dos furos. Assim, a densidade de furos (número de furos por unidade de área) pode ser determinada por microscopia óptica ou por sistema automático de escaneamento e contagem. Devido à sua sensibilidade relativamente baixa para medidas em janelas de tempo curtas, *nuclear track detectors* não são indicados para medição de densidade de fluxo de radônio (ISHIMORI et al., 2013; L'ANNUNZIATA, 2013).

Por outro lado, os *nuclear track detectors* são atualmente os detectores de radônio indicados para medidas de longo prazo em ambientes internos (3 a 12 meses), pois o custo benefício deste equipamento é adequado para medidas concomitantes em um grande território (KROPAT et al., 2015). Além disso, os detectores de traços têm sido predominantemente utilizados na determinação da concentração de ^{222}Rn no ar em virtude do custo relativamente baixo (US\$ 10,00/detector), da simplicidade no uso, da pequena geometria e por apresentarem a vantagem de fornecer dados integrados (de alguns dias até um ano, dependendo da concentração no local) com pouca dependência das condições ambientais (DURRANI, 2008).

2.10.1.2 Detectores de barreira de superfície (estado sólido)

O uso de detectores de barreira de superfície para detectar radônio usando espectrometria alfa é uma técnica configurada em modo ativo. Um exemplo de arranjo comum é fazer o ar passar através de um sistema cilíndrico com dois filtros em linha.

A finalidade do primeiro filtro é reter material particulado que pode estar presente no ar, em particular os produtos do decaimento do radônio. O segundo filtro é relativamente bem espaçado do primeiro para que o decaimento do torônio possa ocorrer. Os produtos do decaimento do radônio ficam retidos no segundo filtro que tem uma das faces voltadas para o detector de barreira de superfície (IAEA, 2010).

Outra abordagem envolve a coleta dos produtos do decaimento em uma superfície metálica localizada no interior de uma câmara que se mantém constantemente em um potencial negativo. As partículas positivas de ^{218}Po são coletadas na superfície metálica e depois são contadas utilizando o detector de barreira de superfície. Em ambos os casos, deve-se conhecer o tempo de medição e a distância entre os dois filtros. Com estes dados, é possível calcular a concentração de radônio e torônio (IAEA, 2010).

Segundo Gilmore e Hemingway (1995), a vantagem da espectrometria alfa é a habilidade de separar os espectros dos produtos do decaimento de ^{222}Rn e ^{220}Rn , já que estes possuem energias de decaimento alfa diferentes. Detectores de superfície têm resíduos de fundo intrínsecos (*intrinsic background*) muito baixos, possibilitando, assim, atingir um limite de detecção baixo. Outras vantagens incluem o tamanho compacto, boa resolução em termos energéticos e a sua robustez. As desvantagens incluem a necessidade de um fornecimento de energia, associação com outros equipamentos eletrônicos e o custo relativamente alto de espectrometrias de raios alfa comparado ao de outras técnicas de detecção (ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.1.3 Células de cintilação

As células de cintilação são cilindros internamente revestidos com um material cintilador, geralmente sulfeto de zinco ativado por prata em pó. Estes cilindros contêm uma janela transparente como saída. A interação das partículas alfa com o material cintilador causa a produção de fótons luminosos, que são detectados e amplificados

por um fotomultiplicador adjacente à janela e são convertidos a uma determinada taxa de contagem por um equipamento eletrônico (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Células de cintilação podem ser operadas em modo passivo ou ativo. Comumente, o ar passa por um filtro antes de entrar na célula para remover poeira e os produtos do decaimento do radônio presentes no ar de entrada, especialmente no caso do sistema ativo. A remoção dos sólidos antes de entrar na câmara garante uma medida confiável das concentrações de radônio (ISHIMORI *et al.*, 2013).

É possível diferenciar os isótopos ^{222}Rn e ^{220}Rn utilizando células de cintilação pelo uso de duas células relativamente bem espaçadas ou de uma técnica de contagem de pares para identificar partículas alfa sucessivas produzidas por ^{220}Rn e ^{216}Po (SAKODA; MEISENBERG; TSCHIRSCH, 2016; ISHIMORI *et al.*, 2013; JANIK; YONEHARA, 2015).

Células de cintilação são responsáveis por um controle satisfatório das incertezas das medições, o que significa que uma grande acurácia pode ser alcançada. As células também são robustas, custam relativamente pouco e permitem uma avaliação rápida das concentrações de ^{220}Rn . A desvantagem das células de cintilação é que o resíduo de fundo (*background*) sempre tende a aumentar devido ao acúmulo de ^{210}Pb e os seus produtos de decaimento que emitem partículas alfa (^{210}Po) dentro da célula. Isto pode ser resolvido por meio da troca periódica do revestimento de sulfeto de zinco. Outra desvantagem é que a diferenciação dos isótopos ^{222}Rn e ^{220}Rn , através da técnica de contagem de pares, é limitada a situações em que a concentração de ^{222}Rn é muito menor que a de ^{220}Rn (SAKODA; MEISENBERG; TSCHIRSCH, 2016; ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.1.4 Método das cargas elétricas (*electret*)

Este método utiliza um disco de teflon eletricamente carregado que tem como finalidade ser tanto uma fonte de um campo eletrostático quanto um sensor. O decaimento alfa que acontece no interior da câmara causa ionização do ar contido no

seu interior e, assim, um decréscimo na carga do disco. Esta queda na voltagem é utilizada para quantificar a concentração de radônio (WHO, 2006; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Este sistema de medição é passivo, integrativo, leve e relativamente pouco custoso financeiramente. As desvantagens incluem a necessidade de permitir queda na voltagem devido à radiação gama e à influência potencial da condensação de água nas descargas elétricas, no interior da câmara de detecção (WHO, 2006; ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.1.5 Carvão ativado

Carvão ativado é utilizado como suporte para adsorção do radônio. O carvão é pesado em uma vasilha e selado até o momento em que ele entra em contato com a atmosfera de medição. O período de exposição pode variar entre poucas horas até muitos dias dependendo do nível de radônio que se espera encontrar e do limite de detecção requerido. Após o período de exposição, a vasilha contendo o carvão ativado é novamente selada e a atividade do radônio é determinada, na maioria dos casos por espectrometria gama, embora cintilação líquida possa ser utilizada após a extração do radônio (KARUNAKARA *et al.*, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

O sistema de medição com carvão ativado é um método simples, passivo, robusto e de baixo custo financeiro. Ele permite que um número grande de medições possa ser realizado em um período razoável de tempo (alguns dias). A capacidade de adsorção do radônio é reduzida pela presença de umidade, uma vez que a água adsorve ao carvão, portanto, este método não é indicado para ambientes úmidos (KARUNAKARA *et al.*, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.1.6 Câmara de ionização

Câmaras de ionização utilizadas para medição de radônio são cilindros metálicos construídos com um anodo coletor no centro. Este sistema de medição é acurado e funciona com base no princípio de que a energia dissipada durante os decaimentos alfa, dos produtos do decaimento radioativo do radônio dentro do cilindro, é coletada pelos eletrodos e medida como uma corrente de íons, por meio de um eletrômetro (AMARAL *et al.*, 2012; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Estes cilindros podem ser operados de forma passiva ou com uma bomba. O nível de resíduo de fundo (*background*) e o volume da câmara determinam o limite de detecção, que pode atingir valores tão baixos quanto 4 Bq/m³. Tal método apresenta como desvantagem um tempo de resposta muito baixo que requer observação cuidadosa para obtenção da leitura máxima. Além disso, os cilindros são sensíveis à temperatura, pressão e umidade (AMARAL *et al.*, 2012; ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.2. Medição da densidade de fluxo de exalação

Em suma, existem três métodos para medição da densidade de fluxo de exalação: sistemas com fluxo contínuo, acumulação e adsorção. As próximas seções descrevem cada uma destes três métodos.

2.10.2.1 Acumulador

O método de acumulação é comumente utilizado para medição da densidade de fluxo de exalação para ²²²Rn, ²²⁰Rn e também para alguns gases traço estáveis como CO₂ e CH₄. Este envolve a colocação de uma câmara conhecida como acumulador que tem uma saída fechada e a outra aberta na superfície que se

interessa medir. Para prevenir perdas superficiais de radônio, a boca da câmara é inserida a alguns centímetros da matriz de medição (Figura 17) (IAEA, 2010).

Figura 17. Diagrama esquemático da técnica que utiliza um acumulador.

Fonte: Adaptado de Ishimori *et al.*, 2013.

Os átomos de radônio exalados da superfície subjacente à câmara entram no espaço vazio e resultam em um acúmulo gradual de radônio. A concentração é medida em vários intervalos regulares durante o período de medição ou, em alguns casos, apenas uma vez no fim do período. A partir dessas medições, a densidade de fluxo de exalação é quantificada. A concentração de radônio é medida utilizando monitores *online* ou métodos instantâneos discutidos na seção anterior, como células de cintilação ou espectrometria alfa (ISHIMORI *et al.*, 2013).

A Figura 17 mostra um diagrama esquemático da técnica que utiliza um acumulador cilíndrico. A concentração de radônio dentro do acumulador após um tempo (t) depende do volume total (V) em m^3 , da área aberta do acumulador (A) em m^2 , da constante de decaimento do radônio (λ) em s^{-1} , da densidade de fluxo de exalação (f) em $Bq.m^2.s^{-1}$, do grau de difusão negativa do radônio e da ventilação no caso de operações em modo ativo (ISHIMORI *et al.*, 2013).

O volume total considera o volume da câmara mais o volume do equipamento de medição conectado à câmara. A difusão negativa se refere à perda de radônio da atmosfera da câmara para o solo e é significativa para volumes pequenos de câmara

(<1L). Possíveis vazamentos e adsorção nas paredes do acumulador também podem afetar as medições de concentração (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Um acumulador pode ser um equipamento com uma única câmara que é diretamente inserida na superfície ou pode ser um equipamento dividido em duas partes, uma que é inserida diretamente no solo e a outra que se encaixa nesta realizando a vedação. O uso de materiais que absorvem radônio na construção do acumulador deve ser evitado. As dimensões do equipamento podem variar dependendo da vazão utilizada, da necessidade de portabilidade, do tempo disponível para medição e da resolução pretendida de mapeamento do fluxo sobre a superfície (UJIC *et al.*, 2008).

Um acumulador com uma base larga (~20-50 cm de diâmetro) é útil para obtenção de dados representativos de áreas maiores e permite a cobertura de superfícies heterogêneas (rochas, vegetação, entre outros). Além disso, uma base larga permite que uma quantidade maior de radônio entre na câmara e, por isso, tais equipamentos são úteis quando os níveis de fluxo são menores. Entretanto, acumuladores grandes não são convenientes do ponto de vista da portabilidade, principalmente para trabalhos em grande escala (SHARMA; VIRK, 2001; TUCCIMEI; MORONI; NORCIA, 2006).

Acumuladores menores (~5-10 cm de diâmetro) são úteis para uma maior resolução espacial das medições e assim é possível explorar melhor variações de fluxo. Entretanto, eles têm uma maior difusão negativa afetando o fluxo e esta deve ser contabilizada no modelo. Considerações similares também existem para a altura do acumulador. Para acumuladores altos, o radônio pode não estar uniformemente distribuído e pode ser necessário utilizar um pequeno ventilador no interior da câmara para uniformizar (SHARMA; VIRK, 2001; TUCCIMEI; MORONI; NORCIA, 2006).

Por outro lado, os efeitos da difusão negativa são maiores em câmaras com alturas pequenas. Em termos práticos, a escolha das dimensões do acumulador deve se basear em considerações de portabilidade, níveis de fluxo, representatividade espacial das medidas e sensibilidade dos equipamentos de monitoramento (SHARMA *et al.*, 2003).

2.10.2.2 Modelo para interpretação dos dados de concentração

O cenário inicial é uma atmosfera uniforme que muda gradativamente conforme a difusão de gás se inicia. O início do processo de difusão causa uma queda de fluxo inicial estimada por um fator k (Equação 23). O valor típico do fator k é 0,88 (ISHIMORI *et al.*, 2013).

$$23. \quad k = \left[1 + n \left(\frac{D}{D_{MA}} \right)^{0,5} \right]^{-1}$$

Em que,

n - porosidade.

D - coeficiente de difusão do radônio na matriz.

D_{MA} - coeficiente de difusão molecular do radônio no ar.

Conforme a concentração de radônio aumenta na câmara, o processo de difusão negativa se inicia causando um efeito de queda gradual do fluxo. A Equação 24 modela por meio de uma teoria de bidimensional este comportamento do fluxo (ISHIMORI *et al.*, 2013; UJIC *et al.*, 2008).

$$24. \quad C(t) = C_0 + C_m \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{t_e} \right) \right)$$

Em que,

$C(t)$ - concentração de radônio em um tempo t .

t – tempo.

C_0 - concentração inicial de radônio no acumulador (tempo $t = 0$) em Bq/m³, assume-se que C_0 é igual ao valor da concentração de radônio em uma atmosfera aberta estável.

t_e - tempo de saturação completa do radônio na câmara (s).

C_m - encontrado através da equação $C_m = kf(A/V)t_e$, onde f é densidade de fluxo de radônio pela área, A é a superfície aberta do acumulador (m²) e V é o volume efetivo do equipamento de amostragem (m³).

O parâmetro t_e tem uma relação complicada com as dimensões da câmara e com o coeficiente de difusão D_e do radônio no meio. Este parâmetro varia entre alguns minutos para câmaras pequenas a muitas horas para câmaras grandes. A densidade de fluxo f pode ser estimada por regressão após a concentração de radônio ser medida em intervalos regulares pelo menos seis vezes (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Para medições em que a duração é significativamente menor que o valor de t_e a Equação 24 pode ser aproximada para a relação linear apresentada na Equação 25 (ISHIMORI *et al.*, 2013).

$$25. C(t) \approx C_0 + k \frac{A}{V} f t$$

O método de análise dos dados de medição do fluxo de ²²⁰Rn é um pouco diferente do que para o ²²²Rn. Devido à sua meia-vida curta, a concentração de ²²⁰Rn no acumulador chega ao um estado de equilíbrio em aproximadamente 5 min. O fluxo de ²²⁰Rn pode ser estimado pela Equação 26 (ISHIMORI *et al.*, 2013).

$$26. f_{Rn^{220}} = \frac{V\lambda_{Rn^{220}}}{A} (C_1 - C_0)$$

Em que,

V - volume efetivo do equipamento de amostragem (m³).

A - superfície aberta do acumulador (m²).

λ_{Rn-220} - constante de decaimento do ²²⁰Rn.

C_1 - concentração de radônio no estado de equilíbrio.

C_0 - concentração no estado inicial.

2.10.2.3 Método de fluxo contínuo

No método de fluxo contínuo, uma câmara que funciona com um princípio similar a um acumulador é posicionada na superfície para medição. Entretanto, o ar na câmara é continuamente removido a uma taxa contínua e a concentração de radônio do fluxo de exalação é mensurado por um sistema semi-integrativo como a célula de cintilação na configuração ativa (ISHIMORI *et al.*, 2013; HOSODA *et al.*, 2011).

A taxa de fluxo da bomba através da câmara deve ser suficientemente alta para prevenir o acúmulo de radônio no espaço vazio da câmara. Entretanto, se o fluxo de ar for muito alto, a concentração de radônio no ar amostrado será baixa e causará incertezas nas medições de radônio. A pressão do ar na câmara deve ser exatamente igual à pressão do ambiente externo. Deve-se atentar para que o fluxo de exalação de radônio para a câmara e o fluxo de sucção da bomba não causem diminuição ou aumento da pressão, respectivamente (SORIMACHI; ISHIKAWA; TOKONAMI, 2012).

No estado de equilíbrio, a densidade de fluxo de exalação é proporcional à concentração de radônio no ar amostrado e à taxa de fluxo da bomba, e é inversamente proporcional à área aberta da câmara. Outros fatores do cálculo da densidade de fluxo do radônio dependem de detalhes de construção do sistema e da sua calibração (HOSODA *et al.*, 2011).

Para métodos de detecção de radônio que não utilizam espectrometria, como é o caso das células de cintilação, a presença de ^{220}Rn e dos produtos de seu decaimento não é um problema. Uma configuração comum é utilizar duas células de cintilação espaçadas significativamente uma da outra para poder medir tanto ^{222}Rn quanto ^{220}Rn (HOSODA *et al.*, 2011).

A Figura 18 mostra um diagrama esquemático do uso de duas células de cintilação em modo ativo. Neste exemplo, o primeiro filtro é utilizado para reter qualquer elemento radioativo sólido do sistema, depois o ar entra na primeira célula de cintilação onde ^{222}Rn e ^{220}Rn e os produtos do decaimento dos dois elementos são quantificados no primeiro fluxo de ar (HOSODA *et al.*, 2011).

Após a primeira célula de cintilação, é importante que haja um comprimento suficiente de tubo para garantir que todo ^{220}Rn presente no fluxo sofra decaimento antes de chegar à segunda célula. Um filtro é posicionado antes da entrada do ar da segunda célula para garantir que todos os elementos radioativos sólidos fiquem retidos no filtro antes do fluxo ser medido na segunda célula (ISHIMORI *et al.*, 2013; HOSODA *et al.*, 2011).

Figura 18. Diagrama esquemático do uso de duas células de cintilação em modo ativo.

* Tubo PM é um tubo fotomultiplicador (*photomultiplier*).

Fonte: Adaptado de ISHIMORI *et al.*, 2013.

2.10.2.4 Adsorção

O método de adsorção para fluxos de exalação de ^{222}Rn envolve o uso de um meio adsorvente (usualmente carvão ativado) localizado próximo à superfície do material a ser analisado.

A Figura 19 mostra um diagrama esquemático deste método. Antes das medições, o carvão ativado é aquecido para remover qualquer contaminante que possa estar adsorvido. Este processo pode acontecer no próprio envoltório ou antes de o material ser alocado no envoltório e pesado. Um cuidado importante é garantir que o envoltório seja selado após este processo para prevenir a adsorção ao carvão de radônio ou umidade do ambiente (KARUNAKARA *et al.*, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Figura 19. Diagrama esquemático do método do carvão ativado.

Fonte: Adaptado de Ishimori *et al.*, 2013.

Após a exposição ao material a ser medido ocorrer, o envoltório é novamente selado e, após um período de três horas (não pode se estender por um período maior que esse), as atividades dos elementos ^{214}Pb e ^{214}Bi são medidas pelo método de espectrometria gama na maioria dos casos. O método de contagem por cintilação líquida pode ser utilizado como técnica de medição caso uma maior precisão de contagem for requerida (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Segundo Ishimori *et al.* (2013), a densidade de fluxo de radônio para o período de exposição pode ser estimada pela Equação 27.

$$27. f = \frac{N \cdot t_c \cdot \lambda^2 \cdot \exp(\lambda t_d)}{\varepsilon \cdot A \cdot [1 - \exp(-\lambda t)] \cdot [1 - \exp(-\lambda t_c)]}$$

Em que,

f - densidade de fluxo de radônio (Bq/m²s).

N - taxa líquida de contagem, após descontar o fundo, obtida durante o período de contagem.

t_c - período de contagem (s).

λ - constante de decaimento radioativa para ²²²Rn (s⁻¹).

t_d - período entre o fim do período de exposição e o início do período de contagem (s).

ε - eficiência de contagem do sistema relativa à atividade do radônio adsorvido (Bq/s).

A - área do envoltório (m²).

t - tempo de exposição (s).

O carvão ativado adsorve a umidade quando exposto a ambientes úmidos e isto pode diminuir a eficiência de coleta de radônio. Para assegurar que a adsorção de água não seja um problema ou para permitir qualquer possível correção, a adsorção de água pode ser quantificada por meio da pesagem do envoltório antes e após a exposição (KARUNAKARA *et al.*, 2015; ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.10.3. Sumário das técnicas de medição de radônio

A Tabela 3 sumariza as técnicas de detecção de radônio disponíveis no mercado com base no que foi apresentado nos itens anteriores. A análise dos prós e contras de cada método de detecção, tanto pelo modo de operação, quanto pelo limite de detecção já foi objeto de estudo de diversas pesquisas, como: Ujic *et al.* (2008), Tuccimei, Moroni e Norcia (2006), Tsapalov *et al.* (2014), já citados anteriormente. O estudo destas pesquisas gerou os resultados apresentados nesta tabela.

Tabela 3. Sumário das técnicas comuns de medição de radônio.

Método	Vantagens	Desvantagens	Tempo*	Modo de Operação	Útil para a esta pesquisa?	Exemplo de Fabricante
<i>Nuclear track detector</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Leves. • Relativamente baratos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidade baixa. • Não diferencia os isótopos de Rn. 	+++			http://www.tasl.co.uk/plastics.php
Filmes Kodak	<ul style="list-style-type: none"> • Leves. • Relativamente baratos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidade baixa. • Não diferencia os isótopos de Rn. 	+++			http://www.kodak.com/eknec/documents/a4/0900688a802aa2a4/in dustrex-products-catalog.pdf
<i>Electret</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Leves. • Relativamente baratos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não diferencia os isótopos de Rn. • Influência da radiação gama nas medidas de Rn. • Condensação de água influencia o potencial elétrico. 	++	Integrativo	Não	http://www.radelec.com/
Carvão ativado	<ul style="list-style-type: none"> • Leves. • Relativamente baratos. • Robusto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Umidade diminui bruscamente a adsorção de Rn. • Associação com outros equipamentos eletrônicos. 	+++			http://www.radonzone.com/short-term-radon-test-kit.html
Detecores de barreira de superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Diferencia os isótopos de Rn. • Baixo <i>background</i>. • Limite de detecção baixo. • Equipamento compacto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de uma fonte de energia. • Associação com outros equipamentos eletrônicos. • Custo relativamente alto das espectrometrias de raios alpha. 	+			http://www3.nd.edu/~wzech/Application-Note-AN34-Experiments-Nuclear-Science-Experiment-4.pdf
Células de cintilação	<ul style="list-style-type: none"> • Diferencia os isótopos de Rn. • Bom controle das incertezas (alta acurácia). • Robustas. • Relativamente baratas. • Permitem uma avaliação rápida das concentrações de Rn. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode ocorrer adsorção de Rn na célula de cintilação que afeta a precisão da célula. 	+	Tempo de Integração Variável ou pode ser utilizado <i>Online</i>	Sim	http://www.tecnavia.com/ee/tecnavia/radonmapper.html http://www.pylonelectronics.com/pylonpdfs/DS130R1.pdf
Câmara de ionização	<ul style="list-style-type: none"> • Método acurado. • Controle do <i>background</i> é possível. • Limite de detecção baixo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de resposta alto. • Sensíveis à temperatura, pressão, umidade e CO₂. 	+			http://www.saphymo.com/radiation-measurement/environmental-radiation-monitoring-systems/alphaquard/154.htm

(!) As informações colocadas nesta tabela devem passar por atualizações periódicas.

* O "+" sinaliza relativamente a quantidade de tempo necessária para realizar as medições.

Fonte: Arquivo pessoal.

2.11. MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE GÁS RADÔNIO NO SOLO

Segundo Makelainen *et al.* (2001), a concentração de radônio em interiores é influenciada por três tipos de fatores: a capacidade do solo de produzir e transportar radônio; a hermeticidade da subestrutura da casa e a ventilação.

A capacidade de produzir o radônio depende da concentração de rádio, do fator de emissão já discutido e da permeabilidade do solo. As medições de gás no solo são normalmente feitas utilizando um tubo inserido na superfície. A sonda é aberta na saída ou tem uma abertura lateral para permitir a difusão de radônio no volume interno. A concentração de radônio dentro da sonda é medida no próprio local (por exemplo, utilizando um *nuclear track detector*) ou pela extração de uma amostra de ar de dentro da sonda para medição de radônio por um método instantâneo ou contínuo (MAKELAINEN *et al.* 2001; ISHIMORI *et al.*, 2013).

O sistema pode precisar de uma membrana porosa para assegurar a remoção (por decaimento) de ^{220}Rn e de um desumidificador e um filtro, para remover os produtos do decaimento do radônio. As concentrações de radônio no gás proveniente do solo são de aproximadamente 10^3 a 10^5 Bq/m³ e as concentrações em materiais naturalmente radioativos podem ser ainda maiores. O valor máximo do limite de calibração do equipamento de medição deve ser considerado (ISHIMORI *et al.*, 2013).

É importante que uma vedação adequada seja obtida entre a sonda e o solo. Isto pode ser mais difícil de alcançar quando rochas estão presentes. Um estudo indicou que métodos passivos podem resultar em valores menores que os ativos para solos argilosos impermeáveis, devido ao decaimento de radônio durante a difusão entre os poros do solo (RUCKERBAUER; WINKLER, 2001).

As concentrações de radônio variam de acordo com as mudanças sazonais. Variações durante um dia também foram observadas para camadas de solo próximas à superfície (ISHIMORI *et al.*, 2013).

2.12. MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Segundo Kropat *et al.* (2014), existem duas vertentes para análise de radônio em ambientes internos, uma que considera apenas o gás proveniente do solo como maior contribuinte para concentrações de radônio e outra que considera também a influência de materiais de construção para a concentração total de radônio em um ambiente.

Entretanto, a tendência de análise dos materiais de construção é relativamente recente, pois se intensificou apenas a partir do ano 2000. Isso se deve às pesquisas anteriores que excluía o material de construção das edificações como fator de risco, concentrando-se apenas na difusão e convecção do gás pelo solo (KROPAT *et al.*, 2014).

Diversas pesquisas recentes tratam da problemática do radônio exalado de materiais de construção em geral, como os já citados nesta pesquisa Awhida *et al.* (2016), Hassan *et al.* (2011), Ngachin *et al.* (2008), SAS *et al.* (2013), SAS *et al.* (2015), Sharma e Virk (2001), Stajic e Nikzic (2015), Stoulos, Mamolopoulou e Papastefanou (2003), Tokonami (2011) e Tuccimei, Moroni e Norcia (2006).

Entretanto, ainda não há um padrão de medição internacional para avaliação da influência dos materiais de construção na concentração de radônio em ambientes internos. A exalação de radônio de materiais de construção depende não só do conteúdo de rádio, mas também de fatores, tais como a fração de radônio produzido, que é liberado a partir do material, a porosidade do material, a preparação da superfície e o acabamento das paredes. É sabido que materiais de construção como o gesso e o concreto contendo xisto aluminoso podem ter alta concentração de rádio, bem como tufos vulcânicos e pozolana, em que o conteúdo de rádio e tório podem chegar a centenas de Bq/kg (BORGONI *et al.*, 2014).

2.13. CALIBRAÇÃO E INCERTEZAS

A garantia da acurácia esperada nas medições é realizada por rastreabilidade, ou seja, a situação do método de calibração dos monitores utilizados deve estar de acordo com um padrão nacional ou internacional. Além disso, os procedimentos de calibração e testes de desempenho devem estar descritos clara e objetivamente no plano de controle de qualidade estabelecido conforme cada organização, de forma a manter a garantia de qualidade (QA) e controle de qualidade (QC) das medições (PITARD, 1993; WHO, 2006; ISHIMORI *et al.*, 2013).

Geralmente, a instrumentação para medições de campo deve ser testada e calibrada utilizando um STAR (Sistema para Teste em Atmosferas com Radônio), operado por organizações de referência ou fabricantes. Como um STAR fornece uma concentração de referência de radônio no ar, isto representa um teste e calibração do equipamento utilizado para medição de radônio. A concentração de radônio na atmosfera de referência é usualmente determinada por um padrão secundário que é calibrado a partir do padrão primário. A calibração acontece em condições atmosféricas padrão, 20 °C, 60% de umidade relativa e 101,3 kPa de pressão atmosférica (ISHIMORI *et al.*, 2013).

A amostra de ar deve ser filtrada para remover os produtos do decaimento dos elementos ^{222}Rn e ^{220}Rn antes de entrarem no detector. Este é um requisito não só para métodos de fluxo contínuo, mas também para métodos passivos, pois deve-se evitar o aumento do resíduo de fundo (*background*) (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Recentemente, medições absolutas de radônio se tornaram padrões populares primários para algumas organizações de referência. Entretanto, liberações de gás radônio a partir de uma solução aquosa de sal de ^{226}Ra também estão disponíveis e tem benefícios em termos de reprodutibilidade (ISHIMORI *et al.*, 2013).

A maior incerteza de medição é o grau de uniformidade do meio no caso de medições da densidade de fluxo de ^{222}Rn , tanto no volume da câmara quanto no instrumento de medição. Portanto, neste caso, é importante incluir um elemento para

misturar a atmosfera e garantir a uniformidade do meio. Para medições acuradas em campo, é importante que os instrumentos estejam protegidos contra condições ambientais mais severas. Além disso, testes de desempenho devem ser feitos nas condições ambientais esperadas (ISHIMORI *et al.*, 2013).

As considerações principais para a medição da densidade de fluxo de radônio são apresentadas abaixo, conforme a IAEA (2010) e WHO (2006):

- Limite de detecção: o plano de medição não deve considerar somente o limite de detecção inferior, mas também o limite superior. A concentração de radônio na câmara de acumulação pode chegar a muitos milhares de Bq/m³. Por exemplo, para uma densidade de fluxo de exalação típica para uma amostra de rejeito de usina de urânio de 10 Bq/m²s, a concentração de radônio na câmara de acumulação de 10 cm de altura atinge aproximadamente 4x10⁵ Bq/m³ após 1 hora.

- Resíduo de fundo (*background*): mesmo para medições em ambientes internos em modo ativo, o elemento ²¹⁰Pb, um produto do decaimento do radônio com meia-vida longa, se acumula dentro do detector e pode causar incertezas nas medições de radônio. Para a densidade de fluxo de exalação, o ²¹⁰Pb dentro do detector deve ser verificado periodicamente e com cuidado, pois as concentrações de radônio são maiores na câmara de acumulação do que em um ambiente interno.

- Volume do detector: o volume do detector, incluindo os equipamentos de amostragem, como bombas e tubos, também podem ser causa de incertezas nas estimativas das concentrações do radônio que se acumula em uma câmara com volume conhecido em um período determinado.

- Sensibilidade ao isótopo ²²⁰Rn: geralmente, os isótopos ²²²Rn e ²²⁰Rn são diferenciados utilizando as suas distintas meias vidas. Portanto, especialmente em medições contínuas, atenção especial deve ser dada à meia-vida do ²²⁰Rn. Alternativamente, ²²²Rn e ²²⁰Rn podem ser diferenciados pelas energias das partículas alfa emitidas dos seus decaimentos. Segundo Tripathi *et al.* (2013), para medições em fluxo contínuo, quando utilizada baixa vazão, a fração de átomos de torônio que

chega ao detector é muito baixa, portanto, a sensibilidade da medição também é reduzida.

- Umidade: a umidade dentro da câmara de acumulação pode afetar a eficiência de alguns detectores ou sistemas de detecção, como câmaras de ionização, carvão ativado, método elétrico, entre outros. Para eliminar tal efeito, mecanismos de secagem do ar podem estar presentes em alguns destes instrumentos.

- Dose de raios gama: a dose de radiação gama pode afetar a eficiência de alguns detectores ou sistemas de detecção, como câmaras de ionização e o método elétrico.

Um plano de controle de qualidade deve ser estabelecido, aplicado e mantido para mostrar objetivamente a consistência das medidas ou a observância com as leis relevantes, regulamentos ou outros requerimentos. Este plano de qualidade deve ter um escopo claro que satisfaça a legislação aplicável e que seja aceito por todas as partes de interesse. O plano pode conter um sistema padrão de medição por escrito, como um procedimento para medição, manuseio e manutenção dos equipamentos utilizados (ISHIMORI *et al.*, 2013).

Em relação à calibração dos equipamentos, uma declaração ou certificado de calibração deverá ser emitida contendo informações tais como: 1) a condição do monitor "como recebido", incluindo quaisquer danos físicos e ajustes realizados, tensão, fundo e fator de calibração conforme necessário; 2) o fundo medido; 3) a resposta medida à atmosfera de referência; 4) os ajustes discriminados, a tensão, o fundo e o fator de calibração, após calibrado; 5) a data em que a calibração foi realizada, e 6) o nome e assinatura da pessoa responsável pela calibração. Uma etiqueta de calibração deve ser afixada ao monitor contendo: 1) o nome da instalação que realiza a calibração; 2) as iniciais da pessoa que realiza a calibração; 3) a data da calibração; 4) a data de expiração da calibração; 5) os valores do fundo e do fator de calibração, e 6) o número de série do monitor. O monitor deve ser calibrado em intervalos regulares, tipicamente anualmente ou semestralmente, dependendo da recomendação do fabricante e dos requisitos das agências de licenciamento ou certificação (WHO, 2006).

2.14. ESPECTROMETRIA GAMA

A espectrometria gama é um método não destrutivo e multielementar que tem sido amplamente empregado em estudos ambientais (PAPACHRISTODOULOU *et al.*, 2003; ASSADOV *et al.*, 2001; RIBEIRO *et al.*, 2001; KOHLER *et al.*, 2000).

A espectrometria gama, quando realizada com detectores de germânio, é a técnica mais adequada para identificar e quantificar radionuclídeos. Isto acontece devido às características muito bem definidas das energias dos raios gama que são produzidos pela maior parte dos radionuclídeos. Entretanto, existem alguns poucos elementos puramente emissores de partículas beta (que não emitem radiação gama) que não podem ser identificados por espectrometria gama. Alguns destes têm grande importância tecnológica, como o ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr . (GILMORE; HEMINGWAY, 1995).

A maior parte das emissões gama acontece após um decaimento tipo beta. Porém, a probabilidade de emissão de raios gama não é a mesma que a de decaimento beta devido a uma conversão interna que pode resultar em emissão de raios X (GILMORE; HEMINGWAY, 1995).

Raios X e gama são usualmente propriedades dos produtos radioativos, mas não com transições isoméricas, que consistem em “desexcitar” o elétron de um determinado estado isomérico, mediante a emissão da radiação gama que lhe corresponde. Isso pode acarretar em dois radionuclídeos isobáricos terem a mesma energia gama. As energias de raios X sobrepõem a amplitude energética nos raios gama, mas os formatos dos picos energéticos podem ser diferentes para cada tipo de radiação (PAPACHRISTODOULOU *et al.*, 2003).

As energias dos raios gama mostram quais elementos estão presentes no material, mas não identifica isótopos. Esta identificação pressupõe o conhecimento do modo de decaimento: transição isomérica, captura de elétrons ou conversão interna. Os esquemas de decaimento fornecem informações importantes sobre o fenômeno de cascata. Dois raios gama são considerados em cascata se eles aparecem exatamente ao mesmo tempo e, caso não haja diferença entre a primeira e a segunda

emissão de raios gama, estes também são chamados de coincidentes (GILMORE; HEMINGWAY, 1995).

O gráfico de radionuclídeos é uma ferramenta útil para identificação dos elementos, e considera tanto a classe do radionuclídeo presente quanto os dados de informação do núcleo (Figura 20) (GILMORE; HEMINGWAY, 1995).

Figura 20. Trecho do gráfico de radionuclídeos.

Fonte: Adaptado de Gilmore e Hemingway, 1995.

2.14.1. Interações dos raios gama com a matéria

Os raios gama interagem com a matéria por espalhamento elástico (Rayleigh) e processos inelásticos. Ambos contribuem para atenuação da intensidade da radiação gama, mas apenas o último contribui para absorção de energia. A energia é

transferida para o material por meio de colisões com elétrons ou pósitrons (GILMORE; HEMINGWAY, 1995).

Segundo Gilmore e Hemingway (1995), a energia cinética dessas partículas é dissipada pela criação de um par de íons secundários que fornece a base para o detector de sinal. As interações inelásticas são:

- Absorção fotoelétrica: absorção total da energia dos raios gama, possivelmente seguida de emissão de radiação fluorescente (picos de fuga de Raios X).
- Espalhamento *Compton*: absorção parcial que dá origem à borda de *Compton* e ao *Compton* contínuo.
- Produção de pares de absorção total seguida de perda completa ou parcial de extinção quanta. A perda completa produz picos de escape simples e duplos. As contagens que surgem entre a borda *Compton* e o pico de energia completa acontecem devido às interações múltiplas de qualquer tipo.

As interações dos raios gama com a blindagem do detector produzem sinais que podem ser classificados como:

- Raios X fluorescentes (usualmente chumbo): absorção fotoelétrica e emissão de radiação fluorescente.
- Pico de retro espalhamento: espalhamento *Compton* por um ângulo grande que resulta em uma distribuição ampla de aproximadamente 200 keV.
- Pico de aniquilação (511 keV): produção de pares dentro da região do entorno do detector seguido pelo escape de um raio gama que provoca aniquilação em direção ao detector. Deve-se lembrar que muitos radionuclídeos com deficiência de nêutrons podem emitir pósitrons e a aniquilação deles também entrará para a contagem de picos de aniquilação.

Quanto maior o detector, maior é a probabilidade de absorção completa dos raios gama e, conseqüentemente, maiores são os picos de energia completa e menores os *Comptons* contínuos. Fontes emissoras de partículas beta de alta energia são prováveis “*bremsstrahlung*” (palavra alemã que significa energia diminuindo) contínuos em baixas energias (ASSADOV *et al.*, 2000).

A atenuação de feixes colimados de radiação gama segue uma relação exponencial simples envolvendo o coeficiente de atenuação, μ , para condições geométricas favoráveis, ou seja, quando a fonte emissora tem uma saída direcionada. Para outras geometrias, um fator de acúmulo deve ser incluído na Equação 28 (GILMORE; HEMINGWAY, 1995).

$$28. I = I_0 e^{-\mu e}$$

Em que,

e - espessura do material absorvedor.

I - intensidade dos raios gama após passarem pelo material absorvedor.

I_0 - intensidade dos raios gama antes de atingirem o material absorvedor.

μ - fator de atenuação.

A opção típica de blindagem radiológica para espectrometria gama é a de 100 mm de chumbo, 3 mm de cádmio ou estanho e 0,7 mm de cobre (GILMORE; HEMINGWAY, 1995).

2.15. LEGISLAÇÃO

A diretiva europeia número 112, intitulada “*Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials*”, em português: “Princípios de Proteção Radiológica para Materiais de Construção Naturalmente Radioativos”, com caráter recomendativo, estabeleceu uma ferramenta de triagem para materiais

de construção, a partir de uma estimativa de dose máxima de raios gama para um dado material (EC, 1999).

Esta ferramenta de triagem considera as concentrações de atividade do ^{226}Ra , do ^{232}Th e ^{40}K , usualmente presentes em materiais naturalmente radioativos, e coeficientes específicos derivados de uma determinada sala de modelo (semelhante a um *bunker* com dimensões 4 m x 5 m x 2,8 m), com paredes, teto e chão de 20 cm de espessura e com uma densidade semelhante ao concreto (2350 kg/m³). A Equação 29 é utilizada para calcular o índice gama (*Index*) considerado nesta triagem (EC, 1999).

$$29. \text{Index} = \frac{C_{\text{Ra}^{226}}}{300} + \frac{C_{\text{Th}^{232}}}{200} + \frac{C_{\text{K}^{40}}}{3000}$$

Em que,

$C_{\text{Ra-226}}$, $C_{\text{Th-232}}$ e $C_{\text{K-40}}$ representam as concentrações de atividade em Bq/kg para o ^{226}Ra , do ^{232}Th e ^{40}K , respectivamente.

Index – adimensional.

Calpéna (2012) afirma que o impacto da espessura do material na dose apresentada anteriormente é aproximadamente linear, assim, quanto mais fina a espessura do “quarto modelo”, menor é a dose, seguindo a Equação 30.

$$30. \text{Estimativa da Dose (mSv/ano)} = \frac{\text{Espessura (cm)}}{20} \left[\frac{C_{\text{Ra}^{226}}}{300} + \frac{C_{\text{Th}^{232}}}{200} + \frac{C_{\text{K}^{40}}}{3000} \right]$$

Desta forma, materiais como rochas ornamentais usadas como decoração podem ter alta atividade radioativa, mas o seu uso pode ser autorizado utilizando esta abordagem que não leva em consideração o gás radônio (CALPÉNA, 2012). O critério de autorização utiliza a Tabela 4 como referência.

Tabela 4. Utilização e categorias para materiais de construção considerando o *index*.

Critério de Dose	Categorias	
	0,3 mSv/ano	1 mSv/ano
Materiais utilizados por peso (por exemplo, concreto)	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
Materiais superficiais ou outros de uso restrito (por exemplo, telhas e placas)	$I \leq 2$	$I \leq 6$

Fonte: Adaptado de EC, 1999.

Em dezembro de 2013, uma nova diretiva sobre radiações ionizantes entrou em vigor na União Europeia, os países membros têm até seis de fevereiro de 2018 para se adequar a esta nova regulamentação. Esta diretiva mantém o cálculo deste índice para critério de seleção de materiais da construção civil e aborda o gás radônio em alguns artigos, conforme a Figura 21.

Esta diretiva mantém o valor de concentração máximo de 300 Bq/m³ recomendável para radônio em interiores, tanto para locais de trabalho, quanto para residências, apesar de reconhecer que concentrações abaixo de 100 Bq/m³ seriam ideais, devido a novos estudos epidemiológicos e recomendação da OMS. Além deste fato, a principal nova recomendação desta diretiva é um plano de ação sobre o gás radônio em ambientes internos (*indoor*) que os países da UE devem apresentar até fevereiro de 2018 contendo os seguintes tópicos (EC, 2013):

(1) Estratégia para a realização de pesquisas de concentrações de radônio em ambientes internos ou concentrações de gases do solo com a finalidade de estimar a distribuição das concentrações de radônio em ambientes internos, para a gestão de dados de medição e para o estabelecimento de outros parâmetros relevantes (como solo e tipos de rocha, permeabilidade e conteúdo de Ra-226 na rocha ou solo).

(2) Critérios utilizados para a delimitação de áreas ou para a definição de outros parâmetros que possam ser usados como indicadores específicos de situações com elevado potencial de exposição ao radônio.

(3) Identificação dos tipos de locais de trabalho e edifícios de acesso público, como escolas, locais de trabalho subterrâneos, e aqueles em determinadas áreas, em que são necessárias medidas, com base numa avaliação dos riscos, considerando por exemplo horas de ocupação.

(4) Base para o estabelecimento de níveis de referência para as habitações e locais de trabalho. Se for o caso, a base para o estabelecimento de níveis de referência diferentes para diferentes usos de edifícios (de habitação, edifícios de acesso público, locais de trabalho), bem como para os atuais e para novos edifícios.

(5) Atribuição de responsabilidades (governamentais e não-governamentais), mecanismos de coordenação e recursos disponíveis para a implementação do plano de ação.

(6) Estratégia para reduzir a exposição ao radônio em habitações e de dar prioridade à resolução das situações identificadas no ponto 2.

(7) Estratégias para facilitar a implantação de medidas corretivas na fase de pós-construção.

(8) Estratégia, incluindo métodos e ferramentas, para prevenir a entrada de radônio em edifícios novos, incluindo a identificação de materiais de construção com exalação de radônio significativa.

(9) Agenda de discussão do plano de ação.

(10) Estratégia de comunicação para aumentar a sensibilização do público e estabelecer locais onde empregadores e trabalhadores se informem dos riscos do radônio, inclusive em relação ao tabagismo.

(11) Orientações sobre os métodos e instrumentos de medição e medidas corretivas. Os critérios para o credenciamento de serviços de medição e de reparação devem também ser considerados.

Figura 21. 2013/59/EURATOM e os artigos relacionados ao gás radônio.

Fonte: Arquivo pessoal.

(12) Se for o caso, prestação de apoio financeiro para pesquisas sobre radônio e medidas corretivas, em especial para residências particulares com concentrações muito elevadas do gás radônio.

(13) Objetivos a longo prazo em termos de redução do risco de câncer de pulmão atribuível à exposição ao radônio (para fumantes e não-fumantes).

(14) Ocasionalmente, a consideração de outras questões conexas e programas correspondentes, tais como programas de economia de energia e qualidade do ar interior.

Com base na legislação dos Estados Unidos, um dos maiores importadores de rochas ornamentais do Brasil, os níveis de exposição em ambientes internos devem ser mantidos abaixo de 4 pCi/L ou 148 Bq/m³ e os níveis ocupacionais para radiações ionizantes não podem ultrapassar 100 pCi/L (para uma jornada de trabalho de 40 horas semanais) (EPA, 2012; OSHA, 1996).

2.15.1. Índices de perigo radiológico

A atividade equivalente ao rádio (Raeq) é definida como a soma ponderada das atividades de ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K, com base no pressuposto de que 370 Bq/kg de ²³⁸U, 259 Bq/kg de ²³²Th e 4810 Bq/kg de ⁴⁰K equivalem à uma dose efetiva de 1,5 mGy por ano, igual a 1 mSv de dose efetiva anual (TUFAIL, 2012). Este cálculo é efetuado a partir da Equação 31 sugerida por Beretka e Mathew (1985). O valor de referência é 370 Bq/kg.

$$31. Ra_{eq} = C_U + 1,43 \times C_{Th} + 0,077 \times C_K$$

Em que,

C_U, C_{Th} e C_K – são as concentrações de atividade de ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K, em Bq/kg, respectivamente.

O índice de perigo externo (Hex), proposto por Hewamanna *et al.* (2001), é aplicado para uma casa com paredes de espessura finita, janelas e portas, e pode ser calculado a partir da Equação 32.

$$32. Hex = \frac{C_U}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810}$$

Em que,

C_U , C_{Th} e C_K – são as concentrações de atividade de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K , em Bq/kg, respectivamente.

O perigo radiológico será desprezível se o seu valor de Hex for menor que a unidade. Além disso, o índice de perigo interno (Hin), proposto por Krieger (1981), leva em consideração a exposição interna devido ao radônio e seus produtos de decaimento de curta duração como uma ameaça ao sistema respiratório. É calculado a partir da Equação 33.

$$33. Hin = \frac{C_U}{185} + \frac{1,43 \times C_{Th}}{259} + \frac{0,077 \times C_K}{4810}$$

Em que,

C_U , C_{Th} e C_K – são as concentrações de atividade de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K , em Bq/kg, respectivamente.

A taxa de dose absorvida (D_{ab}) está relacionada ao perigo referente à quantidade de radiação depositada de emissores gama terrestres por unidade de tempo. A dose D_{ab} (nGy/h) pode ser calculada a partir das concentrações de atividade medidas e dos seguintes fatores de conversão (Equação 34), conforme dados da UNSCEAR (1988):

$$34. D_{ab} = 0,462 \times C_U + 0,604 \times C_{Th} + 0,0417 \times C_K$$

Em que,

C_U , C_{Th} e C_K – são as concentrações de atividade de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K , em Bq/kg, respectivamente.

A dose equivalente gonadal anual (AGDE) é uma medida do significado genético da dose equivalente recebida pelos órgãos reprodutores da população por ano (RAMASAMY *et al.*, 2014). Neste contexto, a atividade da medula óssea e as das células da superfície óssea também foram incluídas pela UNSCEAR (1988) como órgãos de interesse. A AGDE é determinada pela Equação 35 (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2014; RAVISANKAR *et al.*, 2014).

$$35. AGDE (\mu\text{Sv}/\text{ano}) = 3,09 \times C_U + 4,18 \times C_{Th} + 0,314 \times C_K$$

Em que,

C_U , C_{Th} e C_K – são as concentrações de atividade de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K , em Bq/kg, respectivamente.

A dose efetiva anual equivalente (AEDE) leva em consideração a taxa de dose absorvida e também o tempo gasto em contato com a fonte radioativa e esta pode ser calcula pela Equação 36.

$$36. AEDE (\mu\text{Sv}/\text{ano}) = D_{ab} (n\text{Gy}/h) \times 8760h \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv}/\text{Gy} \times 10^{-3}$$

O fator de 0,8 é usado considerando que uma pessoa gastou 80% de seu tempo em ambientes internos. O fator de conversão de 0,7 Sv/Gy converte a taxa de dose absorvida (nGy/h) para dose efetiva anual equivalente em mSv/y (SINGH *et al.*, 2009).

O último índice de perigo radiológico é risco de câncer por excesso de tempo de vida (ELCR) que representa o risco de câncer fatal durante um tempo de vida (DL) de 70 anos levando em consideração a AEDE e um fator de risco (RF em Sv⁻¹) estabelecido como 0,05 pela ICRP 60 (ICRP, 1991) para efeitos estocásticos para o público (TASKIN *et al.*, 2009; ICRP, 2008) e pode ser calculado a partir da Equação 37.

$$37. \text{ELCR} = \text{AEDE} \times \text{DL} \times \text{RF}$$

2.15.2. Brasil

O Brasil ainda não tem legislação para o radônio, mas a CNEN, administrada pelo governo federal, instalou no Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC), equipamentos e pesquisadores dedicados a pesquisas neste tema. Inclusive, já foram realizadas pesquisas relacionando a incidência de casos de câncer com a radiação natural (principalmente radônio) no Planalto de Poços de Caldas, região conhecida pela radiação natural elevada devido ao depósito de urânio na região. Outras pesquisas também estão sendo conduzidas ou apoiadas pela CNEN visando subsidiar a regulamentação sobre o gás radônio no país.

A Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica (SBPR) já organizou dois simpósios sobre radônio no Brasil, de forma a colocar os pesquisadores em contato e disseminar o conhecimento.

Assim, na falta de legislação nacional, a OMS sugere que seja utilizado o valor máximo de referência de 300 Bq/m³ para ambientes internos e este valor é apenas uma recomendação e não tem caráter impositivo. A OMS também recomenda que progressivamente o limite seja diminuído para 100 Bq/m³ (WHO, 2009).

2.16. PANORAMA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS NO BRASIL

Segundo a ABIROCHAS (2015), o Brasil exporta principalmente rochas processadas, seguidas de rochas silicáticas brutas e, por fim, rochas carbonáticas brutas (Figura 24). O mercado de rochas ornamentais é bastante expressivo em relação às exportações. A Figura 22 apresenta os setores minerais brasileiros em relação ao posicionamento do país no mercado global.

Figura 22. Minerais estratégicos para a balança comercial do Brasil.

Fonte: IBRAM, 2015.

Em relação ao total de exportações brasileiras, a participação do mercado de rochas ornamentais cresceu entre 2012 e 2015, conforme a Tabela 5 e Figura 23. Este comportamento do mercado mostra que, apesar do desaquecimento econômico geral do país, o mercado de rochas ornamentais se manteve aquecido.

Tabela 5. Participação do setor de rochas ornamentais no total brasileiro de exportações.

Ano	Total Brasil (U\$ mi)	Setor de Rochas (U\$ mi)	Participação Setor de Rochas (%)
2012	242579	1060	0,44
2013	242178	1302	0,54
2014	225100	1277	0,57
2015	191134	1209	0,63

Fonte: ABIROCHAS, 2015.

Figura 23. Representação gráfica da participação do setor de rochas ornamentais nas exportações brasileiras.

Fonte: Arquivo pessoal.

Os principais destinos destas rochas são EUA, China, Itália, Canadá, Espanha, Reino Unido, Alemanha, México, Venezuela e Holanda (ABIROCHAS, 2015). A participação destes dez países corresponde a 79% das exportações brasileiras, sendo 65% para os EUA, que possuem legislação para radônio em interiores, e 10% para a Europa, que além de possuir legislação para radônio em interiores, também tem normativa para aprovação do uso de materiais de construção em relação à atividade radioativa.

A partir da Figura 24, nota-se que a participação dos granitos nas exportações de rochas ornamentais somou 88,1% para o ano de 2014 e 86,9% para o ano de 2015. A média destes valores está representada graficamente na Figura 25.

Figura 24. Exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2014 e 2015.

Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento															
Variação Percentual em Peso e Valor e do Preço Médio no Período de Janeiro-Dezembro 2014-2015															
Produtos		NCM	Janeiro-Dezembro 2014 (A)				Janeiro-Dezembro 2015 (B)				Variação % (B/A)		US\$/kg	US\$/kg	Variação %
			US\$ mil	PP%	Ton	PP%	US\$ mil	PP%	Ton	PP%	Valor	Peso	2015 (C)	2014 (D)	Preço (C/D)
Rochas Carbonáticas Brutas (mármore, travertinos etc)	Blocos e Chapas Brutas	2515.11.00	1.051,25	0,08	4.490,78	0,18	777,91	0,06	2.530,15	0,11	-26,00	-43,66	0,3075	0,2341	31,34
		2515.12.10	6.039,74	0,47	23.766,52	0,93	5.606,47	0,46	12.527,77	0,54	-7,17	-47,29	0,4475	0,2541	76,10
	Outros (não especificados)	2515.12.20													
		2515.20.00	243,54	0,02	500,25	0,02	175,29	0,01	468,52	0,02	-28,02	-6,34	0,3741	0,4868	-23,15
	Subtotal Rochas Carbonáticas Brutas		7.334,53	0,57	28.757,55	1,13	6.559,67	0,54	15.526,44	0,67	-10,56	-46,01	0,4225	0,2550	65,65
Rochas Silicáticas Brutas (granitos e quartzitos)	Quartzitos (blocos ou chapas brutas)	2506.20.00	15.944,42	1,25	26.278,81	1,03	22.880,50	1,89	35.465,22	1,53	43,50	34,96	0,6452	0,6067	6,33
	Granitos (blocos ou chapas brutas)	2516.11.00	18.994,49	1,49	88.778,60	3,49	16.735,42	1,38	80.809,99	3,48	-11,89	-8,98	0,2071	0,2140	-3,21
		2516.12.00	221.583,21	17,35	1.099.042,69	43,15	174.086,56	14,40	838.251,74	36,08	-21,44	-23,73	0,2077	0,2016	3,01
	Arenitos (blocos ou chapas brutas)	2516.20.00	19,20	0,00	12,95	0,00	37,65	0,00	57,99	0,00	96,06	347,83	0,6492	1,4829	-56,22
	Outros (não especificados)	2516.90.00	327,64	0,03	1.155,28	0,05	148,73	0,01	508,34	0,02	-54,61	-56,00	0,2926	0,2836	3,16
Subtotal Rochas Silicáticas Brutas			256.868,96	20,12	1.215.268,32	47,71	213.888,86	17,69	955.093,28	41,10	-16,73	-21,41	0,2239	0,2114	5,95
Rochas de Processamento Simples e Especial Produtos Acabados e Semi-acabados	Ardósias	2514.00.00	827,58	0,06	1.767,70	0,07	463,28	0,04	1.066,69	0,05	-44,02	-39,66	0,4343	0,4682	-7,23
		6803.00.00	46.471,87	3,64	98.770,82	4,24	39.386,64	3,26	94.565,18	4,07	-15,25	-4,26	0,4165	0,4705	-11,48
	Quartzitos foliados	6801.00.00	14.076,63	1,10	41.520,48	1,63	11.321,48	0,94	36.546,06	1,57	-19,57	-11,98	0,3098	0,3390	-8,63
	Pedra-sabão	2526.10.00	343,77	0,03	811,41	0,03	790,57	0,07	1.263,00	0,05	129,97	55,65	0,6259	0,4237	47,75
		6802.29.00	54.083,62	4,24	71.185,14	2,79	53.554,19	4,43	72.464,93	3,12	-0,98	1,80	0,7390	0,7598	-2,73
	Granitos (sobretudo chapas beneficiadas)	6802.23.00	22.386,25	1,75	28.414,68	1,12	17.875,06	1,48	24.844,51	1,07	-20,15	-12,56	0,7195	0,7878	-8,68
		6802.93.90	817.796,05	64,05	1.027.005,44	40,32	788.665,01	65,23	1.073.788,21	46,21	-3,56	4,56	0,7345	0,7963	-7,76
	Mármore (sobretudo chapas beneficiadas)	6802.21.00	3.742,08	0,29	2.941,91	0,12	2.414,70	0,20	2.447,63	0,11	-35,47	-16,80	0,9865	1,2720	-22,44
		6802.91.00	26.950,41	2,11	18.513,68	0,73	40.580,74	3,36	29.068,74	1,25	50,58	57,01	1,3960	1,4557	-4,10
		6802.92.00	22,24	0,00	21,91	0,00	60,73	0,01	60,00	0,00	173,08	173,82	1,0121	1,0148	-0,27
	Lajotas e outros produtos padronizados	6802.10.00	200,50	0,02	107,54	0,00	402,78	0,03	259,95	0,01	100,89	141,72	1,5495	1,8644	-16,89
	Outros (não especificados)	6802.99.90	25.681,50	2,01	12.098,92	0,47	33.169,54	2,74	16.610,74	0,71	29,16	37,29	1,9969	2,1226	-5,92
Subtotal Rochas Processadas			1.012.582,51	79,31	1.303.159,63	51,16	988.684,71	81,77	1.352.985,63	58,23	-2,36	3,82	0,7307	0,7770	-5,96
TOTAL			1.276.785,99	100,00	2.547.185,49	100,00	1.209.133,23	100,00	2.323.605,34	100,00	-5,30	-8,78	0,5204	0,5013	3,81

Fonte: ABIROCHAS, 2015.

Figura 25. Média das exportação de rochas ornamentais brasileiras entre 2014 e 2015.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para avaliação de radiações ionizantes, os granitos e os mármore diferem muito devido à formação geológica de ambos. Os mármore são rochas metamórficas de composição calcária capazes de receber polimento e sua principal constituição mineral é a calcita e a dolomita. Um fator importante a ser observado é que os minerais de calcita são frágeis e facilmente manchados quando em contato com soluções ácidas. Comparativamente aos minerais de granitos, calcita e dolomita são menos resistentes (KLEIN; DUTROW, 2009).

Os granitos são rochas ígneas, compostas principalmente de minerais de quartzo, feldspato e mica e são aproximadamente duas vezes mais resistentes que os mármore. Normalmente, o granito não possui tantos veios contínuos, salvo aqueles exóticos, que possuem veios contínuos muito parecidos com os encontrados nos mármore (KLEIN; DUTROW, 2009).

Segundo Goldschmidt (1958), o U e o Th se acumulam preferivelmente em rochas ígneas, devido à associação com os últimos estágios dos magmas ígneos. Assim, os granitos são o grupo de maior risco das rochas ornamentais comercializadas atualmente em relação à quantidade de radioatividade total e à exalação de radônio e torônio. Alguns mármore podem apresentar níveis de radioatividade consideráveis tanto em relação às emissões quanto às exalações, dependendo da pureza do calcário que deu origem a rocha, mas este tipo de ocorrência é menos frequente (EL-DINE *et al.*, 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho foi definida de modo a atingir os objetivos propostos nesta pesquisa. As amostras de rochas ornamentais selecionadas foram analisadas tanto em relação aos gases radônio e torônio, quanto em relação à radiação total emitida pela placa (Figura 26).

Figura 26. Metodologia proposta.

Fonte: Arquivo pessoal.

A metodologia proposta na Figura 26 visa criar um método que avalie a possibilidade de uso de rochas ornamentais em interiores atendendo tanto ao nível permitido de emissões, através do cálculo do *Index* estipulado pela legislação europeia (explicado no item 2.15) quanto aos níveis de radônio e torônio exalados pela rocha. Esta demanda surgiu devido a algumas rochas apresentarem emissões radioativas (gama) não tão altas e, desta forma, serem aprovadas para uso em interiores, mesmo quando as concentrações em interiores de radônio, utilizando-se recobrimento superficial destas rochas, pudessem atingir o nível de referência da OMS ou da própria UE em poucas horas.

Assim, propõem-se a criação de um método de triagem de rochas ornamentais que integre a avaliação das emissões com a avaliação das exalações dos gases radônio e torônio, para que se regulamente o uso destas rochas em interiores de construções como material de revestimento. Os principais ensaios e as etapas de preparação de amostras estão descritos na Figura 27. Além dos ensaios descritos nesta figura, foram realizados também ensaios de permeabilidade e porosidade no Laboratório de Petrografia Básica da Petrobras no CENPES (Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello). As metodologias dos ensaios estão apresentadas nos itens 3.3, 3.4 e 3.5.

As análises realizadas foram divididas em quatro categorias, sendo a primeira a que compreende ensaios de caracterização mineralógica das amostras, quais sejam, análises químicas, difração de raios-X, MEV, descrição de lâminas petrográficas, ensaios de densidade e umidade, e ensaios de permeabilidade. A caracterização mineralógica das amostras visou investigar a presença de urânio e tório bem como as associações destes elementos com os minerais presentes, além de quantificar variáveis como a umidade, porosidade e permeabilidade que influenciam diretamente a exalação de gás a partir das rochas (item 2.9).

A segunda categoria corresponde aos ensaios realizados para determinar a atividade radioativa das rochas, sendo eles a espectrometria gama e a quantificação de U e Th. A terceira categoria incluiu ensaios de quantificação do fluxo de exalação dos gases radônio e torônio utilizando uma célula de cintilação (célula do tipo Lucas) e, também, detector portátil de radiação. A última categoria compreendeu apenas um

ensaio, o de análise da superfície das rochas para determinação da rugosidade. As placas de rocha analisadas apresentavam uma superfície rugosa e outra polida ou uma superfície rugosa e outra cortada ou uma superfície cortada e outra polida, que foram simplificadas para fins de agrupamento entre menos rugosas e rugosas.

Figura 27. Ensaios e preparação das amostras.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.1. AMOSTRAS

As amostras de rochas ornamentais utilizadas nesta pesquisa são diversificadas e a escolha de amostras de diversas origens e litologias visou à demonstração do método e não ao estudo aprofundado e particular, específico de cada amostra. Portanto, mesmo que uma das amostras venha a ser reprovada no método de triagem proposto, isto não significa que todas as amostras com a mesma identificação petrológica necessariamente apresentem o mesmo problema, pois, mesmo em uma mesma jazida, é possível encontrar amostras com emissões e exalações radioativas diferentes. Portanto, um trabalho de amostragem deve ser conduzido na jazida para investigar se lotes de amostras seriam problemáticos.

Os nomes das amostras adotados foram os de revenda e, no capítulo de resultados, a identificação petrológica da rocha está apresentada. A grande maioria das rochas é granítica ou protólito granítica, devido à prevalência de tais tipos nas exportações brasileiras (vide item 2.16). Alguns mármore também foram investigados para confirmar a hipótese que não caracterizam um perigo para uso em ambientes internos. É importante salientar que as marmorarias vendem uma grande quantidade de rochas como granito que, na verdade, tem outras classificações petrológicas e isto fica evidenciado também nesta pesquisa.

A Tabela 6, Figura 28 e Figura 29 apresentam as quarenta (40) amostras utilizadas neste estudo. Vale ressaltar que as amostras apresentadas no mapa do Brasil são aquelas mineradas em território nacional (Figura 28), já as amostras apresentadas no mapa da Suíça são apenas comercializadas no país e a maioria é importada (Figura 29).

Os ensaios que necessitaram da etapa de corte foram: permeabilidade, porosidade, lâminas petrográficas, umidade, densidade e análise das superfícies. O ensaio de permeabilidade exigiu blocos de 5 por 5 por 10 cm (comprimento, altura e largura) para que os plugues fossem extraídos com uma serra copo de 1" de diâmetro.

As lâminas exigiram cortes de 2 por 2 cm, assim como a análise de superfícies, umidade e densidade. Os ensaios especificados a seguir utilizaram diversas placas de 2 por 2 cm para garantir a representatividade do ensaio, como explicado no item 3.5, página 145.

As amostras provenientes da Suíça foram coletadas pela autora em 2014, quando ela participava do estágio no *Institut de Radiophysique* (IRA) do CHUV – *Centre Hospitalier Universitaire Vaudois*, localizado na cidade Lausanne. A coleta destas amostras contou com a participação do Prof. Mauro Gandolla da EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Enfatiza-se que as amostras coletadas na Suíça não são necessariamente mineradas no país, mas sim importadas. O critério de escolha foi a popularidade das vendas, e no total, quatorze (14) amostras foram coletadas na Suíça.

Tabela 6. Identificação das amostras.

#	Amostras	#	Amostras
1	Azul Bahia	21	Flor Di Pesco
2	Azul Bahia Escuro	22	Iragua
3	Blinder Cinza Escuro	23	Juparana Gold
4	Barroco Juruena	24	Luserta Fiammata
5	Basaltite	25	Maracujá
6	Bege Dunas	26	Marrom São Paulo
7	Bege Ipanema	27	Monaco Light
8	Blinder Vermelho Claro	28	Onsernone Lucido
9	Branco Ceará	29	Pietra di Jerusalem
10	Bianco Cristal	30	Pietra Lavica
11	Branco Marfim	31	Pietra Lavica (1)
12	Branco Siena	32	Preto Absoluto
13	Branco Suíça	33	Rosa Capri
14	Café Imperial	34	Rosso Lucido
15	Café Imperial Claro	35	Sodalita
16	Capão Bonito	36	Verde Maritaca
17	Capão Bonito GM	37	Verde Pavão
18	Cinza Castelo	38	Verde Ubatuba
19	Cinza Corumba	39	Vermelho Bragança
20	Cinza Mundo Novo	40	Vermelho Jacarandá

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 28. Localização das amostras brasileiras.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 29. Amostras comercializadas na Suíça.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nas seções 3.2.1 e 3.2.2 estão descritas as etapas de preparação das amostras realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios da USP (LTM), de forma que as mesmas fossem submetidas às seguintes análises:

- Análise química por Fluorescência de raios X (FRX) realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP (LCT); este ensaio requer 10 g de material pulverizado.
- Análise mineralógica por Difração de raios X (DRX) realizada no LCT; este ensaio requer 40 g de material pulverizado.
- Picnometria por gás hélio realizada no LCT; este ensaio requer 10 g de material pulverizado.
- Espectrometria gama realizada na Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); este ensaio requer entre 400 e 450 g (dependendo da densidade) de material 100% passante em 2 mm.
- Quantificação de urânio e tório realizada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN); este ensaio requer 1 g de material pulverizado.

3.2.1. Cominuição

A cominuição primária das amostras foi realizada em um britador de mandíbulas laboratorial (Figura 30) até que o material apresentasse granulometria adequada para alimentar o britador de rolos (Figura 31). Utilizou-se uma peneira de controle com 2 mm de abertura para controlar a britagem de rolos. A britagem foi

interrompida quando 100% do material passaram pela peneira de 2 mm. A Figura 34 ilustra o processo de preparação de amostras.

Figura 30. Britador de mandíbulas do LTM-USP.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 31. Britador de rolos do LTM-USP.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.2.2. Homogeneização e quarteamento

Após britagem, as amostras foram acondicionadas em bandejas metálicas e colocadas em uma estufa a 100 °C para remoção da umidade, de forma que cada amostra se adequasse às condições ideais de homogeneização e quarteamento.

As amostras foram homogeneizadas pelo método da pilha alongada representada na Figura 33. Após a homogeneização, a densidade linear da pilha foi calculada, visto que a massa era conhecida. O comprimento resultante após a pilha pronta foi medido, assim foi possível quarteirar a amostra (selecionar alíquotas) a partir da pilha de forma representativa. Uma alíquota de 400 g abaixo de 2 mm foi separada para a CNEN e o restante foi pulverizado para os demais ensaios. As alíquotas que foram encaminhadas para a CNEN foram seladas para atingir o equilíbrio radioativo (Figura 32).

Figura 32. Lata utilizada para acondicionar o material para a espectrometria gama na CNEN.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 33. Pilha alongada.

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 34 apresenta o fluxograma de preparação de amostras para todos os ensaios que estão descritos nos próximos itens.

Figura 34. Fluxograma de preparação de amostras.

3.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada utilizando ensaios complementares que possibilitaram análises de associações mineralógicas preferenciais, bem como a descrição petrológica de cada amostra. Os métodos empregados nos ensaios estão descritos a seguir.

3.3.1. Fluorescência de raios X – FRX

A análise por fluorescência de raios X é um método que pode ser qualitativo e/ou quantitativo baseado na medida das intensidades dos raios X característicos

emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Neste caso, intensidade se refere ao número de raios X detectados por unidade de tempo. Desta forma, as intensidades das linhas espectrais com energias características do elemento são relacionadas à concentração do elemento na amostra (FILHO, 1999). Os teores apresentados foram determinados por análise sem padrões (*standardless*) dos elementos químicos detectados, de flúor a urânio, em espectrômetro por fluorescência de raios X Axios Advanced, marca PANalytical. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1020 °C por duas horas.

3.3.2. Difração de raios X – DRX

A técnica de difração de raios X utiliza o fenômeno de interação entre o feixe de raios X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionados ao espalhamento coerente. A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado. Em um material onde os átomos estejam arranjados periodicamente no espaço, característica das estruturas cristalinas, o fenômeno da difração de raios X ocorre nas direções de espalhamento e segue a Lei de Bragg (Equação 38), assim caracterizando as fases cristalinas presentes na amostra (COSTA, 2009).

$$38. n\lambda = 2d\sin\theta$$

Em que,

n - número inteiro.

λ - comprimento de onda da radiação incidente.

d - distância entre planos atômicos.

θ - ângulo de incidência em relação ao plano considerado.

As análises foram efetuadas segundo o método do pó, mediante o emprego do difratômetro de raios X, marca Phillips, modelo MDP1880. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de

dados PDF2 do ICDD – *International Center for Diffraction Data* (2003) e PAN-ISCD-*PANalytical Inorganic Crystal Structure Database* (LCT, 2015).

3.3.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é a técnica de caracterização microestrutural mais versátil atualmente disponível, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento. A interação de um feixe fino de elétrons focalizado sobre a área ou o microvolume a ser analisado gera uma série de sinais que podem ser utilizados para caracterizar propriedades da amostra, tais como composição, superfície topográfica, cristalografia, entre outros (GOLDSTEIN *et al.*, 1992). Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse referem-se, usualmente, às imagens de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados, ao passo que na microsonda eletrônica o sinal de maior interesse corresponde aos raios X característicos, resultantes do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos presentes em um microvolume (GOLDSTEIN *et al.*, 1992).

Neste trabalho, as amostras foram cortadas e em seguida embutidas em material sintético para posteriormente serem lixadas e limpas de maneira apropriada. O passo seguinte foi o polimento mecânico das amostras. Como as amostras são rochas com superfície isolante, a superfície polida foi submetida a um recobrimento finíssimo de carbono para que o MEV pudesse obter as imagens. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Quanta 600 FEG (FEI), equipado com sistema de microanálise por EDS Esprit-Quantax 4030 (tecnologia SDD, *silicon drift detector*), marca Bruker.

3.3.4. Descrição das lâminas petrográficas

Petrografia é a descrição e classificação das rochas. Petrologia engloba a análise sistemática e descritiva das rochas, a história natural e origem das rochas e dos maciços rochosos. Litologia é o termo utilizado para identificar as rochas no campo macroscopicamente (MOORHOUSE, 1959). O estudo das rochas envolve muitos métodos, os quais dependem da natureza da rocha, do propósito do estudo, das instalações disponíveis e do tempo disponível. Vale ressaltar que uma correta classificação das rochas depende do trabalho realizado no campo. Após o estudo no campo, a preparação e a análise das lâminas delgadas se fazem necessárias.

A petrografia permite o estudo da mineralogia da rocha, as proporções de vários minerais e a textura, característica tão importante quanto a mineralogia. Em alguns casos, a exata identificação dos minerais não é possível, assim, a análise da lâmina deve ser suplementada por outros métodos, como a difração de raios X e análise química (WILLIAMS; TURNER; GILBERT, 1954; SGARBI, 2012). A lâmina delgada é uma película fina de rocha com aproximadamente 30 μm de espessura, preparada para observação microscópica. Utilizando-se de um microscópio e com auxílio de polarizadores e outros artifícios ópticos é possível fazer uma descrição precisa dos minerais presentes na lâmina (IAG, 2015). Segundo Moorhouse (1959), a sequência geral de observações segue esta ordem:

1. Forma e propriedades cristalográficas:
 - a) Formação de cristais.
 - b) Clivagem, separação ou fratura.
 - c) Forma do grão.
 - d) Inclusões, intercrescimentos, alteração e associações com outros minerais.
 - e) Geminação.
2. Propriedades ópticas:
 - a) Minerais opacos.
 - b) Minerais transparentes ou translúcidos.

- c) Análise através de nicóis cruzados (verificação de isotropia ou anisotropia; em minerais anisotrópicos, verificação de interferência de cores e birrefringência; ângulo de extinção).
- d) Informação da figura de interferência (uniaxial ou biaxial).

O preparo das lâminas delgadas envolveu o lixamento e colagem da amostra na lâmina, em seguida corte e desbaste, e para finalizar, polimento ou cobrimento com lamínula. A lâmina pronta foi colocada no microscópio e um geólogo capacitado fez as descrições e caracterizações necessárias para descrever os minerais presentes na camada delgada de rocha, e ainda obteve informações sobre sua formação, baseado em relações de textura e estruturais obtidas pela petrografia.

Esta análise foi feita no Laboratório de Microscopia Óptica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGC-USP), com microscópio Olympus BXP-40. Além disso, foi realizada a análise modal utilizando charriot Olympus U-FMP e contador de pontos da Clay-Adam Inc. Para as amostras de granulação média a grossa, foi adotada uma malha regular de 1 mm por 1 mm para a contagem, sem limite de área na lâmina. Já para as rochas de granulação média a fina, foi adotada uma malha regular de 0,5 mm. Ainda, foi adotado limite mínimo de 500 pontos de contagem, garantindo que pelo menos metade da seção delgada fosse avaliada. O método de classificação das rochas ígneas empregado foi o proposto por Streckeisen (1976).

3.3.5. Densidade e umidade

Duas peças de 2 por 2 cm de cada amostra foram submetidas aos ensaios de umidade e densidade. Um exemplo de tais peças está apresentado na Figura 35. O procedimento consistiu na pesagem da amostra no estado natural, seguida da realização do ensaio de densidade, conforme descrito a seguir e, por último, secagem em estufa a 70 °C para pesagem do material seco. A umidade foi calculada pela Equação 39 a seguir.

$$39. \text{ Umidade (\%)} = \frac{m_n - m_s}{m_n} \times 100$$

Em que,

m_n - massa natural.

m_s - massa seca.

Figura 35. Peça de 2 x 2 cm – amostra Sodalita.

Fonte: Arquivo pessoal.

O procedimento para a determinação da densidade consistiu em manter um sólido imerso em um líquido de densidade conhecida, de modo que seja possível quantificar a resultante entre a força peso e o empuxo. Para obter a resultante foi utilizado um equipamento que consiste em uma gaiola para a amostra sobre a balança, com uma plataforma fixa que passa por cima do plano inferior da gaiola, de modo que não entre em contato com a balança. Para tarar a balança coloca-se um béquer com água sobre a plataforma, e em seguida é fixada uma cesta metálica no centro da gaiola, de modo que ela fique imersa no béquer (Figura 36).

Para quantificar a resultante, coloca-se a amostra na cesta, espera-se 5 minutos para garantir que a água tenha penetrado na amostra, obtendo-se então a massa aparente da amostra. Conhecendo a massa seca do material e a densidade do líquido, é possível calcular a densidade do material. Este método é aplicável a

materiais pouco porosos. Com os dados obtidos, aplica-se a Equação 40 para obter a densidade do sólido imerso no líquido.

$$40. \quad d_s = \left(\frac{m_s}{m_s - m_i} \right) * d_l$$

Em que,

d_s – densidade do sólido.

m_s – massa seca.

m_i – massa do sólido imerso.

d_l – densidade do líquido.

Figura 36. Balança para determinação da densidade.

As densidades obtidas por este método foram utilizadas para estimar a densidade aparente do material (*bulk density*), como mostrado no item 4.3. Para cálculo do coeficiente de difusão, utilizou-se o método de picnometria de gás hélio para a medição da densidade dos grãos das amostras. O picnômetro utilizado foi o AccuPyc II 1340 da marca Micrometrics. Este picnômetro é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos conectadas por uma válvula, uma onde se coloca a amostra e outra chamada de câmara de expansão.

A análise consiste em levar todo o sistema à pressão atmosférica, isola-se a câmara de expansão, fechando a válvula de expansão e pressuriza-se a câmara que

contém a amostra até uma pressão P_1 . Em seguida, a válvula de expansão é aberta e, em consequência, ocorre uma diminuição da pressão (P_2). Admitindo comportamento ideal do hélio, o volume do sólido pode ser calculado a partir da Equação 41. A massa da amostra é introduzida como dado de entrada no aparelho para que ele possa automaticamente calcular a massa específica dos grãos (MOURA; FIGUEIREDO, 2002).

$$41. V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1}$$

Em que,

V_a – volume da câmara da amostra.

V_e – volume de câmara de expansão.

V_s – volume do sólido.

Após a realização das duas picnometrias, foi calculada a porcentagem total de poros abertos e fechados, por meio da Equação 42.

$$42. n_T = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_g}$$

Em que,

n_T – porosidade.

ρ_b – densidade aparente (*bulk density*).

ρ_g – densidade dos grãos.

3.3.6. Porosidade e permeabilidade das rochas

Estes ensaios foram realizados pela autora, com auxílio da equipe técnica da Petrobras, em maio de 2015, no Laboratório de Petrofísica Básica do CENPES.

3.3.6.1 Adsorção gasosa (nitrogênio grau comercial)

O ensaio descrito a seguir visou determinar a porosidade efetiva (razão entre o volume de poros interconectados e o volume total da rocha) das amostras cilíndricas com dimensões de 1" de diâmetro e comprimento próximo de 5 cm (Figura 37). O porosímetro utilizado foi o da marca CORELAB (modelo UP-400), instalado no Laboratório de Petrofísica Básica do CENPES, no Rio de Janeiro. A seguir são descritos os procedimentos adotados.

Figura 37. Plugues para as os ensaios de porosidade e permeabilidade.

Fonte: Arquivo pessoal.

As amostras foram secas em estufa a 60 °C de forma a retirar a umidade dos poros sem interferir na água estrutural, caso houvesse a presença de alguma argila na constituição das amostras. Em seguida, as amostras foram armazenadas em dessecadores para que resfriassem sem contato com a atmosfera. Após esta etapa,

os cilindros foram medidos com um paquímetro (diâmetro e comprimento) pelo menos seis vezes e pesados em uma balança de precisão com duas casas decimais.

Concluídas as etapas de preparação, as amostras que aguardavam para ser analisadas retornaram ao dessecador para evitar o contato com a umidade do ambiente, enquanto uma delas era posicionada na *matrix cup* do equipamento (Figura 38).

Figura 38. *Matrix cup* do porosímetro.

Fonte: Arquivo pessoal.

Após a estabilização da pressão do gás no interior da célula, fechou-se a válvula de admissão e o gráfico de pressão em função do tempo (Figura 40b) foi observado até que a pressão do gás no interior da célula de referência estabilizasse. Após a abertura da válvula, o gás confinado na célula interna migra para a câmara que contém a amostra (*matrix cup*) e há um decréscimo de pressão no sistema devido ao aumento do volume.

Após a pressão do gás atingir o equilíbrio no sistema, o VCC (volume de câmara cheia) foi obtido com base na Lei de Boyle–Mariotte (mantendo constante a temperatura, o volume de uma dada amostra de gás varia na razão inversa da sua pressão). O mesmo procedimento foi realizado para determinação do volume da câmara vazia (VCV). A partir dos dados obtidos foi possível calcular o volume de sólidos (VS) pela Equação 43.

$$43. VS = VCZ - VCC$$

Em que,

VS - volume de sólidos (cm³).

VCV - volume da câmara vazia (cm³).

VCC - volume da câmara cheia (cm³).

O mesmo equipamento empregado na medição do VS foi empregado na medição da porosidade, exceto pelo fato de que o gás foi introduzido na amostra confinada numa célula do tipo Hassler, ao invés da *matrix cup*, conforme ilustra a Figura 39. O declínio de pressão do gás fornece o volume poroso (VP). Conhecendo-se o volume total da amostra (VT), a porosidade efetiva é calculada pela Equação 44.

$$44. \text{Phi} = \frac{VP}{(VP + VS)} \times 100$$

Em que,

Phi - porosidade efetiva (%).

VS - volume de sólidos (cm³).

VP - volume poroso (cm³).

Figura 39. *Holder hassler* utilizado na medida de porosidade.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.6.2 Permeabilidade por decaimento de pulso

Considerando os longos tempos requeridos para se estabilizar a carga constante em rochas de baixa permeabilidade, a prática para mensuração de permeabilidades em rochas de baixa permeabilidade necessita do uso de técnicas especiais com procedimento simples, de baixo custo e tempo de análise (FERNANDES, 2014).

Segundo Fernandes (2014), os experimentos com o permeâmetros do tipo PDP têm sido aprimorados e atualmente é possível obter valores de permeabilidade na faixa de 0,1 mD a 0,01 μ D. Este ensaio necessita apenas do conhecimento do volume poroso da amostra.

No tempo inicial de teste, t_0 , um pulso de pressão positivo no reservatório de entrada decai exponencialmente na direção da amostra, aumentando a pressão no reservatório de saída. Quando o ensaio é iniciado, a diferença de pressão, ΔP , diminuirá à medida que o gás escoar através do volume poroso. A curva ΔP em função do tempo t fornece informações sobre características físicas da amostra. Quanto mais rápido ΔP cessar, maior a permeabilidade medida (ilustrado na Figura 40).

Figura 40. (a) Diagrama esquemático com o fluxo de gás no equipamento e (b) Princípio da igualdade das pressões.

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2014.

As medidas de permeabilidade absoluta foram realizadas em um permeâmetro por decaimento de pulso PDP-200 da *Core Laboratories* (Figura 41), com as mesmas amostras utilizadas nos ensaios de porosidade.

Figura 41. PDP-200.

Fonte: Fernandes, 2014.

3.4. CÁLCULO DO INDEX E QUANTIFICAÇÃO DE URÂNIO E TÓRIO

3.4.1. Determinação das atividades de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{40}K por espectrometria gama

Antes da realização da espectrometria gama, a amostra foi pulverizada e selada em um saco plástico a vácuo por um período de trinta dias para garantir o equilíbrio entre o ^{226}Ra e seus nuclídeos de meia-vida curta. As atividades específicas das amostras foram determinadas utilizando detector de Ge-hiperpuro localizado no LAPOC da CNEN, da marca CANBERRA, modelo GX 2020 (Figura 42). O equilíbrio é determinado tomando-se o valor médio de três fotopicos de seus nuclídeos filhos: ^{214}Pb (295,2 keV e 351,9 keV) e ^{224}Bi (609,3 keV). O ^{228}Ra foi determinado pela medida da intensidade dos picos de 911 keV e 968 keV do ^{228}Ac , admitindo-se que

estes estavam em equilíbrio radioativo. O ^{40}K é determinado diretamente por meio de seu fotopico com energia de 1460 keV.

Figura 42. Detector de Ge-hiperpuro da marca CANBERRA, modelo GX 2020.

O ^{210}Pb foi medido através do fotopico de 46,5 keV. Para esta medida, em alguns casos, foi necessária uma correção devido à atenuação dos raios gama de baixa energia dependendo das composições da amostra e do padrão devido à auto-absorção. Esta correção devido à atenuação é geralmente feita conforme sugerido por Cutshall, Larsen e Olsen (1983).

As concentrações dos nuclídeos de interesse foram obtidas empregando-se o *software Interwinner*. Este programa também fornece o limite de detecção para as condições da análise. As análises preliminares foram realizadas utilizando a mesma metodologia pelo laboratório IRA – *Institut de Radiophysique* em Lausanne, Suíça, o relatório encontra-se no Anexo A deste documento.

O Index foi calculado utilizando a Equação 29, página 109 e os valores obtidos foram comparados com os da Tabela 4, página 110.

3.4.2. Análise por ativação neutrônica

A Análise por Ativação Neutrônica Instrumental (AANI) é um método de análise não destrutivo e multielementar. Tal método consiste no bombardeamento de um dado material, com nêutrons térmicos ou epitérmicos, seguido da medida da radioatividade induzida. A radioatividade resultante é medida usando-se a espectrometria dos raios gama emitidos pelos radioisótopos formados (IAEA, 1990; GREENBERG; BODE, 2011).

Uma vez que cada radioisótopo produzido no processo de ativação possui características próprias de emissão (meia-vida e energia das partículas ou radiação gama emitidas), foi possível efetuar determinações por comparação com padrões certificados.

A concentração foi obtida pela comparação de áreas de picos, obtidos no espectro gama da amostra irradiada, com padrões que foram analisados juntamente com as amostras, utilizando-se para o cálculo a seguinte expressão (Equação 45):

$$45. C_a^i = \frac{(A_a^i m_p C_p^i) e^{\lambda(ta-tp)}}{A_p^i m_a}$$

Em que,

C_a^i - concentração do elemento i na amostra.

C_p^i - concentração do elemento i no padrão.

A_a^i - atividade do elemento i na amostra.

A_m^i - atividade do elemento i no padrão.

m_a e m_p - massas da amostra e do padrão, respectivamente.

λ - constante de decaimento do radioisótopo.

O tempo de irradiação das amostras depende dos elementos que se deseja determinar. Para as determinações propostas, as amostras foram irradiadas durante 6 horas, sob um fluxo de nêutrons de 10^{12} n/cm²s. O tempo de resfriamento para os elementos: Na, K, As, Br, Sb, La, Nd, Sm, Tb e U variou entre cinco a sete dias e, para os elementos Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, Se, Rb, Zr, Cs, Ba, Ce, Eu, Yb, Lu, Hf, Ta e Th aproximadamente quinze dias após a irradiação.

As amostras, pulverizadas em uma granulometria inferior a 0,15 mm, foram embaladas em saco de polietileno e posteriormente irradiadas juntamente com materiais de referência certificados. Após a irradiação, as amostras foram contadas em detectores de Ge-Hiperpuros (AMETEK Inc., EUA) para determinação das respectivas concentrações. A análise dos dados foi realizada por meio do programa VISPECT que identifica os picos de raios gama. As avaliações metodológicas foram feitas através da verificação cruzada dos materiais de referência e padrões sintéticos.

3.5. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS ROCHAS

3.5.1. Interferometria

A técnica de interferometria é um método para analisar a textura da superfície. Esta técnica baseia-se no princípio da superposição: duas ondas sem mudança de fase, de mesma amplitude e na mesma frequência, quando combinados, resultam em uma onda com a mesma frequência, mas com a amplitude duplicada. Este efeito é conhecido como uma interferência construtiva. Por outro lado, duas ondas com um deslocamento de fase de 180° resultam em uma onda com amplitude não nula. Este efeito é conhecido como uma interferência destrutiva. A interação entre as ondas resulta em padrões, conhecidas como franjas, mostrando interferência construtiva ou destrutiva (LEACH *et al.*, 2008). Este método foi utilizado em ensaios preliminares que não mostraram resultados satisfatórios. O fato foi atribuído à baixa refletância das

rochas. A textura das superfícies foi então determinada por microscopia confocal, conforme descrita na próxima seção.

3.5.2. Microscopia confocal

A microscopia confocal é uma técnica óptica para obtenção de imagens para aumentar a resolução óptica, assim como de uma micrografia de contraste por meio de adição de um orifício espaçado no plano confocal da lente para eliminar a luz do foco. Esta combinação torna possível a obtenção de imagens plano a plano, e também um perfil em três dimensões do objeto analisado (SENSOSCAN, 2010).

A rugosidade é o conjunto de desvios micro geométricos, caracterizada pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície. Em seu estudo existem variados parâmetros, os de amplitude, os de espaçamento e os híbridos. Como parâmetros de amplitude, existem: a rugosidade aritmética ou média (R_a), que é determinada em função da linha média do perfil de rugosidade, a rugosidade máxima (R_y), definida como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição, a rugosidade total (R_t ou R_{max}), que corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, independente dos valores de rugosidade parcial, entre outros.

Como parâmetro de espaçamento, existe a largura média de um elemento do perfil (R_{sm}), que corresponde ao espaçamento médio entre os elementos de perfil. Já como parâmetro híbrido, existe a inclinação média quadrática do perfil ($R_{\Delta q}$), esse parâmetro é indicador da inclinação média dos perfis de rugosidade.

O equipamento utilizado para a aquisição das imagens utilizadas para a obtenção dos parâmetros de rugosidade foi o Leica DCM3D (*Dual Core 3D Measuring Microscope*), situado no LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP.

O DCM3D, representado pela Figura 43, possui *dual technology sensor head*, que combina técnicas de aquisição de imagem confocal com interferometria, além de

obtenção de imagens por filmes grossos e finos. O DCM3D *sensor head* permite imagens microscópicas padrão, imagem por confocal, perfilagem confocal, PSI, VSI e medidas em alta resolução com filme de baixa espessura no mesmo instrumento. Para controlar o microscópio DCM3D foi utilizado o *software* LeicaSCAN (SENSOSCAN, 2010).

Figura 43. Microscópio confocal utilizado.

As amostras de granito utilizadas na obtenção das imagens foram retiradas aleatoriamente de blocos maiores, possuindo dimensões de aproximadamente 2 por 2 cm. As amostras limpas foram prensadas com massa de modelar contra uma placa de vidro, para garantir que a face da amostra estivesse paralela ao plano da lente, assegurando melhor qualidade das imagens. A lente utilizada apresentava aumento de cinco vezes.

3.6. EXALAÇÃO DE RADÔNIO

Optou-se pela utilização de células de cintilação (célula de Lucas) para a medição da concentração dos gases radônio e torônio, com base na Tabela 3, página 99 e item 2.10.1.3, página 87. O principal motivo da escolha foi a capacidade de o método conseguir analisar tanto o gás radônio quanto o torônio de forma semi-quantitativa. Os ensaios foram realizados com equipamentos denominados RadonMapper fabricado pela TECNAVIA (Figura 44), no LACASEMIN – Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração da USP.

Figura 44. Células de cintilação utilizadas nesta pesquisa.

Fonte: Arquivo pessoal.

Os equipamentos contam com acelerômetro, medidores de pressão atmosférica e podem ser utilizados tanto no modo passivo quanto no modo ativo com auxílio de uma bomba acoplada, esta última com opção de ajuste da vazão em dois níveis de intensidade (*low* e *high*). O acelerômetro garante a confiabilidade das medidas, para caso alguém venha a mover os equipamentos durante as medições contínuas, e o medidor de pressão auxilia no entendimento de oscilações nas medições. O filtro indicado na Figura 44 garante que apenas os gases radônio e torônio sejam responsáveis pelas emissões que ocorrem na câmara, retendo todos os outros possíveis emissores sólidos retidos no filtro.

As placas de rocha ornamental foram vedadas com plástico e fita adesiva para garantir a medição da exalação superficial da placa. Alguns pequenos furos foram realizados no lado oposto da sucção de ar, para garantir o fluxo contínuo e pressão negativa no sistema. Além disso, garantiu-se que o plástico não “colasse” na superfície quando a bomba fosse ligada, por meio de fios de silicone colados na superfície interior do plástico. Dessa forma considerou-se que o volume entre o plástico e a rocha fosse desprezível (Figura 45).

Figura 45. Medição da exalação específica.

Fonte: Arquivo pessoal.

Além disso, o equipamento RadonMapper conta com entradas USB que podem ser utilizadas para acoplar equipamentos complementares, como no caso desta pesquisa, em que foi utilizado um medidor de fluxo, modelo GSM-B4SA-BN00 da *Vogtlin* (Figura 46) para o cálculo do fluxo de exalação específica de radônio das placas de rochas ornamentais. Neste caso, o *software* do RadonMapper reconhece o medidor de fluxo e armazena estes dados no Excel®, além de gerar um gráfico da variação do fluxo com o tempo que pode ser acessado *online*, como pode ser observado na Figura 48, que mostra o *output* do programa.

Figura 46. Medidor de fluxo.

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 47 ilustra a metodologia de análises das placas de rochas ornamentais com as células de cintilação. A célula da esquerda da figura mede o valor da concentração do ambiente (*background*), a célula do meio tem uma bomba acoplada e recebe os gases radônio e torônio depois da célula da direita, que é a primeira a receber os gases. Cada superfície de cada amostra foi medida em média por três dias e, após este tempo, a câmara de cintilação foi fechada (e a bomba desligada) para verificar o decaimento de torônio para todos os ensaios.

Figura 47. Método de análise das amostras com as células de cintilação.

Fonte: Arquivo pessoal.

As taxas específicas de exalação de radônio e torônio das rochas ornamentais foram calculadas conforme a Equação 46.

$$46. C_e = \frac{C \times f}{A}$$

Em que,

C_e - taxa específica de exalação em Bq/hm².

C - concentração de radônio ou torônio (Bq/m³).

f - fluxo em m³/h.

A - área da placa em m².

Figura 48. Output do programa do RadonMapper.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para o caso do torônio (Rn-220), a MI.AM, fabricante da câmara de Lucas do RadonMapper, recomenda que um Fator de Correção (FC) de 0,9 (valor real/ valor indicado), para a célula de cintilação (célula de Lucas), seja aplicado sobre o valor indicado, pois a mesma foi calibrada para radônio e não torônio¹. Desta forma, há uma leve tendência de superestimativa da célula de Lucas que deve ser ajustada. Entretanto, outros fatores de correção ainda não tão bem estabelecidos devem ser aplicados (Figura 49), pois há também tendência de subestimativa devido ao decaimento rápido de torônio (FC número 2 e 3 na Figura 49) tanto na célula de cintilação, quanto no caminho até a célula. Esta subestimativa depende do volume da câmara e do fluxo adotado, pois a meia-vida do torônio é de apenas 56 s. Para esta pesquisa, considerou-se apenas a tendência de superestimativa da célula, assim os dados desta pesquisa subestimam os valores de Rn-220 e podem ser corrigidos no futuro.

Figura 49. Fatores de correção para o Rn-220 utilizando a câmara de Lucas.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para o FC 2, é possível utilizar a estratégia de dois RadonMappers em série, como utilizado neste trabalho, com distância conhecida entre eles. Assim, para um fluxo conhecido e constante e o volume da câmara conhecido (0,25 L), é possível

¹ Contato realizado via correspondência eletrônica.

calcular o fator de correção, o problema nesta estratégia é garantir o fluxo constante, para, assim, o FC não oscilar durante a medição. Por exemplo, para um fluxo de 0,25 L/min, adotado na maior parte das medições deste trabalho (média de fluxo 0,29 L/min), a tendência de subestimativa seria no mínimo de 20%.

O FC 3 depende do comprimento da amostra, do fluxo adotado e do comprimento dos tubos de conexão utilizados. Uma estratégia para calcular esta subestimativa seria a utilização de um gás traçador no início da placa, como o CO₂, para calcular o tempo efetivo de transição do gás para a célula. Recomenda-se, para estudos complementares, a implementação de um método de controle destes fatores de correção da tendência de subestimativa de Rn-220, bem como o fator de correção relativo ao sistema de calibração da célula de cintilação para o Rn-220.

Segundo a ECONS², a contaminação da célula de Lucas é dividida em três tipos: transitória, persistente e funcional. A transitória consiste naquela que não excede 1/10 da vida teórica do equipamento e é possível estimar com certeza matemática. Esta contaminação transitória se deve aos filhos do gás radioativo com meia-vida curta. A contaminação persistente é aquela que a duração excede 1/10 da vida útil do equipamento e não pode ser calculada com certeza matemática (é calculada uma estimativa), devido à quantidade de Pb-210 que sai da célula e fica retida no filtro. A contaminação funcional é aquela de curta duração devido a amostragens subsequentes sem preparação adequada da célula (calibração intermediária) e pode ser interpretada com precisão suficiente. Para o Rn-222, a contaminação transitória é de 38,2 dias, a contaminação persistente (Pb-210) é maior que 200 anos. O tempo de equilíbrio para o Rn-222 com seus filhos (> 99%) é de 3 horas. A célula de cintilação foi calibrada para medições com uso de microfiltro e fluxo recomendado entre 0,2 a 0,5 L/min. Para o Rn-220, a contaminação transitória é de 4,6 dias e a contaminação persistente não existe. O tempo de equilíbrio para o Rn-220 com seus filhos (> 98%) é de 45 horas (planilhas de cálculo do fabricante constam no Anexo E). Neste estudo, assumiu-se que não há presença de Rn-219 (vide item 2.4.2, página 57), portanto, Rn-total se refere aos isótopos Rn-222 e Rn-220.

² Contato realizado via correspondência eletrônica. A ECONS é uma empresa de Engenharia Ambiental localizada em Bioggio, Suíça.

3.6.1. Detector portátil de radiação total

Um medidor de contaminação portátil foi utilizado para análise das amostras de rocha ornamental, de forma a verificar se este tipo de equipamento pode ser utilizado na triagem das amostras que podem ser problemáticas para uso em interiores. O equipamento utilizado foi o monitor de contaminação modelo CoMo 170, da marca GRAETZ, com área aberta de 170 cm², capaz de separar a radiação alfa das radiações beta e gama (Figura 50).

Figura 50. Monitor de contaminação.

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 7 mostra a eficiência deste equipamento para diversos nuclídeos. Este tipo de equipamento foi desenhado para acusar altos valores de radioatividade, por exemplo, associados a problemas de contaminação radioativa em casos de acidentes ou mau funcionamento de equipamentos. Desta forma, a eficiência não precisa ser alta, mas sim o tempo de resposta do equipamento. Então este método é semi-quantitativo, pois não visa a quantificação dos isótopos nas amostras e nem medir a dose radioativa associada.

Este equipamento foi utilizado neste estudo por detectar a radiação alfa do U-238 e a radiação beta e gama do K-40, presentes em rochas naturais (Tabela 7). O equipamento possui uma fina película de ZnS protegida por uma grade (Figura 51) que atua como detector de cintilação.

Tabela 7. Eficiência nuclídeos CoMo 170.

Eficiência média para medidas realizadas em 100 cm ² das substâncias	
C-14	14%
F-18	18%
P-32	25%
S-35	5%
Cl-36	42%
K-40	30%
Co-57	7%
Co-60	27%
Sr-89	27%
Sr-90/ Y-90	42%
Tc-99m	3%
In-111	8%
I-123	7%
I-125	12%
I-131	21%
Cs-137	35%
Au-198	23%
Tl-204	43%
Am-241 α	22%
Pu-238 α	12%
U-238 α	26%

Fonte: Adaptado de GRAETZ, 2016.

Figura 51. Detalhe da película de ZnS do detector portátil de radiação.

3.6.2. Impermeabilizante de rocha

Uma substância hidro/oleofugante à base de água foi utilizada para testar a redução das exalações dos gases radônio e torônio alternativamente à técnica do polimento. Este produto foi escolhido por não modificar as características das amostras, como brilho e cor, que são importantes para as rochas ornamentais. O princípio ativo da substância é álcool fluorado, com fungicida, diluente e veículo. O produto PEK BIO (Figura 52A) tem rendimento médio de $16 \text{ m}^2/\text{L}$ e custo médio de R\$ 90/L. Portanto, o custo médio de aplicação é de R\$ 5,00/ m^2 (PISOCLEAN, 2016). Visto que o custo do m^2 das rochas ornamentais no mercado varejista pode variar entre R\$ 120,00 a R\$ 5000,00, a aplicação de um impermeabilizante não é inviável e traz inclusive o benefício de prevenir manchas, além de diminuir a exalação natural de radônio e torônio das placas, como evidenciado neste estudo.

Este impermeabilizante é apenas um exemplo dos diversos existentes à venda, recomenda-se, portanto, o teste de outras marcas para estudos complementares. Adicionalmente, o luxímetro da marca Instrutherm LDR-208 foi utilizado para checar a intensidade luminosa refletida pela superfície antes e após a aplicação do produto. A medição foi realizada de acordo com o esquema apresentado na Figura 52B.

Figura 52. (A) PEK BIO – impermeabilizante à base de água e (B) esquema de medição da intensidade luminosa refletida.

Fonte: Arquivo pessoal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura deste capítulo, apesar de não usual, permite ao leitor melhor compreensão dos métodos utilizados para alcançar cada um dos objetivos propostos. A apresentação dos resultados foi posicionada dentro dos itens de cada objetivo, antecidos por um breve prólogo. Todas as análises apresentadas neste capítulo são baseadas nas amostras apresentadas no item 3.1.

4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE TRIAGEM (OBJETIVO 1)

4.1.1. Prólogo – objetivo 1

Este item teve por objetivo analisar se é possível triar as amostras problemáticas para uso em interiores através de um detector portátil de radiação, que consiste em uma análise muito rápida (média um minuto por amostra) e de baixíssimo custo (não há custo operacional), ou pela característica de cor predominante da amostra. Para realizar esta análise, utilizaram-se os seguintes parâmetros: contagens alfa, beta e gama obtidas com monitor de contaminação; cor predominante da amostra, *index* gama calculado a partir dos dados de espectrometria gama, exalações de Rn-222 e Rn-220 obtidos através de célula de cintilação e as concentrações de U-238 e Th-232 medidas por ativação neutrônica. As análises foram conduzidas utilizando os softwares Excel® e o Statistica 13 para Windows. Os conceitos estatísticos necessários para a análise dos dados estão apresentados no Apêndice A (página 326) deste trabalho. Os principais resultados desta seção foram: o monitor de contaminação CoMo 170 da GRAETZ foi validado para uso na triagem primária das amostras tanto em relação ao *Index* gama, quanto em relação às exalações; enquanto a triagem por cor não foi validada. Entretanto, o agrupamento das amostras utilizando o *Index* gama e as exalações de Rn-222 e Rn-220 mostra a cor predominante vermelha como indicativa de amostras problemáticas.

4.1.2. Detector portátil de radiação total

A Tabela 8 apresenta os resultados das análises de radiação das amostras com detector portátil de radiação.

Tabela 8. Resultados monitor de contaminação (CoMo), cor predominante das amostras e origem.

Amostra	CoMo (cps)		Cor predominante	Origem
	Alfa	Beta e Gama		
Azul Bahia	0	11,1	Azul	Bahia
Azul Bahia Escuro	0	17,1	Azul	Bahia
Basaltite	1,6	29,3	Cinza	Suíça
Bege Ipanema	0,3	11,0	Bege	Espírito Santo
Blinde Cinza Escuro	0	6,7	Cinza	Espírito Santo
Blinder Vermelho Claro	2,5	21,1	Vermelho	São Paulo
Branco Ceará	0	12,6	Branco	Ceará
Branco Cristal	0,8	14,7	Branco	Suíça
Branco Marfim	0	13,5	Branco	Espírito Santo
Branco Siena	0	5,7	Branco	Espírito Santo
Branco Suíça	0	5,0	Branco	Suíça
Café Imperial	0	11,8	Marrom	Minas Gerais
Café Imperial Claro	0	16,4	Marrom	Minas Gerais
Capão Bonito	1,5	15,6	Vermelho	São Paulo
Capão Bonito GM	1,3	19,3	Vermelho	São Paulo
Cinza Castelo	0	10,4	Cinza	Espírito Santo
Cinza Corumba	1,9	20,4	Cinza	Espírito Santo
Cinza Novo Mundo	2,8	15,1	Cinza	Espírito Santo
Flor Di Pesco	0	0,9	Branco	Suíça
Iragua	0	11,2	Cinza	Suíça
Lusera Fiammata	1,6	19,8	Cinza	Suíça
Maracuja	0	21,3	Bege	São Paulo
Marrom São Paulo	1,2	22,2	Marrom	São Paulo
Monaco Light	0	1,3	Marrom	Suíça
Onsernone Lucido	0	7,3	Cinza	Suíça
Pietra de Jerusalem	0	1,6	Bege	Suíça
Pietra Lavica	0	12,0	Cinza	Suíça
Pietra Lavica (1)	0	1,5	Vermelho	Suíça
Rosa Capri	1,5	24,3	Rosa	Suíça
Rosso Lucido	0	14,2	Rosa	Suíça
Sodalita	2,5	112,0	Azul	Suíça
Verde Pavão	0,1	10,1	Verde	Espírito Santo
Verde Ubatuba	0	3,9	Verde	Espírito Santo
Vermelho Bragança	0,4	17,0	Vermelho	São Paulo
Vermelho Jacarandá	0,3	12,3	Vermelho	São Paulo

Os resultados do CoMo expressos em cps indicam presença de radiação ionizante do tipo alfa, beta e gama. A janela de recepção do equipamento tem área de 170 cm^2 . O tamanho relativamente grande do equipamento, quando comparado às janelas dos contadores Geiger, diminui a susceptibilidade a variações ao longo da amostra. Ressalta-se que quando a amostra apresentou alta heterogeneidade, foi utilizada a estratégia de amostragem de dividir a placa em quadrantes, como mostra a Figura 53, e posteriormente realizar o cálculo da média dos valores obtidos.

Figura 53. Exemplo de placa dividida em quadrantes para análise com o detector portátil de radiação.

Fonte: Arquivo pessoal.

Observa-se a partir da Tabela 8 que as amostras de mármore (Flor di Pesco e Monaco Light) e o calcário (Pietra de Jerusalém) apresentaram valores de contagem muito baixos ($< 2 \text{ cps}$) condizentes com a premissa inicial de que rochas carbonáticas e mármore tendem a não ser problemáticas para uso em interiores. A partir da Tabela 8, nota-se que foi possível medir a radiação alfa incidente em algumas amostras com o monitor de contaminação. Tais amostras foram selecionadas como potenciais para apresentarem maior fluxo de exalação de radônio e torônio medido pelo RadonMapper, pois a partícula alfa é difícil de detectar devido ao baixo alcance espacial (1,7 a 5,9 cm no ar) e à eficiência da película de ZnS do equipamento. Assim, como foi possível identificar alguma contagem de partículas alfa em algumas amostras, acredita-se que estas sejam as que mais exalem Rn-222, pois o CoMo detecta partículas alfa provenientes do decaimento do U-238, como apresentado na Tabela 7, página 155 deste trabalho. Estas análises estão apresentadas a seguir.

4.1.3. Espectrometria gama

Os resultados das espectrometrias gama realizadas no IRA – *Institut de Radiophysique* e no LAPOC-CNEN estão apresentados na Tabela 9, os certificados estão apresentados nos Anexos A e D deste documento. O cálculo do *Index* foi baseado na metodologia apresentada no item 2.15, página 108 deste trabalho. Os resultados em amarelo apresentados na Tabela 9 indicam as amostras com *Index* acima de um (1) e a em vermelho indica a amostra com *Index* acima de seis (6). A diretiva europeia recomenda que materiais de construção para uso em superfícies, como as placas de rocha ornamental, tenham *Index* abaixo de seis (6) e dois (2), respectivamente para doses anuais de 1 mSv/ano e 0,3 mSv/ano.

Tabela 9. Cálculo do Index a partir das espectrometrias gama.

Amostra	K-40	Incerteza K-40	Th-232	Incerteza Th-232	Ra-226	Incerteza Ra-226	Index gama
	(Bq/kg)						
Azul Bahia	1100,0	66,0			126,0	10,1	0,8
Azul Bahia Escuro	792,9	67,0	63,1	4,8	88,2	2,8	0,9
Basaltite			221,0	9,0	141,0	5,0	1,6
Bege Ipanema	514,0	50,0	52,0	4,0	55,0	1,3	0,6
Blínder Cinza Escuro	1014,0	30,0	19,0	0,9	8,0	0,5	0,5
Blínder Vermelho Claro	1265,0	40,0	114,0	5,0	42,0	2,0	1,1
Branco Ceará			74,0		122,0	3,0	0,8
Branco Cristal			77,0	3,0	122,0	4,0	0,8
Branco Marfim	1270,5	90,8	62,1	4,4	15,7	1,2	0,8
Branco Siena	995,8	69,3	44,9	3,6			0,6
Branco Suíço	477,0	15,0	31,0	1,0	20,0	0,9	0,4
Café Imperial	1667,3	106,6	33,2	3,4	11,7	1,2	0,8
Café Imperial Claro	1737,7	100,0	54,0	4,2	15,8	1,2	0,9
Capão Bonito	1322,0	38,0	165,0	7,0	111,0	9,0	1,6
Capão Bonito G.M.	1601,0	46,0	173,0	7,0	70,0	2,0	1,6
Cinza Castelo	1119,7	77,0	69,0	4,8	25,8	1,4	0,8
Cinza Corumbá	1085,0	32,0	59,0	3,0	62,0	2,0	0,9
Cinza Novo Mundo	1220,2	114,4	111,4	7,0	40,7	1,6	1,1
Flor di Pesco	27,0	2,0	7,0	0,6	5,0	0,3	0,1
Iragua			38,0	2,0	97,0	3,0	0,5
Luserna Fiammata	1017,9	73,2	124,5	7,6	119,3	3,4	1,4
Maracujá	1196,7	97,0	274,0	16,0	53,3	2,0	1,9
Marrom São Paulo	1145,3	83,4	95,1	6,2	51,2	2,0	1,0
Monaco Light					17,7	1,2	0,1
Onserone Lucido	513,0	50,2	49,0	4,0	48,7	1,8	0,6
Pietra de Jerusalem			83,1	4,6	13,8	1,2	0,5
Pietra Lavica	232,8	44,4					0,1
Pietra Lavica (1)	84,0	36,8					0,0
Rosa Capri	1156,2	85,4	206,1	12,0	596,0	2,2	3,4
Rosso Lucido	1307,0	38,0	78,0	3,0	56,0	2,0	1,0
Sodalita	251,0	11,0	2667,0	109,0	14,0	2,0	13,5
Verde Pavão	890,7	65,6					0,3
Verde Ubatuba	504,5	50,0			12,7	1,2	0,2
Vermelho Bragança	1317,0	38,0	170,0	7,0	77,0	3,0	1,5
Vermelho Jacarandá	1318,7	83,4	131,1	8,0	40,0	1,8	1,2
VR ou MG							1 e 6
% das amostras destacadas							37%

Observa-se na Tabela 9 que 37% das amostras apresentaram resultado de *Index* superior a um (1). A propagação dos erros no cálculo da incerteza associada ao *index* gama foi executada utilizando-se a Equação 47 (BEVINGTON; ROBINSON, 2003).

$$47. \text{ Incerteza } Index = \sqrt{\left(\frac{(Erro \text{ K} - 40)}{3000}\right)^2 + \left(\frac{(Erro \text{ Th} - 232)}{200}\right)^2 + \left(\frac{(Erro \text{ Ra} - 226)}{300}\right)^2}$$

Em que,

Erro K-40 – incerteza de medição da atividade de K-40 em Bq/kg.

Erro Th-232 – incerteza de medição da atividade de Th-232 em Bq/kg.

Erro Ra-226 – incerteza de medição da atividade de Ra-226 em Bq/kg.

Os erros associados ao cálculo do *Index* gama apresentaram média de 4,6%. Porém, 71,4% dos valores das incertezas estão abaixo de 4%, devido a um valor excepcionalmente alto (54,5%), associado à incerteza de análise de uma amostra (Sodalita) que apresentou o maior valor de *Index* (13,6). Tais incertezas estão representadas na Figura 54.

Figura 54. Valores de *Index* gama com as incertezas associadas.

4.1.4. Ativação neutrônica

Os resultados da quantificação por ativação neutrônica dos elementos U, Th, K, ETRs – Elementos de Terras Raras (La, Sm, Tb, Sc, Ce, Eu, Yb, Lu), Na, As, Br, Sb, Nd, Ca, Cr, Fe, Co, Zn, Se, Rb, Zr, Cs, Ba, Hf, Ta das amostras estão apresentados na Tabela 10. Estas análises foram conduzidas para investigar a relação entre a radioatividade das amostras e a quantidade de elementos estáveis. Os itens subsequentes mostram as análises de correlação de *Spearman* para os elementos quantificados e análises de agrupamento realizadas para verificar qual das características está associada à radioatividade das amostras. As correlações entre os elementos estão apresentadas na Tabela 126 (Apêndice D, página 410), enquanto que a análise de agrupamento dos elementos está apresentada na Figura 55.

Figura 55. Análise de agrupamento elementos quantificados por ativação neutrônica.

A correlação alta entre Th, Zr e os ETRs já foi documentada na literatura, principalmente em minerais como os silicatos de zircônio, apatitas, monazitas e algumas micas (NAGASAWA, 1970; BEA, 1996; EL-ARABI, 2007; SMITH *et al.*, 2016). Os ETRs compreendem os elementos de número atômico entre o 57 (La) e o 71 (Lu). O Y também é muitas vezes incluído como ETRs por ter o raio atômico parecido com o elemento químico hólmio (Ho) e carga iônica +3, como a maioria dos ETRs (BEST; CHRISTIANSEN, 2001).

Tabela 10. Composição química obtida por ativação neutrônica.

Amostra	U	Th-232	K	As	Ba	Br	Ca	Ce	Co	Cr	Cs	Eu	Fe	Hf	La	Lu	Na	Nd	Rb	Sb	Sc	Se	Sm	Ta	Tb	Yb	Zn	Zr
	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Azul Bahia	11,7	5,6	5,5	3,4	137,6	91,9	0,6	28,4	0,8	98,7	5,0	0,1	1,4	11,9	14,2	0,3	8,6	3,8	246,5	0,1	0,2	7,4	5,2	13,4	0,2	2,9	65,5	592,7
Azul Bahia Escuro	8,1	19,6	2,5	8,7	222,2	103,4	0,5	46,7	3,2	55,0	7,0	0,3	2,1	20,2	25,5	0,3	9,0	18,5	278,1	0,6	0,5	16,6	2,3	19,3	0,3	1,6	115,4	938,3
Basaltite	13,6	59,2	5,9	7,6	1123,8	0,0	2,5	176,7	8,1	83,4	36,7	2,5	3,6	9,3	109,2	0,4	2,0	81,1	433,9	1,2	4,9	0,0	21,0	1,3	1,1	2,5	81,1	572,5
Bege Ipanema	2,1	17,7	0,0	1,6	873,8	0,0	1,3	122,4	5,3	510,3	3,6	1,3	2,4	9,6	66,1	0,1	2,7	36,9	149,3	0,4	4,1	0,5	7,1	1,6	0,7	1,5	69,2	394,5
Blínder Cinza Escuro	0,3	3,5	3,4	0,0	3358,3	0,0	2,9	123,0	17,7	50,8	2,9	2,8	6,4	4,7	62,4	0,3	2,8	47,5	113,4	0,0	11,5	1,6	11,6	1,0	0,8	1,5	176,8	337,8
Blínder Vermelho Claro	4,2	32,4	4,1	0,0	725,8	3,0	0,8	119,3	3,3	293,8	2,1	0,9	1,7	7,3	73,9	0,6	2,4	53,0	212,5	0,3	3,6	2,0	11,6	2,7	0,9	3,3	48,2	266,4
Branco Ceará	12,3	14,2	0,0	2,0	230,5	0,0	0,7	46,1	2,10	443,9	6,5	0,17	0,9	5,5	14,5	1,6	4,2	28,6	896,4	0,7	1,4	4,0	6,1	17,7	1,5	10,0	42,9	228,5
Branco Cristal	14,6	20,9	4,3	1,8	188,1	3,5	0,7	29,0	1,6	184,9	16,5	0,3	0,8	3,8	12,3	0,6	2,2	19,2	227,9	0,0	3,4	2,1	6,6	2,2	1,4	3,2	44,0	165,8
Branco Marfim	2,0	18,1	4,5	20,5	412,6	0,0	1,1	56,0	473,8	10,4	1,9	0,8	1,7	4,9	24,3	0,3	1,7	37,9	218,4	0,0	5,3	2,9	5,7	2,1	1,6	2,3	120,6	133,8
Branco Siena	0,8	10,9	2,8	0,0	623,1	0,0	1,7	65,4	3,5	364,8	0,0	1,0	1,4	4,2	33,8	0,1	2,3	29,2	104,9	0,0	5,5	1,0	5,2	1,0	1,1	0,7	32,7	169,5
Branco Suíça	1,5	8,6	1,8	0,0	416,6	0,0	1,3	47,0	3,8	159,4	1,7	0,9	1,7	4,0	26,8	0,2	3,3	21,3	68,2	0,2	4,7	0,0	1,4	0,7	0,3	0,9	71,3	193,4
Café Imperial	5,2	12,1	5,9	3,8	5874,2	0,0	2,3	287,4	15,2	133,3	3,4	8,2	4,1	7,4	144,4	0,4	2,4	104,6	225,2	1,2	9,9	103,1	30,8	132,1	2,0	3,3	262,9	459,9
Café Imperial Claro	1,3	12,7	7,7	1,7	4981,3	0,0	0,2	352,1	18,0	161,1	2,8	6,6	4,1	7,5	172,6	0,3	2,6	157,0	185,5	0,3	9,4	0,0	27,6	2,0	1,7	1,8	106,0	554,5
Capão Bonito	10,5	95,4	3,9	0,3	2320,3	7,7	0,7	295,2	2,7	594,0	6,9	1,0	2,9	12,9	76,0	15,3	1,6	113,2	969,1	0,2	4,4	3,6	11,4	8,0	2,1	5,4	88,6	474,5
Capão Bonito GM	3,7	87,7	2,0	0,4	2769,3	4,9	0,8	317,7	3,1	691,7	3,9	0,7	2,8	12,9	73,1	16,6	1,1	103,8	724,2	0,0	4,0	2,7	8,5	4,9	2,0	8,6	85,2	373,3
Cinza Castelo	1,4	20,1	3,1	0,0	2913,5	135,5	3,0	290,8	365,1	13,6	1,4	3,5	4,1	15,0	150,5	0,3	2,0	141,8	135,7	0,2	9,5	2,8	18,6	3,3	1,6	1,9	206,2	666,0
Cinza Corumba	6,6	16,3	4,3	5,5	1193,4	0,0	2,3	116,5	7,1	244,8	7,3	1,6	3,1	8,3	58,9	0,4	2,5	48,4	203,2	0,6	7,4	1,0	8,8	1,3	1,2	2,4	78,7	363,0
Cinza Novo Mundo	1,5	25,6	4,3	0,0	814,8	0,0	1,3	116,8	151,3	11,0	1,4	1,0	2,3	11,8	53,8	0,4	1,8	72,5	266,4	0,3	5,7	3,2	9,7	4,2	1,9	2,8	87,2	516,9
Flor Di Pesco	11,6	9,1	0,1	0,5	69,9	4,1	26,6	36,2	0,4	20,9	0,0	0,2	0,2	0,2	22,9	0,1	0,1	9,7	5,1	0,0	0,5	31,2	3,7	41,0	0,3	0,0	26,3	0,0
Iragua	8,1	23,9	5,1	0,0	2638,4	5,5	1,1	90,4	4,6	494,9	4,1	0,7	2,8	6,2	25,3	8,0	2,5	15,8	612,3	0,1	7,3	1,1	5,4	1,7	1,0	4,2	84,2	360,9
Lusera Fiammata	11,7	35,3	4,1	3,1	174,2	0,0	0,6	84,7	1,5	289,4	9,3	0,2	1,3	6,8	37,6	1,2	2,7	42,2	335,9	0,3	2,4	2,7	11,7	3,9	2,2	8,1	63,9	214,4
Maracujá	1,9	69,6	3,7	1,7	1289,2	0,0	1,5	285,8	9,2	221,6	0,5	1,7	2,2	10,2	167,6	0,3	2,2	118,2	220,4	0,1	4,7	7,8	14,2	8,8	1,4	2,0	52,9	402,7
Marrom São Paulo	5,9	30,0	4,5	1,0	874,7	0,0	0,7	154,3	3,2	352,6	2,5	1,4	2,1	10,1	83,8	1,0	2,9	69,7	298,2	0,2	5,2	3,5	14,3	4,0	1,7	5,8	84,4	387,1
Mônaco Light	1,3	12,2	7,2	1,6	4772,9	0,0	0,2	338,0	17,3	154,6	2,7	6,4	3,9	7,2	162,0	0,3	2,4	150,3	177,9	0,2	9,0	0,0	26,0	1,9	1,6	1,8	101,8	532,6
Onsernone Lucido	5,2	13,3	0,7	0,0	1220,9	10,0	2,9	76,9	5,2	639,1	1,6	1,3	3,6	6,7	63,8	0,3	2,8	27,8	79,8	0,7	10,7	44,7	9,1	51,2	0,3	3,0	148,1	295,5
Pietra de Jerusalem	2,5	0,6	0,1	0,0	23,7	1,7	32,2	5,6	5,8	319,2	0,1	0,1	0,5	0,2	3,7	0,0	0,0	3,0	0,0	0,1	0,4	21,5	0,6	18,1	0,3	0,8	243,7	6,7
Pietra Lavica	6,9	4,8	1,5	53,0	819,6	0,0	9,1	63,6	46,0	230,7	0,0	2,2	8,0	5,2	35,1	0,3	2,9	26,7	26,7	0,2	19,8	22,9	6,3	24,7	1,9	1,8	105,2	156,0
Pietra Lavica (1)	0,0	1,0	0,0	0,0	180,7	0,0	3,6	23,8	30,2	253,9	0,0	1,7	5,6	0,9	17,4	0,2	2,4	12,5	1,4	0,0	14,5	0,3	4,4	1,0	0,4	1,3	161,6	61,1
Rosa Capri	17,2	56,6	4,5	3,3	1073,7	0,0	1,4	198,5	5,4	150,3	1,3	1,4	2,1	8,1	112,6	0,3	2,4	76,6	256,8	0,4	4,5	27,3	11,8	30,3	1,0	2,4	40,9	362,6
Rosso Lucido	5,2	19,8	5,5	7,6	775,8	8,5	0,2	56,7	0,4	68,7	5,1	0,8	0,8	5,9	27,1	0,8	1,7	19,5	235,4	1,0	11,7	0,7	9,4	1,6	1,5	4,7	6392,5	217,3
Sodalita	0	731	0,0	0,0	1400,6	226,9	4,4	608,9	4,3	112,8	0,0	29,0	4,1	0,0	302,4	0,0	12,2	317,5	0,0	3,0	11,5	0,0	97,6	2,7	11,8	5,3	905,6	1733,4
Verde Pavão	0	3	4,2	0,0	3180,3	0,0	3,1	155,9	93,6	13,5	0,0	4,0	4,7	16,5	77,1	0,3	2,3	84,1	74,6	0,0	14,3	0,0	12,6	0,9	1,2	1,8	208,9	832,1
Verde Ubatuba	1,7	4,4	1,8	0,0	1827,7	1,6	4,6	142,0	23,4	423,0	0,2	2,8	5,3	6,0	78,2	0,2	2,1	72,4	41,4	1,4	11,3	0,9	11,2	1,5	0,8	1,3	144,3	345,6
Vermelho Bragança	7,5	41,8	3,9	0,0	517,0	1,9	0,9	155,7	2,5	153,8	4,1	0,8	1,5	7,3	89,6	0,4	2,2	75,2	297,8	0,0	4,0	0,0	17,8	1,0	1,0	2,1	51,9	271,1
Vermelho Jacarandá	3,8	36,3	0,7	0,0	584,4	39,4	0,8	109,7	4,4	495,5	3,4	1,5	1,7	5,9	52,4	0,2	1,7	49,3	350,1	0,4	3,9	9,6	5,7	8,6	0,6	1,3	48,3	230,5

4.1.5. Análises das concentrações específicas de radônio

Os resultados dos ensaios para obtenção das concentrações específicas dos gases radônio e torônio de cada amostra, ressaltando o tipo de superfície analisada (mais rugosa e menos rugosa), estão apresentados no Apêndice B, página 336, deste documento, incluindo a memória de cálculo e gráficos. A diferenciação dos isótopos ^{220}Rn e ^{222}Rn foi realizada utilizando a metodologia apresentada no item 3.6, página 147. O sumário dos resultados para ambas as superfícies está apresentado na Tabela 11. A superfície mais lisa de cada amostra foi considerada para a elaboração da Tabela 12 e Tabela 13, uma vez que a diminuição da área específica é investigada neste estudo como mecanismo de tratamento superficial para a diminuição da exalação de gás radônio e torônio das rochas. Assim, cada uma das amostras teve as suas superfícies classificadas qualitativamente como mais rugosa ou menos rugosa antes da medição. Tais dados estão apresentados nas seções a seguir.

O sumário dos resultados obtidos para as superfícies mais lisas de cada amostra, em relação à concentração específica exalada das rochas ornamentais, está apresentado na Tabela 12. Em 57% dos casos, a exalação do isótopo ^{220}Rn , geralmente não mensurado em medições de concentração em ambientes internos, é maior que a do isótopo ^{222}Rn . Ressalta-se que ainda não há legislação para este isótopo em qualquer país.

Os valores de exalação apresentados na Tabela 13 foram calculados com base na taxa específica de exalação apenas do ^{222}Rn , como forma de verificar o atendimento à legislação vigente na UE e também à recomendação da OMS. O ^{222}Rn é o único isótopo de radônio mencionado nas legislações internacionais, pois acredita-se que ele é o maior responsável pelas altas concentrações em interiores. Este fato ocorre, pois, neste tipo de ambiente, o solo é visto como a maior fonte de radônio e, neste caso, o torônio não teria tempo de meia-vida suficiente para conseguir penetrar na construção (KROPAT, 2014). Porém, quando se consideram os materiais de construção como fontes, observa-se que o torônio contribui na concentração final do ambiente (Tabela 12).

Tabela 11. Sumário dos resultados das exalações dos gases Rn-222 e Rn-220 das amostras de rocha ornamental.

Amostra	SUPERFÍCIE MENOS RUGOSA					SUPERFÍCIE MAIS RUGOSA				
	Rn total (Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/h)	²²⁰ Rn (Bq/hm ²)	²²⁰ Rn (Bq/h)	Rn total (Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/h)	²²⁰ Rn (Bq/hm ²)	²²⁰ Rn (Bq/h)
Azul Bahia	72	60	1,2	12	0,2	66	56	1,1	10	0,2
Azul Bahia Escuro	108	89	1,6	19	0,3	114	89	1,6	25	0,4
Basaltite	2673	541	16,5	2132	65,0					
Bege Ipanema	381	147	1,3	234	2,1					
Blinder Cinza Escuro	37	37	33,0	0	0,0					
Blinder Vermelho Claro	3902	1599	38,1	2303	54,8					
Branco Ceará	77	54	1,1	23	0,5	80	60	1,2	20	0,4
Branco Cristal	691	189	7,6	502	20,1	1238	122	4,9	1116	44,6
Branco Marfim	69	50	0,7	19	0,2	147	147	1,9	0	131,0
Branco Siena	74	49	0,9	25	0,4	102	94	1,7	8	0,1
Branco Suíço	56	23	0,9	33	1,3	87	68	2,7	19	0,8
Café Imperial	34	15	0,5	19	0,6	47	33	1,1	14	0,4
Café Imperial Claro	73	26	0,5	47	0,9	72	41	0,8	31	0,6
Capão Bonito	2043	777	31,1	1266	50,6	3281	840	33,6	2441	97,6
Capão Bonito G.M.	6204	3697	83,2	2507	56,4					
Cinza Castelo	127	62	1,7	65	1,8	132	61	1,6	71	1,9
Cinza Corumbá	1800	761	29,8	1039	40,7	2394	894	35,0	1500	58,8
Cinza Novo Mundo	9611	2995	77,9	6616	172,0	10300	3213	83,5	7087	184,3
Flor di Pesco	18	18	0,7	0	0,0					
Iragua	110	54	2,2	56	2,2	234	171	6,8	63	2,5
Luserna Fiammata	241	94	3,8	147	6,0	844	258	10,5	586	23,9
Maracujá	353	110	3,0	243	6,7	408	135	3,7	273	7,6
Marrom São Paulo	670	328	4,9	342	917,0					
Monaco Light	54	39	0,7	15	0,3					
Oserone Lucido	42	37	1,0	5	0,1	139	48	1,3	91	2,5
Pietra de Jerusalem	35	27	0,5	8	0,2	33	31	0,6	2	0,0
Pietra Lavica	170	47	1,9	123	4,9					
Pietra Lavica (1)	79	43	1,4	36	1,2					
Rosa Capri	374	210	2,6	164	2,1	403	228	2,9	175	2,2
Rosso Lucido	117	46	1,3	71	2,1	131	82	2,4	49	1,4
Sodalita	1433	502	5,0	931	9,3					
Verde Pavão	34	26	0,7	8	0,2	85	21	0,5	64	1,7
Verde Ubatuba	34	17	0,5	17	0,5	46	24	0,6	22	0,6
Vermelho Bragança	701	252	6,0	449	10,7	369	152	3,6	217	5,2
Vermelho Jacarandá	3984	1199	31,2	2785	72,4	3619	1149	29,9	2470	64,2

Tabela 12. Sumário das concentrações específicas em Bq/hm² para as superfícies mais lisas de cada amostra – total, Rn-220 e Rn-222.

Amostra	Concentração específica (Bq/hm ²)		
	Total	²²² Rn	²²⁰ Rn
Cinza Novo Mundo	9611	2995	6616
Capão Bonito G.M.	6204	3697	2507
Vermelho Jacarandá	3984	1199	2785
Blínder Vermelho Claro	3902	1599	2303
Basaltite	2673	541	2132
Capão Bonito	2043	777	1266
Cinza Corumbá	1800	761	1039
Sodalita	1433	502	931
Vermelho Bragança	701	252	449
Branco Cristal	691	189	502
Marrom São Paulo	670	328	342
Bege Ipanema	381	147	234
Rosa Capri	374	210	164
Maracujá	353	110	243
Luserna Fiammata	241	94	147
Pietra Lavica	170	47	123
Cinza Castelo	127	62	65
Rosso Lucido	117	46	71
Iragua	110	54	56
Azul Bahia Escuro	108	89	19
Pietra Lavica (1)	79	43	36
Branco Ceará	77	54	23
Branco Siena	74	49	25
Café Imperial Claro	73	26	47
Azul Bahia	72	60	12
Branco Marfim	69	50	19
Branco Suíço	56	23	33
Monaco Light	54	39	15
Oserone Lucido	42	37	5
Blínder Cinza Escuro	37	37	0
Pietra de Jerusalem	35	27	8
Café Imperial	34	15	19
Verde Pavão	34	26	8
Verde Ubatuba	34	17	17
Flor di Pesco	18	18	0

Utilizou-se assim a Equação 48, para calcular em quanto tempo a concentração de um quarto, com volume de 56 m³ e o piso recoberto com 20 m² da amostra, atingisse o limite recomendado pela OMS (100 Bq/m³). O mesmo método foi

empregado para o cálculo do tempo para que fosse atingido o limite da UE (300 Bq/m³).

$$48. C(t) = \frac{J_m M}{V \lambda_e} [1 - e^{-\lambda_e t}] + C_0 e^{-\lambda_e t}$$

Em que,

$C(t)$ - concentração de radônio no quarto no tempo t .

J_m - taxa mássica de exalação (Bq/kg h).

C_0 - quantidade de radônio no quarto no tempo 0 (zero).

M - massa de rocha (kg).

V - volume efetivo (m³).

λ_e - constante efetiva de decaimento, que consiste na soma da taxa de vazamento (TR) mais a constante de decaimento do Rn-222 (s⁻¹).

TR - taxa de renovação (s⁻¹), obtida através da vazão de ar (Q) sobre o volume do quarto (V).

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos conforme o método acima descrito. Pode-se observar que 11% das amostras atingiriam o limite da UE em menos de uma hora, 23% em menos de duas horas e 80% das amostras atingem o limite em menos de 24 horas. Considerando o limite recomendado pela OMS, 100% das amostras atingiriam este limite em 24 horas. Tais resultados foram obtidos considerando C_0 e TR iguais a zero (0).

Outro ponto importante a ser levado em consideração na análise é que, apesar de o ²²⁰Rn decair quase integralmente após dez minutos, os produtos do decaimento deste isótopo ficam no ambiente e podem ser respirados junto com material particulado. Assim, este gás também deve ser levado em consideração ao avaliar o uso de rochas em ambientes internos, mas de uma forma diferente do ²²²Rn, já que este último possui uma meia-vida de 3,8 dias.

Tabela 13. Concentrações específicas e tempo limite para atingir os limites da OMS e da UE.

Amostra	Concentração específica (Bq/hm ²)	20 m ² de rocha em um quarto de 56 m ³ sem TR		20 m ² de rocha em um quarto de 56 m ³ com TR (vazão de 2 m ³ /h.pessoa)		20 m ² de rocha em um quarto de 56 m ³ com TR e background (50 Bq/m ³)	
		²²² Rn		²²² Rn		²²² Rn	
		Minutos 100 Bq/m ³	Minutos 300 Bq/m ³	Minutos 100 Bq/m ³	Minutos 300 Bq/m ³	Minutos 100 Bq/m ³	Minutos 300 Bq/m ³
Capão Bonito G.M.	3697	4,5	13,6	219,4	658,3	2,3	11,4
Cinza Novo Mundo	2995	5,6	16,8	270,9	812,6	2,8	14,0
Blinder Vermelho Claro	1599	10,5	31,5	507,3	1522,1	5,3	26,3
Vermelho Jacarandá	1199	14,0	42,0	676,6	2029,9	7,0	35,0
Capão Bonito	777	21,6	64,9	1044,1	3132,4	10,8	54,1
Cinza Corumbá	761	22,1	66,2	1066,0	3198,2	11,0	55,2
Basaltite	541	31,1	93,2	1499,6	4498,9	15,5	77,6
Sodalita	502	33,5	100,4	1616,1	4848,4	16,7	83,7
Marrom São Paulo	328	51,2	153,7	2473,4	7420,8	25,6	128,1
Vermelho Bragança	252	66,7	200,0	3219,4	9659,2	33,3	166,7
Rosa Capri	210	80,0	240,0	3863,3	11591,4	40,0	200,0
Branco Cristal	189	88,9	266,7	4292,6	12879,7	44,4	222,3
Bege Ipanema	147	114,3	342,9	5519,1	16560,6	57,2	285,8
Maracujá	110	152,7	458,2	7375,8	22133,2	76,4	382,0
Luserna Fiammata	94	178,7	536,2	8631,5	25902,3	89,4	447,0
Azul Bahia Escuro	89	188,8	566,3	9116,5	27358,1	94,4	472,2
Cinza Castelo	62	271,0	812,9	13087,5	39280,3	135,5	678,0
Azul Bahia	60	280,0	840,0	13523,8	40590,6	140,0	700,6
Iragua	54	311,1	933,3	15026,8	45104,2	155,6	778,5
Branco Ceará	54	311,1	933,3	15026,8	45104,2	155,6	778,5
Branco Marfim	50	336,0	1008,0	16229,3	48715,7	168,1	840,8
Branco Siena	49	342,9	1028,6	16560,6	49710,7	171,5	858,0
Pietra Lavica	47	357,4	1072,4	17265,6	51828,0	178,8	894,6
Rosso Lucido	46	365,2	1095,7	17641,0	52955,7	182,7	914,0
Pietra Lavica (1)	43	390,7	1172,1	18872,2	56654,0	195,4	977,9
Monaco Light	39	430,8	1292,3	20808,5	62471,0	215,5	1078,3
Oserone Lucido	37	454,1	1362,2	21933,7	65851,7	227,2	1136,7
Blinder Cinza Escuro	37	454,1	1362,2	21933,7	65851,7	227,2	1136,7
Pietra de Jerusalem	27	622,2	1866,7	30061,6	90279,7	311,4	1558,4
Café Imperial Claro	26	646,2	1938,5	31218,4	93757,7	323,3	1618,5
Verde Pavão	26	646,2	1938,5	31218,4	93757,7	323,3	1618,5
Branco Suíço	23	730,4	2191,4	35292,9	106009,7	365,6	1830,0
Flor di Pesco	18	933,3	2800,1	45104,2	135526,7	467,2	2339,8
Verde Ubatuba	17	988,3	2964,9	47759,7	143518,9	494,7	2477,8
Café Imperial	15	1120,0	3360,2	54133,6	162709,3	560,8	2809,3

A partir da análise da Tabela 13, considerou-se o valor 150 Bq/hm² de Rn-222 como aceitável para a exalação superficial das placas de rocha, pois acrescentando troca de ar no ambiente (Taxa de Renovação - TR em s⁻¹), o tempo para alcançar os limites recomendáveis (OMS e EU) se tornam consideravelmente altos. Porém, amostras com valor acima de 150 Bq/hm² são um perigo à saúde humana mesmo com trocas de ar, principalmente em locais onde mantém-se as taxas de renovação de ar baixas, como os países com clima frio. Portanto, devem ser investigadas alternativas para uso destas rochas, seja limitando a área coberta por esta rocha ou

utilizando tratamento superficial complementar. A concentração média em interiores varia entre 21 Bq/m³ e 80 Bq/m³ (GRAY *et al.*, 2009) advinda principalmente do solo e quase exclusivamente de Rn-222. Acrescentando este valor de concentração inicial C_0 , o tempo para atingir os limites estipulados cai expressivamente (98,3%), como observado nas duas últimas colunas da Tabela 13. Este fato reforça o valor de 150 Bq/hm² como recomendado para triar as amostras que necessitam de tratamento superficial, visto que os limites de 100 Bq/m³ e 300 Bq/m³ são atingidos respectivamente em menos de 1 hora e 4 horas, ainda com uma TR de 2 m³/h/pessoa.

Utilizando o critério de 150 Bq/hm² de exalação total de radônio recomendado neste estudo, 34% das amostras utilizadas neste estudo precisariam ser submetidas a um polimento adicional ou uso de impermeabilizante. Caso não se utilize o tratamento superficial, é recomendável cuidado na utilização destas rochas em interiores; os critérios limites a serem obedecidos nestes casos podem ser a restrição da área recoberta, limitando o uso deste material a poucos m², o uso em locais bem ventilados ou em locais que não haja permanência contínua de pessoas, como no caso de corredores e lavanderias.

4.1.6. Análise estatística objetivo 1

As variáveis analisadas estão sumarizadas na Tabela 14. Nesta mesma tabela estão discriminadas também as origens, as cores predominantes e os rótulos descritivos de cada amostra utilizados no *software* Statistica. Cada rótulo contém a sigla referente ao nome comercial da amostra, a sigla da cor predominante e a sigla do local de origem. Para amostras brasileiras foram utilizadas as siglas dos estados correspondentes e, para as amostras suíças, foi utilizada a sigla CH.

Tabela 14. Variáveis analisadas para o objetivo 1 e 2.

Amostra	Rótulo <i>software</i> Statística	CoMo (cps)		Index gama	Erro Index gama	U	Th-232	K	Rn-total	Rn-222	Rn-220	Cor predominante	Origem
		Alfa	Beta e Gama			ppm	ppm	%	(Bq/hm ²)	(Bq/hm ²)	(Bq/hm ²)		
Azul Bahia	AB - A - BA	0	11,1	0,79	4,0%	11,7	5,6	5,5	72	60	12	Azul	Bahia
Azul Bahia Escuro	ABE - A - BA	0	17,1	0,87	3,4%	8,1	19,6	2,5	108	89	19	Azul	Bahia
Basaltite	BAS - C - CH	1,6	29,3	1,58	4,8%	13,6	59,2	5,9	2673	541	2132	Cinza	Suíça
Bege Ipanema	BE - B - ES	0,3	11,0	0,61	3,0%	4,5	12,8		381	147	234	Bege	Espírito Santo
Blinde Cinza Escuro	BLCE - C - ES	0	6,7	0,46	1,1%	0,3	3,5	3,4	37	37	0	Cinza	Espírito Santo
Blinder Vermelho Claro	BLVC - VM - SP	2,5	21,1	1,13	2,9%	4,2	32,4	4,1	3902	1599	2303	Vermelho	São Paulo
Branco Ceará	BCE - B - CE	0	12,6	0,78	1,0%	9,8	18,2		77	54	23	Branco	Ceará
Branco Cristal	BC - B - CH	0,8	14,7	0,79	2,0%	14,6	20,9	4,3	691	189	502	Branco	Suíça
Branco Marfim	BM - B - ES	0	13,5	0,79	3,8%	2,0	18,1	4,5	69	50	19	Branco	Espírito Santo
Branco Siena	BS - B - ES	0	5,7	0,56	2,9%	0,8	10,9	2,8	74	49	25	Branco	Espírito Santo
Branco Suíça	BCH - C - CH	0	5,0	0,38	0,8%	1,5	8,6	1,8	56	23	33	Branco	Suíça
Café Imperial	CI - M - MG	0	11,8	0,76	4,0%	5,2	12,1	5,9	34	15	19	Marrom	Minas Gerais
Café Imperial Claro	CIC - M - MG	0	16,4	0,90	4,0%	1,3	12,7	7,7	73	26	47	Marrom	Minas Gerais
Capão Bonito	CB - VM - SP	1,5	15,6	1,64	4,8%	10,5	95,4	3,9	2043	777	1266	Vermelho	São Paulo
Capão Bonito GM	CBGM - VM - SP	1,3	19,3	1,63	3,9%	3,7	87,7	2,0	6204	3697	2507	Vermelho	São Paulo
Cinza Castelo	CCS - C - ES	0	10,4	0,80	3,5%	1,4	20,1	3,1	127	62	65	Cinza	Espírito Santo
Cinza Corumba	CC - C - ES	1,9	20,4	0,86	2,0%	6,6	16,3	4,3	1800	761	1039	Cinza	Espírito Santo
Cinza Novo Mundo	CNM - C - ES	2,8	15,1	1,10	5,2%	1,5	25,6	4,3	9611	2995	6616	Cinza	Espírito Santo
Flor Di Pesco	FP - B - CH	0	0,9	0,06	0,3%	11,6	9,1	0,1	18	18	0	Branco	Suíça
Iragua	I - C - CH	0	11,2	0,51	1,4%	8,1	23,9	5,1	110	54	56	Cinza	Suíça
Lusera Fiammata	LF - C - CH	1,6	19,8	1,36	4,7%	11,7	35,3	4,1	241	94	147	Cinza	Suíça
Maracuja	M - B - SP	0	21,3	1,95	8,7%	1,9	69,6	3,7	353	110	243	Bege	São Paulo
Marrom São Paulo	MSP - M - SP	1,2	22,2	1,03	4,2%	5,9	30,0	4,5	670	328	342	Marrom	São Paulo
Monaco Light	ML - M - CH	0	1,3	0,06	0,4%	1,3	12,2	7,2	54	39	15	Marrom	Suíça
Onsernone Lucido	OL - C - CH	0	7,3	0,58	2,7%	5,2	13,3	0,7	42	37	5	Cinza	Suíça
Pietra de Jerusalem	PJ - B - CH	0	1,6	0,46	2,3%	2,5	0,6	0,1	35	27	8	Bege	Suíça
Pietra Lavica	PL - C - CH	0	12,0	0,08	1,5%	6,9	4,8	1,5	170	47	123	Cinza	Suíça
Pietra Lavica (1)	PL1 - VM - CH	0	1,5	0,03	1,2%	0,0	1,0		79	43	36	Vermelho	Suíça
Rosa Capri	RC - R - CH	1,5	24,3	3,40	6,7%	17,2	56,6	4,5	374	210	164	Rosa	Suíça
Rosso Lucido	RL - R - CH	0	14,2	1,01	2,1%	5,2	19,8	5,5	117	46	71	Rosa	Suíça
Sodalita	S - A - CH	2,5	112,0	13,47	54,5%	0	731		1433	502	931	Azul	Suíça
Verde Pavão	VP - V - ES	0,1	10,1	0,30	2,2%	0	3	4,2	34	26	8	Verde	Espírito Santo
Verde Ubatuba	VU - V - ES	0	3,9	0,21	1,7%	1,7	4,4	1,8	34	17	17	Verde	Espírito Santo
Vermelho Bragança	VB - VM - SP	0,4	17,0	1,55	3,9%	7,5	41,8	3,9	701	252	449	Vermelho	São Paulo
Vermelho Jacarandá	VJ - VM - SP	0,3	12,3	1,23	4,9%	3,8	36,3	0,7	3984	1199	2785	Vermelho	São Paulo

4.1.6.1 Hipóteses

As hipóteses investigadas neste item foram o uso do monitor de contaminação e da cor predominante como métodos de triagem primária das amostras.

Os coeficientes de correlação de *Spearman*, calculados para as variáveis alfa, beta e gama, *Index* gama, concentrações de U, Th-232 e K, exalações de Rn- 222 e Rn-220, estão apresentados na Figura 56.

Figura 56. Correlações de *Spearman* para as variáveis alfa, beta e gama, *Index* gama, U, Th-232, K, Rn-222 e Rn-220.

Variáveis	Ranking de correlações de Spearman Correlações em vermelho são significantes para $p < 0.01000$							
	Alpha (cps)	Beta e Gama (cps)	Index gama	U (ppm)	Th-232 (ppm)	K (ppm)	Rn-222	Rn-220
Alpha (cps)	1.000	0.703	0.667	0.220	0.653	0.123	0.802	0.784
Beta e Gama (cps)	0.703	1.000	0.911	0.317	0.825	0.350	0.715	0.678
Index gama	0.667	0.911	1.000	0.291	0.903	0.223	0.772	0.736
U-238 (ppm)	0.220	0.317	0.291	1.000	0.337	0.206	0.282	0.179
Th-232 (ppm)	0.653	0.825	0.903	0.337	1.000	0.168	0.804	0.777
K (ppm)	0.123	0.350	0.223	0.206	0.168	1.000	0.059	0.099
Rn-222	0.802	0.715	0.772	0.282	0.804	0.059	1.000	0.878
Rn-220	0.784	0.678	0.736	0.179	0.777	0.099	0.878	1.000

Os resultados, apresentados na Figura 56, mostram que há correlação significativa para 99% de confiança ($p < 0,01$) entre as seguintes variáveis:

- Contagem alfa, e beta e gama (0,703);
- Contagem alfa com o *Index* gama (0,667);
- Contagem alfa com a quantidade de Th-232 (0,653);
- Contagem alfa com as exalações de Rn-222 e Rn-220 (0,802 e 0,784, respectivamente);
- Contagem beta e gama com o *Index* gama (0,911);
- Contagem beta e gama com a quantidade de Th-232 (0,825);
- Contagem beta e gama com as exalações de Rn-222 e Rn-220 (0,715 e 0,678, respectivamente);
- *Index* gama com a quantidade de Th-232 (0,903);
- *Index* gama com as exalações de Rn-222 e Rn-220 (0,772 e 0,736, respectivamente).

As variáveis U e K não apresentaram correlações significativas com qualquer outra variável. As concentrações de Th-232 apresentaram importante peso nas variáveis *Index* gama e exalações de Rn-222 e Rn-220. A regressão linear equacionada para as variáveis *Index* e beta e gama está apresentada na Figura 57.

Figura 57. Gráfico de regressão das variáveis *Index* gama e contagem de beta e gama (cps).

Para 95% de confiança, o valor de r (coeficiente de correlação de *Pearson* amostral) representa, no teste de hipótese exato, a rejeição da hipótese nula, qual seja, $H_0: |\rho| = 0$, isto é, há evidência estatística de que existe correlação linear entre as variáveis *Index* e beta e gama. O intervalo de confiança para ρ (coeficiente de correlação de *Pearson* da população), utilizando a aproximação Z de Fisher, é $0,940 \leq \rho \leq 0,985$. Para o teste unicaudal, $0,946 \leq \rho$, indicando uma correlação positiva muito forte (acima de 0,9) e o R^2 populacional (coeficiente de determinação) é maior ou igual 0,894, indicando que as variáveis explicam sua variação em 89,4%, para uma amostra de 35 elementos. A mesma regressão está apresentada em detalhe na Figura 58.

Figura 58. Gráfico de regressão das variáveis Index gama e contagem de beta e gama (cps) com detalhe para o intervalo de confiança.

Observa-se a representação do intervalo de confiança, nas linhas vermelhas tracejadas, para predição da variável dependente. Para valores de *Index* maiores ou iguais a um (1), todas as amostras apresentam valores em cps de beta e gama maiores ou iguais a quatro (4), com 95% de confiança. O valor de *Index* maior que um (1) tem por base a legislação da europeia sobre proteção radiológica em relação a materiais de construção (apresentada no item 2.15, página 108). Portanto, em favor da segurança, o valor quatro (4) em cps de beta e gama correlaciona-se sob 95% de confiança com o referido valor do *Index* e, desta forma, este pode indiretamente ser inferido pelas medições com o detector portátil de radiação.

O ajuste da curva da regressão é equacionado pela Equação 49, para o *Index* igual a um (1), o valor de beta e gama correspondente é 13,7; isto significa que as amostras com *Index* maior ou igual a um (1) teriam contagem de beta e gama maior ou igual a 13,7.

$$49. \text{Beta e gama} = 5,8246 + 7,9107 \times \text{Index}$$

A região em azul no gráfico apresentado na Figura 59 é a que compreende as medidas acima de um (1) para o *Index* gama e acima de 12 cps com o CoMo. Este valor é condizente com a equação da regressão linear obtida anteriormente (Equação 49).

Figura 59. Gráfico de dispersão das variáveis *Index* gama e contagem de beta e gama (cps).

A Figura 60 mostra os resultados obtidos com o monitor de contaminação e o *Index* gama plotados em um gráfico misto de barras e dispersão. A partir deste gráfico, observa-se que todas as amostras com valores de *Index* gama (quadrados verdes) acima da linha horizontal preta (*Index* gama igual a 1) apresentaram contagem beta e gama maior que 12 cps (o mínimo foi 12,3 cps) pelo monitor de contaminação. Todas as amostras com *Index* gama acima de um (1) corresponderam também à contagem de alfa não nula, com exceção da amostra Maracujá.

Figura 60. Gráfico para análise das medições obtidas com o monitor de contaminação e os valores de *Index* gama.

A Figura 61 mostra os resultados obtidos com o monitor de contaminação e os valores de Rn-total plotados em um gráfico misto de barras e dispersão. A partir deste gráfico, observa-se que todas as amostras com valores de Rn-total (quadrados verdes) acima da linha horizontal preta (exalação igual a 150 Bq/hm²) apresentaram contagem beta e gama maior que 11 cps pelo monitor de contaminação. Todas as amostras com exalação total acima de 150 Bq/hm² correspondem também à contagem de alfa não nula, com exceção da amostra Maracujá. As correlações significativas ($p < 0,05$) apresentadas pelo monitor de contaminação tanto com o *Index* gama quanto com as exalações de Rn, além das análises dos gráficos apresentados na Figura 60 e Figura 61, validam o seu uso como método de triagem das amostras de rochas ornamentais. Os valores de contagem alfa não nula e/ou contagem beta e gama igual ou superior a 4 cps, obtido pelo intervalo de confiança populacional da regressão linear, são os valores recomendados utilizados para esta triagem primária, utilizando o intervalo de confiança da população de 95%. O valor de 4 cps é aqui considerado conservador. No entanto, diminuindo-se o intervalo de confiança, valores maiores que quatro são obtidos, mas são menos favoráveis à segurança. Por este método, 14,3% das amostras seriam aprovadas para uso em interiores sem necessidade de avaliações adicionais de exalação e índices de perigo radiológicos, quais sejam Flor di Pesco que apresentou *Index* igual a 0,06 e exalação de Rn-total igual a 18 Bq/hm²; Mônaco Light que apresentou *Index* igual a 0,06 e exalação de Rn-total igual 54 Bq/hm²; Pietra de Jerusalém que apresentou *Index* igual a 0,46 e exalação de Rn-total igual 35 Bq/hm²; Pietra Lavica (1) que apresentou *Index* igual a 0,03 e exalação de Rn-total igual 79 Bq/hm²; e Verde Ubatuba que apresentou *Index* igual a 0,21 e exalação de Rn-total igual 34 Bq/hm².

Importante ressaltar que resultados “falso positivos”, que consistem em amostras que na triagem primárias seriam consideradas problemáticas, mas posteriormente na análise do *Index* gama e da exalação de radônio se mostrarem não prejudiciais, não são considerados uma falha do sistema de triagem, pois estão no sentido de aumento da segurança. Para as amostras selecionadas, o método não gerou nenhum “falso negativo” que, se ocorresse, poderia causar um problema de classificação errônea da rocha, contrário, portanto, à segurança. Estudos complementares com mais amostras podem confirmar a robustez do método.

Figura 61. Gráfico para análise das medições obtidas com o monitor de contaminação e os valores de exalação de Rn-total.

Adicionalmente, foi verificada se a cor predominante também poderia ser utilizada como mecanismo de triagem primária das amostras de rocha ornamental. Para isto, foi realizado o agrupamento das amostras utilizando como parâmetros os valores de *Index* gama, Rn-222 e Rn-220 da Tabela 14 (vide página 170). O rótulo das amostras consiste em nome comercial abreviado, cor abreviada e sigla do local de origem, a listagem dos rótulos por amostra também está na Tabela 14.

O resultado da análise de agrupamento está apresentado na Figura 62. Pode-se observar no dendograma que traçando uma reta horizontal em 24% de $(Dlink/Dmáx)*100$, há três grupos formados e não há uma única cor predominante em cada grupo. Porém, nota-se que 67% das amostras com cor predominante vermelha se encontram nos primeiros dois grupos (amostras com maior risco associado ao uso em interiores). Portanto, apesar de não ter sido validado o método de triagem por cor, as amostras com cor predominante vermelha se mostraram proporcionalmente mais problemáticas neste estudo. Entretanto, a presença do elemento Fe, que pode estar associada a esta cor vermelha nas amostras, não apresentou correlação significativa com o *Index*, ou mesmo com as exalações.

Figura 62. Dendograma para as variáveis *Index* gama, Rn-222 e Rn-220.

4.2. CORRELAÇÃO ENTRE INDEX GAMA E EXALAÇÕES DE Rn-222 E Rn-220 (OBJETIVO 2)

4.2.1. Prólogo – objetivo 2

Este item teve por objetivo verificar se o uso do *Index* gama é suficiente para apontar as amostras problemáticas para uso em interiores, considerando também as exalações de radônio e torônio. Os valores recomendados de *Index* gama são um (1) para materiais de construção utilizados por peso e seis (6) para materiais de construção com uso em superfícies. Para esta análise foram consideradas as seguintes variáveis: *Index* gama e exalações de Rn-222 e Rn-220. As análises foram conduzidas utilizando os *softwares* Excel® e o Statistica 13 para Windows. Os conceitos estatísticos necessários para a análise dos dados estão apresentados no Apêndice A (página 326) deste trabalho. Os resultados das análises desta seção foram que o valor de *Index* gama não é suficiente para avaliar as amostras em relação às exalações de radônio e torônio e propõem-se a utilização do valor um (1) de referência de *Index* gama para as amostras de rocha ornamental, mesmo quando utilizadas em placas. Propõem-se também a medição das exalações de Rn-total, Rn-222 e Rn-220, como ferramentas complementares ao *Index* gama na avaliação do uso destas rochas em interiores.

4.2.2. Análise estatística objetivo 2

4.2.2.1 Hipótese

A hipótese analisada neste item foi de que o *Index* gama é suficiente para classificar as amostras problemáticas para uso em interiores, considerando as

exalações de radônio e torônio. Os dados utilizados para esta análise estão apresentados na Tabela 14 (vide página 170).

A Figura 63 apresenta o gráfico *box plot* (gráfico de caixas) para as exalações total, de Rn-222 e Rn-220 em Bq/hm² para as amostras estudadas.

Figura 63. *Box plot* de variáveis múltiplas para as exalações de Rn-total, Rn-222 e Rn-220.

Observa-se, a partir da Figura 63, que os valores da distribuição de Rn-220 são maiores do que as de Rn-222 e, principalmente, que as amostras são bastante heterogêneas em relação às exalações. Neste caso ressalta-se a necessidade da avaliação individual das amostras. No objetivo seis (6) deste estudo (vide página 237) foi explorada a comparação entre as proporções de U e Th nas amostras e as respectivas exalações de Rn-222 e Rn-220.

A Figura 64 mostra o gráfico *box plot* (gráfico de caixas) para o *Index gama*.

Figura 64. *Box plot para Index gama.*

Observa-se, a partir da Figura 64, que a quantidade de pontos discrepantes é menor quando comparada às exalações de gás, porém, amostras com valores mais altos do que a distribuição dos dados mostram que também há necessidade de avaliação individual das amostras, pois as emissões das mesmas não apresentam comportamento homogêneo. No objetivo seis (6) deste trabalho (vide página 301), o agrupamento das amostras em relação à classificação litológica das rochas foi realizado e verificou-se que as amostras de mesma litologia tendem a apresentar resultados similares.

A Figura 65 mostra as correlações de *Spearman* para os dados analisados nesta seção. Todas as variáveis têm correlação significativa para valores de $p < 0,01$. Apesar destas correlações altas, foram investigadas as relações entre os limites recomendados propostos para estas variáveis.

Figura 65. Correlações de postos de *Spearman* para Index gama, Rn-total, Rn-222 e Rn-220.

Variáveis	Ranking de correlações de Spearman Correlações em vermelho são significantes para $p < .01000$			
	Index gama	Rn-total	Rn-222	Rn-220
Index gama	1.000	0.755	0.772	0.736
Rn-total	0.755	1.000	0.955	0.967
Rn-222	0.772	0.955	1.000	0.878
Rn-220	0.736	0.967	0.878	1.000

A Figura 66 mostra os valores de *Index* gama e exalação de Rn-total, com destaque para o intervalo compreendido entre as barras horizontais pretas (limite inferior de um (1) para *Index* gama e superior de 150 Bq/hm² de exalação total. Apenas a amostra Sodalita seria reprovada pela recomendação de valor inferior a seis (6) para o *Index* gama. Se for considerado o valor de um (1), onze (11) amostras apresentaram valores superiores e duas apresentaram valores iguais a um (1).

Ao comparar os valores de *Index* com as exalações totais de Rn (Figura 66), observa-se que as onze (11) amostras que apresentaram valores de *Index* gama superiores ao valor um (1), apresentadas em preto no gráfico, e uma (1) amostra que apresentou valor igual um (1), apresentada em verde no gráfico, também exibiram concentrações totais de Rn superiores ao valor recomendado neste estudo de 150 Bq/hm². Entretanto, quatro (4) amostras com *Index* abaixo de (1), apresentadas em vermelho no gráfico, tiveram valores de exalação de Rn-total superiores à recomendação de 150 Bq/hm², quais sejam a Bege Ipanema (*Index* 0,6 e 381 Bq/hm²), Branco Cristal (*Index* 0,8 e 691 Bq/hm²), Cinza Corumbá (*Index* 0,9 e 1800 Bq/hm²) e Pietra Lavica (*Index* 0,1 e 170 Bq/hm²). Portanto, conclui-se que todas as amostras com valores de *Index* gama superiores a um (1) acusaram valores de exalação total de Rn superiores à recomendação proposta de 150 Bq/hm², porém, não foram todas as amostras com exalações superiores à recomendação que ultrapassaram o valor um (1) de *Index* gama.

Para fins de melhor visualização do gráfico, optou-se por manter a escala do eixo y limitada ao valor limite apropriado, portanto, os valores que não aparecem são superiores ao máximo do intervalo. Isto acontece na Figura 66, Figura 67 e Figura 69.

Figura 66. Gráfico para análise do Index gama em relação à exalação total de radônio.

Figura 67. Gráfico para análise do Index gama em relação à exalação total de Rn-222.

Ao realizar a mesma análise para a exalação isolada do Rn-222, único isótopo mencionado nas legislações internacionais (Figura 67), observa-se que as oito (8) amostras que apresentaram valores de *Index* gama superiores ao valor um (1), apresentados em preto no gráfico, e uma (1) amostra que apresentou valor igual um (1), apresentada em verde no gráfico, também exibiram concentrações de Rn-222 superiores ao valor recomendado neste estudo de 150 Bq/hm² (considerando apenas Rn-222 para efeitos de simulação). Entretanto, duas (2) amostras com *Index* abaixo de (1), apresentadas em vermelho no gráfico, tiveram valores de exalação de Rn-222 superiores à recomendação de 150 Bq/hm², quais sejam, Branco Cristal (*Index* 0,8 e 189 Bq/hm²) e Cinza Corumbá (*Index* 0,9 e 761 Bq/hm²). Portanto, conclui-se que não são todas as amostras com valores de *Index* gama superiores a um (1) que acusaram valores de exalação Rn-222 superiores à recomendação proposta de 150 Bq/hm², assim como quatro (4) amostras com exalações superiores à recomendação ultrapassaram o valor um (1) de *Index* gama.

4.2.3. Análise dos índices de perigo radiológico

Apesar de não ser o foco deste estudo, outros índices de perigo radiológico descritos no item 2.15.1, página 113, foram calculados e estão apresentados na Tabela 15. Estes valores foram calculados com base nas atividades dos isótopos ²³⁸U, ²³²Th e ⁴⁰K obtidos por espectrometria gama, apresentados na Tabela 9 (vide página 160). Os índices utilizados na Tabela 15 estão descritos a seguir.

- Raeq – atividade de rádio equivalente.
- Hin – índice de perigo interno.
- Hex – índice de perigo externo.
- Dab – dose absorvida.
- AGDE – dose equivalente gonadal anual.
- AEDE – dose efetiva anual equivalente.
- ELCR – risco de câncer por excesso de tempo de vida.

Tabela 15. Índices de perigo radiológicos calculados para as amostras estudadas.

Amostra	Index gama	Erro Index	Raeq	Erro Raeq	Hex	Erro Hex	Hin	Erro Hin	D _{ab}	Erro D _{ab}	AGDE	Erro AGDE	AEDE	Erro AEDE	ELCR	Erro ELCR
			(Bq/kq)			%		%	nGy/h	±	mSv/ano	±	mSv/ano	±	x10 ⁻³	±
Azul Bahia	0,8	4,0%	210,7	11,3	0,18	1,36%	0,70	5,45%	104	5	0,73	1,2	0,51	0,2	1,79	0,57
Azul Bahia Escuro	0,9	3,4%	239,5	9,0	0,30	1,37%	0,84	3,05%	112	4	0,79	1,0	0,55	0,1	1,92	0,50
Basaltite	1,6	4,8%	457,0	13,8	0,80	2,57%	1,98	5,66%	199	6	1,36	1,3	0,97	0,2	3,41	0,60
Bege Ipanema	0,6	2,6%	168,9	7,0	0,22	1,11%	0,59	2,32%	78	3	0,55	0,7	0,38	0,1	1,34	0,44
Blinder Cinza Escuro	0,5	1,1%	113,2	2,7	0,07	0,26%	0,16	0,57%	57	1	0,42	0,3	0,28	0,1	0,99	0,29
Blinder Vermelho Claro	1,1	2,9%	302,4	8,0	0,38	1,40%	0,88	2,97%	141	4	1,00	0,8	0,69	0,1	2,42	0,46
Branco Ceará	0,8	1,0%	227,8	3,0	0,37	0,41%	1,07	1,62%	101	1	0,69	0,3	0,50	0,1	1,74	0,29
Branco Cristal	0,8	2,0%	232,1	5,9	0,38	0,99%	1,08	2,72%	103	3	0,70	0,6	0,50	0,1	1,77	0,39
Branco Marfim	0,8	3,8%	202,3	9,5	0,20	1,22%	0,45	2,52%	98	5	0,71	1,1	0,48	0,2	1,68	0,53
Branco Siena	0,6	2,9%	140,9	7,4	0,13	0,99%	0,26	1,99%	69	4	0,50	0,8	0,34	0,1	1,18	0,47
Branco Suíço	0,4	0,8%	101,1	2,0	0,12	0,30%	0,29	0,74%	48	1	0,34	0,2	0,23	0,1	0,82	0,24
Café Imperial	0,8	4,0%	187,6	9,6	0,12	0,95%	0,27	1,99%	95	5	0,70	1,2	0,47	0,2	1,63	0,54
Café Imperial Claro	0,9	4,0%	226,8	9,8	0,18	1,17%	0,41	2,41%	112	5	0,82	1,1	0,55	0,2	1,93	0,54
Capão Bonito	1,6	4,8%	448,7	13,8	0,61	2,28%	1,53	6,21%	206	6	1,45	1,3	1,01	0,2	3,54	0,61
Capão Bonito G.M.	1,6	3,9%	440,7	10,8	0,58	1,94%	1,36	4,01%	204	5	1,44	1,1	1,00	0,2	3,50	0,53
Cinza Castelo	0,8	3,5%	210,7	9,2	0,23	1,33%	0,54	2,76%	100	4	0,72	1,0	0,49	0,1	1,72	0,51
Cinza Corumbá	0,9	2,0%	229,9	5,3	0,25	0,87%	0,68	1,98%	110	2	0,78	0,5	0,54	0,1	1,88	0,38
Cinza Novo Mundo	1,1	5,2%	294,0	13,4	0,37	1,94%	0,85	3,96%	137	6	0,97	1,5	0,67	0,2	2,35	0,62
Flor di Pesco	0,1	0,3%	17,1	0,9	0,03	0,17%	0,07	0,37%	8	0	0,05	0,1	0,04	0,0	0,13	0,15
Iragua	0,5	1,4%	151,3	4,1	0,24	0,68%	0,73	1,96%	68	2	0,46	0,4	0,33	0,1	1,16	0,33
Luserna Fiammata	1,4	4,7%	375,7	12,7	0,51	2,14%	1,35	4,58%	173	6	1,21	1,3	0,85	0,2	2,97	0,59
Maracujá	1,9	8,7%	537,3	24,2	0,84	4,41%	1,82	8,90%	240	11	1,69	2,3	1,18	0,2	4,12	0,79
Marrom São Paulo	1,0	4,2%	275,4	11,1	0,34	1,73%	0,82	3,59%	129	5	0,92	1,2	0,63	0,2	2,21	0,56
Monaco Light	0,1	0,4%	17,7	1,2	0,02	0,16%	0,10	0,65%	8	1	0,05	0,1	0,04	0,1	0,14	0,18
Onserone Lucido	0,6	2,7%	158,3	7,1	0,20	1,13%	0,54	2,41%	73	3	0,52	0,7	0,36	0,1	1,26	0,45
Pietra de Jerusalem	0,5	2,3%	132,6	6,7	0,25	1,28%	0,53	2,62%	57	3	0,39	0,6	0,28	0,1	0,97	0,41
Pietra Lavica	0,1	1,5%	17,9	3,4	0,00	0,04%	0,00	0,07%	10	2	0,07	0,4	0,05	0,1	0,17	0,33
Pietra Lavica (1)	0,0	1,2%	6,5	2,8	0,00	0,03%	0,00	0,06%	4	2	0,03	0,4	0,02	0,1	0,06	0,30
Rosa Capri	3,4	6,7%	979,8	18,5	1,38	3,31%	4,38	6,73%	448	8	3,07	1,8	2,20	0,2	7,69	0,70
Rosso Lucido	1,0	2,1%	268,2	5,6	0,30	0,87%	0,75	1,98%	127	3	0,91	0,6	0,63	0,1	2,19	0,39
Sodalita	13,5	54,5%	3847,1	155,9	7,36	29,98%	14,80	60,19%	1628	66	11,27	14,4	7,99	0,6	27,95	1,99
Verde Pavão	0,3	2,2%	68,6	5,1	0,01	0,05%	0,01	0,11%	37	3	0,28	0,7	0,18	0,1	0,64	0,41
Verde Ubatuba	0,2	1,7%	51,5	4,0	0,02	0,17%	0,08	0,65%	27	2	0,20	0,5	0,13	0,1	0,46	0,36
Vermelho Bragança	1,5	3,9%	421,5	10,9	0,58	1,97%	1,38	4,19%	193	5	1,36	1,0	0,95	0,2	3,32	0,53
Vermelho Jacarandá	1,2	4,9%	329,0	13,2	0,43	2,21%	0,96	4,52%	153	6	1,09	1,4	0,75	0,2	2,62	0,60
VR ou MG	1 e 6		370		1		1		84		0,36		0,46		1,16	
% das amostras destacadas	37%		23%		6%		29%		63%		80%		63%		74%	

VR - valor recomendado.

MG - média global da literatura.

valor ≥ VR ou MG

Pode-se observar que mais de dois terços das amostras superam os valores recomendados para a dose absorvida (63%), para a dose gonadal equivalente (80%), para a dose efetiva anual equivalente (63%) e para o risco de câncer por excesso de tempo de vida (74%). Em relação às variáveis atividade de rádio equivalente, índice de perigo interno e índice de perigo externo, 23%, 6% e 29% das amostras superaram os valores recomendados, respectivamente.

A Figura 68 apresenta as correlações calculadas entre os índices estudados e as exalações de gás nas amostras estudadas.

Figura 68. Correlações de *Spearman* para os índices de perigo radiológico e as exalações de radônio.

Variáveis	Ranking de correlações de Spearman Correlações em vermelho são significantes para $p < .01000$										
	Index gama	Rn-total	Rn-222	Rn-220	Raeq (Bq/kg)	Hex	Hin	D (nGy/h)	AGDE (mSv/ano)	AEDE (mSv/ano)	ELCR (10 ⁻³)
Index gama	1.000										
Rn-total	0.755	1.000									
Rn-222	0.772	0.955	1.000								
Rn-220	0.736	0.967	0.878	1.000							
Raeq (Bq/kg)	0.991	0.767	0.791	0.742	1.000						
Hex	0.932	0.763	0.794	0.727	0.957	1.000					
Hin	0.915	0.741	0.782	0.691	0.950	0.981	1.000				
D (nGy/h)	0.997	0.753	0.774	0.729	0.994	0.931	0.923	1.000			
AGDE (mSv/ano)	0.997	0.742	0.765	0.721	0.987	0.916	0.902	0.997	1.000		
AEDE (mSv/ano)	0.997	0.753	0.774	0.729	0.994	0.931	0.923	1.000	0.997	1.000	
ELCR (10 ⁻³)	0.997	0.753	0.774	0.729	0.994	0.931	0.923	1.000	0.997	1.000	1.000

Pode-se verificar pela Figura 68, que o Raeq teve maior correlação (0,767) com a exalação total de radônio (Rn-222 + Rn-220); o Hex teve maior correlação (0,794) com a exalação de Rn-222 e o Raeq teve maior correlação (0,742) com a exalação de Rn-220. Apesar do Raeq ter maior correlação com a exalação total de radônio, este parâmetro ainda não é suficiente para avaliar o perigo da exposição em relação às exalações de Rn- 220 e Rn-222, pois ainda gera “falsos negativos”, ou seja, amostras sem aparente problema em relação ao Raeq exalam valores de Rn- total superiores ao valor de 150 Bq/hm² recomendado neste estudo, conforme apontam os oito casos em vermelho na Figura 69.

Figura 69. Gráfico misto de barras e dispersão para verificar a relação entre Raeq e as exalações totais de Rn.

4.3. CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS FÍSICOS DAS ROCHAS E AS EXALAÇÕES DE RADÔNIO E TORÔNIO (OBJETIVO 3)

4.3.1. Prólogo – objetivo 3

Neste item foram investigadas as correlações entre a densidade, volume de poros e umidade com as exalações de Rn-222 e Rn-220 em amostras selecionadas. Adicionalmente, foi calculada a distância de difusão para o Rn-222 e para o Rn-220 utilizando a permeabilidade absoluta das rochas obtidas no PDP do CENPES-PETROBRAS. Para isto foi utilizada a Lei de Darcy e as constantes de decaimento para os dois isótopos (Rn-222 e Rn-220). As variáveis utilizadas nesta análise foram: densidades *bulk* e de grãos obtidas respectivamente nas picnometrias por água e gás hélio; o volume de poros, obtido pela relação entre as duas densidades; a umidade base úmida, obtida pelas pesagens das amostras antes e depois de colocadas na estufa para secagem; e a permeabilidade já mencionada. Os conceitos estatísticos necessários para a análise dos dados estão apresentados no Apêndice A (página 326) deste trabalho. Os principais resultados desta seção foram: os resultados das distâncias de difusão, calculadas para o Rn-222 e Rn-220 nas amostras selecionadas, foram muito baixos ($< 0,06 \mu\text{m}$) e foi possível concluir que apenas a difusão superficial contribui para o fluxo de exalação mássico de radônio, desconsiderando a convecção e a difusão na matriz. Este resultado foi comprovado pela análise dos parâmetros físicos da rocha, pois não se obteve correlação acima 0,6 com as exalações de radônio nas amostras de rocha selecionadas para quaisquer parâmetros, corroborando que apenas as superfícies das placas influenciam na exalação.

4.3.2. Resultados porosidade e permeabilidade PDP

4.3.2.1 Hipótese

A hipótese investigada foi de que apenas a difusão superficial de radônio e torônio contribuem para o fluxo de exalação mássico de placas de rochas ornamentais, desconsiderando assim a difusão interna e a convecção. A caracterização de cada amostra está apresentada na Tabela 16, enquanto que os resultados de permeabilidade, porosidade efetiva, massa específica e volume poroso de cada amostra selecionada, estão apresentados na Tabela 17. Todos estes resultados foram obtidos no Laboratório de Petrofísica Básica do CENPES-PETROBRAS.

Tabela 16. Volume de sólidos e massas das amostras submetidas aos ensaios de porosidade e permeabilidade.

Amostra	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Volume Total (cm³)	Volume de Sólidos (cm³)	Massa da Amostra (g)
Bege Ipanema	2,55	4,73	24,16	24,04	64,37
Blínder Cinza Escuro	2,51	5,00	24,74	25,00	71,30
Blínder Vermelho Claro	2,52	4,46	22,24	22,19	57,83
Branco Ceará	2,55	4,56	23,29	23,19	61,42
Branco Siena	2,55	4,57	23,34	23,17	61,60
Capão Bonito	2,50	4,33	21,25	21,33	55,72
Cinza Corumbá	2,52	4,52	22,54	22,56	59,95
Marrom São Paulo	2,55	4,56	23,29	23,12	61,23
Rosso Lucido	2,34	4,29	18,45	18,13	46,85
Vermelho Bragança	2,52	4,50	22,44	22,30	58,62

Tabela 17. Resultados dos ensaios de porosidade e permeabilidade.

Amostra	Permeabilidade Absoluta (mD)	Porosidade Efetiva (%)	Massa Específica dos Grãos (g/cm³)	Volume Poroso (cm³)
Bege Ipanema	0,001179	0,4	2,68	0,09
Blínder Cinza Escuro	0	0,71	2,85	0,18
Blínder Vermelho Claro	0,00171037	1,16	2,61	0,26
Branco Ceará	0,001169	0,3	2,65	0,07
Branco Siena	0,000331	0,2	2,66	0,04
Capão Bonito	0,00238291	1,07	2,61	0,23
Cinza Corumbá	0,00419827	0,49	2,66	0,11
Marrom São Paulo	0,000774	0,3	2,65	0,06
Rosso Lucido	0,00151404	2,68	2,58	0,50
Vermelho Bragança	0,00189869	0,62	2,63	0,14

Observa-se na Tabela 17 que a permeabilidade das amostras analisadas foi baixíssima (a amostra Cinza Corumbá inclusive foi confundida com tampão de aço pelo PDP), portanto, é plausível admitir que a exalação da superfície seja apenas superficial, desconsiderando a convecção interna de gás. A porosidade também pode ser considerada insignificante (< 5%) (FERNANDES, 2014). Para comprovar esta hipótese, calculou-se a distância de difusão dos gases Rn-222 e Rn-220 na placa através da Lei de Darcy (ANDERSEN, 2000), apresentada na Equação 50.

$$50. \vec{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla p$$

Em que,

$\vec{q}$ – densidade de fluxo na matriz (m³/s por m²).

k – permeabilidade (m²).

μ - viscosidade (Pa/s) – 1,8×10⁻⁵.

dp/dL – variação de pressão com o deslocamento (Pa/m).

Visto que as placas têm espessura muito pequena (< 3 cm), considera-se a diferença de pressão no seu interior muito baixa; em matrizes rochosas sem pressão de confinamento, é próxima de 0 Pa/m (FERNANDES, 2014). Para efeito de cálculo, foi utilizado o valor de variação de pressão de 1 Pa/m.

Os resultados da distância de difusão foram calculados por meio da Equação 50 e da Equação 18, apresentada na página 78. A viscosidade do radônio é próxima de 1,8×10⁻⁵ Pa/s, para temperatura ambiente, e as constantes de decaimento são 2,09×10⁻⁹ s⁻¹ e 1,24×10⁻⁴ s⁻¹, para o Rn-222 e Rn-220, respectivamente (ANDERSEN, 2000). Os resultados estão apresentados na Tabela 18. O mecanismo de escoamento do gás na matriz é por difusão, desconsiderando-se a convecção de gás.

Tabela 18. Distâncias de difusão calculadas para Rn-222 e Rn-220.

Amostra	Permeabilidade Absoluta (D)	Permeabilidade (m^2)	Velocidade de escoamento (m/s)	Distância de difusão Rn-222 (μm)	Distância de difusão Rn-220 (μm)
Bege Ipanema	1,18E-06	1,16E-18	6,46435E-14	0,0308	5,20E-06
Blínder Cinza Escuro	0	0	0	0	0
Blínder Vermelho Claro	1,71E-06	1,69E-18	9,3778E-14	0,0447	7,55E-06
Branco Ceará	1,17E-06	1,15E-18	6,40952E-14	0,0306	5,16E-06
Branco Siena	3,31E-07	3,27E-19	1,81484E-14	0,0087	1,46E-06
Capão Bonito	2,38E-06	2,35E-18	1,30653E-13	0,0623	1,05E-05
Cinza Corumbá	4,20E-06	4,14E-18	2,30187E-13	0,1097	1,85E-05
Marrom São Paulo	7,74E-07	7,64E-19	4,24377E-14	0,0202	3,42E-06
Rosso Lucido	1,51E-06	1,49E-18	8,30134E-14	0,0396	6,68E-06
Vermelho Bragança	1,90E-06	1,87E-18	1,04103E-13	0,0496	6,68E-06
Média	1,52E-06	1,50E-18	8,31E-14	0,0396	6,52E-06
Desvio padrão	1,18E-06	1,17E-18	6,49E-14	0,0309	5,19E-06

Estes resultados comprovam que as distâncias de difusão são baixíssimas (média de 0,0396 μm para Rn-222 e de $6,52 \times 10^6 \mu m$ para o Rn-220). Sendo assim, apenas as superfícies das placas de rocha ornamental contribuem para a exalação.

Este resultado é bastante significativo e traz uma contribuição expressiva para a modelagem de equações de coeficiente de difusão para materiais de baixíssima permeabilidade ($< 0,1 mD$), como as rochas estudadas, visto que as equações existentes para solo (Equação 21, página 81) têm baixa aderência com os resultados de exalação de rochas com baixíssimas permeabilidades. Devido ao alto custo associado à análise, apenas dez (10) amostras foram submetidas a este ensaio. A continuação deste estudo com mais amostras, categorizadas por diferentes litologias, é uma sugestão para estudos futuros complementares.

4.3.3. Densidade, porcentagem aparente de poros e umidade

Os resultados dos parâmetros físicos das rochas estão sumarizados na Tabela 19.

Tabela 19. Resultados dos parâmetros físicos das rochas.

Amostra	Densidade <i>bulk</i> (g/cm ³)	Densidade pulverizado (g/cm ³)	Desvio padrão picnometria pulverizado	% aparente de poros	% água em massa (base úmida)	% água em volume (base úmida)
Azul Bahia	2,353	2,5963	0,0004	9,375	0,001	0,001
Azul Bahia Escuro	2,481	2,6216	0,0009	5,348	0	0,001
Basaltite	2,252	2,7581	0,0014	18,349	0,001	0,003
Bege Ipanema	2,559	2,7359	0,0027	6,475	0,001	0,003
Blinder Cinza Escuro	2,674	2,9279	0,0011	8,665	0,001	0,002
Blinder Vermelho Claro	2,514	2,6947	0,0009	6,722	0,003	0,008
Branco Ceará	2,414	2,7746	0,0005	12,988	0,001	0,002
Branco Cristal	2,539	2,6950	0,0002	5,800	0,001	0,003
Branco Marfim	2,518	2,7164	0,0013	7,291	0,001	0,002
Branco Siena	2,633	2,7154	0,0021	3,031	0,001	0,004
Branco Suíça	2,544	2,7459	0,0018	7,369	0	0,001
Café Imperial	2,704	2,8726	0,0015	5,886	0	0,001
Café Imperial Claro	2,826	2,8518	0,0008	0,902	0,002	0,007
Capão Bonito	2,448	2,7013	0,0006	9,389	0	0,000
Capão Bonito GM	2,401	2,7028	0,0009	11,163	0,002	0,004
Cinza Castelo	2,709	2,8042	0,0008	3,410	0,001	0,002
Cinza Corumba	2,685	2,7801	0,0012	3,430	0	0,001
Cinza Novo Mundo	2,674	2,7541	0,0005	2,926	0,001	0,001
Flor Dipesco	2,530	2,7656	0,0015	8,535	0	0,001
Iragua	2,509	2,7280	0,0003	8,043	0,001	0,002
Lusera Fiammatta	2,656	2,7109	0,0006	2,029	0	0,001
Maracujá	2,689	2,7530	0,0008	2,332	0,001	0,003
Marrom São Paulo	2,642	2,7139	0,0005	2,664	0,001	0,004
Monaco Light	2,704	2,9026	0,0006	6,839	0,001	0,003
Onsernone Lucido	2,525	2,8253	0,0009	10,619	0	0,001
Pietra de Jerusalém	2,484	2,7552	0,0010	9,830	0,001	0,002
Pietra Lavica	2,380	2,9078	0,0009	18,149	0,007	0,017
Pietra Lavica (1)	2,436	2,9228	0,0004	16,662	0,008	0,019
Rosa Capri	2,657	2,7273	0,0020	2,594	0,001	0,002
Rosso Lucido	2,413	2,6760	0,0003	9,826	0,001	0,003
Sodalita	2,096	2,5612	0,0004	18,178	0,001	0,002
Verde Pavão	2,898	2,9875	0,0003	2,981	0,002	0,005
Verde Ubatuba	2,933	2,9380	0,0002	0,174	0,001	0,004
Vermelho Bragança	2,633	2,7297	0,0005	3,529	0,001	0,003
Vermelho Jacarandá	2,693	2,7071	0,0012	0,530	0,001	0,002

A estatística descritiva dos dados, apresentada na Figura 70, mostra que as análises de densidade e porcentagem aparente de poros foram consistentes, com desvios padrões baixos. O parâmetro densidade *bulk* teve média $2,566 \pm 0,172$ g/cm³, a densidade do material pulverizado teve média $2,7646 \pm 0,0986$ g/cm³, a

porcentagem aparente de poros teve média $7,201 \pm 5,065\%$, umidade em massa (base úmida) $0,001 \pm 0,002\%$ e umidade em volume (base úmida) $0,003 \pm 0,004\%$.

Figura 70. Estatística descritiva dos parâmetros físicos das amostras.

Variáveis	Estatística descritiva			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Densidade bulk (g/cm ³)	2.566	2.096	2.93	0.172
Densidade pulverizado (g/cm ³)	2.7646	2.5612	2.988	0.0986
% poros	7.201	0.174	18.35	5.065
% água em massa (base úmida)	0.001	0	0.008	0.002
% água em volume (base úmida)	0.003	0	0.019	0.004

Estes resultados estão apresentados graficamente em *box plots* (gráficos de caixas) na Figura 71, Figura 72 e Figura 73. As análises de umidade foram as que apresentam resultados com maior desvio padrão, devido aos valores serem muito baixos, até mesmo insignificantes e qualquer valor anômalo prejudica a distribuição dos dados.

Figura 71. Gráfico *box plot* para as densidades das amostras.

Figura 72. Gráfico *box plot* para a % aparente de poros das amostras.

Figura 73. Gráfico *box plot* para as % umidade em massa e volume (base úmida).

Os resultados dos ensaios de umidade comprovaram que a faixa de umidade que as amostras se encontram não afeta o coeficiente de emanção (ilustrado na Figura 12, página 67) de forma significativa, pois estão muito próximas do zero, o que limita a influência da umidade e posiciona o trabalho fora do intervalo de umidade considerada crítica pela literatura.

Visto que a matriz rochosa é muito fechada, é improvável que, por exemplo, em piaas de cozinha revestidas com granito, o material se posicione na faixa de umidade crítica em que a exalação aumenta quase linearmente, porém, esta influência do molhamento das amostras não foi avaliada neste trabalho e é uma sugestão para estudos futuros.

A Figura 74 apresenta as correlações entre as exalações de Rn-222 e Rn-220 e os parâmetros físicos da rocha.

Figura 74. Correlações de *Spearman* para os parâmetros físicos das amostras com as exalações específicas de radônio.

Variáveis	Ranking de correlações de Spearman Correlações em vermelho são significantes para $p < 0.01000$							
	Rn-total (Bq/hm ²)	Rn-222 (Bq/hm ²)	Rn-220 (Bq/hm ²)	Densidade bulk (g/cm ³)	Densidade pulverizado (g/cm ³)	% poros	% água em massa (base úmida)	% água em volume (base úmida)
Rn-total (Bq/hm ²)	1.000							
Rn-222 (Bq/hm ²)	0.955	1.000						
Rn-220 (Bq/hm ²)	0.967	0.878	1.000					
Densidade bulk (g/cm ³)	-0.243	-0.251	-0.139	1.000				
Densidade pulverizado (g/cm ³)	-0.528	-0.596	-0.460	0.488	1.000			
% poros	-0.039	-0.048	-0.121	-0.828	-0.039	1.000		
% água em massa (base úmida)	0.139	0.028	0.187	-0.017	0.174	0.004	1.000	
% água em volume (base úmida)	0.096	-0.011	0.147	0.091	0.252	-0.081	0.988	1.000

A Figura 74 corrobora os resultados da análise anterior, pois todos os parâmetros físicos mensurados para as amostras selecionadas tiveram correlações baixas com as exalações. Apenas os valores de densidade do material pulverizado tiveram correlações inversamente proporcionais com as exalações para $p < 0,01$, mas com valores baixos, quais sejam, -0,528 com o Rn-total, -0,596 com o Rn-222 e -0,460 com o Rn-220.

4.4. CORRELAÇÕES ENTRE A RUGOSIDADE E AS EXALAÇÕES DE Rn-222 E Rn-220 (OBJETIVO 4)

4.4.1. Prólogo – objetivo 4

Neste item foi investigada a diminuição das exalações dos gases Rn-222 e Rn-220 com a diminuição da rugosidade da superfície das placas de rochas ornamentais selecionadas. A hipótese estudada foi de que o polimento é um método de tratamento superficial das placas de rocha que têm exalação excessiva de radônio, de forma que a comercialização destas não seja prejudicada. As variáveis estudadas foram os parâmetros de superfície normatizados pela ISO 25178 (Anexo C) e pela EUR 15178N obtidos através do mapeamento da superfície realizado por microscópio confocal, as áreas das placas e as exalações de radônio. Os conceitos estatísticos relativos à análise dos dados estão apresentados no Apêndice A (página 326) deste trabalho. O principal resultado desta seção foi: o teste de hipótese *Wilcoxon Signed Rank Test* indicou a diminuição da rugosidade como método de tratamento superficial para diminuição das exalações de Rn-222 e Rn-220 das placas de rocha ornamental estudadas. Recomendam-se estudos complementares de exalação de radônio e torônio para diferentes níveis de polimento para a mesma amostra, para verificar a robustez do modelo proposto.

4.4.1.1 Hipótese

A hipótese verificada foi de que a diminuição da rugosidade (superfície específica) da rocha diminui as exalações de radônio, principalmente nas placas de rochas com exalação deste gás acima de 150 Bq/hm².

4.4.2. Diferença entre as exalações das superfícies mais e menos rugosas

A Tabela 20 mostra as diferenças absolutas e relativas entre as exalações para o Rn-total, ^{222}Rn e ^{220}Rn , em relação à rugosidade da rocha. Os valores em verde mostram os ensaios em que os valores de exalação diminuíram com a diminuição da superfície específica da rocha (discriminados entre superfície mais ou menos rugosa), enquanto que os valores em vermelho são resultados em que as exalações não se alteraram ou aumentaram. As amostras destacadas em vermelho com valores de taxa de exalação muito próximos aos valores de radônio ambiente (50 Bq/m^3 foi a média do *background*) não apresentaram redução de exalação. Este fato provavelmente está associado ao desempenho do equipamento para valores baixos de concentração. Nestes casos, como o valor do ambiente supera o valor da amostra, o valor lido no equipamento para a amostra também se altera e, mesmo descontando o *background*, os resultados apresentam inconsistências para valores baixos devido à retroalimentação do ar na medição.

As médias das diferenças relativas para todas as amostras foram de -25%, -26% e 6% para o Rn-total, Rn-222 e Rn-220, respectivamente. Nota-se que a diminuição da rugosidade não necessariamente diminui a exalação de Rn-220 (Tabela 20). No entanto, ao se reunirem somente amostras que exalam mais que 150 Bq/hm^2 de Rn-total (Tabela 21), observa-se que as médias das diferenças relativas das exalações sobem para -28%, -16% e -29% para o Rn-total, Rn-222 e Rn-220, respectivamente. As regressões dos dados para todas as amostras e aquelas que apresentaram exalações superiores a 150 Bq/hm^2 de Rn-total mostram coeficientes de determinação altos para ambos os casos, tanto para as superfícies mais quanto para as menos rugosas. Estes dados estão ilustrados na Figura 75 e evidenciam a qualidade dos resultados obtidos, pois os valores de R^2 são acima de 0,9 para todas as regressões. De forma geral, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e recomenda-se aumentar o número de dados para melhorar a robustez da análise. O estudo estatístico abrangente das variáveis envolvidas (parâmetros de rugosidade e dados de exalação) está apresentado no item 4.4.2, página 208. Os dados apresentados nesta seção têm intuito apenas de sumarizar algumas informações.

Tabela 20. Diferença entre as exalações das superfícies das rochas em relação à rugosidade – Rn-total, Rn-222 e Rn-220.

Amostra	SUPERFÍCIE MENOS RUGOSA			SUPERFÍCIE MAIS RUGOSA			Rn-total		²²² Rn		²²⁰ Rn	
	Rn-total (Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/hm ²)	²²⁰ Rn (Bq/hm ²)	Rn-total(Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/hm ²)	²²⁰ Rn (Bq/hm ²)	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa
Azul Bahia	72	60	12	66	56	10	6	9%	4	7%	2	20%
Azul Bahia Escuro	108	89	19	114	89	25	-6	-5%	0	0%	-6	-24%
Basaltite	2673	541	2132	3306	1015	2291	-633	-19%	-474	-47%	-159	-7%
Branco Ceará	77	54	23	80	60	20	-3	-4%	-6	-10%	3	15%
Branco Cristal	691	189	502	1238	122	1116	-547	-44%	67	55%	-614	-55%
Branco Marfim	69	50	19	147	147	0	-78	-53%	-97	-66%	19	
Branco Siena	74	49	25	102	94	8	-28	-27%	-45	-48%	17	213%
Branco Suiço	56	23	33	87	68	19	-31	-36%	-45	-66%	14	74%
Café Imperial	34	15	19	47	33	14	-13	-28%	-18	-55%	5	36%
Café Imperial Claro	73	26	47	72	41	31	1	1%	-15	-37%	16	52%
Capão Bonito	2043	777	1266	3281	840	2441	-1238	-38%	-63	-8%	-1175	-48%
Cinza Castelo	127	62	65	132	61	71	-5	-4%	1	2%	-6	-8%
Cinza Corumbá	1800	761	1039	2394	894	1500	-594	-25%	-133	-15%	-461	-31%
Cinza Novo Mundo	9611	2995	6616	10300	3213	7087	-689	-7%	-218	-7%	-471	-7%
Iragua	110	54	56	234	171	63	-124	-53%	-117	-68%	-7	-11%
Lusera Fiammata	241	94	147	844	258	586	-603	-71%	-164	-64%	-439	-75%
Maracujá	353	110	243	408	135	273	-55	-13%	-25	-19%	-30	-11%
Oserone Lucido	42	37	5	139	48	91	-97	-70%	-11	-23%	-86	-95%
Pietra de Jerusalem	35	27	8	33	31	2	2	6%	-4	-13%	6	300%
Rosa Capri	374	210	164	403	228	175	-29	-7%	-18	-8%	-11	-6%
Rosso Lucido	117	46	71	131	82	49	-14	-11%	-36	-44%	22	45%
Verde Pavão	34	26	8	85	21	64	-51	-60%	5	24%	-56	-88%
Verde Ubatuba	34	17	17	46	502	1269	-12	-26%	-485	-97%	-1252	-99%
Vermelho Bragança	701	252	449	1771	502	1269	-1070	-60%	-250	-50%	-820	-65%
Vermelho Jacarandá	3984	1199	2785	3619	1149	2470	365	10%	50	4%	315	13%
Média							-222	-25%	-84	-26%	-207	6%
Desvio padrão							382	25%	141	34%	392	91%

Tabela 21. Diferença entre as exalações de Rn-total, Rn-222 e Rn-220 das superfícies das rochas em relação à rugosidade para as amostras que exalam acima de 150 Bq/hm² de Rn -total.

Amostra	SUPERFÍCIE MENOS RUGOSA			SUPERFÍCIE MAIS RUGOSA			Rn-total		²²² Rn		²²⁰ Rn	
	Rn-total (Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/hm ²)	²²⁰ Rn (Bq/hm ²)	Rn-total(Bq/hm ²)	²²² Rn (Bq/hm ²)	²²⁰ Rn (Bq/hm ²)	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa
Basaltite	2673	541	2132	3306	1015	2291	-633	-19%	-474	-47%	-159	-7%
Branco Cristal	691	189	502	1238	122	1116	-547	-44%	67	55%	-614	-55%
Capão Bonito	2043	777	1266	3281	840	2441	-1238	-38%	-63	-8%	-1175	-48%
Cinza Corumbá	1800	761	1039	2394	894	1500	-594	-25%	-133	-15%	-461	-31%
Cinza Novo Mundo	9611	2995	6616	10300	3213	7087	-689	-7%	-218	-7%	-471	-7%
Lusera Fiammata	241	94	147	844	258	586	-603	-71%	-164	-64%	-439	-75%
Maracujá	353	110	243	408	135	273	-55	-13%	-25	-19%	-30	-11%
Rosa Capri	374	210	164	403	228	175	-29	-7%	-18	-8%	-11	-6%
Vermelho Bragança	701	252	449	1771	502	1269	-1070	-60%	-250	-50%	-820	-65%
Vermelho Jacarandá	3984	1199	2785	3619	1149	2470	365	10%	50	4%	315	13%
Média							-509	-28%	-123	-16%	-387	-29%
Desvio padrão							484	26%	163	33%	433	30%

Figura 75. Gráficos de regressão para todas as amostras e para as amostras com taxas de exalação superiores ao recomendado.

4.4.1. Parâmetros de superfície obtidos

A Tabela 22 à Tabela 25 apresentam os parâmetros obtidos a partir da microscopia confocal. Os parâmetros disponíveis para caracterizar as superfícies são muitos e normatizados pela ISO 25178 (Anexo C) e pela EUR 15178N. As definições dos parâmetros adotados neste estudo estão apresentadas a seguir.

- Sq – raiz quadrada da área média (μm);
- Sa – média aritmética das alturas (μm);
- Ssk – assimetria;
- Sku – curtose;
- Sp – Altura máxima de pico (μm);
- Sv – altura máxima de vale (μm);
- Sz – Altura máxima (μm);
- Smr – razão de material a uma altura específica (%);
- Smc – razão inversa de material a uma altura específica (μm);
- Sxp – Altura do pico extremo (μm);
- Vm – Volume de material ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$);
- Vv – Volume de vazios ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$);
- Vmp – volume de picos do material ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$);
- Vmc – volume do núcleo do material ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$);
- Vvc – Volume de vazios do núcleo ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$);
- Vvv – Volume de vazios na região de vale ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$);
- Sqd – raiz quadrada da média dos gradientes ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$);
- Sdr – razão de área de interface desenvolvida (%);
- Sdc – diferença de altura das superfícies (μm).

Tabela 22. Parâmetros obtidos superfícies menos rugosas – parte I.

Amostra	ISO 25178									
	Parâmetros de Altura							Funcionais		
	Sq µm	Ssk	Sku	Sp µm	Sv µm	Sz µm	Sa µm	Smr %	Smc µm	Sxp µm
Azul Bahia	0,8603	-0,08404	5,3870	2,662	8,761	11,420	0,62700	4,17E+00	9,80E-01	1,71E+00
Azul Bahia Escuro	0,699	1,696	3,3570	3,295	1,863	5,159	0,48350	1,33E-01	7,72E-01	1,19E+00
B. Vermelho Claro	12,58000	-2,42900	13,13000	50,45000	89,05000	139,50000	7,95600	7,88E-04	1,19E+01	3,80E+01
B. Cinza Escuro	6,48300	-0,73520	4,87500	28,94000	37,22000	66,16000	4,90700	7,84E-04	7,40E+00	1,56E+01
Basaltite	13,03000	0,12260	3,22700	48,13000	66,06000	114,20000	10,45000	7,23E-03	1,68E+01	2,30E+01
Bege Ipanema	2,78800	-0,51770	4,40800	10,38000	13,02000	23,40000	2,12600	3,65E-02	3,65E-02	6,37E+00
Branco Ceará	1,18100	0,29610	3,94900	6,32800	5,04200	11,37000	0,91330	2,39E-02	1,45E+00	2,24E+00
Branco Cristal	0,49700	-0,46780	4,43500	1,47900	3,11600	4,59500	0,38900	1,86E+01	6,55E-01	9,74E-01
Branco Marfim	0,88290	-0,02465	3,59100	4,19900	3,74000	7,93900	0,68600	7,16E-02	1,09E+00	1,94E+00
Branco Siena	0,52870	-1,56200	14,37000	2,08600	6,55300	8,63800	0,38450	9,14E-01	6,21E-01	1,04E+00
Branco Suíça	20,51000	-2,43800	11,89000	40,20000	170,90000	211,10000	14,08000	4,24E-04	1,73E+01	6,30E+01
Café Imperial	0,84250	-1,59100	12,13000	3,78800	9,28000	13,07000	0,58350	2,89E-01	8,19E-01	2,03E+00
Café Imperial Claro	0,6207	-0,1199	4,673	3,108	3,166	6,274	0,4686	4,15E-01	6,91E-01	1,36E+00
Capão Bonito	1,849	-3,46	22,03	7,063	16,48	23,54	1,013	1,01E-02	1,49E+00	5,48E+00
Capão Bonito G.M.	0,6956	-0,7431	8,382	4,506	5,739	10,24	0,4979	3,77E-02	7,95E-01	1,49E+00
Cinza Castelo	2,372	-3,218	19,29	4,89	18,72	23,61	1,436	6,49E-01	2,05E+00	6,60E+00
Cinza Corumbá	0,741	-0,3494	4,483	3,166	3,857	7,022	0,5673	3,05E-01	8,11E-01	1,79E+00
Cinza Novo Mundo	0,4071	-0,3375	3,656	1,554	3,199	4,753	0,3228	7,82E+00	5,13E-01	8,42E-01
Flor di Pesco	0,6546	-0,1054	3,358	2,283	2,582	4,865	0,5106	2,71E+00	8,42E-01	1,31E+00
Iragua	1,167	-1,011	6,735	2,992	9,936	12,93	0,8598	2,60E+00	1,45E+00	2,60E+00
Lusera Fiammata	3,696	-1,517	7,081	7,636	22,72	30,36	2,68	5,59E-01	2,91E+00	1,04E+01
Maracujá	17,07	-3,045	15,67	34,13	131,2	165,3	10,44	2,58E-04	1,32E+01	5,49E+01
Marrom São Paulo	2,055	-0,07997	2,542	5,82	5,846	11,67	1,675	4,67E-01	2,76E+00	4,20E+00
Monaco Light	0,6682	0,09678	3,205	2,276	4,503	6,779	0,5233	3,55E+00	8,60E-01	1,32E+00
Onsemone Lucido	1,95	-3,847	24,19	8,114	19,17	27,28	1,123	3,72E-03	1,45E+00	5,86E+00
Pietra de Jerusalem	1,081	-0,1008	2,737	3,389	4,513	7,902	0,8776	7,90E-01	1,41E+00	2,12E+00
Pietra Lavica	50,46	-1,666	6,801	104,2	278,1	382,3	35,35	1,53E-04	4,86E+01	1,53E+02
Pietra Lavica (1)	91,89	-0,7312	3,961	240,3	422,8	663,2	70,57	3,03E-04	1,05E+02	2,34E+02
Rosa Capri	1,024	-1,055	6,802	11,09	9,6	20,69	0,7396	1,39E-03	1,10E+00	2,79E+00
Rosso Lucido	1,147	-2,543	18,38	9,334	10,66	20	0,6891	1,32E-02	9,98E-01	3,12E+00
Sodalita	0,2097	-0,01932	2,811	0,712	0,7102	1,422	0,1681	9,11E+01	2,80E-01	4,01E-01
Verde Pavão	1,087	0,007923	3,999	4,259	4,324	8,583	0,8343	6,39E-01	1,33E+00	2,23E+00
Verde Ubatuba	0,7318	0,2438	2,522	2,049	2,079	4,128	0,6039	9,26E+00	1,02E+00	1,19E+00
Vermelho Brangança	1,01400	0,12900	5,68800	4,48500	4,56700	9,05200	0,72560	5,52E-01	9,56E-01	2,09E+00
Vermelho Jacarandá	0,8969	-0,4579	3,986	3,101	3,537	6,637	0,6795	9,11E-01	1,02E+00	2,20E+00

Tabela 23. Parâmetros obtidos superfícies menos rugosas – parte II.

Amostra	ISO 25178					EUR 15178N		
	Parâmetros Funcionais (Volume)					Parâmetros de Área e Volume		
	Vm $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	Vv $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	Vmp $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	Vmc $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	Vvc $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	Vw $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	Smr %	Sdc μm
Azul Bahia	0,0629	1,04	0,0629	0,6069	0,9133	0,1269	4,166	1,520
Azul Bahia Escuro	0,03111	0,8025	0,03111	0,5508	0,7357	0,06676	0,1334	1,287
B. Vermelho Claro	0,467	11,69	0,467	7,064	9,192	2,497	0,0007879	16,26
B. Cinza Escuro	0,2621	7,652	0,2621	5,331	6,66	0,9924	0,0007838	11,99
Basaltite	0,6803	17,52	0,6803	11,42	16,21	1,313	0,007231	27,63
Bege Ipanema	0,1303	3,352	0,1303	2,329	2,963	0,3897	0,03648	5,292
Branco Ceará	0,07621	1,521	0,07621	0,972	1,391	0,1203	0,02395	2,363
Branco Cristal	0,01664	0,6599	0,01664	0,4244	0,5982	0,06176	18,61	1,023
Branco Marfim	0,04348	1,099	0,04348	0,9871	0,9871	0,1121	0,0716	1,767
Branco Siena	0,0205	0,621	1,041	0,0205	0,5555	0,07261	0,9142	0,9662
Branco Suíça	0,3284	17,63	0,3284	13,86	13,19	4,447	0,0004238	27,04
Café Imperial	0,03623	0,8509	0,03623	0,5998	0,7011	0,1499	0,2885	1,301
Café Imperial Claro	0,03592	0,7266	0,03592	0,4995	0,6403	0,08634	0,4145	1,14
Capão Bonito	0,08103	1,472	0,08103	0,7686	0,1	0,3724	0,01011	1,868
Capão Bonito G.M.	0,03631	0,8122	0,03631	0,5146	0,7133	0,09896	0,03777	1,228
Cinza Castelo	0,05933	2,089	0,05933	2,089	0,05933	0,4974	0,6493	2,861
Cinza Corumbá	0,04346	0,853	0,04346	0,5955	0,7544	0,09853	0,3047	1,35
Cinza Novo Mundo	0,01596	0,5246	0,01596	0,3654	0,4736	0,051	7,821	0,839
Flor di Pesco	0,03161	0,87520	0,03161	0,55450	0,79280	0,08235	2,70800	1,347
Iragua	0,04142	1,43800	0,04142	0,89310	1,24900	0,18810	2,60000	2,143
Lusera Fiammata	0,09843	3,98100	0,09843	2,72200	3,29500	0,68610	0,55910	6,016
Maracujá	0,39650	13,55000	0,39650	8,41400	9,50400	4,05100	0,00026	17,92
Marrom São Paulo	0,06835	2,82600	0,06835	1,94200	2,60000	0,22610	0,46740	4,543
Monaco Light	0,03647	0,89440	0,03647	0,58220	0,81700	0,07740	3,54900	1,399
Onsernone Lucido	0,03696	1,43800	0,03696	0,92750	0,1,021	0,41700	0,00372	1,949
Pietra de Jerusalem	0,04278	1,44500	0,04278	1,01600	1,32600	0,11920	0,79030	2,342
Pietra Lavica	1,24600	49,49000	1,24600	37,03000	39,05000	10,45000	0,00015	76,07
Pietra Lavica (1)	3,60300	107,60000	3,60300	78,70000	93,05000	14,56000	0,00030	171,8
Rosa Capri	0,03744	1,14800	0,03744	0,74150	0,96180	0,18620	0,00139	1,703
Rosso Lucido	0,04664	1,03000	0,06640	0,59180	0,81140	0,21870	0,01317	1,403
Sodalita	0,00849	0,28790	0,00849	0,19230	0,26450	0,02340	91,13000	0,4568
Verde Pavão	0,06211	1,38700	0,06211	0,90480	1,26100	0,12660	0,63940	2,166
Verde Ubatuba	0,02935	1,049	0,02935	0,6902	0,9929	0,05648	9,262	1,683
Vermelho Brangança	0,08948	1,049	0,08949	0,7487	0,9157	0,1329	0,5524	1,664
Vermelho Jacarandá	0,04655	1,069	0,04655	0,7567	0,9388	0,1298	0,9105	1,695

Tabela 24. Parâmetros obtidos superfícies mais rugosas – parte I.

Amostra	ISO 25178									
	Parâmetros de Altura							Funcionais		
	Sq μm	Ssk	Sku	Sp μm	Sv μm	Sz μm	Sa μm	Smr %	Smc μm	Sxp μm
Azul Bahia	10,07	0,05049	3,45	43,28	50,34	93,61	7,888	0,0001102	12,6	19,41
Azul Bahia Escuro	2,089	-0,429	3,441	6,535	9,42	15,95	1,66	0,1896	2,536	4,479
B. Vermelho Claro										
B. Cinza Escuro										
Basaltite	68,69	-2,967	13,44	109,9	433	542,9	41,82	0,0002056	51,67	245,1
Bege Ipanema										
Branco Ceará	8,893	-0,7568	4,272	24,35	50,15	74,5	6,903	0,002343	10,66	21,15
Branco Cristal	22,13	-0,8043	5,064	65,64	132,4	198,1	17,03	0,0002546	26,58	50,82
Branco Marfim	52,21	-0,7635	3,953	141,6	219	360,5	40,68	0,0001945	60,23	132,7
Branco Siena	48,6	-0,2059	3,055	159,3	210,8	370,1	38,86	8,47E-05	61,24	99,72
Branco Suíça	87,58	-0,5172	3,103	268,8	344,7	613,6	69,33	0,0001102	103,6	209,6
Café Imperial	53,97	-0,1085	2,863	181,5	218	399,5	43,43	2,87E-05	70,91	106,2
Café Imperial Claro	24,08	-0,8005	3,958	62,18	112,7	174,9	18,8	0,0001815	28,64	59,79
Capão Bonito	19,11	-0,4733	4,848	82,55	125,8	208,3	14,61	1,69E-04	23,06	40,59
Capão Bonito G.M.										
Cinza Castelo	38,34	-0,8575	4,743	101,6	207,7	309,3	29,46	7,81E-04	44,32	92,65
Cinza Corumbá	52,43	-0,342	3,228	142,1	188,3	330,4	41,01	1,71E-04	66,8	117,7
Cinza Novo Mundo	19	-0,5392	3,233	54,52	78,4	132,9	15,11	3,60E-04	23,07	44,44
Flor di Pesco										
Iragua	78,11	-0,4496	3,351	270,5	289,7	560,2	60,92	1,29E-03	92,7	184,4
Lusera Fiammata	61,91	-0,3048	3,187	209,4	282,4	491,8	49,27	8,47E-05	78,06	128,1
Maracujá	78,99	-0,4775	3,35	254,8	347,2	602	62,29	8,47E-05	94,2	180,4
Marrom São Paulo										
Monaco Light										
Onsemone Lucido	24,61	-1,505	5,347	53,19	126,1	179,3	18,65	2,20E-04	22,07	74,82
Pietra de Jerusalem										
Pietra Lavica										
Pietra Lavica (1)										
Rosa Capri	38,78	-0,7637	4,084	111,1	183,3	294,4	30,07	1,91E-05	45,4	95,27
Rosso Lucido	33,23	0,4214	4,011	145,4	114	259,4	24,74	6,41E-04	42,85	63,43
Sodalita										
Verde Pavão	22,28	-1,164	5,468	55,98	129,4	185,4	16,87	3,02E-04	24,58	58,05
Verde Ubatuba	53,75	-0,2727	3,235	176,2	215,5	391,7	42,31	8,88E-05	67,53	118,4
Vermelho Brangança	37,77	-0,262	3,072	122,2	148	270,2	30,01	1,09E-03	47,16	82,48
Vermelho Jacarandá	48,33	-0,5977	4,086	149,3	239,3	388,6	37,55	8,90E-05	59,11	110,9

Tabela 25. Parâmetros obtidos superfícies mais rugosas – parte II.

Amostra	ISO 25178						EUR 15178N	
	Parâmetros Funcionais (Volume)						Parâmetros de Área e Volume	
	Vm	Vv	Vmp	Vmc	Vvc	Vw	Smr	Sdc
	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	%	μm
Azul Bahia	0,5542	13,77	0,5542	8,625	12,01	1,137	0,0001102	20,63
Azul Bahia Escuro	0,081	2,614	0,081	1,915	2,347	0,2666	0,1896	4,263
B. Vermelho Claro								
B. Cinza Escuro								
Basaltite	0,8324	52,09	0,08324	30,7	34,44	17,65	0,0002056	65,13
Bege Ipanema								
Branco Ceará	0,2876	10,78	0,2876	7,695	9,461	1,32	0,002343	17,16
Branco Cristal	0,7629	27,23	0,7629	18,71	24,12	3,112	0,0002546	42,83
Branco Marfim	1,673	61,92	1,673	45,36	54	7,915	0,0001945	99,36
Branco Siena	2,006	63,24	2,006	44,72	57,47	5,768	8,47E-05	102,2
Branco Suíça	3,219	106,7	3,219	80,91	94,35	12,37	0,0001102	175,3
Café Imperial	2,176	72,77	2,176	50,09	66,71	6,06	2,87E-05	116,8
Café Imperial Claro	0,6205	29,08	0,6205	20,94	25,37	3,717	0,0001815	46,31
Capão Bonito	0,9078	23,96	0,9078	15,6	21,38	2,578	1,69E-04	26,99
Capão Bonito G.M.								
Cinza Castelo	1,306	45,61	1,306	32,58	39,85	5,758	7,81E-04	72,42
Cinza Corumbá	2	68,28	2	45,21	61,01	7,273	1,71E-04	106,2
Cinza Novo Mundo	0,5923	23,61	0,5923	17,27	20,92	2,689	3,60E-04	38,19
Flor di Pesco								
Iragua	3,051	96,4	3,051	67,47	84,8	11,59	1,29E-03	152,3
Lusera Fiammata	2,391	80,31	2,391	58,51	72,83	7,481	8,47E-05	131,4
Maracujá	3,063	97,1	3,063	71,52	86,11	10,98	8,47E-05	157,6
Marrom São Paulo								
Monaco Light								
Onsernone Lucido	0,4553	23,13	0,4553	20,69	18,19	4,935	2,17E-04	38,88
Pietra de Jerusalem								
Pietra Lavica								
Pietra Lavica (1)								
Rosa Capri	1,259	46,5	1,259	33,57	40,6	5,897	1,91E-05	74,17
Rosso Lucido	2,184	44,95	2,184	26,21	40,94	4,014	6,41E-04	67,14
Sodalita								
Verde Pavão	0,6086	25,15	0,6086	18,45	21,38	3,769	3,02E-04	39,83
Verde Ubatuba	2,264	69,56	2,264	47,01	62,5	7,057	8,88E-05	109,5
Vermelho Brangança	1,57	48,74	1,57	33,75	43,91	4,837	1,09E-03	77,65
Vermelho Jacarandá	1,797	60,25	1,797	41,41	53,52	6,739	8,90E-05	94,93

A partir dos dados listados na Tabela 22 à Tabela 25, realizou-se uma análise fatorial no item 4.4.2 de forma a verificar quais parâmetros são mais significativos para o estudo (explicam a maior parte da variância).

O agrupamento destas variáveis está apresentado na Figura 76. A partir destas análises foi possível indicar o polimento como tratamento superficial para diminuir as exalações dos gases torônio e radônio das amostras. A partir destes dados de superfície, com uma regressão multivariada, é possível também criar um modelo de previsão da diminuição da exalação com a diminuição relativa dos parâmetros de

superfície, mas, para isso, são necessários mais pares de dados válidos, uma prévia com os resultados atuais está apresentada a seguir. Os resultados da análise estatística dos dados de superfície estão apresentados no item 4.4.2, página 208. Os perfis das superfícies analisadas de cada amostra com a foto da amostra correspondente estão apresentados no Apêndice C (página 387) e, a partir destas imagens, é possível identificar desníveis e perturbações nas superfícies.

Figura 76. Agrupamento das variáveis de superfície.

Nota-se, a partir da Figura 76, que três grupos foram formados para a distância de 10% do dendograma. As variáveis são classificadas pelas normativas em três grupos, quais sejam, parâmetros de altura, parâmetros funcionais e parâmetros de volume. Entretanto, no estudo do agrupamento destas variáveis, nota-se que, nem sempre variáveis da mesma classificação pertencem ao mesmo grupo, por exemplo, as variáveis Smc e Ssk agrupadas juntas pertencem aos grupos, respectivamente, das variáveis funcionais e de altura.

A escolha de apenas um parâmetro que represente o aumento da rugosidade é difícil mesmo para materiais bastante homogêneos, por exemplo, peças metálicas da indústria mecânica. Isto ocorre, pois, a correta representação da superfície muitas vezes necessita de uma combinação de parâmetros, como em um caso em que há a

preocupação com imperfeições em peças, por exemplo, tem-se a altura máxima do vale (S_v), mas a densidade de vazios na região dos vales (V_{vv}) também é importante para quantificar o tamanho da imperfeição da peça. Em comparação às peças metálicas, as rochas apresentam rugosidade bastante heterogênea (BHUSHAN, 2001). Portanto, coletaram-se diversos parâmetros (apresentados na Tabela 22 à Tabela 25) e um estudo matemático foi conduzido para verificar quais parâmetros influenciam mais no caso estudado. A Figura 77 apresenta como exemplo o perfil 2D da superfície polida da amostra Iragna. A partir deste perfil, nota-se que a altura máxima do vale não é necessariamente representativa da área da superfície, pois ao observar o perfil 3D, apresentado na Figura 78, verifica-se que a superfície é bastante uniforme, mas contém imperfeições pontuais que afetam a quantificação dos parâmetros.

Figura 77. Perfil 2D – Iragna – superfície polida.

Figura 78. Perfil 3D – Iragna – superfície polida.

A Figura 79 apresenta para efeitos de comparação a superfície rugosa desta amostra. Observa-se que a superfície é mais irregular que a superfície apresentada na Figura 78.

Figura 79. Perfil 3D – Iragua – superfície rugosa.

4.4.2. Análise Estatística

A análise estatística conduzida neste item do trabalho foi realizada excepcionalmente com o *software* de estatística SPSS para Windows (versão 22), devido à dificuldade da autora em conduzir esta análise no *software* Statistica 13. Os objetivos destas análises foram avaliar as distribuições das variáveis relacionadas à exalação de radônio; analisar as relações entre variáveis e conduzir a análise fatorial nas variáveis de superfície; analisar as relações entre as amostras agrupadas pela diferença relativa de exalação; testar a hipótese de a exalação de radônio ser proporcional à superfície de exposição. Estas análises independem da origem das amostras.

Todos os testes estatísticos realizados neste capítulo foram não-paramétricos, pois não é possível assumir que as amostras obedeçam uma distribuição normal. Os conceitos estatísticos utilizados estão apresentados e explicados no Apêndice A, na página 326.

4.4.3. Análise fatorial (*data reduction*)

A análise fatorial é uma técnica de interdependência cujo propósito principal é definir a estrutura inerente entre as variáveis na análise (HAIR JR., 2009). Desta forma, pode-se utilizá-la como um método para redução do número de variáveis em uma análise, com uma perda mínima de informação. Esta estratégia foi adotada para reduzir o número de parâmetros de superfície obtidos (19) e, dessa forma, verificar se a diminuição relativa dos parâmetros de rugosidade implica na redução da exalação, nas amostras estudadas.

Primeiramente foi elaborada a matriz de correlação pelo método de *Spearman*, de forma a verificar a dependência entre as variáveis analisadas (Tabela 26). Os valores entre 0,8 e 1,0 foram considerados correlações altas (realçadas em verde na figura), enquanto que os valores entre 0,6 e 0,8 foram considerados correlações médias e os demais foram considerados correlações baixas ou baixíssimas. A partir da Tabela 26, nota-se que os parâmetros Ssk (assimetria) e Sku (curtose) são aparentemente independentes dos restantes e negativamente correlacionadas entre si (-0,758). Todos os outros parâmetros apresentaram correlações significantes entre si, sinalizadas em verde na Tabela 26.

A partir das informações contidas na matriz da Tabela 26 foi dada sequência à análise fatorial apresentada na Tabela 27. As cargas fatoriais apresentadas correspondem à correlação entre as variáveis originais e os fatores. Estes valores ao quadrado indicam qual percentual da variância em uma variável original é explicada por um fator. Desta forma, estes valores são determinantes para o entendimento de um fator em particular. Os fatores representam as combinações lineares das variáveis originais. O número de componentes escolhido depende da soma das cargas fatoriais ao quadrado para um fator. Desta forma, quando estes autovalores têm um comportamento decrescente expressivo para os primeiros componentes e, para os demais, tendem a variar pouco ou não variar, pode-se limitar o número de componentes com segurança no estudo.

Tabela 26. Matriz de correlação de *Spearman*.

Variáveis	Root mean square height - Sq (µm)	Arithmetic mean height - Sa (µm)	Skewness - Ssk	Kurtosis - Sku	Maximum peak height - Sp (µm)	Maximum pit height - Sv (µm)	Maximum height - Sz (µm)	Inverse areal material ratio - Smc (µm)	Extreme peak height - Sxp (µm)	Material volume - Vm (µm ³ /µm ²)	Void volume - Vv (µm ³ /µm ²)	Peak material volume - Vmp (µm ³ /µm ²)	Core material volume - Vmc (µm ³ /µm ²)	Core void volume - Vvc (µm ³ /µm ²)	Pit void volume - Vvv (µm ³ /µm ²)	Areal material ratio - Smr (%)	Areal height difference - Sdc (µm)
Root mean square height - Sq (µm)	1,00	,997**	-0,23	-0,15	,968**	,966**	,977**	,969**	,993**	,966**	,990**	,901**	,986**	,933**	,985**	-,874**	,986**
Arithmetic mean height - Sa (µm)	,997**	1,00	-0,19	-0,20	,968**	,957**	,970**	,974**	,986**	,970**	,996**	,905**	,992**	,943**	,977**	-,869**	,993**
Skewness - Ssk	-0,23	-0,19	1,00	-,758**	-0,19	-,380**	-,323*	-0,16	-,301*	-0,08	-0,15	-0,11	-0,13	0,02	-,336**	0,23	-0,12
Kurtosis - Sku	-0,15	-0,20	-,758**	1,00	-0,15	0,01	-0,03	-0,23	-0,08	-0,21	-0,24	-0,18	-,258*	-,373**	-0,04	0,08	-,268*
Maximum peak height - Sp (µm)	,968**	,968**	-0,19	-0,15	1,00	,945**	,970**	,939**	,963**	,963**	,961**	,912**	,955**	,917**	,954**	-,916**	,956**
Maximum pit height - Sv (µm)	,966**	,957**	-,380**	0,01	,945**	1,00	,993**	,931**	,976**	,924**	,944**	,889**	,933**	,873**	,982**	-,870**	,933**
Maximum height - Sz (µm)	,977**	,970**	-,323*	-0,03	,970**	,993**	1,00	,945**	,981**	,947**	,959**	,905**	,950**	,891**	,985**	-,888**	,949**
Inverse areal material ratio - Smc (µm)	,969**	,974**	-0,16	-0,23	,939**	,931**	,945**	1,00	,958**	,944**	,977**	,883**	,971**	,927**	,948**	-,847**	,974**
Extreme peak height - Sxp (µm)	,993**	,986**	-,301*	-0,08	,963**	,976**	,981**	,958**	1,00	,950**	,976**	,882**	,971**	,908**	,995**	-,875**	,969**
Material volume - Vm (µm ³ /µm ²)	,966**	,970**	-0,08	-0,21	,963**	,924**	,947**	,944**	,950**	1,00	,972**	,947**	,968**	,944**	,942**	-,856**	,970**
Void volume - Vv (µm ³ /µm ²)	,990**	,996**	-0,15	-0,24	,961**	,944**	,959**	,977**	,976**	,972**	1,00	,910**	,995**	,953**	,963**	-,862**	,997**
Peak material volume - Vmp (µm ³ /µm ²)	,901**	,905**	-0,11	-0,18	,912**	,889**	,905**	,883**	,882**	,947**	,910**	1,00	,904**	,896**	,879**	-,813**	,913**
Core material volume - Vmc (µm ³ /µm ²)	,986**	,992**	-0,13	-,258*	,955**	,933**	,950**	,971**	,971**	,968**	,995**	,904**	1,00	,953**	,959**	-,857**	,997**
Core void volume - Vvc (µm ³ /µm ²)	,933**	,943**	0,02	-,373**	,917**	,873**	,891**	,927**	,908**	,944**	,953**	,896**	,953**	1,00	,893**	-,822**	,959**
Pit void volume - Vvv (µm ³ /µm ²)	,985**	,977**	-,336**	-0,04	,954**	,982**	,985**	,948**	,995**	,942**	,963**	,879**	,959**	,893**	1,00	-,871**	,955**
Areal material ratio - Smr (%)	-,874**	-,869**	0,23	0,08	-,916**	-,870**	-,888**	-,847**	-,875**	-,856**	-,862**	-,813**	-,857**	-,822**	-,871**	1,00	-,854**
Areal height difference - Sdc (µm)	,986**	,993**	-0,12	-,268*	,956**	,933**	,949**	,974**	,969**	,970**	,997**	,913**	,997**	,959**	,955**	-,854**	1,00

**. Correlation is significant at the 0.01

*. Correlation is significant at the 0.05

Tabela 27. Variância combinada dos parâmetros.

Componente	Variância total explicada								
	Autovalores iniciais			Somadas de extração de carregamentos ao quadrado			Somadas de rotação de carregamentos ao quadrado		
	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa
1	13,509	79,467	79,467	13,509	79,467	79,467	13,347	78,511	78,511
2	2,007	11,803	91,270	2,007	11,803	91,270	2,071	12,180	90,691
3	,934	5,492	96,763	,934	5,492	96,763	1,032	6,071	96,763
4	,403	2,373	99,136						
5	,071	,420	99,556						
6	,029	,170	99,725						
7	,022	,130	99,855						
8	,015	,088	99,944						
9	,006	,034	99,978						
10	,003	,017	99,995						
11	,000	,002	99,997						
12	,000	,001	99,998						
13	,000	,001	99,999						
14	5,339E-05	,000	100,000						
15	3,165E-05	,000	100,000						
16	1,733E-05	,000	100,000						
17	7,621E-09	4,483E-08	100,000						
Método de Extração: Análise de Componente Principal.									

A partir da Tabela 27 pode-se afirmar que apenas com três componentes formados pelas combinações lineares das variáveis do estudo, explica-se 96,8% da variância total do conjunto de parâmetros, duas variáveis explicariam 90,7% da variância e uma variável explicaria 78,5% da variância.

A Figura 80 apresenta os componentes e seus autovalores, ou seja, mostra-se graficamente que a análise das superfícies é satisfatoriamente alcançada com três variáveis. Visualmente isto é verificado observando o ponto em que a curva do gráfico de esarpa tende a apresentar um comportamento horizontal.

Figura 80. Componentes e seus autovalores.

A seguir foi conduzida análise estatística pelo método Varimax. Este método é o mais popular entre as rotações fatoriais ortogonais da literatura e a sua vantagem é se concentrar na simplificação das colunas em uma matriz fatorial (HAIR JR., 2009).

Este método de rotação ortogonal foi proposto por Kaiser (1958). A ideia do método consiste no seguinte: para cada rotação dos fatores que ocorre, há o aparecimento de altas cargas para poucas variáveis, enquanto que as demais cargas ficarão próximas de zero.

No início Kaiser definiu a simplicidade de um fator k como a variância do quadrado de suas cargas, como representado na Equação 51:

$$51. s_k^2 = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (a_{jk}^2)^2 - \frac{1}{p^2} \left(\sum_{j=1}^p a_{jk}^2 \right)^2$$

Em que,

a_{jk} - nova carga para a variável j no fator k , $j = 1, 2, \dots, p$ e $k = 1, 2, \dots, m$.

Quando a variância atinge o máximo, o fator tem maior simplicidade de interpretação, no sentido de que as cargas deste fator tendem ou à unidade, ou à zero. O critério de máxima simplicidade de uma matriz fatorial completa é definido como a maximização da soma destas simplicidades.

Como este critério dá igual peso às variáveis com comunalidades grandes ou pequenas, Kaiser sugeriu que antes de iniciar o processo de maximização, as cargas fossem divididas pela raiz quadrada da comunalidade correspondente, o que é equivalente a normalizar os vetores de cargas a_j' . Após a matriz M ter sido obtida, as cargas finais deveriam ser multiplicadas novamente pela raiz quadrada da comunalidade. A este critério varimax modificado, Kaiser denominou critério varimax normal, e é o mais utilizado. Portanto, este método requer que as cargas dos fatores finais sejam tais que maximizem a função, representada na Equação 52.

$$52. V = \sum_{k=1}^m s_k^2 = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^p \left(\frac{a_{jk}^2}{h_j^2} \right) - \frac{1}{p^2} \sum_{k=1}^m \left(\sum_{j=1}^p \frac{a_{jk}^2}{h_j^2} \right)^2$$

Em que,

h_j^2 - comunalidade da variável j .

Ou, de uma maneira mais simples, após a multiplicação da expressão anterior por p^2 , já que a multiplicação por uma constante não afeta o processo de maximização, de acordo com a Equação 53.

$$53. V = p \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^p \left(\frac{a_{jk}}{h_j} \right)^4 - \sum_{k=1}^m \left(\sum_{j=1}^p \frac{a_{jk}^2}{h_j^2} \right)^2$$

Esta expressão foi chamada por Kaiser como critério varimax normal ou simplesmente critério varimax. O procedimento de cálculo para a solução varimax é a que se segue. Os fatores são rotacionados dois por vez de acordo com a Equação 54.

$$54. B = \Lambda M_{12} M_{13} \dots M_{kq} \dots M_{(m-1),m}$$

Em que,

$K = 1, 2, \dots, (m-1)$, e o correspondente $q = p+1, p+2, \dots, m$.

Esta expressão indica que a matriz dos fatores finais, B, corresponde ao produto das transformações de todas as combinações de pares de fatores. O conjunto completo de $m(m-1)/2$ pares de p e q (o que corresponde à combinação de m fatores 2 a 2) é chamado "ciclo". Este ciclo será repetido até que o valor de V (equação 53) mantenha-se relativamente estável.

As rotações varimax de cargas fatoriais, obtidas a partir de diferentes métodos de estimativa (componentes principais, máxima verossimilhança, etc.), em geral, não são coincidentes. Da mesma forma, se fatores comuns adicionais são incluídos no modelo, o padrão de carregamento rotacionado pode mudar consideravelmente. Se existe um único fator dominante, considerando então geral, (no qual todas as variáveis apresentam cargas altas), geralmente, ele é obscurecido por qualquer rotação ortogonal. Entretanto, este fator pode ser mantido fixo e os demais rotacionados (MENEZES *et al.*, 1978).

A Tabela 28 apresenta a matriz de componentes rotacionada pelo método Varimax.

Tabela 28. Matriz de componentes rotacionada.

Matriz de componente rotativa ^a			
Variáveis	Componente		
	1	2	3
Root mean square height - Sq (μm)	,996	,030	-,051
Arithmetic mean height - Sa (μm)	,995	,075	-,057
Skewness - Ssk	-,029	,982	,037
Kurtosis - Sku	-,184	-,941	-,063
Maximum peak height - Sp (μm)	,975	,135	-,073
Maximum pit height - Sv (μm)	,964	-,098	-,044
Maximum height - Sz (μm)	,992	-,006	-,057
Inverse areal material ratio - Smc	,989	,114	-,062
Extreme peak height - Sxp (μm)	,968	-,078	-,032
Material volume - Vm ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	,960	,179	-,074
Void volume - Vv ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	,988	,118	-,064
Peak material volume - Vmp	,928	,196	-,085
Core material volume - Vmc	,985	,122	-,062
Core void volume - Vvc ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	,978	,158	-,068
Pit void volume - Vvw ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	,943	-,126	-,024
Areal material ratio - Smr (%)	-,113	,093	,988
Areal height difference - Sdc (μm)	,982	,138	-,065
Método de Extração: Análise de Componente Principal.			
Método de Rotação: Varimax com Normalização de Kaiser.			
^a . Rotação convergida em 4 iterações.			

Nota-se a partir da Tabela 28 que há proporcionalmente mais variáveis que compõem a componente um (1) que as demais. A escolha da variável para representar as componentes foi realizada com base no maior fator apresentado em cada componente. Assim, para a análise de agrupamento foram utilizadas as variáveis: Sq, Ssk e Smr. Estas variáveis representam respectivamente a raiz quadrada da área média, a assimetria e a razão de material a uma altura de um plano específico. Estas variáveis foram as que apresentaram fatores calculados mais altos em cada grupo sinalizado em verde na Tabela 28, respectivamente, 0,996, 0,982 e 0,988.

A Figura 81 apresenta de forma gráfica o que foi apresentado na Tabela 28.

Figura 81. Ortogonalidade entre as variáveis.

Observa-se visualmente a inexistência de correlação entre as componentes comprovando que as componentes são ortogonais (independentes). A qualidade da análise fatorial foi confirmada pelo teste KMO e de esfericidade de Bartlett (apresentados na Tabela 29) que consistem em testes estatísticos da significância geral de todas as correlações em uma matriz de correlação.

Tabela 29. Teste KMO e Esfericidade de Bartlett.

Teste de KMO e Bartlett		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adequação de amostragem.		,895
	Aprox. Qui-quadrado	5032,403
Teste de esfericidade de Bartlett	df	136
	Sig.	0,000

A Figura 82 apresenta o dendrograma das amostras agrupadas de acordo com as variáveis de superfície escolhidas pela análise fatorial (Sq, Ssk e Smr).

Figura 82. Dendograma utilizando as variáveis de rugosidade.

A partir da Figura 82, nota-se que 90% do grupo 1 é formado por superfícies menos rugosas e 88% do grupo 3 é formado por superfícies mais rugosas, assim considerou-se os grupos homogêneos, sendo representadas no grupo 1 todas as superfícies mais lisas de cada amostra e, representadas no grupo 3, todas as superfícies mais rugosas de cada amostra. Já o grupo 2 contém amostras na transição entre os dois grandes grupos, esta transição também é homogênea pois ocorre gradualmente entre os grupos 1 e 3. Duas amostras (Azul Bahia e Azul Bahia Escuro), classificadas como rugosas, estão no grupo 1; assim, como duas superfícies classificadas como lisas (Pietra Lavica e Pietra Lavica 1) estão no grupo três. Observa-se assim que as classificações qualitativas iniciais de tais amostras (mais ou menos rugosas) não são adequadas, como demonstram os resultados da análise executada.

Esta análise é, portanto, útil para identificar a estrutura das variáveis de rugosidade, mostrando características de cada amostra. Além disto, visa também esclarecer os rótulos qualitativos utilizados (lisas e rugosas).

4.4.4. Análise das variáveis de exalação

Os coeficientes ρ de correlação de *Spearman* para as variáveis relativas à exalação das superfícies lisas estão apresentados na matriz de correlação da Tabela 30. Esta análise visa verificar a correlação entre as variáveis envolvidas na exalação de gás. A variável fluxo não foi incluída, pois seu uso só se justifica em caso particular, visto que ela foi determinada *a priori* para os ensaios, relativo ao volume da câmara da célula de cintilação e não houve variação significativa durante os ensaios. Os valores descritos como “Exalação 1” e “Exalação 2” correspondem ao primeiro e ao segundo RadonMapper a receber o gás, respectivamente, conforme aparato experimental apresentado na Figura 47 da página 150.

Tabela 30. Matriz de correlação para as variáveis de exalação, para as superfícies lisas.

rô de Spearman	Correlações - Liso					
	Exalação 1 - Total (Bq/m2.h) - Liso	Exalação 1 - Rn-222 (Bq/m2.h) - Liso	Exalação 1 - Rn-220 (Bq/m2.h) - Liso	Exalação 2 - Total (Bq/m2.h) - Liso	Exalação 2 - Rn-222 (Bq/m2.h) - Liso	Exalação 2 - Rn-220 (Bq/m2.h) - Liso
Exalação 1 - Total (Bq/m2.h) - Liso	1,000	,955**	,967**	,946**	,830**	,934**
Exalação 1 - Rn222 (Bq/m2.h) - Liso	,955**	1	,878**	,915**	,865**	,848**
Exalação 1 - Rn220 (Bq/m2.h) - Liso	,967**	,878**	1	,926**	,783**	,962**
Exalação 2 - Total (Bq/m2.h) - Liso	,946**	,915**	,926**	1	,917**	,921**
Exalação 2 - Rn222 (Bq/m2.h) - Liso	,830**	,865**	,783**	,917**	1	,756**
Exalação 2 - Rn220 (Bq/m2.h) - Liso	,934**	,848**	,962**	,921**	,756**	1

** A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

A análise dos resultados apresentados indica correlações significativas entre todas as variáveis, inclusive entre as exalações de isótopos diferentes entre um equipamento e outro. O mesmo comportamento ocorre para as superfícies rugosas (Tabela 31) e quando comparadas as exalações das duas superfícies para a Exalação 1 (Tabela 32) e para a Exalação 2 (Tabela 33).

Tabela 31. Matriz de correlação para as variáveis de exalação, para as superfícies rugosas.

rô de Spearman	Correlações - Rugoso					
	Exalação 1 - Total (Bq/m2.h)- Rugoso	Exalação 1 - Rn222 (Bq/m2.h)- Rugoso	Exalação 1 - Rn220 (Bq/m2.h)- Rugoso	Exalação 2 - Total (Bq/m2.h)- Rugoso	Exalação 2 - Rn222 (Bq/m2.h)- Rugoso	Exalação 2 - Rn220 (Bq/m2.h)- Rugoso
Exalação 1 - Total (Bq/m2.h)- Rugoso	1,000	,931**	,872**	,775**	,720**	,676**
Exalação 1 - Rn222 (Bq/m2.h)- Rugoso	,931**	1	,716**	,730**	,782**	,587**
Exalação 1 - Rn220 (Bq/m2.h)- Rugoso	,872**	,716**	1	,627**	,514*	,722**
Exalação 2 - Total (Bq/m2.h)- Rugoso	,775**	,730**	,627**	1	,875**	,884**
Exalação 2 - Rn222 (Bq/m2.h)- Rugoso	,720**	,782**	,514*	,875**	1	,672**
Exalação 2 - Rn220 (Bq/m2.h)- Rugoso	,676**	,587**	,722**	,884**	,672**	1

** A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

* A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).

Tabela 32. Matriz de correlação para as variáveis de exalação 1, para as superfícies lisas e rugosas.

rô de Spearman	Correlações - Liso vs Rugoso - Exalação 1					
	Exalação 1 - Total	Exalação 1 - Rn-220	Exalação 1 - Rn-222	Exalação 1 - Total	Exalação 1 - Rn-220	Exalação 1 - Rn-222
	(Bq/m ² .h) - Liso	(Bq/m ² .h) - Liso	(Bq/m ² .h) - Liso	(Bq/m ² .h) - Rugoso	(Bq/m ² .h) - Rugoso	(Bq/m ² .h) - Rugoso
Exalação 1 - Total (Bq/m ² .h) - Liso	1,000	,967**	,955**	,906**	,839**	,908**
Exalação 1 - Rn-220 (Bq/m ² .h) - Liso	,967**	1	,878**	,865**	,820**	,871**
Exalação 1 - Rn-222 (Bq/m ² .h) - Liso	,955**	,878**	1	,887**	,799**	,888**
Exalação 1 - Total (Bq/m ² .h) - Rugoso	,906**	,865**	,887**	1	,872**	,931**
Exalação 1 - Rn-220 (Bq/m ² .h) - Rugoso	,839**	,820**	,799**	,872**	1	,716**
Exalação 1 - Rn-222 (Bq/m ² .h) - Rugoso	,908**	,871**	,888**	,931**	,716**	1

** A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

Tabela 33. Matriz de correlação para as variáveis de exalação 2, para as superfícies lisas e rugosas.

rô de Spearman	Correlações - Liso vs Rugoso - Exalação 2					
	Exalação 2 - Total	Exalação 2 - Rn-220	Exalação 2 - Rn-222	Exalação 2 - Total	Exalação 2 - Rn-220	Exalação 2 - Rn-222
	(Bq/m ² .h) - Liso	(Bq/m ² .h) - Liso	(Bq/m ² .h) - Liso	(Bq/m ² .h) - Rugoso	(Bq/m ² .h) - Rugoso	(Bq/m ² .h) - Rugoso
Exalação 2 - Total (Bq/m ² .h) - Liso	1,000	,921**	,917**	,647**	,605**	,636**
Exalação 2 - Rn-220 (Bq/m ² .h) - Liso	,921**	1	,756**	,524*	,570**	,621**
Exalação 2 - Rn-222 (Bq/m ² .h) - Liso	,917**	,756**	1	,652**	,586**	,590**
Exalação 2 - Total (Bq/m ² .h) - Rugoso	,647**	,524*	,652**	1	,884**	,875**
Exalação 2 - Rn-220 (Bq/m ² .h) - Rugoso	,605**	,570**	,586**	,884**	1	,672**
Exalação 2 - Rn-222 (Bq/m ² .h) - Rugoso	,636**	,621**	,590**	,875**	,672**	1

** A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

* A correlação é significativa no nível 0,05 (bilateral).

As correlações obtidas na Tabela 33 são mais baixas em média (0,697) que os resultados na Tabela 32 (média de 0,873). Neste caso, há sentido físico nestes resultados, pois o segundo equipamento a receber o gás recebe proporcionalmente menos Rn-total devido aos decaimentos e, quando comparadas exalações diferentes (liso e rugoso), é razoável assumir que a correlação entre os dados diminua. Os dados de Exalação 1 e 2 estão apresentados na Tabela 34 e foram lançados no mesmo gráfico, como apresentado na Figura 83 para fins comparativos.

Tabela 34. Exalações 1 e 2 para as superfícies mais e menos rugosas.

Amostra	Superfície menos rugosa						Superfície mais rugosa					
	Exalação 1			Exalação 2			Exalação 1			Exalação 2		
	Total	²²² Rn	²²⁰ Rn	Total	²²² Rn	²²⁰ Rn	Total	²²² Rn	²²⁰ Rn	Total	²²² Rn	²²⁰ Rn
Azul Bahia	72	60	12	43	32	11	66	56	10	45	34	11
Azul Bahia Escuro	108	89	19	92	75	17	114	89	25	92	37	55
B. Vermelho Claro	3902	1599	2303	3261	958	2303						
B. Cinza Escuro	37	37	0	33	33	0						
Basaltite	2673	541	2132	2011	645	1366	3306	1015	2291	1953	394	1559
Bege Ipanema	381	147	234	248	126	122						
Branco Ceará	77	54	23	53	32	21	80	60	20	53	32	21
Branco Cristal	691	189	502	274	109	165	1238	122	1116			
Branco Marfim	69	50	19	55	44	11	147	147	0	131	131	0
Branco Siena	74	49	25	74	49	25	102	94	8	83	42	41
Branco Suíça	56	23	33	40	15	25	87	68	19	80	46	34
Café Imperial	34	15	19	27	12	15	47	33	14	34	31	3
Café Imperial Claro	73	26	47	65	40	25	72	41	31	65	40	25
Capão Bonito	2043	777	1266				3281	840	2441	3036	720	2316
Capão Bonito G.M.	6204	3697	2507	4223	1856	2367						
Cinza Castelo	127	62	65	84	35	49	132	61	71	85	45	40
Cinza Corumbá	1800	761	1039	1228	375	853	2394	894	1500	1451	626	825
Cinza Novo Mundo	9611	2995	6616	5460	2004	3456	10300	3213	7087	34	31	3
Flor di Pesco	18	18	0	37	37	0						
Iragua	110	54	56	48	24	24	234	171	63	155	41	114
Lusera Fiammata	241	94	147	143	55	88	844	258	586	487	146	341
Maracujá	353	110	243	353	110	243	408	135	273	207	83	124
Marrom São Paulo	670	328	342	1259	917	342						
Monaco Light	54	39	15	50	15	35						
Onsernone Lucido	42	37	5	37	37	0	139	48	91	87	29	58
Pietra de Jerusalem	35	27	8	31	13	18	33	31	2	27	23	4
Pietra Lavica	170	47	123	92	28	64						
Pietra Lavica (1)	79	43	36	52	23	29						
Rosa Capri	374	210	164	213	82	131	403	228	175	241	134	107
Rosso Lucido	117	46	71	87	39	48	131	82	49	82	27	55
Sodalita	1433	502	931	1008	415	593						
Verde Pavão	34	26	8	62	46	16	85	21	64	62	16	46
Verde Ubatuba	34	17	17	38	21	17	46	24	22	38	21	17
Vermelho Brangança	701	252	449	369	152	217	1771	502	1269	1023	152	871
Vermelho Jacarandá	3984	1199	2785	2262	686	1576	3619	1149	2470	2002	667	1335

Figura 83. (A) Gráfico de bissetriz para Exalação 1 ^{220}Rn e Exalação 2 ^{220}Rn e (B) Gráfico de bissetriz para Exalação 1 ^{222}Rn e Exalação 2 ^{222}Rn .

A partir da Figura 83 nota-se que, para o ^{222}Rn e ^{220}Rn , as medidas do segundo equipamento a receber o gás (Exalação 2) foram em sua maior parte menores que as medidas do primeiro equipamento (Exalação 1). Nos casos em que as concentrações de gás no segundo equipamento se mostram levemente maiores para algumas amostras, os valores de concentração foram baixos (próximas 50 Bq/hm²), estes valores estão apresentados na Tabela 34. Este fenômeno não tem sentido físico, devido ao decaimento radioativo dos gases. Porém, o desempenho do equipamento nesta faixa de concentrações pode justificar a imprecisão das medições. Uma recomendação ao fabricante é estipular o limite de detecção para o equipamento, corrigido anualmente pela contaminação persistente.

4.4.5. Análise entre rugosidade e exalação

Neste tópico foi investigada a hipótese da diminuição das exalações com a diminuição da rugosidade. A hipótese nula investigada no teste foi de que as exalações antes e depois são iguais. A hipótese alternativa é de que a exalação depois da diminuição da rugosidade é menor do que antes desta (unicaudal). A Figura 84 apresenta os pares de dados lançados em um gráfico de bissetriz. Pode-se observar que, para as amostras analisadas, o tratamento superficial reduz a exalação de gás das amostras, pois muitas amostras situaram-se acima da linha de bissetriz, o que

indica a superfície mais rugosa para cada amostra sempre exala mais gás do que a superfície mais lisa de cada amostra, para o Rn-222.

Figura 84. Gráfico de bisetriz para as exalações das superfícies mais lisa e mais rugosa de cada amostra, (A) Rn-220 e (B) Rn-222.

No caso do Rn-220, observa-se um comportamento menos uniforme para exalações menores, pois a célula de cintilação calibrada para Rn-222 interfere na qualidade das medições para o Rn-220. A determinação dos fatores de correção é imprescindível para uma correta avaliação das superfícies para este isótopo. A distância percorrida pelo gás na placa pode também ser um fator determinante para imprecisão nas medidas de Rn-220, pois, com meia-vida de 56 s, parte do gás decai no caminho para a célula. Este fato é minimizado no caso do Rn-222, pois a meia-vida é de 3,8 dias. Foi possível também validar a redução da exalação de Rn-220 com a diminuição da rugosidade, porém, como visto na Figura 84, é necessário ainda estudos sobre o comportamento deste isótopo nas medições com a célula de cintilação. Importante ressaltar novamente que as análises são consistentes para valores de exalação acima de 50 Bq/hm², devido à interferência do *background* da sala nas medições.

As diferenças relativas de exalação de gás foram calculadas pela Equação 55.

$$55. V = 1 - \frac{X_{depois}}{X_{antes}}$$

Em que,

X - grandeza pareada de qualquer medida antes e depois.

V - diferença relativa.

A Figura 85 apresenta o gráfico das diferenças relativas entre as superfícies lisas e rugosas das amostras com a redução percentual na exalação de ^{222}Rn . As amostras utilizadas nesta análise foram aquelas que exalam valores maiores ou iguais a 50 Bq/hm². Este resultado corrobora o resultado anterior, de que a redução da rugosidade diminui a exalação de gás radônio e quão mais expressiva for a redução de rugosidade, maior será a redução de gás.

Figura 85. Gráfico das diferenças relativas de exalação, para ^{222}Rn .

A Figura 86 apresenta o gráfico das diferenças relativas entre as superfícies lisas e rugosas das amostras com a redução percentual na exalação de ^{220}Rn . As amostras utilizadas nesta análise foram aquelas que exalam valores maiores ou iguais a 50 Bq/hm². Este resultado corrobora o resultado anterior, de que a redução da rugosidade diminui a exalação de gás radônio e quão mais expressiva for a redução de rugosidade, maior será a redução de gás, apesar das considerações sobre a acurácia das medidas de ^{220}Rn nas amostras estudadas.

Figura 86. Gráfico das diferenças relativas de exalação, para ^{220}Rn .

4.4.5.1 Teste não paramétrico

Os pares de amostras de exalação foram analisados quanto aos grupos (*clusters*) de rugosidade estabelecidos, conforme mostra o dendograma da Figura 82, na página 217. O teste de hipótese *Wilcoxon Signed Rank Test* (Apêndice A, na

página 326) foi utilizado para um nível de confiança de 95%. Este teste foi o escolhido porque a distribuição dos dados se trata de amostras pareadas com uma distribuição não-normal. Neste caso, em função das observações anteriores, apenas os pares de dados com exalações maiores que 50 Bq/hm² foram analisadas. Enfatiza-se aqui que a hipótese nula é aquela que as exalações antes e depois do polimento são iguais e que a hipótese alternativa é que a exalação depois é menor do que antes (unicaudal). A Figura 87 apresenta o resultado do *Wilcoxon Signed Rank Test* para as quinze amostras selecionadas em relação ao Rn-222. Observa-se, na Figura 87, a frequência das diferenças positivas e negativas, o número total de amostras e a significância do teste de hipótese.

Figura 87. *Wilcoxon Signed Rank Test* para ²²²Rn entre as superfícies mais e menos rugosas de cada amostra.

A Figura 88 apresenta o teste de hipótese *Wilcoxon Signed Rank Test* aplicado para ²²²Rn entre as superfícies lisas e rugosas de cada amostra. Rejeitou-se a hipótese nula para a distribuição de dados de exalações de Rn-222 analisada.

Figura 88. Teste de hipótese pelo *Wilcoxon Signed Rank Test* – Rn-222.

Sumarização de Teste de Hipótese				
	Hipótese nula	Teste	Sig.	Decisão
1	A mediana das diferenças entre Exalação 1 - Rn222 (Bq/m2.h) - Liso e Exalação 1 - Rn222 (Bq/m2.h)- Rugoso é igual a 0.	Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon de Amostras Relacionadas	,026	Rejeitar a hipótese nula.
São exibidas significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.				

A Figura 89 apresenta o resultado do Wilcoxon Signed Rank Test para as doze amostras selecionadas em relação ao Rn-220. Observa-se, na Figura 89, a frequência das diferenças positivas e negativas, o número total de amostras e a significância do teste de hipótese.

Figura 89. *Wilcoxon Signed Rank Test* para ^{220}Rn entre as superfícies mais e menos rugosas de cada amostra.

A Figura 90 apresenta o teste de hipótese *Wilcoxon Signed Rank Test* aplicado para ^{220}Rn entre as superfícies lisas e rugosas de cada amostra. Rejeitou-se a hipótese nula para a distribuição de dados de exalações de ^{220}Rn analisada.

Figura 90. Teste de hipótese pelo *Wilcoxon Signed Rank Test* – Rn-220.

Sumarização de Teste de Hipótese				
	Hipótese nula	Teste	Sig.	Decisão
1	A mediana das diferenças entre Exalação 1 - Rn220 (Bq/m ² .h) - Liso e Exalação 1 - Rn220 (Bq/m ² .h)- Rugoso é igual a 0.	Teste dos postos sinalizados de Wilcoxon de Amostras Relacionadas	,010	Rejeitar a hipótese nula.
São exibidas significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.				

Conclui-se a partir dos resultados apresentados que foi em termos estatísticos, a diminuição da rugosidade da superfície tem o potencial de apresentar menores exalações de Rn-222 e Rn-220. Este efeito é mais acentuado para exalações de Rn-222. Assim, indica-se o polimento como tratamento superficial para diminuição das exalações de ambos isótopos estudados (Rn-222 e Rn-220).

Os resultados apresentados a seguir objetivam estabelecer a relação entre a diminuição dos valores dos parâmetros de rugosidade e o tratamento superficial denominado polimento, correlacionando as diferenças relativas dos parâmetros de rugosidade com as diferenças relativas nas exalações. A Tabela 35 apresenta as diferenças absolutas e relativas das variáveis de superfície selecionadas através da análise fatorial, quais sejam Sq, Ssk e Smr. Estas variáveis representam respectivamente a raiz quadrada da área média, a assimetria e a razão de material a uma altura de um plano específico. Uma regressão múltipla entre a diferença de exalação (variável dependente) com o aumento da rugosidade e a diferença dos valores das variáveis de superfícies, também com o aumento da rugosidade, foi realizada e o resultado está apresentado na Figura 91.

Tabela 35. Diferenças relativas das variáveis de superfície escolhidas pela análise de fatorial.

Amostra	Sq		Ssk		Smr	
	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa
Azul Bahia	-6,132	-0,877	0,776	-0,902	4,166	0,000
Azul Bahia Escuro	-16,811	-0,960	-15,814	0,327	0,133	1210,626
Basaltite	-183,670	-0,934	-196,577	-1,378	0,007	48,291
Branco Ceará	-12,409	-0,913	1,096	-1,370	-1,157	-1494,704
Branco Cristal	-18,413	-0,974	0,458	-0,495	18,610	219793,496
Branco Marfim	-56,867	-0,985	0,806	-0,970	0,072	937,278
Branco Siena	-56,611	-0,991	-170,838	-3,790	0,914	10796,213
Branco Suíço	-190,590	-0,903	-174,838	-1,014	0,000	2,849
Café Imperial	-61,538	-0,986	-1,299	4,449	0,288	7571,178
Café Imperial Claro	-25,889	-0,977	0,781	-0,867	0,414	6867,268
Capão Bonito	-20,041	-0,916	-3,249	15,414	0,010	118,405
Cinza Castelo	-38,928	-0,943	-2,276	2,415	0,649	830,903
Cinza Corumbá	-58,999	-0,988	-46,829	-1,008	0,305	3597,677
Cinza Novo Mundo	-21,763	-0,982	-0,292	6,380	7,821	88202,451
Iragua	-90,563	-77,603	-0,726	2,541	2,598	1298,350
Lusera Fiammata	-89,744	-24,281	-78,177	-1,020	0,559	6602,283
Maracujá	-87,930	-5,151	-88,195	-1,036	0,000	2,051
Oserone Lucido	-25,220	-0,928	-23,697	-1,194	0,004	42,888
Pietra de Jerusalem	-7,132	-0,868	4,504	-0,978	0,790	8911,823
Rosa Capri	-43,706	-0,977	-0,184	0,211	0,001	71,851
Rosso Lucido	-58,023	-0,981	-49,453	-1,054	0,013	154,545
Verde Pavão	-57,683	-0,982	0,404	-1,020	0,639	7210,007
Verde Ubatuba	-23,348	-0,970	1,250	-1,242	9,262	104453,720
Vermelho Bragança	-39,906	-0,975	-32,271	-0,996	0,552	6523,153
Vermelho Jacarandá	-59,523	-0,985	0,827	-0,644	0,910	10267,411
Média	-54,058	-5,121	-34,952	0,430	1,902	19360,801
Desvio padrão	47,233	15,815	60,649	3,755	4,244	49241,061

Figura 91. Regressão múltipla para a variável dependente de diferença de exalação e entre as variáveis de superfície selecionadas pela análise fatorial.

Recomenda-se, para estudos futuros, a criação de um modelo de predição do aumento da exalação com o aumento quantitativo da rugosidade (medido através das variáveis de superfície). A quantidade de resultados, até agora, não é satisfatória, apesar de o valor alto de R do ajuste linear da curva (0,82) indicar o aumento da exalação relativo ao aumento da rugosidade (Figura 91). Para quantificar os dados de entrada do modelo, recomenda-se a medição das variáveis de superfície e de exalação para diferentes níveis de polimento para a mesma amostra. Esta ferramenta também é importante para classificar de forma quantitativa o que seria uma superfície denominada polida. A criação de graus de polimentos quantitativos, com uma tabela de classificação, também se faz necessária a partir desta técnica de obtenção de dados de superfície com o microscópio confocal. Outra recomendação de trabalho é utilizar diferentes abrasivos para verificar a qualidade final obtida pelo polimento e comparar a granulometria do abrasivo com o resultado final da rugosidade, como realizado por Silveira (2007) e Neves (2010). Estes resultados podem ser comparados com a exalação de Rn-total da amostra.

4.5. MÉTODO ALTERNATIVO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL EM RELAÇÃO À EXALAÇÃO DE RADÔNIO (OBJETIVO 5)

4.5.1. Prólogo – objetivo 5

Neste item foi investigada a diminuição das exalações dos gases Rn-222 e Rn- 220, mediante a aplicação de uma substância hidro/óleofugante nas superfícies das placas de rochas ornamentais selecionadas. A hipótese estudada foi de que tal substância é um método alternativo ao polimento de tratamento superficial das placas de rocha que têm exalação excessiva de radônio, de forma que a comercialização destas não seja prejudicada. As variáveis estudadas foram as exalações de radônio antes e depois da aplicação do produto. Os conceitos estatísticos necessários para a análise dos dados estão apresentados no Apêndice A (página 326) deste trabalho. Os principais resultados desta seção foram: as exalações de Rn-222 e Rn-220 diminuem em média 29% e 31%, respectivamente, com a aplicação do produto. O método de tratamento superficial foi validado com o teste não paramétrico *Wilcoxon Signed Rank Test*. Recomendam-se estudos complementares de exalação de radônio e torônio para diferentes substâncias disponíveis no mercado. É importante destacar que o fabricante do produto empregado garante que as propriedades de cor e brilho das placas não são alteradas com a aplicação, ao olho nu. Este comportamento foi confirmado mediante a medição da refletância das superfícies, com luxímetro da marca Instrutherm LDR-208, nas quais o produto foi aplicado.

4.5.1.1 Hipótese

A hipótese investigada neste item foi de que o produto PEK BIO, que contém propriedades hidro/óleofugante, pode ser utilizado como método de tratamento superficial para diminuir as exalações dos gases Rn-222 e Rn-220 de placas de rochas ornamentais selecionadas.

4.5.2. Diferença entre as exalações das superfícies antes e depois da aplicação de impermeabilizante

Os resultados das exalações de Rn-222 e Rn-220 antes e depois da aplicação do produto PEK BIO estão apresentados na Tabela 36. Nesta mesma tabela, pode-se observar que a média da diminuição total de exalação, mediante aplicação do PEK BIO, foi de 30%. O gráfico das diferenças relativas de exalação por amostra está apresentado na Figura 92.

Figura 92. Gráfico das diferenças relativas de exalação para Rn-222 e Rn-220 após aplicação de PEK BIO.

Pode-se observar, na Figura 92, que houve inversão da tendência de diminuição das exalações para uma amostra (Barroco Juruena) para os dois isótopos, para uma amostra (Rosso Lucido) para o Rn-222 e para uma amostra (Capão Bonito) para o Rn-220. Para os dois primeiros casos, os valores de exalação estavam próximos de 50 Bq/hm², o que pode justificar a inversão de tendência. Já a amostra Capão Bonito não teve diminuição da exalação de Rn-220 com a aplicação no impermeabilizante de rocha. A Figura 93 apresenta o gráfico de bisettriz para os dados de exalação antes e depois da aplicação do produto PEK BIO, que reforça a análise de que a aplicação de impermeabilizante tendeu a reduzir as exalações de Rn-222 e Rn-220 nas amostras estudadas.

Tabela 36. Diferença entre as exalações das superfícies das rochas em relação à aplicação de PEK BIO – Rn-total, Rn-222 e Rn-220.

Amostras	COM PEK BIO			SEM PEK BIO			Rn-total		Rn-222		Rn-220	
	Rn total (Bq/hm ²)	Rn ²²² (Bq/hm ²)	Rn ²²⁰ (Bq/hm ²)	Rn total (Bq/hm ²)	Rn ²²² (Bq/hm ²)	Rn ²²⁰ (Bq/hm ²)	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa	Diferença absoluta	Diferença relativa
Preto Absoluto	42	25	17	56	38	18	-14	-25%	-13	-34%	-1	-6%
Barroco Juruena	55	39	16	48	34	14	7	15%	5	15%	2	14%
Juparaná Gold	60	23	37	72	27	45	-12	-17%	-4	-15%	-8	-18%
Rosso Lucido	102	64	38	117	46	71	-15	-13%	18	39%	-33	-46%
Vermelho Bragança	195	92	103	701	252	449	-506	-72%	-160	-63%	-346	-77%
Lusera Fiammata	329	118	211	844	258	586	-515	-61%	-140	-54%	-375	-64%
Bege Dunas	346	101	245	709	224	485	-363	-51%	-123	-55%	-240	-49%
Bianco Cristal	410	108	302	691	189	502	-281	-41%	-81	-43%	-200	-40%
Verde Maritaca	1589	460	1129	2176	599	1577	-587	-27%	-139	-23%	-448	-28%
Capão Bonito	2143	528	1615	2043	777	1266	100	5%	-249	-32%	349	28%
Cinza Novo Mundo	5992	1185	4807	9611	2995	6616	-3619	-38%	-1810	-60%	-1809	-27%
Média							-579	-30%	-268	-29%	-311	-31%
Desvio padrão							1097	28%	548	34%	576	33%

Figura 93. Gráfico de bissetriz para exalações de Rn-total antes e depois da aplicação de PEK BIO.

A estatística descritiva das distribuições das exalações antes e depois da aplicação do impermeabilizante estão apresentadas graficamente na Figura 94. É possível observar a diminuição das exalações para a mediana e valores mínimos e máximos, tanto para o Rn-222, quanto para o Rn-220.

Figura 94. Gráfico *box plot* para as exalações de Rn-222 (A) e Rn-220 (B) com e sem PEK BIO.

A Figura 95 e a Figura 96 mostram os resultados do teste de hipótese *Wilcoxon Signed Rank Test* para os dois isótopos. A hipótese nula é que a média das exalações antes e depois da aplicação do PEK BIO são iguais e a hipótese alternativa é que a exalação diminui com a aplicação do PEK BIO. Neste teste as observações são ranqueadas em ordem crescente, a variável T representa a soma dos rankings do menor grupo. Em testes não paramétricos a significância escolhida para o teste não pode ser garantida, desta forma, o valor de Z obtido é utilizado para obter o valor de *p-value* que consiste em uma medida inversamente proporcional da evidência de rejeição da hipótese nula.

Figura 95. Wilcoxon Signed Rank Test para Rn-220 entre a superfície com e sem PEK BIO.

Pares de variáveis	Valores em vermelho são significativos para $p < .05000$			
	Valid N	T	Z	p-value
Rn-220 (PEK BIO) & Rn-220	11	10.00000	2.044949	0.040861

Figura 96. Wilcoxon Signed Rank Test para Rn-222 entre a superfície com e sem PEK BIO.

Pares de variáveis	Valores em vermelho são significativos para $p < .05000$			
	Valid N	T	Z	p-value
Rn-222 (PEK BIO) & Rn-222	11	6.000000	2.400593	0.016369

Em ambos casos o teste indicou a rejeição da hipótese nula. Assim, conclui-se que para as amostras estudadas, a aplicação do impermeabilizante pode ser utilizada como tratamento superficial alternativo e/ou complementar ao polimento. A medição da exalação após a aplicação é imprescindível para verificar o sucesso individual do método para cada amostra.

Recomenda-se para estudos futuros aumentar o número de amostras e testar outras substâncias existentes no mercado. Um estudo de viabilidade econômica para cada uma das substâncias disponíveis também é sugerido para avaliar a economicidade da aplicação, juntamente com a eficácia do método. As rochas ornamentais são produtos que podem ter alto valor agregado de acordo com as características estéticas do produto, portanto, é importante verificar a manutenção destas características, por exemplo, medir o brilho da placa com o equipamento denominado *glossmeter*, conforme procedimento padrão estabelecido pela norma ASTM D 523-94 (SILVEIRA, 2007). Os produtos aplicados idealmente também devem agregar valor às placas de rocha, acrescentando características positivas. Da mesma forma que o polimento pode aumentar a durabilidade da placa, a impermeabilização atua como anti-manchas, característica esta que pode ser visualizada na Figura 97.

Figura 97. Amostra após a aplicação do PEK BIO.

O estudo da refletância da superfície foi realizado com um luxímetro marca Instrutherm LDR-208, como descrito no item 3.6.2, página 156 da metodologia, e os resultados estão apresentados na Tabela 37.

Tabela 37. Intesidade luminosa refletida antes e depois da aplicação do impermeabilizante.

Amostra	Intensidade luminosa refletida (lux)			
	Natural	com PEK BIO	Diferença absoluta	Diferença relativa
Bege Dunas	112	114	1	1%
Branco Suiça	178	177	1	0%
Capão Bonito	147	152	4	2%
Jupara Gold	104	105	1	1%
Verde maritaca	138	139	1	1%

Pode-se observar na Tabela 37 que não há diferença significativa (média de 1%) na intensidade de luz refletida antes e depois da aplicação do produto impermeabilizante. Portanto, esta análise indica que o uso do produto não altera significativamente a refletância da superfície. Uma recomendação adicional é em relação à durabilidade do produto. Neste caso, a periodicidade de reaplicação deve ser avaliada, de forma a ser considerada na economicidade da técnica.

4.6. ASSOCIAÇÃO MINERALÓGICA DE U E Th E PROPORÇÕES ENTRE OS ISÓTOPOS DE RADÔNIO (OBJETIVO 6)

4.6.1. Prólogo – objetivo 6

A investigação de uma associação mineralógica preferencial de urânio e tório em rochas ornamentais foi realizada neste item. Adicionalmente, foram analisadas as proporções de radônio e torônio em amostras de rochas ornamentais selecionadas e estes dados foram comparados com as proporções de U-238 e Th-232 quantificados nas amostras. Adicionalmente, foi conduzida uma análise de agrupamento das amostras, utilizando o *Index* e as exalações, para verificar se a classificação petrológica é homogênea nos grupos formados. As concentrações de Ra-226, Th-232, e K-40 nas amostras foram comparadas com as médias globais. As variáveis analisadas neste item foram os resultados das análises químicas por FRX; da DRX; do MEV; da ativação neutrônica; da petrografia e das exalações de Rn-222 e Rn-220. Os conceitos estatísticos necessários para a análise dos dados estão apresentados no Apêndice A (página 326) deste trabalho. Os principais resultados desta seção foram: as rochas ornamentais brasileiras tendem a ser enriquecidas em Th com uma relação Th/U variando de 5 a 15. As amostras suíças possuem esta relação mais próxima da média global (3 a 4). O Th teve correlação significativa com os Elementos de Terras Raras (ETR), Cs, Rb; o Urânio com o Cs, Rb, Se e Ta; e o K apresentou boas correlações com As, Cs, Rb, REE, Zr e uma correlação negativa com Ca. Estes valores indicam que Th, Zr e REE podem provavelmente estar associados com minerais como zircão, badeleita, apatita, titanita e alanita. Tais resultados foram confirmados pelas análises de MEV. Na análise de agrupamento, as amostras monzograníticas se apresentaram concentradas nos grupos de maior perigo associado ao uso em interiores, independentemente do seu local de origem.

4.6.2. Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada de forma a identificar os minerais que contêm urânio e tório (pais das séries radioativas naturais) e suas associações com os demais minerais e elementos formadores da rocha. O U e Th são elementos abundantes na crosta terrestre. A sequência decrescente de formação preferencial é em rochas ígneas ácidas (mais de 66% de sílica); intermediárias (52 a 66% de sílica); básicas (45 a 52% de sílica) e ultrabásicas (menos que 45% de sílica). O elemento tório é 3 a 4 vezes mais abundante que o urânio na crosta terrestre, pois é menos suscetível à mobilização em ambientes supergênicos, onde a concentração dos elementos ocorre por dissolução de minerais em água ou em ácido. O tório ocorre na natureza na forma do seu cátion tetravalente e se apresenta na constituição de fosfatos, óxidos e silicatos e em minerais formadores de rochas, como monazita, torianita (ThO_2) e na torita (ThSiO_4), entre outros (MOURA *et al.*, 2011).

O urânio ocorre de forma mais acentuada em granitos, sienitos e pegmatitos graníticos. Os minerais que contêm urânio muitas vezes se apresentam nas rochas como acessórios ou secundários. Algumas rochas apresentam maior quantidade de mineral de urânio, como a uranita (UO_2), mas esta ocorrência também é pouco frequente. A distribuição do urânio no mineral pode estar ligada aos processos de reposição isomórfica, concentração e adsorção de minerais imperfeitos, inclusão na estrutura cristalina e em micro cristais. A biotita, por exemplo, retém 19% a 22% do urânio presente na rocha, já minerais pesados, como o zircão, a monazita, a apatita, a magnetita, a ilmenita e a rubelita contêm de 61% a 65% do urânio presente. (AMARAL *et al.*, 2012).

4.6.3. Análises químicas por fluorescência de raios X

A Tabela 38 e Tabela 39 apresentam os resultados das análises químicas por fluorescência de raios X.

Tabela 38. Análises químicas por fluorescência de raios X – parte I.

Amostra	Basaltite	Cinza Corumbá	Blinder Cinza Escuro	Blinder Vermelho Claro	Vermelho Bragança	Iragua	Rosso Lucido	Azul Bahia	Sodalita	Capão Bonito	Capão Bonito GM	Flor di Pesco	Branco Cristal	Branco Suíça	Maracujá	Branco Ceará	Mônaco Light
F	0,347	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,33	<0,001	<0,001	0,602	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	<0,001
Na ₂ O	2,63	3,47	3,66	2,83	2,67	3,04	2,30	11,4	16,2	2,76	3,16	0,082	3,14	4,27	3,37	5,96	<0,001
MgO	0,954	0,48	3,84	0,512	0,606	0,84	0,045	0,311	1,6	0,238	0,352	0,218	0,098	0,811	0,491	<0,001	15,3
Al ₂ O ₃	17,7	14,1	16,5	12,1	13,1	13,9	13,5	20,7	19,8	12,2	12,8	0,379	12,1	15,1	14,6	16,3	0,225
SiO ₂	56,8	68	48,5	73,8	71,5	70,8	73,3	53,0	24,2	72,6	72,2	1,08	75,6	69,8	67,9	69,5	0,662
P ₂ O ₅	0,408	0,257	1,98	0,152	0,12	0,252	0,010	0,008	0,084	0,077	0,09	0,014	0,04	0,103	0,203	0,025	<0,001
SO ₃	0,018	0,027	0,253	0,013	0,042	<0,001	0,108	0,028	0,399	0,041	0,030	0,033	0,039	0,019	0,016	-	0,066
Cl	0,014	<0,001	0,025	0,020	0,037	0,007	0,021	2,01	4,56	0,026	0,013	0,011	0,006	0,012	0,050	-	<0,001
K ₂ O	9,32	5,84	4,75	5,90	6,30	4,87	6,39	4,72	0,162	6,13	5,95	0,106	5,33	2,22	6,46	4,73	0,05
CaO	4,62	2,16	5,93	1,04	1,58	2,25	0,442	1,38	7,81	1,28	1,26	54,5	1,39	3,26	1,62	0,69	37,5
TiO ₂	0,579	0,4666	1,62	0,340	0,28	0,353	0,102	0,025	<0,001	0,253	0,287	0,017	0,083	0,343	0,547	<0,001	<0,001
Cr ₂ O ₃	0,015	<0,001	0,012	0,057	0,043	0,053	0,042	0,027	0,024	0,045	0,049	<0,001	0,055	0,067	<0,001	-	<0,001
MnO	0,125	0,064	0,212	0,047	0,047	0,068	0,040	0,127	0,445	0,049	0,035	<0,001	0,050	0,042	<0,001	-	0,018
Fe ₂ O ₃	5,16	4,17	10,7	2,34	2,49	2,98	1,61	2,35	6,75	2,88	2,80	0,257	1,47	3,13	0,038	0,055	0,011
NiO	<0,001	<0,001	0,007	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,009	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	3,39	0,954	0,094
CuO	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,016	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,022	0,019	<0,001
ZnO	0,009	0,011	0,016	0,008	0,006	0,008	0,008	0,011	0,126	0,010	0,009	0,007	0,006	0,011	<0,001	-	<0,001
Ga ₂ O ₃	<0,001	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	0,006	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,004	<0,001
Br	-	-	-	-	-	-	-	0,005	0,014	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,008	0,007	<0,001
Rb ₂ O ₃	0,055	0,024	0,012	0,025	0,039	0,024	0,027	0,030	<0,001	0,039	0,029	<0,001	0,031	0,009	<0,001	0,010	<0,001
SrO	0,159	0,033	0,171	0,021	0,017	0,03	0,003	0,006	1,02	0,014	0,014	0,020	0,005	0,072	<0,001	-	<0,001
Y ₂ O ₃	<0,001	<0,001	0,022	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,016	0,018	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	<0,001
ZrO ₂	0,056	0,037	0,021	0,034	0,03	0,016	0,017	0,101	<0,001	0,032	0,032	<0,001	0,010	0,022	0,03	0,128	<0,001
Nb ₂ O ₅	0,006	<0,001	0,005	0,006	0,006	0,003	0,005	0,032	0,014	0,009	0,005	0,006	0,004	0,003	0,044	<0,001	0,015
BaO	0,259	0,141	0,806	0,167	0,152	<0,001	0,104	<0,001	0,228	0,093	0,104	<0,001	<0,001	0,036	<0,001	-	<0,001
La ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	0,038	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,054	0,006	<0,001
CeO ₂	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	0,138	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,009	<0,001
MoO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	0,007	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	<0,001
Nd ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	<0,001	0,027	<0,001	<0,001	0,017	<0,001	0,203	<0,001	<0,001
PbO	0,013	-	0,010	<0,001	<0,001	<0,001	0,010	<0,001	0,023	0,011	0,009	0,009	0,011	<0,001	0,069	<0,001	<0,001
V ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CoO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
As ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SeO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ThO ₂	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	0,083	0,006	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-	-
WO ₃	-	0,104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,120	0,090	<0,001
PF	0,80	0,59	1,01	0,62	0,99	0,46	1,60	3,66	16,2	0,56	0,75	43,2	0,55	0,67	0,72	1,46	46,1

Tabela 39. Análises químicas por fluorescência de raios X – parte II.

Amostra	Café Imperial	Café Imperial Claro	Verde Ubatuba	Verde Pavão	Cinza Castelo	Bege Ipanema	Luserta Fiammata	Onsernone Lucido	Pietra Lavica	Vermelho Jacarandá	Azul Bahia Escuro	Cinza Novo Mundo	Marrom São Paulo	Rosa Capri	Pietra de Jerusalém	Pietra Lavica 1	Branco Marfim	Branco Siena
F	0,32	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Na ₂ O	3,42	3,69	3,28	3,62	3,03	3,91	3,71	4,34	4,11	2,61	12,1	3,05	3,71	3,36	<0,001	3,41	2,84	3,57
MgO	2,34	2,57	4,3	1,47	1,18	0,522	0,089	1,54	3,56	0,319	<0,001	0,653	0,215	0,394	0,433	3,1	0,426	0,134
Al ₂ O ₃	14,7	14,4	16,9	17,6	14,6	13,8	12,7	16,1	16,7	13,5	21,6	14,7	13,7	14,5	0,143	15,5	14,2	14,2
SiO ₂	54,1	54,7	51,3	57,1	61,2	69,8	74,9	62,8	50,3	71,6	54	67,4	71,0	69,3	0,5	46,9	70,9	72,8
P ₂ O ₅	1,33	1,67	1,18	0,678	0,603	0,121	0,029	0,292	0,489	0,12	<0,001	0,271	0,098	0,116	0,024	0,313	0,166	0,077
SO ₃	0,086	0,081	0,223	0,128	0,078	-	<0,001	0,159	0,027	0,022	0,023	0,021	0,019	0,012	0,033	3,180	0,029	<0,001
Cl	0,02	0,02	0,06	<0,001	0,07	-	<0,001	0,01	0,02	0,01	1,49	<0,001	0,020	0,03	<0,001	0,02	<0,001	<0,001
K ₂ O	8,42	8	2,6	4,92	5,58	4,15	5,72	2,74	1,93	7,29	4,58	6,71	6,33	6,42	0,046	0,684	6,52	5,13
CaO	5,83	6,12	7,45	5,18	3,74	1,94	0,542	4,7	7,71	1,43	0,824	1,93	1,23	1,59	55,2	10,4	1,44	1,94
TiO ₂	1,43	1,42	1,76	1,31	1,25	0,407	0,106	0,726	2,01	0,293	0,019	0,622	0,303	0,409	<0,001	1,73	0,299	0,099
Cr ₂ O ₃	<0,001	0,008	0,021	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	0,028	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,028	<0,001	<0,001
MnO	0,073	0,082	0,127	0,097	0,109	0,051	0,019	0,069	0,129	0,038	0,143	0,069	0,048	0,026	0,018	0,114	0,051	0,035
Fe ₂ O ₃	5,52	5,45	9,2	6,89	6,93	3,46	1,45	5,51	11,40	1,82	2,81	3,62	2,44	2,77	0,072	10,60	2,41	1,52
NiO	0,005	0,007	0,007	<0,001	0,003	-	<0,001	<0,001	0,014	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,013	<0,001	<0,001
CuO	0,004	0,006	0,007	0,004	0,004	<0,001	<0,001	0,004	0,005	0,003	<0,001	0,003	<0,001	0,003	0,003	0,006	0,003	0,003
ZnO	0,01	0,016	0,017	0,015	0,02	<0,001	0,009	0,007	0,016	0,006	0,017	0,011	0,008	0,007	0,003	0,018	0,006	0,005
Ga ₂ O ₃	0,003	0,003	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	<0,001	0,002
Br	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rb ₂ O	0,024	0,025	0,005	0,009	0,016	0,018	0,042	0,009	0,002	0,035	0,034	0,033	0,027	0,031	<0,001	<0,001	0,025	0,013
SrO	0,51	0,361	0,218	0,088	0,079	0,021	<0,001	0,054	0,101	0,019	0,005	0,018	0,020	0,026	0,031	0,072	0,011	0,018
Y ₂ O ₃	<0,001	0,004	<0,001	0,004	0,004	-	0,01	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
ZrO ₂	0,019	0,023	0,032	0,088	0,076	0,041	0,016	0,03	0,024	0,02	0,136	0,055	0,042	0,035	<0,001	0,012	0,017	0,009
Nb ₂ B ₅	<0,001	0,003	0,004	0,004	0,009	<0,001	0,004	0,002	0,004	<0,001	0,023	0,003	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
BaO	0,899	0,0715	0,263	0,388	0,389	0,109	<0,001	0,137	0,095	0,096	<0,001	0,106	0,139	0,151	<0,001	0,025	<0,001	0,082
La ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CeO ₂	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,062	<0,001	0,029	<0,001	0,038	<0,001	0,071	<0,001	0,023	<0,001	<0,001
MoO ₃	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,011	<0,001	<0,001	0,035	<0,001	0,039	0,017	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Pr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nd ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V ₂ O ₅	<0,001	0,016	<0,001	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	0,044	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,011	<0,001
CoO	0,007	0,007	0,008	0,007	0,012	0,040	0,017	0,014	<0,001	0,016	<0,001	0,016	0,017	0,02	<0,001	0,009	0,03	0,022
As ₂ O ₃	0,004	0,003	<0,001	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	0,006	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	0,004	<0,001
SeO ₂	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	-	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,007	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
ThO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WO ₃	0,034	0,036	0,052	0,068	0,086	0,284	0,125	0,085	0,023	0,344	0,04	0,186	0,116	0,115	<0,001	0,038	0,159	0,128
PF	0,88	0,56	0,97	0,38	0,86	1,33	0,52	0,70	1,22	0,38	2,12	0,49	0,52	0,65	43,50	3,76	0,46	0,16

Cálculos efetuados, a partir dos resultados apresentados na Tabela 38 e Tabela 39, indicam que 89% das amostras apresentam ZrO_2 em sua composição, que se mostrou um indicativo da presença de Th nas amostras pelas análises de MEV realizadas e apresentadas a seguir. As amostras que não contém ZrO_2 foram: Sodalita (sodalita foidolito), Flor di Pesco (mármore), Mônaco Light (mármore) e Pietra de Jerusalém (calcário). Estas amostras, com exceção da Sodalita, foram as menos radioativas tanto em relação aos índices de perigo radiológicos (item 4.2.3, na página 185), quanto em relação às exalações (item 4.1.5, na página 164).

Apesar de a técnica de fluorescência de raios X não ser a mais indicada para a análise de elementos traço como U e Th, as amostras Sodalita e Capão Bonito apresentaram concentrações de ThO_2 de 0,083% e 0,006%, respectivamente. Estas duas amostras foram as únicas em que foi possível determinar a presença de Th por esta técnica. A exalação específica de gás torônio (^{220}Rn) destas rochas foi 1266 Bq/hm^2 e 931 Bq/hm^2 , para as amostras Capão Bonito e Sodalita, respectivamente (item 4.1.5, na página 164). Tais concentrações estão acima do valor recomendado para as exalações totais de radônio neste estudo. Estes dados são compatíveis visto que o ^{220}Rn provém do ^{232}Th , o único isótopo do tório encontrado em minerais.

Para análises das composições de cada amostra, é interessante cruzar as informações dos resultados da ativação neutrônica, da análise química por fluorescência de raios X, das difrações de raios X e os resultados do MEV para entender as associações entre os elementos. Estas análises estão apresentadas no item 4.6.7.

A fluorescência de raios-X foi conduzida de forma a buscar óxidos que compõem cada amostra. Observa-se, na Tabela 38 e Tabela 39, que a maior parte das amostras apresentou teor de SiO_2 bastante altos. Neste caso, os cálculos indicaram uma média de 58%, o que é compatível com o esperado para rochas ricas em minerais silicáticos, sendo 46% das amostras rochas ácidas, ou seja, são amostras que contêm 66% de sua composição de SiO_2 (KLEIN; DUTROW, 2009). Destaca-se o baixo teor de CaO também compatível com rochas graníticas, basálticas ou gnáissicas e a presença de K_2O em todas as amostras, o que pode indicar a presença

de feldspatos e/ou micas. A presença de potássio também pode ser um indicativo de radiação naturalmente emitida das rochas, por causa do isótopo K-40 que em seu decaimento emite radiação beta e gama.

A Tabela 38 difere da Tabela 39 principalmente devido ao ThO_2 que foi possível identificar em duas amostras, como já comentado. Observa-se também que as amostras Flor di Pesco, Mônaco Light, Pietra de Jerusalém e a Sodalita diferem das demais amostras no que compete aos teores de SiO_2 , quais sejam, 1,08, 0,66, 0,54 e 24,20, respectivamente. A média do teor de SiO_2 das demais amostras foi 65%. Estas amostras também apresentaram os maiores teores de CaO, 54,5%, 37,5%, 55,2% e 7,8% respectivamente.

Através da Tabela 38 e da Tabela 39, conclui-se então que todos os resultados das análises químicas foram compatíveis com a premissa inicial de que as amostras de rochas graníticas são a maioria neste estudo, por causa dos teores altos de SiO_2 . No total, foram estudadas vinte e oito (28) amostras ígneas, seis (6) metamórficas (2 mármore e 4 gnaisses) e uma (1) sedimentar. Esta análise baseia-se na petrografia apresentada no item 4.6.5 e confirmada pelas análises de FRX e DRX.

A Figura 98 apresenta o agrupamento realizado com as variáveis obtidas na análise química. Pode-se observar que a classificação da rocha, obtida na petrografia (item 4.6.5), foi confirmada com estes resultados. O rótulo das amostras utilizadas no gráfico está na seguinte ordem: sigla do nome comercial, sigla da cor predominante, sigla do local de origem e sigla simplificada da classificação petrológica da rocha. A Tabela 40 apresenta os nomes por extenso das litologias obtidas através da análise das lâminas das amostras em microscópio, conforme técnica apresentada no item 4.6.5, página 133.

Figura 98. Agrupamento realizado com os resultados das análises químicas.

Tabela 40. Siglas das litologias utilizadas no agrupamento das amostras.

Sigla	Litologia simplificada
MGN	Monzogranito
SGN	Sienogranito
GNS	Gnaisse
SNT	Sienito
MAR	Mármore
GNR	Granodiorito
CRT	Calcarenito
BAT	Basalto
DIB	Diabásio
SDT	Sodalita
MGT	Mangerito

Traçando uma linha horizontal em 20% no dendrograma (distância euclidiana entre as observações normalizada para 100%), observam-se três grupos homogêneos, o primeiro contendo as amostras com altos valores de magnésio e cálcio (mármore e calcário); o segundo grupo que contém os monzogranitos,

sienogranitos e gnaisses; e o terceiro grupo contendo os basaltos, o diabásio, os sienitos, a sodalita, os mangeritos e os monzodioritos. Duas amostras, Cinza Castelo (CCS) e Branco Marfim (BM) apresentaram inconsistência na classificação. A amostra CCS foi classificada pela petrografia como um monzogranito, mas foi agrupado junto aos sienitos e granodiorito; a amostra BM foi classificada como monzodiorito, mas foi agrupada juntos aos monzogranitos.

4.6.4. Difração de raios X

A Tabela 41 e a Tabela 42 apresentam os sumários dos resultados de DRX. Pode-se observar que todas as amostras, com exceção dos mármore Flor di Pesco e Mônaco Light, do calcário Pietra de Jerusalém, das Pietras Lavicas e da Sodalita, apresentam feldspato potássico na composição. Os feldspatos potássicos observados pela técnica da difração de raios-X foram o ortoclásio/microclínio e a sanidina. A mineralogia obtida através das lâminas petrográficas foi confirmada com os resultados da difração de raios X para classificação satisfatória das amostras de rocha estudadas.

Entre os minerais identificados nas amostras, destacam-se aqueles que possuem K na fórmula, como a própria flogopita, a leucita, o microclínio, o ortoclásio e a sanidina. O potássio pode contribuir para emissões altas de materiais naturalmente radioativos, pois o seu isótopo ^{40}K emite radiação beta e gama do seu decaimento. A abundância isotópica do ^{40}K é 0,0118% e a sua atividade específica é 262000 Bq/g, enquanto que as atividades específicas do ^{238}U e do ^{232}Th são 12348 Bq/g e 4057 Bq/g, respectivamente (GILMORE; HEMINGWAY, 1995). O K total foi medido por ativação neutrônica e a atividade do ^{40}K foi medida através da espectrometria gama.

Tabela 41. Sumário resultados DRX – parte I.

Mineral	Fórmula Química	Basaltite	Blinder Cinza Escuro	Blinder Vermelho Claro	Vermelho Bragança	Iragna	Azul Bahia	Sodalita	Capão Bonito	Capão Bonito GM	Flor di Pesco	Branco Cristal	Branco Suíça	Rosso Lucido	Branco Marfim	Branco Siena	Mônaco Light	Maracujá	Marrom São Paulo
Sandina	$K(Si_3AlO_8)$					✓													
Sanidina	$(K,Na)(Si_3Al)O_8$	✓																	
Labradorita	$Ca_{0,65}Na_{0,32}Al_{1,62}Si_{2,38}O_8$	✓																	
Ortoclásio	$KAlSi_3O_8$	✓											✓	✓	✓	✓			
Flogopita	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	✓			✓				✓	✓	pp	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Flogopita	$K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2$		✓	✓		✓	✓	pp											
Fluorapatita	$Ca_5(PO_4)_3F$																		
Leucita	$K(AlSi_2O_6)$	✓																	
Quartzo	SiO_2			✓	✓			pp	✓	✓	pp	✓	✓	✓	✓	✓	pp	✓	✓
Albita	$Na(AlSi_3O_8)$						✓			✓				✓					✓
Albita	$(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$		✓	✓	✓	✓			✓			✓	✓		✓	✓		✓	
Microclínio	$KAlSi_3O_8$		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓						✓	✓
Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$				pp	pp			✓	pp		✓	✓	✓				pp	pp
Hidroxiapatita	$Ca_5(PO_4)_3(OH)$		✓																
Anfíbólio	$Al_{3,2}Ca_{3,4}Fe_{4,02}K_{0,6}Mg_6NaSi_{12,8}O_{44}(OH)_4$		✓																pp
Biotita	$KFeMg_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$																		
Clinocloro	$(Mg,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$			✓					pp										
Sodalita	$Na_4Cl(Al_3Si_3O_{12})$						✓	✓											
Cancrinita	$Na_6Si_6Al_6O_{24}Ca_{1,5}(CO_3)_{1,5}(H_2O)_2$						pp												
Anquerita	$Ca_{1,01}Mg_{0,45}Fe_{0,54}(CO_3)_2$							✓											
Calcioburbankita	$(Na,Ca)_3(Ca,Ln,Sr)_3(CO_3)_5$							pp											
Andesina	$Na_{0,499}Ca_{0,491}(Al_{1,488}Si_{2,506}O_8)$																		
Enstatina	$(Mg_{1,568},Fe_{0,432})Si_2O_6$																		
Muscovita	$K(Al_{1,91},Fe_{0,09})(Si_3,Al)O_{10}(OH)_2$																		
Pigeonita	$Ca_{0,18}Mg_{1,21}Fe_{0,58}(SiO_3)_2$																		
Bassanita	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$																		
Diopsídio	$CaMgSi_2O_6$																		
Analcima	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$																		
Halita	$NaCl$																		
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$																✓		
Calcita	$CaCO_3$										✓						✓		

pp = possível presença

Tabela 42. Sumário resultados DRX – parte II.

Mineral	Fórmula Química	Pietra Lavica	Vermelho Jacarandá	Azul Bahia Escuro	Cinza Novo Mundo	Cinza Castelo	Cinza Corumbá	Lusera Fiammata	Onsernone Lucido	Verde Ubatuba	Verde Pavão	Café Imperial	Café Imperial Claro	Branco Ceará	Bege Ipanema	Pietra de Jerusalém	Pietra Lavica (1)	Rosa Capri
Sandina	$K(Si_3AlO_8)$										✓							
Sanidina	$(K,Na)(Si_3Al)O_8$																	
Labradorita	$Ca_{0,68}Na_{0,32}Al_{1,62}Si_{2,38}O_8$																	
Ortoclásio	$KAlSi_3O_8$									✓		✓	✓					
Flogopita	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$		✓		✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓
Flogopita	$K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2$																	
Fluorapatita	$Ca_5(PO_4)_3F$												✓					
Leucita	$K(AlSi_2O_6)$																	
Quartzo	SiO_2		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	pp		✓
Albita	$Na(AlSi_3O_8)$			✓	✓		✓	✓				✓	pp	✓	✓			✓
Albita	$(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$		✓			✓			✓									
Microclínio	$KAlSi_3O_8$		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓			✓
Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$							pp										pp
Hidroxipatita	$Ca_5(PO_4)_3(OH)$																	
Anfíbolio	$Al_{3,2}Ca_{3,4}Fe_{4,2}K_{0,8}Mg_6NaSi_{12,8}44(OH)_4$									✓	✓	✓	✓					pp
Biotita	$KFeMg_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$									✓								
Clinocloro	$(Mg,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$					pp	pp		pp									
Sodalita	$Na_4Cl(Al_3Si_3O_{12})$			✓														
Cancrinita	$Na_6Si_6Al_6O_{24}Ca_{1,5}(CO_3)_{1,5}(H_2O)_2$			pp														
Anquerita	$Ca_{1,01}Mg_{0,45}Fe_{0,54}(CO_3)_2$																	
Calcioburbankita	$(Na,Ca)_3(Ca,Ln,Sr)_3(CO_3)_5$																	
Andesina	$Na_{0,499}Ca_{0,491}(Al_{1,488}Si_{2,506}O_8)$	✓								✓	✓		✓				✓	
Enstatina	$(Mg_{1,568}, Fe_{0,432})Si_2O_6$	✓															✓	
Muscovita	$K(Al_{1,91}, Fe_{0,09})(Si_3, Al)O_{10}(OH)_2$			✓		✓		✓									✓	
Pigeonita	$Ca_{0,18}Mg_{1,21}Fe_{0,58}(SiO_3)_2$																pp	
Bassanita	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$																pp	
Diopsídio	$CaMgSi_2O_6$	✓																
Analcima	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$			✓														
Halita	$NaCl$			pp														
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$															✓		
Calcita	$CaCO_3$															✓		

pp = possível presença

As correlações entre os minerais maiores e os óxidos quantificados na fluorescência de raios X foram realizadas no item 4.6.7, página 301. A correlação inversa alta ($\geq 0,7$) entre os feldspatos potássicos e o SrO (- 0,871) é compatível com a substituição de elementos traços nas amostras estudadas. A correlação positiva entre o SrO e os plagioclásios (0,659) em magmas graníticos reduzidos também é um resultado compatível com a literatura demonstrado estatisticamente neste estudo (BARKER, 1983; BEST; CHRISTIANSEN, 2001).

O elemento rubídio (Rb) também apresentou correlação positiva baixa com o K, compatível com a literatura (0,350), estes elementos têm raio iônico próximos, mas altas concentrações de potássio indicam alguma concentração de Rb na amostra. O ^{87}Rb com abundância isotópica de 27,83% é radioativo e decai para ^{87}Sr . As características cristal químicas do Sr não se assemelham às do Rb, sendo mais próximas à do Ca, portanto, Sr se concentra relativamente mais em minerais cálcicos. Este comportamento foi observado nas amostras analisadas, as quais apresentaram correlações de - 0,671 entre o Ca e Rb e 0,540 entre Ca e SrO (Tabela 127).

4.6.5. Petrografia

A identificação dos minerais individuais, das suas texturas, das composições, da abundância e dos tamanhos dos grãos foi realizada. A partir destas informações, foi possível classificar as rochas, tanto em relação à sua origem quanto a modificações posteriores.

Os minerais são classificados em grupos, quais sejam quartzo, feldspatos, piroxênios, anfibólios e micas. Os feldspatos são divididos em feldspatos alcalinos (ortoclásio, sanidina, anortoclásio, microclínio, entre outros) e plagioclásios (albita, oligoclásio, andesina, labradorita, anortita e bytownita). As proporções destes grupos de minerais definem a classificação da rocha. Os granitos, por exemplo, apresentam como minerais maiores o quartzo, feldspatos alcalinos, plagioclásios e, como minerais menores a biotita e/ou muscovita (micas), a hornblenda (anfibólio), entre outros.

As amostras foram classificadas e as rochas plutônicas estudadas foram lançadas em um gráfico QAPF, sendo a letra “Q” representando o quartzo, a letra “A” o feldspato alcalino, a letra “P” o plagioclásio e a letra “F” o feldspatóide (Figura 99). Este sistema de classificação é o proposto pela IUGS – *International Union of Geological Sciences*, que evita enviesamentos individuais e contradições entre petrólogos (BEST; CHRISTIANSEN, 2001). Este sistema de classificação foi proposto por Streckeisen (1976). As amostras vulcânicas também foram classificadas pelo sistema QAPF próprio, mas todas apresentaram a mesma classificação (basalto/andesito), por isso não foram representadas graficamente.

Na mesma Figura 99, as amostras indicadas com a cor vermelha representam as rochas que possuem composição granítica. A maior parte dessas rochas possuem composição monzogranítica, com variações desde sienito a granodiorito. As amostras representadas com a coloração azul correspondem a rochas ígneas de composição alcalina. As amostras representadas pela cor verde são rochas charnockíticas, as quais possuem composição quartzo feldspática com a presença de ortopiroxênio. Essas amostras são classificadas como quartzo mangerito. O sumário dos resultados obtidos na descrição das lâminas petrográficas está apresentado na Tabela 43, Tabela 44 e Tabela 45.

Figura 99. Gráfico QAPF.

Tabela 43. Petrografia – parte I.

	Amostra	Capão Bonito GM	Blinder Cinza Escuro	Azul Bahia Escuro	Branco Suiça	Branco Siena	Vermelho Bragança	Branco Cristal	Basaltite	Cinza Corumbá	Maracujá	Rosso Lucido
Mineralogia (%)	Quartzo	32	-	-	29	25	29	37	-	35	30	34
	Feldspato potássico	39	16	28	22	57	32	33	1	23	34	42
	Plagioclásio	26	34	31	36	13	31	26	69	31	27	21
	Nefelina	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-
	Biotita	2	24	4	9	1	6	3	2	10	8	2
	Hornblenda	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Piroxênio	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-
	Sodalita	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-
	Opacos	Traço	2	-	-	-	-	Traço	9	-	-	-
	Apatita	Traço	5	-	Traço	Traço	Traço	-	2	Traço	-	-
	Zircão	1	-	-	Traço	Traço	1	Traço	-	Traço	Traço	-
	Titanita	-	3	-	-	Traço	-	-	-	Traço	-	Traço
	Alanita	Traço	-	-	Traço	-	Traço	-	-	-	Traço	-
	Rutilo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Granada	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-
	Muscovita	Traço	-	1	3	1	-	-	-	-	Traço	1
	Clorita	Traço	8	-	Traço	-	-	Traço	-	Traço	1	-
	Epidoto	-	4	Traço	-	Traço	-	Traço	-	-	-	-
	Carbonato	Traço	Traço	Traço	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cor	Laranja com cinza	Cinza escuro	Azul	Cinza claro	Branco	Vermelha alaranjada com cinza	Branco	Cinza escuro	Cinza	Laranja claro	Vermelha alaranjada
	M' (%)	2	36	4	-	5	6	3	28	10	9	2
Alteração dos minerais	Estrutura	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Foliada	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Fluxo magmático	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica
	Textura	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular lepidoblastica	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	Porfiritica	Inequigranular	Inequigranular
	Tamanho dos grãos (mm)	0,25 - 3	0,00275-0,875	0,05 - 3	0,1 - 2,3	0,07 - 4	0,08 - 10	0,025 - 3	M: 0,01-0,4 P: 0,5-2,75	M: 0,125 - 1,7 P: 2,3 - 6	0,225 - 6,25	0,5 - 3,125
	Feldspato potássico	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Fraco	Incipiente
	Plagioclásio	Fraco	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Fraco	Incipiente	Moderado	Fraco	Incipiente
	Biotita	Fraco	Cloratizado	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Fraco	Fraco	Moderado	Incipiente	Fraco	Seritizada
	Piroxênio	-	-	-	-	-	-	-	Moderado	-	-	-
	Classificação	Monzogranito	Biotita Monzodiorito	Foide Monzodiorito	Biotita gnaiss com muscovita	Sienogranito	Monzogranito	Monzogranito	Basalto	Biotita Monzogranito	Biotita Monzogranito	Sienogranito

Tabela 44. Petrografia – parte II.

	Amostra	Flor di Pesco	Capão Bonito	Blinder Vermelho Claro	Café Imperial Claro	Rosa Capri	Pietra Lavica	Onsernone Lucido	Lusera Fiammata	Vermelho Jacarandá	Cinza Novo Mundo	Verde Pavão
Mineralogia (%)	Quartzo	-	33	34	-	26	-	21	37	43	34	14
	Feldspato potássico	-	36	23	66	37	-	12	29	22	31	36
	Plagioclásio	-	25	38	8	32	52	38	28	30	18	33
	Nefelina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Biotita	-	5	4	4	3	-	21	Traço	3	11	1
	Hornblenda	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	9
	Piroxênio	-	-	-	-	-	27	-	-	-	-	4
	Sodalita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Opacos	1	-	-	2	Traço	16	1	-	1	-	3
	Apatita	-	Traço	Traço	1	-	5	1	Traço	-	Traço	Traço
	Zircão	-	1	Traço	-	Traço	-	Traço	-	Traço	1	Traço
	Titanita	-	-	-	2	-	-	Traço	Traço	-	-	-
	Alanita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Rutilo	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	Granada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Muscovita	-	Traço	-	-	Traço	-	-	4	2	4	-
	Clorita	-	1	1	-	Traço	-	3	Traço	Traço	Traço	-
	Epidoto	-	-	-	-	Traço	-	3	Traço	-	Traço	-
	Carbonato	99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cor	Branco	Laranja com cinza	Laranja claro e cinza	Marrom claro	Laranja claro	Cinza escuro	Cinza claro a cinza	Cinza esverdeado	Cinza alaranjado	Cinza escuro	Verde escuro
	M ⁱ (%)	-	6	5	22	3	43	24	-	5	-	17
Alteração dos minerais	Estrutura	Isotrópica com veios	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	gnaisseica Foliada	Isotrópica	Foliada	Isotrópica
	Textura	Equigranular	Porfíritica	Inequigranular	Inequigranular	Porfíritica	Porfíritica	Inequigranular	Inequigranular	Porfíritica	Inequigranular	Porfíritica
	Tamanho dos grãos (mm)	0,12 - 2,37	M: 0,45 - 4,8 P: 8	0,62 - 8,75	0,02 - 10	M: 0,75 - 3,5 P: up to 22	M: 0,005-0,275 P: 0,825-1,65	0,5 - 4	0,03 - 4	M: 0,475 - 5,2 P: >10	0,01 - 3,35	M: 0,025-3,5 P: 10
	Feldspato potássico	-	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	-	Fraco	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente
	Plagioclásio	-	Moderado	Fraco	Fraco	Forte	Incipiente	Fraco	Fraco	Forte	Incipiente	Incipiente
	Biotita	-	Incipiente	Fraco	Incipiente	Incipiente	-	Incipiente	Fraco	Fraco	Incipiente	Incipiente
	Piroxênio	-	-	-	-	-	Forte	-	-	-	-	Forte
Classificação		Mármore	Monzogranito	Monzogranito	Hornblenda Sienito	Monzogranito	Basalto	Biotita Granodiorito	Gnaisse com muscovita	Monzogranito	Biotita gnaisse com muscovita	Hornblenda Quartzo Mangerito

Tabela 45. Petrografia – parte III.

	Amostra	Café Imperial	Iragna	Azul Bahia	Sodalita	Verde Ubatuba	Mônaco Light	Pietra Lavica (1)	Cinza Castelo	Pietra de Jerusalem	Branco Marfim
Mineralogia (%)	Quartzo	-	38	-	-	7	-	-	25	-	45
	Feldspato potássico	60	18	33	Traço	14	-	-	26	-	29
	Plagioclásio	11	30	20	Traço	14	-	59	26	-	16
	Nefelina	-	-	1	4	-	-	-	-	-	-
	Biotita	Traço	12	-	-	13	-	-	17	-	1
	Hornblenda	23	-	-	-	2	-	-	-	-	-
	Piroxênio	-	-	5	-	7	-	29	-	-	-
	Sodalita	-	-	39	80	-	-	-	-	-	-
	Opacos	2	Traço	-	Traço	3	Traço	12	1	-	Traço
	Apatita	4	Traço	-	-	2	-	-	1	-	-
	Zircão	-	-	-	-	Traço	-	-	Traço	-	-
	Titanita	3	-	-	-	Traço	-	-	2	-	Traço
	Alanita	-	-	-	-	-	-	-	Traço	-	-
	Rutilo	Traço	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Granada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
	Muscovita	-	1	-	-	-	-	-	Traço	-	Traço
	Clorita	-	1	-	-	Traço	-	-	Traço	-	-
	Epidoto	-	Traço	-	-	-	-	-	-	-	-
	Carbonato	-	-	1	16	1	Traço	-	Traço	100	Traço
	Cor	Marrom escuro e verde escuro	Branco a Cinza claro	Azul	Azul	Verde escuro	Branco	Cinza avermelhado	Cinza	Branco	Branco
	M' (%)	25	-	5	0	25	-	41	18	-	11
Alteração dos minerais	Estrutura	Isotrópica	Foliada	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica com porosidade secundária Calcarenito clástico sustentado	Isotrópica
	Textura	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	Porfírica	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular		Porfírica
	Tamanho dos grãos (mm)	0,125 - 10	0,01 - 7	0,03 - 6	M: 0,0125-3 P: 6	0,75 - 3,5	0,075 - 0,875	0,05 - 3	0,025 - 2,5	0,2-0,8	M: 0,075 - 3 P:10
	Feldspato potássico	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Incipiente	-	-	Incipiente	-	Incipiente
	Plagioclásio	Fraco	Incipiente	Incipiente	Incipiente	Fraco	-	Incipiente	Fraco a Moderado	-	Fraco
	Biotita	Incipiente	Moderado	-	-	Incipiente	-	-	Incipiente	-	Moderado
	Piroxênio	-	-	Fraco	-	Forte	-	Moderado	-	-	-
	Classificação	Hornblenda Sienito	Biotita gnaiss	Foide Sodalita Monzosienito	Sodalita Foideolito	Quartzo Mangerito	Mármore	Diabásio	Biotita Monzogranito	Calcarenito Palesparito	Granada Monzogranito

4.6.6. MEV

Alguns dos espectros de raios X obtidos com a Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) do MEV estão apresentados nas figuras a seguir (Figura 101 à Figura 218). Estas análises visaram identificar associações preferenciais de U e Th nas amostras, utilizando o DRX e as descrições das lâminas de rocha como ferramentas acessórias. Nas mesmas figuras há indicativo de que a maior parte das fases minerais que contém U ou Th se apresenta com a badeleita - ZrO_2 ou zircão - ZrSiO_4 ; titanita - CaTiSO_3 ; alanita - $\text{Ca}_2(\text{Fe, Ti, Al})_3(\text{O, OH})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)$; e na própria monazita – $(\text{Ce, La, Th})\text{PO}_4$. Estes minerais estão contidos em feldspatos sódicos ou potássicos, como a albita e o microclínio e muitas vezes apresentam elementos acessórios, como ETR e Nb, Ce, Y, e Ti (BEA, 1996), que puderam ser identificados em algumas amostras nas análises químicas por fluorescência de raios-X e, principalmente nas análises de ativação neutrônica, que visou verificar a associação entre a composição química e a radioatividade das amostras (Tabela 38 e Tabela 39, páginas 239 e 240 respectivamente). Esta análise está apresentada no item 4.6.7, página 301.

Esta análise objetivou explorar as relações entre os elementos U e Th e os outros elementos formadores de minerais, nas amostras estudadas. Desta forma, utilizou-se o contraste por peso atômico para buscar apenas as partículas que contivessem elementos pesados em sua composição. Após identificar as partículas pesadas, foram realizados o número necessário de EDS investigativos para procurar U e Th e analisar as associações entre os minerais que continham os elementos de interesse com os demais. O número de EDS por amostra dependeu do número de partículas com peso atômico alto encontradas. Nos casos em que, para um mesmo grão, mais de um EDS apresentou os mesmos elementos com intensidades parecidas, os resultados em redundância foram omitidos. As amostras submetidas a este ensaio foram: Azul Bahia, Basaltite, Branco Cristal, Capão Bonito GM, Capão Bonito, Cinza Corumbá, Cinza Novo Mundo, Flor di Pesco, Iragna, Lusera Fiammata, Maracujá, Rosa Capri, Rosso Lucido, Vermelho Bragança e Vermelho Jacarandá, Marrom São Paulo e Sodalita. Todas as amostras que indicaram *Index* maior que 1,0 e exalação de Rn-total maior que 150 Bq/hm² foram analisadas no MEV.

Observa-se nas figuras a seguir (Figura 101 à Figura 218) que a presença de ETR se mostrou um forte indicador da presença dos isótopos radioativos de interesse nas amostras estudadas, pois muitas vezes não é possível encontrar uma partícula ou grão contendo concentrações suficientes de U ou Th para que seja possível a identificação através do EDS, mas foi possível encontrar picos de Th consideráveis nas amostras Branco Cristal (Figura 107) e Capão Bonito (Figura 151), nas demais os picos foram mais fracos, por exemplo o apresentado na Figura 120.

As correlações entre os elementos U, Th e K, obtidos por ativação neutrônica, estão apresentadas na Tabela 46.

Tabela 46. Correlações das concentrações de *Spearman*, obtidas por ativação neutrônica, de U, Th e K com as dos demais elementos.

	U (ppm)	Th (ppm)	K %		U (ppm)	Th (ppm)	K %
As (ppm)	0,531	0,107	0,478	Nd (ppm)	-0,323	0,488	0,268
Ba (ppm)	-0,366	0,124	0,318	Rb (ppm)	0,560	0,677	0,511
Br (ppm)	0,219	0,297	-0,311	Sb (ppm)	0,131	0,238	0,139
Ca (%)	-0,261	-0,390	-0,585	Sc (ppm)	-0,572	-0,302	-0,011
Ce (ppm)	-0,253	0,500	0,285	Se (ppm)	0,431	-0,008	-0,176
Co (ppm)	-0,557	-0,323	0,058	Sm (ppm)	-0,161	0,410	0,425
Cr (ppm)	0,121	0,134	-0,321	Ta (ppm)	0,454	0,183	-0,125
Cs (ppm)	0,586	0,403	0,538	Tb (ppm)	-0,137	0,462	0,308
Eu (ppm)	-0,560	-0,070	0,091	Yb (ppm)	0,386	0,655	0,390
Fe (%)	-0,451	-0,195	-0,033	Zn (ppm)	-0,489	-0,320	-0,084
Hf (ppm)	0,177	0,330	0,449	Zr (ppm)	-0,118	0,321	0,373
La (ppm)	-0,268	0,414	0,232	U (ppm)	1,000	0,340	0,261
Lu (ppm)	0,443	0,539	0,572	Th (ppm)	0,340	1,000	0,167
Na (%)	-0,029	-0,171	0,027	K (%)	0,261	0,167	1,000

Na mesma Tabela 46, notam-se, em vermelho, correlações significativas ($p < 0,05$) entre o U e As, Cs, Lu, Rb, Se, Ta e Yb; entre o Th e Ce, Cs, La, Lu, Nd, Rb, Sm, Tb e Yb; e entre o K e As, Cs, Hf, Lu, Rb, Sm, Yb e Zr. O dendograma dos elementos está reapresentado na Figura 100.

Figura 100. Análise de agrupamento elementos quantificados por ativação neutrônica.

Ambos resultados são coerentes com os resultados obtidos no MEV, embora a ferramenta EDS não seja adequada para identificação dos minerais, é possível verificar a associação entre os elementos nas fases e como as fases se diferenciam. A correlação inversa do Ca e K também é evidente nos resultados por fluorescência de raios X, a correlação de *Spearman* entre os óxidos destes elementos foi de -0,471, que é significativa para $p < 0,005$, este resultado está apresentado na Tabela 127, página 410.

Os grupos formados no dendrograma (Figura 100), conforme já apresentado no item 4.1.4, foram:

- Th com La, Zr, Rb, Cr, Ce, Co e Nd.
- K mais próximo do Br, Ta, Se, Sm, Lu, Tb, Sb, Na, Yb e Fe.
- U mais próximo do Eu, Sc, Hf, Cs, Ca e As.

Foram realizados quatro (4) EDS na amostra Branco Cristal. No primeiro EDS, foi possível identificar o K associado ao Fe, Na, Mg e Al inserido em um feldspato alcalino (Figura 103 e Figura 106). A associação com o Fe e Na vai ao encontro do

resultado do agrupamento. No segundo EDS foi possível identificar o Th com o Al, P e Ca e no terceiro EDS o tório com o Al, Ce, Sr, P, La, Nd e Sm (Figura 101 à Figura 114).

Figura 101. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 1.

Figura 102. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 2.

Figura 103. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 3.

Figura 104. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 4.

Figura 105. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 5.

Figura 106. EDS 1 – Branco Cristal – ponto 6.

Figura 107. EDS 2 – Branco Cristal – ponto 1.

Figura 108. EDS 2 – Branco Cristal – ponto 2.

Figura 109. EDS 2 – Branco Cristal – ponto 3.

Figura 110. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 1.

Figura 111. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 3.

Figura 112. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 4.

Figura 113. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 5.

Figura 114. EDS 3 – Branco Cristal – ponto 6.

Um EDS foi realizado na amostra Basaltite e foi possível identificar o U associado com Zr em uma matriz contendo K, Al, Ti, Mn e Fe (Figura 115 à Figura 119).

Figura 115. EDS 1 – Basaltite – ponto 1.

Figura 116. EDS 1 – Basaltite – ponto 2.

Figura 117. EDS 1 – Basaltite – ponto 3.

Figura 118. EDS 1 – Basaltite – ponto 4.

Figura 119. EDS 1 – Basaltite – ponto 5.

Para a amostra Capão Bonito GM, foram realizados dois (2) EDS e foi possível observar o Th associado ao Ce, Al, Ca, La, Nb, Sm e Fe associados à uma matriz contendo Ti e Fe, resultado também condizente com a ativação neutrônica (Figura 120 à Figura 125).

Figura 120. EDS 1 – Capão Bonito GM – ponto 1.

Figura 121. EDS 1 – Capão Bonito GM– ponto 3.

Figura 122. EDS 1 – Capão Bonito GM – ponto 4.

Figura 123. EDS 2 – Capão Bonito GM – ponto 1.

Figura 124. EDS 2 – Capão Bonito GM – ponto 3.

Figura 125. EDS 2 – Capão Bonito GM – ponto 4.

Foram realizados três (3) EDS na amostra Iragna, no primeiro EDS foi possível observar Th e U juntos associados ao Ce, P, Ca, La, Nd, Sm com um mineral contendo Sr, P e F (Figura 126 à Figura 134). Uma tendência indicada nas análises de MEV foi a presença de Ce nas amostras contendo Th. No segundo e terceiro EDS foi observado a mesma associação de Th já descrita para o EDS um (1), mas desta vez no entorno havia presença de K associado ao Ti, Fe, Mg e Al.

Figura 126. EDS 1 – Iragna– ponto 1.

Figura 127. EDS 1 – Iragna– ponto 4.

Figura 128. EDS 1 – Iragna– ponto 4.

Figura 129. EDS 1 – Iragna– ponto 6.

Figura 130. EDS 2 – Iragna– ponto 1.

Figura 131. EDS 2 – Iragna– ponto 2.

Figura 132. EDS 3 – Iragna– ponto 1.

Figura 133. EDS 3 – Iragna– ponto 3.

Figura 134. EDS 3 – Iragna– ponto 4.

Foram realizados dois (2) EDS na amostra Azul Bahia (Figura 135 à Figura 143). No primeiro EDS, o U foi identificado associado ao Ca, Ta, Na, Fe e Nb inseridos em um feldspato alcalino. A associação do Ca com o U também foi identificada na análise de agrupamento. No segundo EDS, o K estava associado ao Ti e Fe.

Figura 135. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 1.

Figura 136. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 6.

Figura 137. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 7.

Figura 138. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 8.

Figura 139. EDS 1 – Azul Bahia – ponto 9.

Figura 140. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 1.

Figura 141. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 6.

Figura 142. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 7.

Figura 143. EDS 2 – Azul Bahia – ponto 8.

Foram realizados três (3) EDS na amostra Capão Bonito, no primeiro, o Th estava associado ao Ce, Ca, Na, Al, La, Nb, Sm e Gd inseridos em um feldspato alcalino (Figura 144 à Figura 155). No segundo EDS, o Th e U juntos estavam associados ao Ce, La, Nb, Sm e Gd em uma matriz contendo Mg, K, Ti e Fe. No terceiro EDS, o Th estava associado ao Zr, Al, Ca, Fe e Pb inseridos em minerais contendo Fe e S, e também K e Al.

Figura 144. EDS 1 – Capão Bonito – ponto 1.

Figura 145. EDS 1 – Capão Bonito – ponto 3.

Figura 146. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 1.

Figura 147. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 5.

Figura 148. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 6.

Figura 149. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 7.

Figura 150. EDS 2 – Capão Bonito – ponto 8.

Figura 151. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 1.

Figura 152. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 3.

Figura 153. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 4.

Figura 154. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 5.

Figura 155. EDS 3 – Capão Bonito – ponto 6.

Na amostra Flor di Pesco não foi possível observar K, U ou Th, condizente com a ausência de radioatividade da amostra (Figura 156 e Figura 157).

Figura 156. EDS 1 – For di Pesco – ponto 1.

Figura 157. EDS 1 – For di Pesco – ponto 3.

Na amostra Cinza Novo Mundo, um EDS foi realizado e foi possível observar o K com o Ti, Mg e Fe associados ao Zr (Figura 158 à Figura 160).

Figura 158. EDS 1 – Cinza Novo Mundo – ponto 1.

Figura 159. EDS 1 – Cinza Novo Mundo – ponto 2.

Figura 160. EDS 1 – Cinza Novo Mundo – ponto 3.

Na amostra Luserta Fiammata, foi realizado um (1) EDS e foi possível observar U e Th com o Ca, Nd, Fe, Ce, Mg, Al associados a um mineral contendo Fe, Mg e Ca (Figura 161 à Figura 169).

Figura 161. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 1.

Figura 162. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 2.

Figura 163. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 3.

Figura 164. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 4.

Figura 165. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 5.

Figura 166. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 6.

Figura 167. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 1.

Figura 168. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 2.

Figura 169. EDS 1 – Luserta Fiammata– ponto 3.

A amostra Rosa Capri apresentou U associado com Fe, Al, Zr e Ca, apenas um (1) EDS foi realizado para esta amostra (Figura 171 à Figura 173).

Figura 170. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 1.

Figura 171. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 2.

Figura 172. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 3.

Figura 173. EDS 1 –Rosa Capri– ponto 4.

Na amostra Rosso Lucido, foram realizados dois (2) EDS e observou-se no primeiro o Th com Ce, Ca, La, Nd, Sm em minerais contendo Ca e Mg, silicatos de ferro e óxido de titânio. No segundo EDS, o Th estava associado ao Y, Ca, La, Ce, Nd, Sm inseridos em um mineral contendo Al, Nb, Ti e Fe (Figura 174 à Figura 180).

Figura 174. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 2.

Figura 175. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 3.

Figura 176. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 4.

Figura 177. EDS 1 – Rosso Lucido – ponto 6.

Figura 178. EDS 2 – Rosso Lucido – ponto 1.

Figura 179. EDS 2 – Rosso Lucido – ponto 4.

Figura 180. EDS 2 – Rosso Lucido – ponto 5.

Na amostra Vermelho Bragança foram realizados dois (2) EDS semelhantes em que o Th e U estavam associados ao Zr, Ca, Ti e Fe, ao redor deste ponto foram identificados os mesmos elementos presentes com exceção o Th e U (Figura 181 à Figura 192).

Figura 181. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 1.

Figura 182. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 2.

Figura 183. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 3.

Figura 184. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 4.

Figura 185. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 5.

Figura 186. EDS 1 – Vermelho Bragança – ponto 6.

Figura 187. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 1.

Figura 188. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 2.

Figura 189. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 3.

Figura 190. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 4.

Figura 191. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 5.

Figura 192. EDS 2 – Vermelho Bragança – ponto 6.

Na amostra Vermelho Jacarandá, foi realizado um (1) EDS e foi possível observar o Th com Fe, Nd, Ce, La, Ca, P e Al, associados ao K com Ti, Fe e Mg (Figura 193 à Figura 197).

Figura 193. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 1.

Figura 194. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 2.

Figura 195. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 3.

Figura 196. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 4.

Figura 197. EDS 1 – Vermelho Jacarandá – ponto 5.

Na amostra Sodalita, que apresentou maior exalação, *Index* e teor de Th, estranhamente não foi possível identificar o elemento Th no MEV, possivelmente devido arranjo cristalino do mineral que contém o elemento (Figura 198 e Figura 199).

Figura 198. EDS 1 – Sodalita – ponto 1.

Figura 199. EDS 1 – Sodalita – ponto 2.

Na amostra B. Vermelho Claro, também não foi possível encontrar Th, mas identificou-se no EDS um (1) a presença de Ce, Nd, Mg, Al, La e Fe associados à Fe, Mg, Al e Ca, que foram indicativos da presença de Th nas demais amostras (Figura 200 à Figura 202).

Figura 200. EDS 1 – Blinder Vermelho Claro – ponto 1.

Figura 201. EDS 1 – Blinder Vermelho Claro – ponto 2.

Figura 202. EDS 1 – Blinder Vermelho Claro – ponto 3.

Na amostra Cinza Corumbá, foram realizados dois (2) EDS e foi possível identificar, no primeiro EDS, Th e K juntos pela primeira vez nas amostras estudadas e estes estavam associados ao Fe, Nd, Ce, La, Ca, S, Al que por sua vez estavam inseridos em um mineral contendo Mn, Al, Ti, Fe e Cu. No segundo EDS, o K estava associado com o Fe, Mg, Ti e Al juntos ao Zr (Figura 203 à Figura 211).

Figura 203. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 1.

Figura 204. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 2.

Figura 205. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 3.

Figura 206. EDS 1 – Cinza Corumbá – ponto 4.

Figura 207. EDS 2 – Cinza Corumbá – ponto 1.

Figura 208. EDS 2 – Cinza Corumbá – ponto 2.

Figura 209. EDS 3 – Cinza Corumbá – ponto 1.

Figura 210. EDS 3 – Cinza Corumbá – ponto 2.

Figura 211. EDS 3 – Cinza Corumbá – ponto 3.

Por último, na amostra Marrom São Paulo, foi observado K com Ti, Na, Al, Ca, Mn e Fe associados a minerais contendo La, Ce, Nd, Al e Ca (Figura 212 à Figura 218). Desta forma, conclui-se que houve aderência entre os resultados obtidos no agrupamento dos elementos quantificados pela ativação neutrônica e as análises no MEV.

Figura 212. EDS 1 – Marrom SP– ponto 1.

Figura 213. EDS 1 – Marrom SP– ponto 2.

Figura 214. EDS 1 – Marrom SP– ponto 3.

Figura 215. EDS 2 – Marrom SP– ponto 1.

Figura 216. EDS 2 – Marrom SP– ponto 2.

Figura 217. EDS 2 – Marrom SP– ponto 3.

Figura 218. EDS 2 – Marrom SP– ponto 4.

4.6.7. Análise estatística objetivo 6

O teor de Ra das amostras foi quantificado e a relação dos ETRs com os minerais presentes foi explorada. Adicionalmente, calcularam-se as proporções de Rn-220 e Rn-222 correlacionadas com as proporções de U e Th. As tabelas de correlações entre as variáveis estão apresentadas no Apêndice D, página 408. A Tabela 47 apresenta as proporções de Th/U e Rn-220/Rn-222 nas amostras estudadas e a Figura 219 apresenta graficamente estes resultados.

Tabela 47. Proporções de Th/U e Rn-220/Rn-222 nas amostras.

Amostras	Th/U	Rn-220/Rn-222
PJ - B - CH - CRT	0,2	0,3
AB - A - BA - MSN	0,5	0,2
PL - C - CH - BAT	0,7	2,6
FP - B - CH - MAR	0,8	0,0
BC - B - CH - MGN	1,4	2,7
BCE - B - CE	1,9	0,4
CI - M - MG - SNT	2,3	1,3
ABE - A - BA - MDR	2,4	0,2
CC - C - ES - MGN	2,5	1,4
VU - V - ES - MGT	2,5	1,0
OL - C - CH - GNR	2,5	0,1
BE - B - ES	2,8	1,6
I - C - CH - GNS	2,9	1,0
LF - C - CH - GNS	3,0	1,6
RC - R - CH - MGN	3,3	0,8
RL - R - CH - SGN	3,8	1,5
BAS - C - CH - BAT	4,3	3,9
MSP - M - SP	5,1	1,0
BCH - C - CH - GNS	5,5	1,4
VB - VM - SP - MGN	5,5	1,8
BLVC - VM - SP - MGN	7,7	1,4
BM - B - ES - MDR	9,0	0,4
CB - VM - SP - MGN	9,1	1,6
VJ - VM - SP - MGN	9,5	2,3
CIC - M - MG - SNT	9,6	1,8
ML - M - CH - MAR	9,7	0,4
BLCE - C - ES - MDR	11,3	0,0
BS - B - ES - SGN	13,7	0,5
CCS - C - ES - MGN	14,2	1,0
CNM - C - ES - GNS	17,1	2,2
CBGM - VM - SP - MGN	24,0	0,7
M - B - SP - MGN	36,6	2,2
PL1 - VM - CH - DIB		0,8
S - A - CH - SDT		1,9
VP - V - ES - MGT		0,3
Média	7,1	1,2
Média BR	9,4	1,1
Média CH	3,2	1,4

Figura 219. Gráfico da relação entre Th/U e Rn-220/Rn-222 nas amostras estudadas.

Observa-se na Tabela 47 que a média da relação Th/U nas amostras foi de 7,1, sendo 9,4 a média das amostras brasileiras e 3,2 a média das amostras suíças. O tório é três a quatro (3 a 4) vezes mais abundante que o urânio nas rochas da litosfera (KYSER; CUNEY, 2008) e rochas sedimentares geralmente contêm apenas alguns $\mu\text{g/g}$ deste elemento, enquanto sua concentração pode ser até dez (10) vezes maior em rochas ígneas ácidas, onde pode substituir os elementos de terras raras (LAUBENSTEIN; MAGALDI, 2008). Observa-se também que o valor médio da relação entre a exalação de Rn-220 e a exalação de Rn-222 foi 1,2; enquanto que a média das amostras brasileiras foi 1,1 e a média das amostras suíças foi 1,4.

Fica evidente que a exalação de Rn-220 supera a de Rn-222 para a maior parte das amostras e que este isótopo tem a maior parcela na contribuição para as exalações totais nas amostras estudadas. As análises apresentadas no item 4.2.2, página 179, corroboram este resultado, as médias das exalações para as superfícies mais lisas foram de 436 Bq/hm^2 para Rn-222 e de 677 Bq/hm^2 para o Rn-220.

A análise da Figura 219 também evidencia que o enriquecimento de tório nas amostras não é proporcional ao aumento da exalação de Rn-220. Este fato tem explicação física, pois a meia-vida do torônio é muito curta e a permeabilidade da matriz muito baixa. Assim apenas a superfície exposta contribui para a exalação e não o teor de Th diretamente (Figura 220), o baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,012$) apresentada entre os valores também vai ao encontro dos resultados obtidos no objetivo 3, em que foi comprovada baixíssima correlação entre a exalação da amostra e os parâmetros físicos (densidade, volume de poros e umidade). Entre as amostras que exalam mais torônio do que radônio (20), 55% são graníticas, 15% são gnaisses de composição granítica, 10% são basaltos e os outros 15% são dois sienitos e a sodalita. Entre as amostras que exalam torônio acima de 150 Bq/hm^2 (12), 75% são graníticas, o que indica a tendência desse tipo de maior perigo associado ao uso de tais materiais em interiores.

Figura 220. Gráfico de dispersão dos valores de Th-232 e Rn-220 das amostras estudadas.

O teor de Ra das amostras também foi comparado com as médias globais. A média mundial de teor de Ra é de $2,7 \times 10^{-12}$ g/g e $1,2 \times 10^{-12}$ g/g em granitos e basaltos, respectivamente (DALY, 1933). Os valores obtidos neste estudo são compatíveis com a literatura e estão apresentados na Tabela 48 e na Figura 221, sendo eles $2,84 \times 10^{-12}$ g/g para as amostras de granitos, $1,91 \times 10^{-12}$ g/g para os basaltos e $1,87 \times 10^{-12}$ g/g para as amostras de diabásio.

Tabela 48. Média do teor de Ra nas amostras estudadas.

Rocha	Média Teor Ra g/g
Granitos	2,84E-12
Basaltos	1,91E-12
Diabásio	1,87E-12
Geral	1,74E-12

Figura 221. Gráfico dos teores de Ra nas amostras estudadas.

Nota-se que as amostras estudadas têm a média das concentrações de Ra ligeiramente maior do que as apresentadas pela literatura. A amostra com maior teor de rádio associado foi a Rosa Capri com $1,61 \times 10^{-11}$ g/g, portanto, uma das duas amostras com exalação total maior que 150 Bq/hm² e que apresentou exalação de Rn-222 maior que a de Rn-220. A outra foi a Capão Bonito GM, que apresentou concentração de Ra de $1,89 \times 10^{-12}$ g/g. As atividades mundiais médias na crosta terrestre são de cerca de 40 Bq/kg, 40 Bq/kg e 400 Bq/kg para o rádio, tório e potássio, respectivamente (EC, 1999). Os valores médios para as amostras estudadas foram: 63,9 Bq/kg, 155,2 Bq/kg e 842,5 Bq/kg, de rádio, tório e potássio, respectivamente.

Uma análise de agrupamento foi realizada utilizando as variáveis *Index*, exalação de Rn-222 e exalação de Rn-220. Utilizou-se a seguinte composição como rótulo das amostras: a sigla do nome comercial, a sigla da cor predominante, a sigla do local de origem e a sigla das litologias utilizadas, conforme mostra a Tabela 49.

Tabela 49. Siglas das litologias utilizadas no agrupamento das amostras.

Sigla	Litologia simplificada
MGN	Monzogranito
SGN	Sienogranito
GNS	Gnaisse
SNT	Sienito
MAR	Mármore
GNR	Granodiorito
CRT	Calcarenito
BAT	Basalto
DIB	Diabásio
SDT	Sodalita
MGT	Mangerito

A Figura 222 apresenta o dendograma e pode-se notar que, traçando uma linha horizontal em 20%, a distância entre observações está normalizada para 100%, assim, a maior similaridade corresponde a valores próximos de zero. A decisão de quantos agrupamentos devem ser formados para a análise ser mais representativa da estrutura dos dados da amostra é subjetiva e depende do conhecimento do pesquisador para discernir entre diferenças significativas entre subgrupos (HAIR Jr. *et al.*, 2009). Neste caso, observam-se três grupos formados (numerados na Figura 222) preferencialmente por amostras de mesma litologia independentemente do local de origem da amostra.

As amostras monzograníticas se concentraram nos primeiros grupos e no começo do terceiro grupo, indicando que materiais deste tipo tendem a ter um perigo radiológico maior associado ao uso em interiores. Um gnaisse (Cinza Novo Mundo), um basalto (Basaltite) e a sodalita também participam dos dois primeiros grupos com maiores valores de *Index* e exalação de radônio. Ao traçar uma linha horizontal em 8% observa-se que a totalidade das amostras, que compõem os cinco primeiros grupos (os dois primeiros são amostras sozinhas), apresentaram valores de exalação de Rn-total superior ou igual a 150 Bq/hm². Entre estas amostras estão também aquelas com *Index* menor que um (1), ou seja, as amostras que precisam de cuidado com o uso.

Figura 222. Dendograma em relação ao *Index* e exalação de radônio.

O dendograma, para as variáveis de atividades de Ra-226, K-40 e Th-232, está apresentado na Figura 223. Pode-se observar nesta mesma Figura 223 que também há evidência de agrupamento litológico em relação às atividades destes isótopos. Assim, traçando uma linha horizontal em 20%, a amostra Sodalita fica deslocada dos demais grupos por conter apenas Th na composição, o segundo grupo inclui amostras preferencialmente da Suíça, que contêm atividade de um dos três isótopos (Ra-226, K-40 e Th-232) abaixo do limite de detecção. Como não foram utilizados ponderadores, o dendograma não caracteriza, assim, índice de perigo radiológico.

Figura 223. Dendograma em relação às atividades de Ra-226, Th-232 e K-40.

4.7. MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para uso de um lote de rocha ornamental em interiores está apresentado em forma de fluxograma na Figura 224. A aprovação de um determinado material, em princípio, não pode ocorrer apenas uma vez por jazida, pois mesmo em um corpo mineral aparentemente homogêneo, existe uma heterogeneidade intrínseca ao material que não pode ser negligenciada. Gy (1992) afirma que a homogeneidade é a condição inatingível de heterogeneidade zero. Portanto, é importante que cada lote de material comercializado seja avaliado pelo método proposto. A tomada da amostra do lote também deve ocorrer de forma que não gere viés (amostras acuradas) e que as amostras sejam reprodutíveis (precisas), de forma que a amostra seja representativa do lote amostrado (PITARD, 1993).

Após a seleção da amostra, esta deve ser analisada pelo monitor de contaminação portátil. Caso o valor médio de contagem beta e gama, descontados do *background*, seja superior a 4 cps e/ou a contagem alfa seja diferente de zero, deve-se prosseguir na avaliação das exalações de Rn-222 e Rn-220 e dos índices de perigo radiológicos. Caso a taxa de exalação de Rn-total seja superior a 150 Bq/hm² (valor de referência recomendado neste estudo), a amostra deve prosseguir para as etapas de tratamentos superficiais, antes de ser liberada para uso em interiores. Em relação à radiação externa, índices de perigo radiológicos diversos estão descritos na literatura (como apresentado no item 2.15.1); o *Index* gama da legislação europeia foi investigado neste estudo e recomendou-se o valor um (1) de referência para este índice, no caso de placas de rochas ornamentais. Independente da escolha do índice de perigo a ser utilizado, a dose absorvida deve ser calculada e comparada com os valores recomendados, pois neste estudo em média 66% das amostras superaram os valores recomendados das doses calculadas (D_{ab} , AGDE, AEDE e ELCR). Os lotes podem ser utilizados em interiores, desde que atendam a critérios limite de massa e de local a ser utilizado. Deve-se evitar, por exemplo, o emprego de tais lotes no recobrimento de piso de dormitórios, pois um ser humano passa em média 33% do seu tempo dormindo, resultando, portanto, em tempo elevado de exposição.

Figura 224. Fluxograma do método proposto para aprovação do uso de um lote de amostras de rocha ornamental em interiores.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi determinar as exalações dos gases radônio e torônio de amostras de rochas ornamentais, utilizadas como materiais de construção, de forma que o uso destas em interiores não traga risco à saúde dos ocupantes. Desta forma, recomenda-se que esses materiais sejam avaliados em relação à proteção radiológica. Na prática, diferentes critérios radiológicos são utilizados em relação ao uso de materiais de construção em interiores. No entanto, é incoerente aplicar critérios diferentes para decidir sobre a aceitabilidade de materiais naturais da mesma categoria. Tais diferenças são minimizadas mediante aplicação do método aqui proposto, principalmente em relação ao Rn-222 e Rn-220.

A inovação deste trabalho foi evidenciada ao apontar a concentração de torônio (Rn-220) como a principal contribuinte para a exalação total da maioria das amostras estudadas. O torônio é tradicionalmente assumido com uma fonte de exposição relevante apenas em condições raras em que os materiais de construção contêm concentrações excepcionalmente altas de tório. Provou-se que, teores excepcionalmente altos de tório não são necessários para que haja correlação expressiva do Th-232 com as exalações totais de radônio e com o cálculo dos índices de perigo radiológicos. Entre os índices de perigo radiológicos estudados, o Raq foi o que obteve a maior correlação com a exalação total de radônio, entretanto, provou-se também que a avaliação das amostras apenas em relação à exalação ou somente em relação aos índices de perigo radiológicos não é suficiente para a correta classificação das amostras. Desta forma, as duas avaliações devem ocorrer necessariamente.

O objetivo dos controles propostos no método criado é restringir as doses individuais elevadas na exposição ao perigo radiológico. Portanto, os critérios utilizados para os controles nacionais devem ser escolhidos de forma que os materiais de construção disponíveis no mercado cumpram os requisitos, mesmo que seja por meio de algum tipo de tratamento superficial, como no caso das exalações. A restrição do uso de determinados materiais de construção pode ter consequências econômicas, ambientais ou sociais significativas em nível local e nacional. Tais consequências,

juntamente com os níveis de radioatividade nos materiais de construção nacionais, devem ser avaliadas e consideradas ao estabelecer legislações sobre o assunto. No caso das exportações, como é o caso da maior parte da produção brasileira, é necessário que o produtor ou o comerciante de cada lote de rocha ornamental seja responsável pelo cumprimento da legislação do país importador do produto.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS. Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento. Disponível em: http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/18/3606/Exporta_Importa_12_2015.pdf. Acesso em: 22 jan. 2016. Ano de referência: 2015.

AHMAD, M. N., HUSSEIN, A. J. A. **Natural radioactivity in Jordanian building materials and the associated radiation hazards**. J. Environ. Radioact. 39 922. 1997.

AKAIKE H. **Information Theory and the Extension of the Maximum Likelihood Principle**. In: Second International Symposium on Information Theory. (Eds: V.N. Petrov and F. Csaki). Academiai Kiadó, Budapest. 267-281. 1973.

ALBERIGI, S. **Sobre a Influência de Fatores Ambientais nos Níveis de Radônio em Cavernas dos Parques Estaduais do Vale do Ribeira, SP e Avaliação do Equilíbrio Radioativo e fator de Equilíbrio entre Radônio e seus Descendentes**. Tese de doutorado. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 2011. 105 p.

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

ANDERSEN, C. E. **Radon transport modelling: User's guide to RnMdo3d**. Risø-R-1201(EN) (2000). ISBN 87-550-2733-4.

ANTONIAZZI, B. N., SILVA, N. C., CUNHA, T. N., OTERO, U. B. **Projeto planalto Poços de Caldas: pesquisa câncer e radiação natural. Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais**. Belo Horizonte: ESP-MG. ISBN: 978-85-62047-90-9. 2013.

ASADOV, A., KROFCHECK, D. & GREGORY, M. **Application of gamma-ray spectrometry to the of grain size distribution of beach and river sands**. Marine Geology, 179: 203 – 211. 2001.

AWHIDA, A., UJIC, P., VUKANAC, I., DURASEVIC, M., KANDIC, A., CELIKOVIC, I., LONCAR, B. & KOLARZ, P. **Novel method of measurement of radon exhalation from building materials**. Journal of Environmental Radioactivity 164 (2016). Pág. 337-343.

BARKER, D. S. **Igneous Rocks**. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. ISBN: 0-13-450692-8. 1983.

BEA, F. **Residence of REE, Y, Th and U in Granites and Crustal Protoliths; Implications for the Chemistry of Crustal Melts**. Journal of Petrology. Volume 37. Number 5. Pág. 521-552. 1996.

BERETKA, J., MATTHEW, P. J. ***Natural radioactivity of Australian building materials, industrial waste sand by-products***. Health Phys. 48. Pp. 87–95. 1985.

BEVINGTON, P. R. & ROBINSON, D. K. ***Data reduction and error analysis for the physical sciences***. 3ª Edição. ISBN 0-07-247227-8. Mc Graw Hill. 2003.

BEST, M., CHRISTIANSEN, E. H. *Igneous Petrology*. Blackwell Science. United Kingdom. ISBN: 0-86542-541-8. 2001.

BHUSHAN, B. ***Modern Tribology Handbook, Volume 1, chapter 2***. The Ohio State University. 2001. CRC Press LLC.

BOLUS, N. E. ***NCRP Report 160 and What It Means for Medical Imaging and Nuclear Medicine***. J Nucl Med Technol 2013; 41:1–6 DOI: 10.2967/jnmt.113.128728.

BORGONI, R., FRANCESCO, D., BARTOLO, D. TZAVIDIS, N. ***Hierarchical modeling of indoor radon concentration: how much do geology and building factors matter?*** Journal of Environmental Radioactivity 138. Pág. 227-237. 2014.

BUSSAB, W. O. e& MORETTIN, P. A. *Estatística básica*. 5ª ed. São Paulo: Saraiva, 2002.

CALPÉNA, S. ***EU regulatory progress for NORM & building materials***. WEACAU-III International Workshop on Environmental Aspects of Coal Ash Utilization. 2012.

CAMARGO, I. M. C. ***Determinação da concentração dos isótopos naturais de urânio e tório em amostras de água***. Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1994.

CATALANO, R., IMMÉ, G., MANGANO, G., MORELLI, D. & ARANZULLA, M. ***Radon transport: laboratory and model study***. Radiation Protection Dosimetry (2015), Vol. 164, No. 4, pp. 575–581.

CHANDRASEKARAN, A., RAVISANKAR, R., SENTHILKUMAR, G., THILLAIVELAVAN, K., DHINAKARAN, B., VIJAYAGOPAL, P., VENKATRAMAN, B. ***Spatial distribution and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Yelagiri Hills, Tamilnadu, India***. Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences, 1(1), pp. 38–48. 2014.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Apostila educativa Radioatividade***. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/orientacoes/2-uncategorised/128-apostilas-educativas>>. Acesso em 04 fev. 2013a.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Apostila educativa Radiações Ionizantes e a vida***. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br>>. Acesso em 04 fev. 2013b.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais**. CNEN-NN-4.01. 2005. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br>>. Acesso em 04 fev. 2013.

COLLIGNAN, B., POWAGA, E. ***Procedure for the characterization of radon potential in existing dwellings and to assess the annual average indoor radon concentration***. Journal of Environmental Radioactivity 137. 2014. 64-70.

COSTA, L. P. **Identificação de Minerais**. Universidade Federal do rio Grande do Norte. Laboratório de Geoquímica. Natal. 2009.

CUTSHALL, N. H., LARSEN, I. L. e OLSEN, C. R. ***Direct analysis of ^{210}Pb in sediments samples: self absorption corrections***. Nuclear Instruments and Methods, 206: 309-312. 1983.

DALY, R. A. **Igneous rocks and the depths of the Earth**. McGraw-Hill Book Company, 1933.

DEVORE, J.L. ***Probability and Statistics for Engineering and the Sciences***, (4th ed.) Duxbury Press, Belmont, CA. 1995.

DURRANI, S. A., ***Nuclear tracks today: Strengths, weaknesses, challenges. Radiation Measurements***. v. 43, p. 26-36, 2008.

EPA – Environmental Protection Agency. Washington, D.C. Radiation Protection – Radon. Disponível em: <<http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/radon.html#affectthehealth>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

EPA – Environmental Protection Agency. A Citizen's Guide to Radon. EPA 402/K-12/002. 2012. Disponível em: <www.epa.gov/radon>. Acesso em: 05 jan. 2016.

EC – European Commission. ***Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials***. Radiation protection Nº 112. 1999. Luxemburgo.

EC – European Commission. ***Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation***. Official Journal of the European Union. 2013.

EL-ARABI, A. M. Ra-226, Th-232 and K-40 concentrations in igneous rocks from eastern desert Egypt and its radiological implications. Radiation Measurements. Volume 42, Issue 1. 2007. Págs. 94-100.

EL-DINE, N. W., EL-SHERSHABY, A., AHMED, F., ABDEL-HALEEM, A. S. ***Measurement of radioactivity and radon exhalation rate in different kinds of marbles and granites***. Applied Radiation and Isotopes 55 (2001) 853–860.

FERNANDES, C. P. **Caracterização Petrofísica de Rochas de Baixa Permeabilidade**. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas. 2014.

FILHO, V. F. N. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. Departamento de Ciências Exatas/ ESALQ. 1999.

FREUND, J. E. Estatística aplicada: economia, administração e contabilidade. 11ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 536.

GALLELLI, G., PANATTO, D., LAI, P., ORLANDO, P., RISSO, D. **Relevance of Main Factors Affecting Radon Concentration in Multi-storey Buildings in Liguria (Northern Italy)**. J. Environ. Radioactivity, Vol. 39, No. 2, pp. 117—128. 1998.

GILMORE, G., HEMINGWAY, J. **Practical Gamma – Ray Spectrometry**. ISBN: 0471951501. England: John Wiley & Sons Ltd, 1995. 314p.

GOLDSCHMIDT, V. M. **Geochemistry**. The International Series of Monographs on Physics. Edited by Alex Muir. Oxford. 1958.

GOLDSTEIN, J. I., NEWBURY, D. E., ECHLIN, P., JOY, D. C., ROMING JR., A. D., LYMAN, L. E., FIORI, C., LIFSHIN, E., **Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis - A Textbook for Biologist, Materials Scientists and Geologists**. 1992. Plenum Press. New York.

GRAETZ. Products: CoMo 170. Disponível em: <<http://www.graetz.com/como-170+M52087573ab0.html>>. Acesso em: 06 de novembro de 2016.

GRAY, A., READ, S., MCGALE, P., DARBY, S. **Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potencial of polices to reduce them**. BMJ 2009; 338: a3110 doi:10.1136/bmj.a3110.

GREENBERG, R. R., BODE, P., FERNANDES, E. A. N., **Neutron activation analysis: A primary method of measurement**. Spectrochimica Acta Part B, 66. 193–241. 2011.

GY, P. **Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: theories of heterogeneity, sampling and homogenizing**. Data handling in science and echnology 10, Amsterdam, Elsevier, 654 p. 1992.

HAIR JR., J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., ANDERSON, R. E. & TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Bookman, Porto Alegre. 6. ed. 2009.

HAND, B. M. & BANIKOWSKI, J. E. **Radon in Onondaga County, New York: Paleohydrogeology and redistribution of uranium in Paleozoic sendimentary rocks**. Geology. V. 16, p. 775-778. Setembro, 1988.

HANLEY, G. M.; O'ROURKE. ***The race without a finishing line: legislative means for confronting bullying in the Australian workplace.*** Asia Pacific Journal of Human Resources (2016) 54, 352–368 doi:10.1111/1744-7941.12093.

HASSAN, N. M., ISHIKAWA, T., HOSODA, M., IWAOKA, K., SORIMACHI, A., SAHOO, S. K., JANIK, M., KRANROD, C., YONEHARA, H., FUKUSHI, M. ***The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan.*** Radiation Measurements 46, Issue 2. Pág. 232–237. 2011.

HEWAMANNA, R., SUMITHRARACHCHI, C., MAHAWATTE, P., NANAYAKKARA, H., RATNAYAKE, H. ***Natural radioactivity and gamma dose from Sri Lankan clay bricks used in building construction.*** Appl. Radiat. Isot. 54: pp. 365–369. 2001.

HOSODA, M., ISHIKAWA, T., SORIMACHI, A., TOKONAMI, S., UCHIDA, S. ***Development and application of a continuous measurement system for radon exhalation rate.*** Rev. Sci. Instrum. 82, 015101. doi:10.1063/1.3527065. 2011.

IAEA – International Atomic Energy Agency TECDOC – 564. ***Practical aspects of operating a neutron analysis laboratory.*** International Atomic Energy Agency, Vienna. 1990.

IAEA – International Atomic Energy Agency. ***Measuring Radionuclides in the Environment. Argonne National Laboratory, USA.*** 2010.

IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo.

Disponível em: <<http://www.iag.usp.br/paleo/?q=content/preparo-de-l%C3%A2minas-petrogr%C3%A1ficas>>. Acesso em: 1 dez. 2015.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Informações sobre a economia mineral brasileira 2015. Brasília. Setembro, 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em: 09 de outubro de 2016.

ICRP. ***Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.*** ICRP Publication 60. Oxford: Pergamon Press. 1991.

ICRP. ***Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals.*** Addendum 3 to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106. Ann. ICRP 38 pp.1-2. 2008.

ISHIMORI, Y.; LANGE, K.; MARTIN, P.; MAYYA, Y.S.; PHANEUF, M. ***Measurements and calculation of radon releases from NORM residues.*** Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. 103p.

JANIK, M. & YONEHARA, H. ***The most recent international intercomparisons of radon and thoron monitors with the NIRS radon and thoron chambers.*** Radiation Protection Dosimetry (2015), Vol. 164, No. 4, pp. 595–600.

JOHNER, H. U. & SURBECK, H. ***Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction***. The Science of the Total Environment 272 (2001). Pág. 337-341.

KARUNAKARA, N., KUMARA, K. S., YASHODHARA, I., SAHOO, B. K., GAWARE, J. J., SAPRA, B. K., MAYYA, Y. S. ***Evaluation of radon adsorption characteristics of a coconut shell-based activated charcoal system for radon and thoron removal applications***. Journal of Environmental Radioactivity 142. Pág. 87-95. 2015.

KAISER, H. F. **The Varimax criterion for analytic rotation on factor analysis**. Psychometrika – vol. 23, no 3, Setembro, 1958.

KLEIN, C., DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23ª Ed. ISBN: 8577809633, 9788577809639. Editora Bookman. 724 p. 2009.

KOHLER, M.; GLEISBERG, B. & NIESE, S. ***Investigation of the soil-plant transfer of primordial radionuclides in tomatoes by low-level gamma-ray spectrometry***. Applied Radiation Isotopes, 53: 203 – 208. 2000.

KRIEGER, R. ***Radioactivity of construction materials***. Betonwerk Fertigteil Technol. 47: pp. 468–473. 1981.

KROPAT, G., BOCHUD, F., JABOYEDOFF, M., LAEDERMANN, J-P., MURITH, C., PALACIOS, M., BAECHLER, S. Journal of Environmental. ***Major influencing factors of indoor radon concentrations in Switzerland*** *Radioactivity*. 129. Pág. 7-22. 2014.

KROPAT, G., BAECHLER, S., BAILAT, C., BARAZZA, F., BOCHUD, F., DAMET, J., MEYER, N., GRUSON, M. P., BUTTERWECK, G. ***Calibration of the Politrack® system based on CR39 solid-state nuclear track detectors for passive indoor concentration measurements***. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 167. No. 1-3. Pág. 302-305. 2015.

KYSER, K., CUNEY, M. ***Recent and not-so recent developments in uranium deposits and implications for exploration***. Miner. Assoc. Can. Short Course 39, 257. 2008.

LARA, E. G. **Radônio nos gases do solo: distribuições e correlações com litologias e pedologias da RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Energia Nuclear. 2013.

LATTIN, J. CARROLL, J. D., GREEN, P. **Análise de dados multivariados**. CENGAGE Learning. São Paulo, ISBN: 978-85-221-0901-2. 2011.

LAUBENSTEIN, M., DONATELLO, M. ***Natural radioactivity of some red Mediterranean soils***. Catena, Volume 76, Issue 1, 15 December, 2008, Pages 22-26.

LEACH, R.; BROWN, L.; JIANG, X.; BLUNT, R.; MAUGER, M.
“Measurement Good Practice Guide No.108: Guide to the Measurement of Smooth Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry”.
 National Physical Laboratory. London, United Kingdom. 2008.

LCT - LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA. **Resultado de Identificação de Fases por Difractometria de Raios-X.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2015.

L’ANNUNZIATA, M. F. **Handbook of radioactivity analysis.** Second Edition. ISBN: 978-0-12-436039. Academic Press. 1326p. 2013.

MAKELAINEN, I., ARVELA, H., VOUTILAINEN, A. **Correlations between radon concentration and indoor gamma dose rate, soil permeability and dwelling substructure and ventilation.** The Science of the Total Environment 272.Pág. 283-289. 2001.

MENEZES, A. C. F.; FAISSOL, S.; FERREIRA, M. L. **Análise da matriz geográfica: estruturas e inter-relações.** In: IBGE. Tendências atuais na geografia urbano-regional: teorização e quantificação. Rio de Janeiro, 1978. p. 67-109.

MOORHOUSE, W. W. **The study of rocks in thin section.** Harper & Brothers, New York. 1959.

MOURA, M. J., FIGUEIREDO, M. M. **Aplicação das Técnicas de Picnometria e Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de E. globulus.** Silva Lusitana 10 (2): 207 - 216, 2002 ©EFN, Lisboa. Portugal.

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

NAGASAWA, H. **Rare earth concentrations in zircons and apatites and their host dacites and granites.** Earth and Planetary Science Letters. Volume 9, Issue 4. 1970. Págs. 359-364.

NCRP – National Council on Radiation Protection and Measurements. **Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States.** Bethesda, MD: National Council on; 2009. NCRP report 160.

NELMS, S. M. **Inductively Coupled Plasma mass Spectrometry Handbook, Blackwell Publishing:** Oxford. 485p. 2005.

NEVES, M. C. Estudo Experimental do Polimento de diferentes “Granitos” e as Relações com a Mineralogia. São Carlos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 113p. 2010.

NGACHIN, M., GARAVAGLIA, M., GIOVANI, C., NOURREDDINE, A., NJOCK, M. G. K., SCRUIZZI, E., LAGOS, L. **²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K contents and radon exhalation rate from materials used for construction and decoration in Cameroon.** J. Radiol. Prot. 28. 369–378 doi:10.1088/0952-4746/28/3/007. 2008.

NIKOLOV, J., FORKAPIC, S., HANSMAN, J., BIKIT, I., VESKOVIC, M., TODOROVIC, N., MRDA, D., BIKIT, K. **Natural radioactivity around former uranium mine, Gabrovnica in Eastern Serbia.** Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, Vol. 302(1), pp.477-482.

OKUNO, E., YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações. Primeira Edição. ISBN: 9788579750052. Oficina de Textos. 296p. 2010.

OSHA – Occupational Safety & Health Administration. 1910.1096 Ionizing radiation. Disponível em:
<https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARD&p_id=10098>. Acesso em: 21 jan. 2016. Publicado: Junho, 1996.

PAPACHRISTODOULOU, C. A., ASSIMAKOPOULOS, P.; PATRONIS, N.E. & IOANNIDES, K.G. **Use of HPGE gamma-ray spectrometry to assess the isotropic composition of uranium in soils.** Journal of Environmental Radioactivity, 64: 195 – 203. 2003.

PISOCLEAN. Tabela de rendimentos. Disponível em:
<http://www.pisoclean.com.br/principal/ShowEXEMPLAR.asp?var_chavereg=255>
Acesso em: 13 de novembro de 2016.

PITARD, F.F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control.** 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 488 p. 1993.

PRASAD, G., ISHIKAWA, T., HOSODA, M., SORIMACHI, A., SAHOO, S. K., KAVASI, N., TOKONAMI, S., SUGINO, M., UCHIDA, S. **Seasonal and diurnal variations of radon/thoron exhalation rate in Kanto-loam area in Japan.** J Radioanal Nucl Chem 292:1385–1390. 2012. DOI: 10.1007/s10967-012-1620-6.

RAMASAMY, V., PARAMASIVAM, K., SURESH, G., JOSE, M. T. **Function of minerals in the natural radioactivity level of Vaigai River sediments, Tamilnadu, India** – Spectroscopical approach. Spectrochim. Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 117(3):340-350. 2014

RAVISANKAR, R VANASUNDARI, K., SUGANYA, M., RAGHU, Y., RAJALAKSHMI, A., CHANDRASEKARAN, A., VENKATRAMAN, B. **Multivariate statistical analysis of radiological data of building materials used in Tiruvannamalai, Tamilnadu, India.** Applied Radiation and Isotopes, 85(0), 114–127. 2014.

REINERT, D. The future of OSH: a wealth of chances and risks. 387 Industrial Health 2016, 54, 387–388.

RIBEIRO, F. B.; ROQUE, A.; BOGGIANI, P. C. & FLEXOR, J. ***Uranium and thorium series disequilibrium in quaternary carbonate deposits from the Serra da Bodoquena and Pantanal do Miranda***. Mato Grosso do Sul State, central Brazil, Applied radiation Isotopes, 54: 153 – 173. 2001.

ROGERS, V. C., NIELSON, K. K. ***Correlations for predicting air permeabilities and ^{222}Rn diffusion coefficients of soils***. Health Phys. 61:225-230. 1991.

RUCKERBAUER, F., WINKLER, R. ***Radon concentration in soil gas: a comparison of methods***. Applied Radiation and Isotopes 55. Pág 273-280. 2001.

SAHU, P., MISHRA, D. P., PANIGRAHI, D. C., JHA, V., PATNAIK, R. L., SETHY, N. K. ***Radon emanation from backfilled mill tailings in underground uranium mine***. Journal of Environmental Radioactivity, April 2014, Vol.130, pp.15-21.

SAKODA, A.; MEISENBERG, O. & TSCHIERSCH, J. ***Behavior of radon progeny produced in a scintillation cell in the flow-through condition***. Radiation Measurements 77 (2015). Págs. 41-45.

SAKODA, A.; MEISENBERG, O. & TSCHIERSCH, J. ***An approach to discriminatively determine thoron and radon emanation rates for a granular material with a scintillation cell***. Radiation Measurements 89 (2016). Págs. 8-13.

SAS, Z., SOMLAI, J., JÓNAS, J., SZEILER, G., KÓVACS, T., GYÖNGYÖSI, C. S., SYDÓ, T. ***Radiological survey of hungarian clays; radon emanation and exhalation influential effect of sample and internal structure conditions***. Rom. Journ. Phys., Vol. 58, Supplement, P. S243–S250, Bucharest. 2013.

SAS, Z., SZÁNTÓ, J., KOVÁCS, J., SOMLAI, J., KOVÁCS, T. ***Influencing effect of heat-treatment on radon emanation and exhalation characteristic of red mud***. Journal of Environmental Radioactivity 148. Pág. 27-32. 2015.

SENFLE, F. E., STIEFF, L., CUTTITTA, F. & KURODA, P. K. ***Comparison of the isotopic abundance of ^{235}U and ^{238}U and the radium activity ratios in Colorado Plateau uranium ores***. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 11. Pág. 189-193. Pergamon Press Ltd., London. 1957.

SENSOSCAN. User's manual 3.2. DCM3D Dual Core Measuring Microscope. LeicaScan. Espanha. Dezembro de 2010.

SGARBI, G. N. C. ***Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas***. Editora UFMG. 632 p. 2ª Edição. 2012.

SHARMA, N., VIRK, H. S. ***Exhalation rate study of radon/thoron in some building materials***. Radiat. Meas. 34, 467–469. 2001.

SHARMA, D. K., KUMAR, A., KUMAR, M., SINGH, S. ***Study of uranium, radium and radon exhalation rate in soil samples from some areas of Kangra***

district, Himachal Pradesh, India using solid-state nuclear track detectors. Radiat. Meas. 36, 363–366. 2003.

SILVEIRA, L. L. L., Polimento de Rochas Ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 227p. 2007.

SINGH, J., SINGH, H., SINGH, S., BAJWA, B. S., SONKAWADE, R. G. **Comparative study of natural radioactivity levels in soil samples from the Upper Siwaliks and Punjab, India using gamma-ray spectrometry.** J Environ Radioact. (2009), 100: 94–98.

SINGH, P., SAKOO, B. K. & BAJWA, B. S. **Theoretical modeling of indoor radon concentration and its validation through measurements in South-East Haryana, India.** Journal of Environmental Management 171 (2016). Pág. 35-41.

SMITH, M. P., MOORE, K., KAVECSÁNSKI, D., FINCH, A. A., KYNICKY, J., WALL, F. From mantle to critical zone: A review of large and giant sized deposits of the rare earth elements. Geosciences Frontiers. Volume 7, Issue 3. 2016. Págs. 315-334.

SORIMACHI, A.; ISHIKAWA, T. & TOKONAMI, S. **Performance test for radon measuring instruments using radon chamber at PTB.** Applied Radiation and Isotopes 70 (2012). Pág 994-998.

STAJIC, J. M., NIKEZIC, D. **Measurement of radon exhalation rates from some building materials used in Serbian construction.** J Radioanal Nucl Chem. 303:1943–1947 DOI 10.1007/s10967-014-3726-5. 2015.

STOULOS, S., MAMOLOPOULOU, M., PAPASTEFANOU, C. **Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece.** J. Environ. Radioact. 69. 225–40. 2003.

STRECKEISEN, A. L. **Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: a provisional attempt.** Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Monatshefte, 1976, H.I, pág. 1-15.

TASKIN, H., KARAVUS, M., AY, P., TOPUZUGLU, A., HINDIROGLU, S., KARAHAN, G. **Radionuclide concentrations in soil and life time cancer risk due to the gamma radioactivity in Kirklareli, Turkey.** J Environ Radioact. (2009), 100: 49–53.

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., PRINZO, R. Di, PRINZO, M. A. R. R. Di. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2013. 242p, 4v.

TOKONAMI, S. **The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan.** Radiation Measurements 46. Pág. 232-237. 2011.

TRIPATHI, R. M., SUMESH, C. G., VINOD KUMAR, A. & PURANIK, V. D. ***Application of thoron interference as a tool for simultaneous measurement of radon and thoron with a pulse ionization chamber.*** Radiation Protection Dosimetry (2013), vol. 155, nº 2, pp. 155-160.

TSAPALOV, A., GULABYANTS, L., LIVSHITS, M., KOVLER. ***New method and installation for rapid determination of radon diffusion coefficient in various materials.*** Journal of Environmental Radioactivity 130. Pág. 7-14. 2014.

TUCCIMEI, P., MORONI, M., NORCIA, D. ***Simultaneous determination of ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: influence of particle size, humidity and precursors concentration.*** Appl. Radiat. Isot. 64, 254–263. 2006.

TUFAIL, M. ***Radium equivalent activity in the light of UNSCEAR report.*** Environ Monit. Assess. (2012) 184: 5663–5667.

UJIC, P., CELIKOVIC, I., KANDIC, A., ŽUNIC, Z. ***Standardization and difficulties of the thoron exhalation rate measurements using an accumulation chamber.*** Radiation Measurements 43. Pág. 1396 – 1401. 2008.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. ***Sources, effects and risks of ionising radiation.*** Report to the General Assembly (New York: United Nations). 1988.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. ***Ionizing radiation: Sources and Biological Effects*** (New York: United Nations). 1993.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. ***Exposure from Natural Sources of Radiation*** (New York: United Nations). 1994.

USGS – United States Geological Survey. U.S. Government Printing Office: 1992. ***The geology of radon.*** Washington, DC. ISBN: 0-16-037974-1.

VIEIRA, F. O., MÓ, J. R. R., SANTOS, V. M., MIRANDA, R. C. A., BORDUAN, P. O. ***Segurança do Trabalho: a persistência de acidentes diante das políticas de prevenção.*** V Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 2009. ISSN: 1984-9354.

ZEEB, H. ***International radon project – survey on radon guidelines, programmes and activities.*** Geneva, WHO Press, 2007, 49p.

WILLIAMS, H., TURNER, F. J. & GILBERT, C. M. ***Petrography – An Introduction to the Study of Rocks in Thin Sections.*** W. H. Freeman and Company, San Francisco. 1954.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Who handbook on indoor radon: a public health perspective**. France, WHO Press, 2009. 110p.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **World Health Organization's International Radon Project**. DOI: [10.1080/15287390500261299](https://doi.org/10.1080/15287390500261299). J Toxicol. Environ Health A. 2006. Apr;69(7):759-69.

APÊNDICE A
FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA A ANÁLISE ESTATÍSTICA

Coeficiente de correlação de postos de *Spearman*

Nos casos em que os dados não formam uma nuvem comportada, com alguns pontos bem distantes dos demais, ou em que parece existir uma relação crescente ou decrescente num formato de curva, o coeficiente de correlação por postos de *Spearman* é mais apropriado (DEVORE, 1995).

Ele também pode ser usado quando os dados não pertencem a uma escala de medida padrão, mas existe uma ordenação clara, por exemplo, escores numa escala de 1 a 20.

Este é um método não-paramétrico que usa somente os postos, e não faz quaisquer suposições. Essencialmente tudo o que faz é calcular o coeficiente de correlação de *Pearson* nos postos. A Equação 56 é utilizada para o cálculo do coeficiente de *Spearman* (DEVORE, 1995).

$$56. \rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{(n^3 - n)}$$

Em que,

n – número de pares (x_i, y_i) .

d_i – posto de x_i dentre os valores de x menos o posto de y_i nos valores de y .

Wilcoxon Signed Rank Test – Teste de Wilcoxon Pareado

O teste de Wilcoxon pareado é utilizado para comparar se as medidas de posição de duas amostras são iguais no caso em que as amostras são dependentes. Para isto, consideram-se duas amostras dependentes de tamanho n vindas de duas populações $P1$ e $P2$, isto é, $X_1, \dots, X_n$ e $Y_1, \dots, Y_n$ (DEVORE, 1995).

Neste caso considera-se observações pareadas, isto é, uma amostra de pares:

$$\{(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)\}.$$

Define-se $D_i = X_i - Y_i$, para $i = 1, 2, \dots, n$. Assim, obtém-se a amostra $D_1, D_2, \dots, D_n$, resultante das diferenças entre os valores de cada par.

Para realizar o Teste de Wilcoxon Pareado deve-se primeiramente estabelecer as hipóteses:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 : \Delta = 0 \\ H_1 : \Delta \neq 0 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} H_0 : \Delta = 0 \\ H_1 : \Delta > 0 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} H_0 : \Delta = 0 \\ H_1 : \Delta < 0 \end{array} \right\}$$

Ou seja, testa-se se as populações diferem em localização ou não utilizando a seguinte ideia: se a hipótese nula for aceita, tem-se que a mediana da diferença é nula, ou seja, as populações não diferem em localização. Já se a hipótese nula for rejeitada, ou seja, se a mediana da diferença não for nula, tem-se que as populações diferem em localização (DEVORE, 1995).

Análise fatorial

O propósito essencial da análise fatorial é descrever, se possível, a estrutura de covariâncias entre as variáveis em termos de um número menor de variáveis (não observáveis) chamadas fatores. Por outras palavras, a análise fatorial estuda os inter-relacionamentos entre as variáveis, visando encontrar um conjunto de fatores (em menor número que o conjunto de variáveis originais) que exprima o que as variáveis originais partilham em comum (LATTIN; CARROLL; GREEN, 2011).

Supõe-se que as variáveis podem ser agrupadas tendo em conta as correlações entre elas. Isto é, todas as variáveis de um dado grupo estão fortemente correlacionadas entre si, mas têm correlações relativamente pequenas com variáveis

de outro grupo. É concebível que cada grupo de variáveis represente um fator, este responsável pelas correlações observadas (HAIR Jr. *et al.*, 2009).

Em geral o primeiro passo a dar neste tipo de análise consiste no exame das relações entre as variáveis utilizando o coeficiente de correlação como medida de associação entre cada par de variáveis. A matriz de correlações poderá permitir identificar subconjuntos de variáveis que estão muito correlacionadas entre si no interior de cada subconjunto, mas pouco associada a variáveis de outros subconjuntos. Neste caso, a aplicação da análise fatorial permite concluir se é possível explicar este padrão de correlações através de um menor número de variáveis - os fatores (LATTIN; CARROLL; GREEN, 2011).

De forma resumida, pode-se dizer que a análise fatorial é uma técnica estatística usada para identificar um número relativamente pequeno de fatores que podem ser usados para identificar relacionamentos entre um conjunto de muitas variáveis inter-relacionadas entre si (HAIR Jr. *et al.*, 2009).

Teste de esfericidade de Barlett e teste KMO

O Teste Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) é uma medida da qualidade dos seus dados para Análise Fatorial. O teste mede a adequação da amostragem para cada variável no modelo. A análise é uma medida da proporção de variância entre as variáveis que podem ser representativas da variância comum. Quanto menor for a proporção, mais adequados serão os seus dados para Análise Fatorial. O teste KMO retorna valores entre 0 e 1. A regra para interpretar os dados é: os valores de KMO entre 0,8 e 1 indicam que a amostragem é adequada; e os valores de KMO inferiores a 0,6 indicam que a amostragem não é adequada e que devem ser tomadas medidas corretivas. Alguns autores colocam esse valor em 0,5, então use seu próprio julgamento para valores entre 0,5 e 0,6. O teste de esfericidade de Barlett é um teste estatístico para verificar a presença de correlações entre as variáveis, conceitualmente semelhante ao teste KMO, este teste fornece como resposta a significância estatística de que a matriz de correlação tem correlações significantes entre pelo menos algumas das variáveis, valor de significância igual a zero (0) é esperado para uma análise fatorial satisfatória (HAIR Jr. *et al.*, 2009).

Análise de agrupamento

As análises de agrupamento reúnem indivíduos ou objetos em grupos tais que os objetos do mesmo grupo são mais parecidos uns com os outros do que com objetos de outros grupos. A ideia desta análise é maximizar a homogeneidade de objetos dentro de grupos, ao mesmo tempo que se maximiza a heterogeneidade entre os grupos (HAIR Jr. *et al.*, 2009). Os dados são comumente apresentados graficamente em dendogramas (Figura 225) no qual cada objeto é colocado em um eixo e o outro eixo representa os passos do procedimento hierárquico. A distância euclidiana é a medida de similaridade mais usada. Essencialmente é uma medida do comprimento de um segmento de reta desenhada entre dois objetos, quando representada graficamente (HAIR Jr. *et al.*, 2009). O método de Ward utiliza a soma dos quadrados dentro dos agrupamentos feita sobre todas as variáveis. Neste procedimento, a seleção do par de agrupamentos a combinar é baseada em qual combinação de agregados minimiza a soma interna de quadrados no conjunto completo de agrupamentos separados ou disjuntos. Em cada iteração, os dois agrupamentos combinados são aqueles que minimizam o aumento na soma total de quadrados em todas as variáveis em todos os agrupamentos (HAIR Jr. *et al.*, 2009).

Figura 225. Exemplo de dendograma.

Gráfico de caixas (*box plot*)

Este gráfico identifica observações atípicas através de uma representação pictórica da distribuição de dados de uma variável métrica para cada grupo (categoria) de uma variável não métrica. Os quartis superior e inferior da distribuição de dados formam os limites superior e inferior da caixa com o comprimento da caixa sendo a distância entre o 25º percentil e o 75º percentil. A caixa contém os 50% centrais dos dados, e quanto maior a caixa, maior a dispersão das observações. A mediana é representada por uma linha sólida dentro da caixa. Se a mediana se encontra próxima de um extremo da caixa, assimetria na direção oposta é indicada (HAIR Jr. *et al.*, 2009). Um exemplo deste tipo de gráfico está ilustrado na Figura 226. As linhas que se estendem a partir de cada caixa (chamada de *whiskers*) representam a distância da menor e maior das observações que estão a menos de um quartil da caixa. Observações atípicas (que variam entre 1,0 e 1,5 quartis da caixa) e valores extremos (valores a mais de 1,5 quartis do extremo da caixa) são representados por símbolos fora do *whiskers* (HAIR Jr. *et al.*, 2009).

Figura 226. Exemplo de *box plot*.

Otimização do Número de Variáveis Utilizadas em Regressões Múltiplas

As regressões múltiplas utilizam várias variáveis explicativas ($X_1, X_2, \dots, X_n$) para modelar uma variável dependente Y . Uma tendência é utilizar o maior número de variáveis explicativas disponíveis, em uma expectativa de melhorar a correlação do modelo e assim seu poder preditivo. Entretanto esse procedimento pode não ser o mais adequado, uma vez que o acréscimo de variáveis, embora possa acrescentar novas informações ao modelo de forma absoluta, não aumenta sua qualidade de forma significativa. Vários índices foram desenvolvidos para se medir de forma objetiva o aumento, ou o decréscimo, da qualidade da correlação, podendo-se então se obter o conjunto ótimo de variáveis explicativas. Destacam-se dois por seu significado, quais sejam, o R^2 e o AIC (BUSSAB, 2002; FREUND, 2006).

O R^2 ajustado, que é o coeficiente de determinação corrigido em relação ao coeficiente de determinação R^2 que leva em consideração o número de variáveis utilizadas no modelo e que pode inclusive assumir valor negativo se o coeficiente de determinação for próximo de zero. Seu valor é definido pela Equação 57.

$$57. R^2 = 1 - (1 - R^2) \times \left(\frac{W - 1}{W - p - 1} \right)$$

Em que,

W – soma dos pesos, que na maioria das vezes corresponde ao número de pontos em análise;

p – quantidade de variáveis explicativas.

Analizando-se as diversas combinações de variáveis explicativas, o conjunto que maximizar o valor de R^2 será o conjunto ótimo por esse critério. Outro importante índice é o AIC, Akaike's Information Criterion, definido pela Equação 58.

$$_{58.} AIC = W \times \ln\left(\frac{SEQ}{W}\right) + 2(p + q)$$

Em que,

SEQ - soma dos erros quadráticos.

W – soma dos pesos, que na maioria das vezes corresponde ao número de pontos em análise.

p – quantidade de variáveis explicativas.

q – quantidade de variáveis dependentes.

Este índice, proposto por Akaike (1973) é derivado da teoria da informação, com a métrica de Kullback e Leibler, que mede a informação perdida quando a aproximação do modelo é usada para representar a realidade completa. Em relação ao conjunto de variáveis, serve à seleção de modelo que penaliza modelos para os quais a adição de novas variáveis explicativas não fornece informações suficientes ao modelo, sendo o volume de informação medido pelo SEQ. O objetivo é minimizar o critério AIC, encontrando-se o conjunto de variáveis explicativas que cumpre esse objetivo. Os índices podem ser utilizados simultaneamente, verificando se conjuntos distintos de variáveis explicativas otimizam separadamente cada critério de seleção apresentado, ou se um mesmo conjunto otimiza ambos.

Intervalo de Confiança para Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação pode ser utilizado para se determinar se há alguma evidência sobre a associação estatisticamente significativa entre duas variáveis. Este índice pode variar entre -1 e 1, indicando o sinal respectivamente correlação negativa ou positiva. O valor do módulo informa o grau de correlação entre as variáveis, sendo que o valor 0 indica que não há correlação entre elas e o valor 1, correlação perfeita. O coeficiente de correlação da população, ρ , é desconhecido, mas pode ser estimado pontualmente por r , calculado a partir dos valores amostrais (BUSSAB, 2002; FREUND, 2006).

A partir da denominada transformação z de Fisher, uma mudança de escala de r para z, tem-se a distribuição ξ , dada pela Equação 59 (BUSSAB, 2002; FREUND, 2006).

$$59. \xi = \frac{1}{2} \times \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right)$$

A qual apresenta uma distribuição aproximadamente normal com média μ e desvio padrão σ dados pela

$$60. \mu = \frac{1}{2} \times \ln \left(\frac{1+p}{1-p} \right)$$

$$61. \sigma^2 = \frac{1}{(n-3)}$$

Em que,

n - tamanho da amostra;

p - valor da correlação populacional.

Pode-se construir um intervalo de confiança bicaudal para o valor de ξ centrado em μ pela Equação 62.

$$62. P(\mu - z(\alpha/2) \times \sqrt{\sigma^2} \leq \xi \leq \mu + z(\alpha/2) \times \sqrt{\sigma^2}) = 1 - \alpha$$

Ou um intervalo unicaudal:

$$63. P(\mu - z(\alpha/2) \times \sqrt{\sigma^2} \leq \xi) = 1 - \alpha$$

Em que,

$z(\alpha)$ – coordenada da distribuição normal reduzida, para uma dada significância α .

Os valores dos limites do intervalo de confiança de ρ podem ser restituídos isolando-se r na Equação 59, qual seja:

$$64. \quad r = \frac{e^{2\xi-1}}{e^{2\xi+1}}$$

O limite inferior do intervalo construído é o valor mínimo que ρ pode assumir, dada a significância α , podendo ser utilizado para verificar qual a estimativa da qualidade da correlação de ρ (BUSSAB, 2002; FREUND, 2006).

APÊNDICE B
GRÁFICOS E MEMÓRIA DE CÁLCULO EXALAÇÕES DE RADÔNIO

Tabela 50. Concentração específica em Bq/hm² – Capão Bonito – superfície polida.

Capão Bonito 18/06/2014			
Paralelo		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,37 lmin ⁻¹	Fluxo	0,37 lmin ⁻¹
Concentração 1	4000 Bq/m ³	Concentração 1	Bq/m ³
Concentração 2	1400 Bq/m ³	Concentração 2	Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	70 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	70 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1266 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²
Rn ²²²	777 Bq/hm ²	Rn ²²²	0 Bq/hm ²

Figura 227. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ - Capão Bonito – superfície polida. Tabela 51. Concentração específica em Bq/hm² – Capão Bonito – superfície cortada.

Capão Bonito 17/06/2014			
Paralelo		Superfície Corte	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,4 lmin ⁻¹	Fluxo	0,32 lmin ⁻¹
Concentração 1	6000 Bq/m ³	Concentração 1	7000 Bq/m ³
Concentração 2	1400 Bq/m ³	Concentração 2	1500 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	45 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	40 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	2421 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	2316 Bq/hm ²
Rn ²²²	840 Bq/hm ²	Rn ²²²	720 Bq/hm ²

Figura 228. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ - Capão Bonito – superfície cortada.

Tabela 52. Concentração específica em Bq/hm² – Basaltite – superfície rugosa.

Basaltite 02/07/2014			
Série		Superfície Rugosa	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,5 lmin ⁻¹	Fluxo	0,5 lmin ⁻¹
Concentração 1	1674 Bq/m ³	Concentração 1	1223 Bq/m ³
Concentração 2	305 Bq/m ³	Concentração 2	222 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	- Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	- Bq/m ³
Área	169 cm ²	Área	169 cm ²
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	2132 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	1559 Bq/hm ²
Rn ²²²	541 Bq/hm ²	Rn ²²²	394 Bq/hm ²

Figura 229. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Basaltite – superfície rugosa.

Tabela 53. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Cristal – superfície polida.

Branco Cristal 01/07/2014			
Série		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	2030 Bq/m ³	Concentração 1	792 Bq/m ³
Concentração 2	505 Bq/m ³	Concentração 2	291 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	- Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	- Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	502 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	165 Bq/hm ²
Rn ²²²	189 Bq/hm ²	Rn ²²²	109 Bq/hm ²

Figura 230. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Cristal – superfície polida. Tabela 54. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Cristal – superfície rugosa.

Branco Cristal 26/06/2014	
Paralelo	Superfície Rugosa
Radon Mapper 1	
Fluxo	0,45 lmin ⁻¹
Concentração 1	2066 Bq/m ³
Concentração 2	181 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	- Bq/m ³
Área	400 cm ²
Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1116 Bq/hm ²
Rn ²²²	122 Bq/hm ²

Figura 231. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Cristal – superfície rugosa.

Tabela 55. Concentração específica em Bq/hm² – Flor di Pesco – superfície polida.

Flor di Pesco 04/08/2014			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,5 lmin ⁻¹	Fluxo	0,5 lmin ⁻¹
Concentração 1	24 Bq/m ³	Concentração 1	49 Bq/m ³
Concentração 2	24 Bq/m ³	Concentração 2	49 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	- Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	- Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²
Rn ²²²	18 Bq/hm ²	Rn ²²²	37 Bq/hm ²

Figura 232. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Flor di Pesco – superfície polida.

Tabela 56. Concentração específica em Bq/hm² – Rosso Lucido – superfície polida.

Rosso Lucido 16/03/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,41 lmin ⁻¹	Fluxo	0,41 lmin ⁻¹
Concentração 1	206 Bq/m ³	Concentração 1	152 Bq/m ³
Concentração 2	75 Bq/m ³	Concentração 2	63 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	85 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	85 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	162 Bq/m ³	Mínimo 1	109 Bq/m ³
Máximo 1	281 Bq/m ³	Máximo 1	194 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	17 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	17 Bq/m ³
Mínimo 2	1 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	149 Bq/m ³	Máximo 2	120 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	38 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	40 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	71 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	48 Bq/hm ²
Rn ²²²	46 Bq/hm ²	Rn ²²²	39 Bq/hm ²

Figura 233. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Rosso Lucido – superfície polida. Tabela 57. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Suíça– superfície rugosa.

Branco Suíça 22/04/2015			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,405 lmin ⁻¹	Fluxo	0,405 lmin ⁻¹
Concentração 1	147 Bq/m ³	Concentração 1	138 Bq/m ³
Concentração 2	112 Bq/m ³	Concentração 2	75 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	38 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	38 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	41 Bq/m ³	Mínimo 1	82 Bq/m ³
Máximo 1	178 Bq/m ³	Máximo 1	138 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	12 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	11 Bq/m ³
Mínimo 2	31 Bq/m ³	Mínimo 2	1 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	178 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	48 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	65 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	19 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	34 Bq/hm ²
Rn ²²²	68 Bq/hm ²	Rn ²²²	46 Bq/hm ²

Figura 234. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Suíça – superfície rugosa.

Tabela 58. Concentração específica em Bq/hm² – Sodalita – superfície polida.

Sodalita 01/04/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,395 lmin ⁻¹	Fluxo	0,395 lmin ⁻¹
Concentração 1	660 Bq/m ³	Concentração 1	460 Bq/m ³
Concentração 2	212 Bq/m ³	Concentração 2	175 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	34 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	34 Bq/m ³
Área	100 cm ²	Área	100 cm ²
Mínimo 1	575 Bq/m ³	Mínimo 1	398 Bq/m ³
Máximo 1	723 Bq/m ³	Máximo 1	528 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	24 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	22 Bq/m ³
Mínimo 2	119 Bq/m ³	Mínimo 2	1 Bq/m ³
Máximo 2	355 Bq/m ³	Máximo 2	326 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	65 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	101 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	931 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	593 Bq/hm ²
Rn ²²²	502 Bq/hm ²	Rn ²²²	415 Bq/hm ²

Figura 235. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Sodalita – superfície polida.

Tabela 59. Concentração específica em Bq/hm² – Lusera Fiamatta – superfície cortada.

Lusera Fiamatta 22/01/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	712 Bq/m ³	Concentração 1	424 Bq/m ³
Concentração 2	256 Bq/m ³	Concentração 2	150 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	57 Bq/m ³	Ambiente	57 Bq/m ³
Área	408 cm ²	Área	408 cm ²
Mínimo 1	590 Bq/m ³	Mínimo 1	335 Bq/m ³
Máximo 1	793 Bq/m ³	Máximo 1	523 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	36 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	34 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	561 Bq/m ³	Máximo 2	326 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	113 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	85 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	147 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	88 Bq/hm ²
Rn ²²²	94 Bq/hm ²	Rn ²²²	55 Bq/hm ²

Figura 236. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Lusera Fiamatta – superfície cortada. Tabela 60. Concentração específica em Bq/hm² – Lusera Fiamatta – superfície rugosa.

Lusera Fiamatta 03/12/2015			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	2519 Bq/m ³	Concentração 1	1455 Bq/m ³
Concentração 2	701 Bq/m ³	Concentração 2	398 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	38 Bq/m ³	Ambiente	38 Bq/m ³
Área	408 cm ²	Área	408 cm ²
Mínimo 1	2434 Bq/m ³	Mínimo 1	1391 Bq/m ³
Máximo 1	2616 Bq/m ³	Máximo 1	1539 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	36 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	22 Bq/m ³
Mínimo 2	384 Bq/m ³	Mínimo 2	178 Bq/m ³
Máximo 2	1149 Bq/m ³	Máximo 2	767 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	151 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	114 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	586 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	341 Bq/hm ²
Rn ²²²	258 Bq/hm ²	Rn ²²²	146 Bq/hm ²

Figura 237. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Lusera Fiamatta – superfície rugosa.

Tabela 61. Concentração específica em Bq/hm² – Pietra Lavica – superfície rugosa.

Pietra Lavica 10/09/2015			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,245 lmin ⁻¹	Fluxo	0,245 lmin ⁻¹
Concentração 1	510 Bq/m ³	Concentração 1	276 Bq/m ³
Concentração 2	127 Bq/m ³	Concentração 2	76 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	40 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	40 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	424 Bq/m ³	Mínimo 1	218 Bq/m ³
Máximo 1	578 Bq/m ³	Máximo 1	339 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	28 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	23 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	355 Bq/m ³	Máximo 2	296 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	68 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	56 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	123 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	64 Bq/hm ²
Rn ²²²	47 Bq/hm ²	Rn ²²²	28 Bq/hm ²

Figura 238. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Pietra Lavica – superfície rugosa.

Tabela 62. Concentração específica em Bq/hm² – Rosa Capri – superfície polida.

Rosa Capri 28/07/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	331 Bq/m ³	Concentração 1	192 Bq/m ³
Concentração 2	175 Bq/m ³	Concentração 2	68 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	49 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	49 Bq/m ³
Área	125 cm ²	Área	125 cm ²
Mínimo 1	90 Bq/m ³	Mínimo 1	60 Bq/m ³
Máximo 1	595 Bq/m ³	Máximo 1	379 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	70 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	51 Bq/m ³
Mínimo 2	60 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	502 Bq/m ³	Máximo 2	178 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	114 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	44 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	164 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	131 Bq/hm ²
Rn ²²²	210 Bq/hm ²	Rn ²²²	82 Bq/hm ²

Figura 239. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Rosa Capri – superfície polida. Tabela 63. Concentração específica em Bq/hm² – Rosa Capri – superfície rugosa.

Rosa Capri 31/07/2015			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	356 Bq/m ³	Concentração 1	214 Bq/m ³
Concentração 2	190 Bq/m ³	Concentração 2	112 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	52 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	52 Bq/m ³
Área	125 cm ²	Área	125 cm ²
Mínimo 1	160 Bq/m ³	Mínimo 1	160 Bq/m ³
Máximo 1	290 Bq/m ³	Máximo 1	290 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	22 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	214 Bq/m ³
Mínimo 2	1 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	384 Bq/m ³	Máximo 2	355 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	110 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	77 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	175 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	107 Bq/hm ²
Rn ²²²	228 Bq/hm ²	Rn ²²²	134 Bq/hm ²

Figura 240. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Rosa Capri – superfície rugosa.

Tabela 64. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Siena – superfície polida.

Branco Siena 28/05/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,4 lmin ⁻¹	Fluxo	0,4 lmin ⁻¹
Concentração 1	57 Bq/m ³	Concentração 1	49 Bq/m ³
Concentração 2	36 Bq/m ³	Concentração 2	20 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	39 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	39 Bq/m ³
Área	176 cm ²	Área	176 cm ²
Mínimo 1	0 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	83 Bq/m ³	Máximo 1	76 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	10 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	9 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	90 Bq/m ³	Máximo 2	120 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	26 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	33 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	25 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	35 Bq/hm ²
Rn ²²²	49 Bq/hm ²	Rn ²²²	27 Bq/hm ²

Figura 241. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Siena – superfície polida.

Tabela 65. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Siena – superfície rugosa.

Branco Siena			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,4 lmin ⁻¹	Fluxo	0,4 lmin ⁻¹
Concentração 1	76 Bq/m ³	Concentração 1	65 Bq/m ³
Concentração 2	69 Bq/m ³	Concentração 2	31 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	60 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	60 Bq/m ³
Área	176 cm ²	Área	176 cm ²
Mínimo 1	37 Bq/m ³	Mínimo 1	24 Bq/m ³
Máximo 1	117 Bq/m ³	Máximo 1	108 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	17 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	16 Bq/m ³
Mínimo 2	31 Bq/m ³	Mínimo 2	1 Bq/m ³
Máximo 2	120 Bq/m ³	Máximo 2	90 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	24 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	34 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	8 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	41 Bq/hm ²
Rn ²²²	94 Bq/hm ²	Rn ²²²	42 Bq/hm ²

Figura 242. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Siena – superfície rugosa. Tabela 66. Concentração específica em Bq/hm² – Maracujá – superfície polida.

Maracujá 24/06/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	715 Bq/m ³	Concentração 1	388 Bq/m ³
Concentração 2	203 Bq/m ³	Concentração 2	140 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	35 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	35 Bq/m ³
Área	277 cm ²	Área	277 cm ²
Mínimo 1	607 Bq/m ³	Mínimo 1	325 Bq/m ³
Máximo 1	873 Bq/m ³	Máximo 1	455 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	35 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	24 Bq/m ³
Mínimo 2	149 Bq/m ³	Mínimo 2	60 Bq/m ³
Máximo 2	296 Bq/m ³	Máximo 2	267 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	44 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	73 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	243 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	118 Bq/hm ²
Rn ²²²	110 Bq/hm ²	Rn ²²²	76 Bq/hm ²

Figura 243. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Maracujá – superfície polida.

Tabela 67. Concentração específica em Bq/hm² – Maracujá – superfície rugosa.

Maracujá 29/06/2015			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	748 Bq/m ³	Concentração 1	416 Bq/m ³
Concentração 2	249 Bq/m ³	Concentração 2	154 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	49 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	49 Bq/m ³
Área	277 cm ²	Área	277 cm ²
Mínimo 1	341 Bq/m ³	Mínimo 1	1 Bq/m ³
Máximo 1	492 Bq/m ³	Máximo 1	443 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	30 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	77 Bq/m ³
Mínimo 2	1 Bq/m ³	Mínimo 2	341 Bq/m ³
Máximo 2	443 Bq/m ³	Máximo 2	492 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	98 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	30 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	237 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	124 Bq/hm ²
Rn ²²²	135 Bq/hm ²	Rn ²²²	83 Bq/hm ²

Figura 244. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Maracujá – superfície rugosa.

Tabela 68. Concentração específica em Bq/hm² – Vermelho Bragança – superfície polida.

Vermelho Bragança 26/01/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	1212 Bq/m ³	Concentração 1	633 Bq/m ³
Concentração 2	400 Bq/m ³	Concentração 2	241 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	24 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	24 Bq/m ³
Área	238 cm ²	Área	238 cm ²
Mínimo 1	707 Bq/m ³	Mínimo 1	266 Bq/m ³
Máximo 1	1943 Bq/m ³	Máximo 1	1090 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	227 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	633 Bq/m ³
Mínimo 2	207 Bq/m ³	Mínimo 2	119 Bq/m ³
Máximo 2	708 Bq/m ³	Máximo 2	384 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	123 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	84 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	449 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	217 Bq/hm ²
Rn ²²²	252 Bq/hm ²	Rn ²²²	152 Bq/hm ²

Figura 245. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Vermelho Bragança – superfície polida. Tabela 69. Concentração específica em Bq/hm² – Vermelho Bragança – superfície rugosa.

Vermelho Bragança 28/01/2016			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	3092 Bq/m ³	Concentração 1	1816 Bq/m ³
Concentração 2	797 Bq/m ³	Concentração 2	241 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	41 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	41 Bq/m ³
Área	238 cm ²	Área	238 cm ²
Mínimo 1	2149 Bq/m ³	Mínimo 1	943 Bq/m ³
Máximo 1	4414 Bq/m ³	Máximo 1	2708 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	407 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	308 Bq/m ³
Mínimo 2	443 Bq/m ³	Mínimo 2	119 Bq/m ³
Máximo 2	1120 Bq/m ³	Máximo 2	384 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	391 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	84 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1269 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	871 Bq/hm ²
Rn ²²²	502 Bq/hm ²	Rn ²²²	152 Bq/hm ²

Figura 246. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Vermelho Bragança – superfície rugosa.

Tabela 70. Concentração específica em Bq/hm² – Azul Bahia Escuro – superfície polida.

Azul Bahia Escuro 15/05/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,4 lmin ⁻¹	Fluxo	0,4 lmin ⁻¹
Concentração 1	81 Bq/m ³	Concentração 1	69 Bq/m ³
Concentração 2	65 Bq/m ³	Concentração 2	55 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	53 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	53 Bq/m ³
Área	176 cm ²	Área	176 cm ²
Mínimo 1	52 Bq/m ³	Mínimo 1	39 Bq/m ³
Máximo 1	125 Bq/m ³	Máximo 1	106 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	15 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	12 Bq/m ³
Mínimo 2	31 Bq/m ³	Mínimo 2	1 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	120 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	31 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	47 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	19 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	17 Bq/hm ²
Rn ²²²	89 Bq/hm ²	Rn ²²²	75 Bq/hm ²

Figura 247. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Azul Bahia Escuro – superfície polida.

Tabela 71. Concentração específica em Bq/hm² – Azul Bahia Escuro – superfície corte.

Azul Bahia Escuro 22/05/2015			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,4 lmin ⁻¹	Fluxo	0,4 lmin ⁻¹
Concentração 1	86 Bq/m ³	Concentração 1	73 Bq/m ³
Concentração 2	65 Bq/m ³	Concentração 2	27 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	58 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	58 Bq/m ³
Área	176 cm ²	Área	176 cm ²
Mínimo 1	48 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	130 Bq/m ³	Máximo 1	114 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	16 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	17 Bq/m ³
Mínimo 2	1 Bq/m ³	Mínimo 2	1 Bq/m ³
Máximo 2	120 Bq/m ³	Máximo 2	61 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	40 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	19 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	25 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	55 Bq/hm ²
Rn ²²²	89 Bq/hm ²	Rn ²²²	37 Bq/hm ²

Figura 248. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Azul Bahia Escuro – superfície corte. Tabela 72. Concentração específica em Bq/hm² – Cinza Corumbá – superfície polida.

Cinza Corumbá 10/06/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,395 lmin ⁻¹	Fluxo	0,395 lmin ⁻¹
Concentração 1	1609 Bq/m ³	Concentração 1	1114 Bq/m ³
Concentração 2	629 Bq/m ³	Concentração 2	310 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	58 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	58 Bq/m ³
Área	196 cm ²	Área	196 cm ²
Mínimo 1	1504 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	1716 Bq/m ³	Máximo 1	443 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	42 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	169 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	1025 Bq/m ³
Máximo 2	796 Bq/m ³	Máximo 2	1223 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	332 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	33 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1039 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	853 Bq/hm ²
Rn ²²²	761 Bq/hm ²	Rn ²²²	375 Bq/hm ²

Figura 249. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Cinza Corumbá – superfície polida.

Tabela 73. Concentração específica em Bq/hm² – Cinza Corumbá – superfície rugosa.

Cinza Corumbá 16/06/2015			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,395 lmin ⁻¹	Fluxo	0,395 lmin ⁻¹
Concentração 1	2153 Bq/m ³	Concentração 1	1296 Bq/m ³
Concentração 2	739 Bq/m ³	Concentração 2	518 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³
Área	196 cm ²	Área	196 cm ²
Mínimo 1	1976 Bq/m ³	Mínimo 1	1296 Bq/m ³
Máximo 1	2337 Bq/m ³	Máximo 1	1489 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	63 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	56 Bq/m ³
Mínimo 2	364 Bq/m ³	Mínimo 2	266 Bq/m ³
Máximo 2	1355 Bq/m ³	Máximo 2	914 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	270 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	172 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1500 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	825 Bq/hm ²
Rn ²²²	894 Bq/hm ²	Rn ²²²	626 Bq/hm ²

Figura 250. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Cinza Corumbá – superfície rugosa.

Tabela 74. Concentração específica em Bq/hm² – Café Imperial – superfície polida.

Café Imperial MG 06/11/2015			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	79 Bq/m ³	Concentração 1	62 Bq/m ³
Concentração 2	32 Bq/m ³	Concentração 2	25 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	46 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	46 Bq/m ³
Área	321 cm ²	Área	321 cm ²
Mínimo 1	36 Bq/m ³	Mínimo 1	23 Bq/m ³
Máximo 1	125 Bq/m ³	Máximo 1	107 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	21 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	21 Bq/m ³
Mínimo 2	9 Bq/m ³	Mínimo 2	8 Bq/m ³
Máximo 2	53 Bq/m ³	Máximo 2	55 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	7 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	7 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	19 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	15 Bq/hm ²
Rn ²²²	15 Bq/hm ²	Rn ²²²	12 Bq/hm ²

Figura 251. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Café Imperial – superfície polida. Tabela 75. Concentração específica em Bq/hm² – Café Imperial – superfície rugosa.

Café Imperial MG 16/11/2015			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	104 Bq/m ³	Concentração 1	74 Bq/m ³
Concentração 2	71 Bq/m ³	Concentração 2	67 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	46 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	46 Bq/m ³
Área	321 cm ²	Área	321 cm ²
Mínimo 1	63 Bq/m ³	Mínimo 1	42 Bq/m ³
Máximo 1	149 Bq/m ³	Máximo 1	114 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	18 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	17 Bq/m ³
Mínimo 2	11 Bq/m ³	Mínimo 2	6 Bq/m ³
Máximo 2	159 Bq/m ³	Máximo 2	164 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	27 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	27 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	14 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	3 Bq/hm ²
Rn ²²²	33 Bq/hm ²	Rn ²²²	31 Bq/hm ²

Figura 252. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Café Imperial – superfície rugosa.

Tabela 76. Concentração específica em Bq/hm² – Iragua – superfície polida.

Iragua			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,45 lmin ⁻¹	Fluxo	0,45 lmin ⁻¹
Concentração	175 Bq/m ³	Concentração 1	75 Bq/m ³
Concentração	80 Bq/m ³	Concentração 2	35 Bq/m ³
Ambiente	50 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	50 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	56 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	24 Bq/hm ²
Rn ²²²	54 Bq/hm ²	Rn ²²²	24 Bq/hm ²

Tabela 77. Concentração específica em Bq/hm² – Iragua – superfície rugosa.

Iragua			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,6 lmin ⁻¹	Fluxo	0,6 lmin ⁻¹
Concentração	270 Bq/m ³	Concentração 1	190 Bq/m ³
Concentração	190 Bq/m ³	Concentração 2	45 Bq/m ³
Ambiente	50 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	50 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	63 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	114 Bq/hm ²
Rn ²²²	171 Bq/hm ²	Rn ²²²	41 Bq/hm ²

Tabela 78. Concentração específica em Bq/hm² – Pietra Lavica (1) – superfície rugosa.

Pietra Lavica (1) 08/01/2016			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,245 lmin ⁻¹	Fluxo	0,245 lmin ⁻¹
Concentração 1	183 Bq/m ³	Concentração 1	121 Bq/m ³
Concentração 2	84 Bq/m ³	Concentração 2	50 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	43 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	43 Bq/m ³
Área	321 cm ²	Área	321 cm ²
Mínimo 1	127 Bq/m ³	Mínimo 1	79 Bq/m ³
Máximo 1	261 Bq/m ³	Máximo 1	163 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	18 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	14 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	237 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	54 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	49 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	40 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	29 Bq/hm ²
Rn ²²²	38 Bq/hm ²	Rn ²²²	23 Bq/hm ²

Figura 253. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Pietra Lavica (1) – superfície rugosa. Tabela 79. Concentração específica em Bq/hm² – Azul Bahia – superfície polida.

Azul Bahia 03/02/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	76 Bq/m ³	Concentração 1	61 Bq/m ³
Concentração 2	57 Bq/m ³	Concentração 2	45 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	44 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	44 Bq/m ³
Área	196 cm ²	Área	196 cm ²
Mínimo 1	46 Bq/m ³	Mínimo 1	30 Bq/m ³
Máximo 1	126 Bq/m ³	Máximo 1	114 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	16 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	17 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	208 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	49 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	48 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	13 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	11 Bq/hm ²
Rn ²²²	44 Bq/hm ²	Rn ²²²	34 Bq/hm ²

Figura 254. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Azul Bahia – superfície polida.

Tabela 80. Concentração específica em Bq/hm² – Azul Bahia – superfície corte.

Azul Bahia 01/02/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	82 Bq/m ³	Concentração 1	64 Bq/m ³
Concentração 2	74 Bq/m ³	Concentração 2	50 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	40 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	40 Bq/m ³
Área	196 cm ²	Área	196 cm ²
Mínimo 1	25 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	133 Bq/m ³	Máximo 1	131 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	24 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	27 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	326 Bq/m ³	Máximo 2	237 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	74 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	49 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	5 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	9 Bq/hm ²
Rn ²²²	57 Bq/hm ²	Rn ²²²	38 Bq/hm ²

Figura 255. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Azul Bahia – superfície corte.

Tabela 81. Concentração específica em Bq/hm² – Vermelho Jacarandá – superfície polida.

Vermelho Jacaranda 24/02/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	7722 Bq/m ³	Concentração 1	4303 Bq/m ³
Concentração 2	2095 Bq/m ³	Concentração 2	1189 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	33 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	33 Bq/m ³
Área	260 cm ²	Área	260 cm ²
Mínimo 1	7168 Bq/m ³	Mínimo 1	2840 Bq/m ³
Máximo 1	8340 Bq/m ³	Máximo 1	4855 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	177 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	194 Bq/m ³
Mínimo 2	1384 Bq/m ³	Mínimo 2	707 Bq/m ³
Máximo 2	3031 Bq/m ³	Máximo 2	1737 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	344 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	216 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	2848 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	1576 Bq/hm ²
Rn ²²²	1209 Bq/hm ²	Rn ²²²	686 Bq/hm ²

Figura 256. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Vermelho Jacarandá – superfície polida. Tabela 82. Concentração específica em Bq/hm² – Vermelho Jacarandá – superfície rugosa.

Vermelho Jacaranda 02/03/2016			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	6959 Bq/m ³	Concentração 1	3793 Bq/m ³
Concentração 2	1981 Bq/m ³	Concentração 2	1156 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	54 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	54 Bq/m ³
Área	260 cm ²	Área	260 cm ²
Mínimo 1	6450 Bq/m ³	Mínimo 1	3178 Bq/m ³
Máximo 1	7255 Bq/m ³	Máximo 1	4138 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	139 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	126 Bq/m ³
Mínimo 2	1384 Bq/m ³	Mínimo 2	649 Bq/m ³
Máximo 2	2826 Bq/m ³	Máximo 2	1649 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	266 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	190 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	2519 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	1335 Bq/hm ²
Rn ²²²	1143 Bq/hm ²	Rn ²²²	667 Bq/hm ²

Figura 257. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Vermelho Jacarandá – superfície rugosa.

Tabela 83. Concentração específica em Bq/hm² – Onsernone Lucido – superfície polida.

Onsernone 16/02/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	78 Bq/m ³	Concentração 1	69 Bq/m ³
Concentração 2	68 Bq/m ³	Concentração 2	68 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	71 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	71 Bq/m ³
Área	277,5 cm ²	Área	277,5 cm ²
Mínimo 1	1 Bq/m ³	Mínimo 1	6 Bq/m ³
Máximo 1	183 Bq/m ³	Máximo 1	159 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	30 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	26 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	237 Bq/m ³	Máximo 2	208 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	52 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	53 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	5 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²
Rn ²²²	37 Bq/hm ²	Rn ²²²	37 Bq/hm ²

Figura 258. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Onsernone Lucido – superfície polida.

Tabela 84. Concentração específica em Bq/hm² – Onsernone Lucido – superfície rugosa.

Onsernone 19/02/2016			
Série		Superfície Rugosa	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	279 Bq/m ³	Concentração 1	176 Bq/m ³
Concentração 2	88 Bq/m ³	Concentração 2	54 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³
Área	277,5 cm ²	Área	277,5 cm ²
Mínimo 1	214 Bq/m ³	Mínimo 1	72 Bq/m ³
Máximo 1	362 Bq/m ³	Máximo 1	239 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	28 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	24 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	54 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	46 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	91 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	58 Bq/hm ²
Rn ²²²	48 Bq/hm ²	Rn ²²²	29 Bq/hm ²

Figura 259. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Onsernone Lucido – superfície rugosa. Tabela 85. Concentração específica em Bq/hm² – Cinza Castelo – superfície polida.

Cinza Castelo 10/09/2016			
Série		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,24 lmin ⁻¹	Fluxo	0,24 lmin ⁻¹
Concentração 1	256 Bq/m ³	Concentração 1	166 Bq/m ³
Concentração 2	116 Bq/m ³	Concentração 2	91 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	54 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	54 Bq/m ³
Área	270 cm ²	Área	270 cm ²
Mínimo 1	174 Bq/m ³	Mínimo 1	94 Bq/m ³
Máximo 1	363 Bq/m ³	Máximo 1	264 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	35 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	30 Bq/m ³
Mínimo 2	1 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	355 Bq/m ³	Máximo 2	208 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	70 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	54 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	65 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	35 Bq/hm ²
Rn ²²²	62 Bq/hm ²	Rn ²²²	49 Bq/hm ²

Figura 260. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Cinza Castelo – superfície polida.

Tabela 86. Concentração específica em Bq/hm² – Cinza Castelo – superfície rugosa.

Cinza Castelo 13/09/2016			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	255 Bq/m ³	Concentração 1	164 Bq/m ³
Concentração 2	109 Bq/m ³	Concentração 2	81 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	41 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	41 Bq/m ³
Área	270 cm ²	Área	270 cm ²
Mínimo 1	178 Bq/m ³	Mínimo 1	101 Bq/m ³
Máximo 1	342 Bq/m ³	Máximo 1	235 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	28 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	22 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	267 Bq/m ³	Máximo 2	237 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	67 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	59 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	71 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	40 Bq/hm ²
Rn ²²²	61 Bq/hm ²	Rn ²²²	45 Bq/hm ²

Figura 261. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Cinza Castelo – superfície rugosa.

Tabela 87. Concentração específica em Bq/hm² – Verde Pavão – superfície rugosa.

Verde Pavão 13/04/2016			
Paralelo		Superfície Rugosa	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	163 Bq/m ³	Concentração 1	118 Bq/m ³
Concentração 2	37 Bq/m ³	Concentração 2	27 Bq/m ³
Ambiente	49 Bq/m ³	Ambiente	49 Bq/m ³
Área	260 cm ²	Área	260 cm ²
Mínimo 1	46 Bq/m ³	Mínimo 1	11 Bq/m ³
Maxímo 1	316 Bq/m ³	Maxímo 1	257 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	50 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	47 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	149 Bq/m ³	Maxímo 2	90 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	40 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	29 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	64 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	46 Bq/hm ²
Rn ²²²	21 Bq/hm ²	Rn ²²²	16 Bq/hm ²

Figura 262. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Verde Pavão – superfície rugosa. Tabela 88. Concentração específica em Bq/hm² – Verde Pavão – superfície polida.

Verde Pavão 18/04/2016			
Paralelo		Superfície Polido	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	61 Bq/m ³	Concentração 1	46 Bq/m ³
Concentração 2	45 Bq/m ³	Concentração 2	35 Bq/m ³
Ambiente	47 Bq/m ³	Ambiente	47 Bq/m ³
Área	260 cm ²	Área	260 cm ²
Mínimo 1	6 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Maxímo 1	144 Bq/m ³	Maxímo 1	133 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	23 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	21 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	208 Bq/m ³	Maxímo 2	178 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	Bq/m ³	Desvio Padrão 2	38 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	8 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	6 Bq/hm ²
Rn ²²²	26 Bq/hm ²	Rn ²²²	20 Bq/hm ²

Figura 263. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Verde Pavão – superfície polida.

Tabela 89. Concentração específica em Bq/hm² – Café Imperial Claro – superfície corte.

Café Imperial Claro 09/05/2016			
Paralelo	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	97 Bq/m ³	Concentração 1	77 Bq/m ³
Concentração 2	52 Bq/m ³	Concentração 2	41 Bq/m ³
Ambiente	64 Bq/m ³	Ambiente	64 Bq/m ³
Área	192 cm ²	Área	192 cm ²
Mínimo 1	50 Bq/m ³	Mínimo 1	33 Bq/m ³
Maxímo 1	151 Bq/m ³	Maxímo 1	145 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	18 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	22 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	1 Bq/m ³
Maxímo 2	149 Bq/m ³	Maxímo 2	90 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	52 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	26 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	31 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	25 Bq/hm ²
Rn ²²²	41 Bq/hm ²	Rn ²²²	32 Bq/hm ²

Figura 264. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Café Imperial Claro – superfície corte.

Tabela 90. Concentração específica em Bq/hm² – Café Imperial Claro – superfície polida.

Café Imperial Claro 06/05/2016			
Paralelo		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	98 Bq/m ³	Concentração 1	88 Bq/m ³
Concentração 2	60 Bq/m ³	Concentração 2	51 Bq/m ³
Ambiente	89 Bq/m ³	Ambiente	89 Bq/m ³
Área	192 cm ²	Área	192 cm ²
Mínimo 1	13 Bq/m ³	Mínimo 1	43 Bq/m ³
Maxímo 1	167 Bq/m ³	Maxímo 1	154 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	20 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	19 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	237 Bq/m ³	Maxímo 2	178 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	52 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	41 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	26 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	25 Bq/hm ²
Rn ²²²	47 Bq/hm ²	Rn ²²²	40 Bq/hm ²

Figura 265. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Café Imperial Claro – superfície polida. Tabela 91. Concentração específica em Bq/hm² – Cinza Novo Mundo – superfície polida.

Cinza Novo Mundo 24/03/2016			
Paralelo		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	18261 Bq/m ³	Concentração 1	10302 Bq/m ³
Concentração 2	5191 Bq/m ³	Concentração 2	3473 Bq/m ³
Ambiente	43 Bq/m ³	Ambiente	43 Bq/m ³
Área	260 cm ²	Área	260 cm ²
Mínimo 1	17701 Bq/m ³	Mínimo 1	9785 Bq/m ³
Maxímo 1	19436 Bq/m ³	Maxímo 1	10987 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	228 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	178 Bq/m ³
Mínimo 2	4619 Bq/m ³	Mínimo 2	2413 Bq/m ³
Maxímo 2	5796 Bq/m ³	Maxímo 2	3473 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	325 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	237 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	6614 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	3456 Bq/hm ²
Rn ²²²	2995 Bq/hm ²	Rn ²²²	2004 Bq/hm ²

Figura 266. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Cinza Novo Mundo – superfície polida.

Tabela 92. Concentração específica em Bq/hm² – Cinza Novo Mundo – superfície corte.

Cinza Novo Mundo 28/03/2016			
Paralelo		Superfície Corte	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	19572 Bq/m ³	Concentração 1	11195 Bq/m ³
Concentração 2	5569 Bq/m ³	Concentração 2	3095 Bq/m ³
Ambiente	47 Bq/m ³	Ambiente	47 Bq/m ³
Área	260 cm ²	Área	260 cm ²
Mínimo 1	18080 Bq/m ³	Mínimo 1	10281 Bq/m ³
Maxímo 1	21100 Bq/m ³	Maxímo 1	12175 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	411 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	316 Bq/m ³
Mínimo 2	4796 Bq/m ³	Mínimo 2	2531 Bq/m ³
Maxímo 2	6443 Bq/m ³	Maxímo 2	3561 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	371 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	263 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	7087 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	4099 Bq/hm ²
Rn ²²²	3213 Bq/hm ²	Rn ²²²	1786 Bq/hm ²

Figura 267. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Cinza Novo Mundo – superfície corte.

Tabela 93. Concentração específica em Bq/hm² – Blinder Vermelho Claro – superfície corte.

Blinder Vermelho Claro 18/10/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,24 lmin ⁻¹	Fluxo	0,24 lmin ⁻¹
Concentração 1	16643 Bq/m ³	Concentração 1	9757 Bq/m ³
Concentração 2	4354 Bq/m ³	Concentração 2	2609 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	34 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	34 Bq/m ³
Área	392 cm ²	Área	392 cm ²
Mínimo 1	15575 Bq/m ³	Mínimo 1	8874 Bq/m ³
Máximo 1	18076 Bq/m ³	Máximo 1	10536 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	380 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	279 Bq/m ³
Mínimo 2	3413 Bq/m ³	Mínimo 2	1796 Bq/m ³
Máximo 2	5649 Bq/m ³	Máximo 2	3296 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	397 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	320 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	3960 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	2303 Bq/hm ²
Rn ²²²	1599 Bq/hm ²	Rn ²²²	958 Bq/hm ²

Figura 268. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Blinder Vermelho Claro – superfície corte. Tabela 94. Concentração específica em Bq/hm² – Blinder Cinza Escuro – superfície corte.

Blinder Cinza Escuro 24/10/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	47 Bq/m ³	Concentração 1	37 Bq/m ³
Concentração 2	62 Bq/m ³	Concentração 2	55 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³
Área	253 cm ²	Área	253 cm ²
Mínimo 1	24 Bq/m ³	Mínimo 1	13 Bq/m ³
Máximo 1	87 Bq/m ³	Máximo 1	69 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	9 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	37 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	237 Bq/m ³	Máximo 2	296 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	62 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	51 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²
Rn ²²²	37 Bq/hm ²	Rn ²²²	33 Bq/hm ²

Figura 269. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Blinder Cinza Escuro– superfície corte.

Tabela 95. Concentração específica em Bq/hm² – Basaltite – superfície corte.

Basaltite 16/11/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	2980 Bq/m ³	Concentração 1	1810 Bq/m ³
Concentração 2	834 Bq/m ³	Concentração 2	530 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	43 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	43 Bq/m ³
Área	123,25 cm ²	Área	123,25 cm ²
Mínimo 1	2408 Bq/m ³	Mínimo 1	1433 Bq/m ³
Máximo 1	3445 Bq/m ³	Máximo 1	2147 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	159 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	125 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	237 Bq/m ³
Máximo 2	1296 Bq/m ³	Máximo 2	826 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	277 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	132 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	2291 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	1366 Bq/hm ²
Rn ²²²	1015 Bq/hm ²	Rn ²²²	645 Bq/hm ²

Figura 270. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Basaltite– superfície corte.

Tabela 96. Concentração específica em Bq/hm² – Bege Ipanema – superfície rugosa.

Bege Ipanema 14/10/2016			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	248 Bq/m ³	Concentração 1	159 Bq/m ³
Concentração 2	88 Bq/m ³	Concentração 2	73 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	34 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	34 Bq/m ³
Área	90 cm ²	Área	90 cm ²
Mínimo 1	139 Bq/m ³	Mínimo 1	90 Bq/m ³
Máximo 1	355 Bq/m ³	Máximo 1	245 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	34 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	30 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	296 Bq/m ³	Máximo 2	267 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	88 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	55 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	234 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	126 Bq/hm ²
Rn ²²²	147 Bq/hm ²	Rn ²²²	122 Bq/hm ²

Figura 271. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Bege Ipanema – superfície rugosa. Tabela 97. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Ceará – superfície polida.

Branco Ceará 20/09/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	107 Bq/m ³	Concentração 1	76 Bq/m ³
Concentração 2	72 Bq/m ³	Concentração 2	68 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	39 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	39 Bq/m ³
Área	200 cm ²	Área	200 cm ²
Mínimo 1	21 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	267 Bq/m ³	Máximo 1	198 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	39 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	33 Bq/m ³
Mínimo 2	1 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	237 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	48 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	53 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	23 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	5 Bq/hm ²
Rn ²²²	54 Bq/hm ²	Rn ²²²	51 Bq/hm ²

Figura 272. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Ceará – superfície polida.

Tabela 98. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Ceará – superfície corte.

Branco Ceará 23/09/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,24 lmin ⁻¹	Fluxo	0,24 lmin ⁻¹
Concentração 1	115 Bq/m ³	Concentração 1	79 Bq/m ³
Concentração 2	84 Bq/m ³	Concentração 2	45 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	39 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	39 Bq/m ³
Área	200 cm ²	Área	200 cm ²
Mínimo 1	11 Bq/m ³	Mínimo 1	1 Bq/m ³
Máximo 1	252 Bq/m ³	Máximo 1	237 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	39 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	33 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	267 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	53 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	43 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	20 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	21 Bq/hm ²
Rn ²²²	60 Bq/hm ²	Rn ²²²	32 Bq/hm ²

Figura 273. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Ceará – superfície corte.

Tabela 99. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Marfim – superfície polida.

Branco Marfim 26/09/2016			
Série		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	62 Bq/m ³	Concentração 1	49 Bq/m ³
Concentração 2	43 Bq/m ³	Concentração 2	38 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	33 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	33 Bq/m ³
Área	130 cm ²	Área	130 cm ²
Mínimo 1	0 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	149 Bq/m ³	Máximo 1	125 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	26 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	24 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	178 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	43 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	37 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	19 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	11 Bq/hm ²
Rn ²²²	50 Bq/hm ²	Rn ²²²	44 Bq/hm ²

Figura 274. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Marfim – superfície polida. Tabela 100. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Marfim – superfície rugosa.

Branco Marfim 20/08/2016			
Série		Superfície Rugosa	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	82 Bq/m ³	Concentração 1	79 Bq/m ³
Concentração 2	102 Bq/m ³	Concentração 2	91 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	56 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	56 Bq/m ³
Área	104 cm ²	Área	104 cm ²
Mínimo 1	0 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	296 Bq/m ³	Máximo 1	296 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	62 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	59 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	237 Bq/m ³	Máximo 2	178 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	48 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	57 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²
Rn ²²²	147 Bq/hm ²	Rn ²²²	131 Bq/hm ²

Figura 275. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Marfim – superfície rugosa.

Tabela 101. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Suíça – superfície corte.

Branco Suíça 03/11/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	162 Bq/m ³	Concentração 1	115 Bq/m ³
Concentração 2	62 Bq/m ³	Concentração 2	39 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	47 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	47 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	77 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	280 Bq/m ³	Máximo 1	188 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	31 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	25 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	178 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	45 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	36 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	33 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	25 Bq/hm ²
Rn ²²²	23 Bq/hm ²	Rn ²²²	15 Bq/hm ²

Figura 276. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Suíça – superfície corte.

Tabela 102. Concentração específica em Bq/hm² – Marrom São Paulo – superfície corte.

Marrom São Paulo 31/10/2016			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	2288 Bq/m ³	Concentração 1	1376 Bq/m ³
Concentração 2	325 Bq/m ³	Concentração 2	339 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	55 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	55 Bq/m ³
Área	148,75 cm ²	Área	148,75 cm ²
Mínimo 1	1501 Bq/m ³	Mínimo 1	691 Bq/m ³
Máximo 1	3326 Bq/m ³	Máximo 1	2090 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	329 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	263 Bq/m ³
Mínimo 2	325 Bq/m ³	Mínimo 2	149 Bq/m ³
Máximo 2	973 Bq/m ³	Máximo 2	561 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	163 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	92 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1736 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	917 Bq/hm ²
Rn ²²²	328 Bq/hm ²	Rn ²²²	342 Bq/hm ²

Figura 277. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Marrom São Paulo – superfície corte. Tabela 103. Concentração específica em Bq/hm² – Mônaco Light – superfície polida.

Monaco Light 11/10/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	65 Bq/m ³	Concentração 1	59 Bq/m ³
Concentração 2	45 Bq/m ³	Concentração 2	40 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	61 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	61 Bq/m ³
Área	171 cm ²	Área	171 cm ²
Mínimo 1	11 Bq/m ³	Mínimo 1	1 Bq/m ³
Máximo 1	149 Bq/m ³	Máximo 1	144 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	26 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	25 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	178 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	48 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	39 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	15 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	15 Bq/hm ²
Rn ²²²	39 Bq/hm ²	Rn ²²²	35 Bq/hm ²

Figura 278. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Mônaco Light – superfície polida.

Tabela 104. Concentração específica em Bq/hm² – Pietra de Jerusalém – superfície polida.

Pietra de Jerusalem 04/10/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	48 Bq/m ³	Concentração 1	43 Bq/m ³
Concentração 2	36 Bq/m ³	Concentração 2	24 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	40 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	40 Bq/m ³
Área	200 cm ²	Área	200 cm ²
Mínimo 1	5 Bq/m ³	Mínimo 1	1 Bq/m ³
Máximo 1	99 Bq/m ³	Máximo 1	90 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	16 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	14 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	149 Bq/m ³	Máximo 2	120 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	36 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	32 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	8 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	13 Bq/hm ²
Rn ²²²	27 Bq/hm ²	Rn ²²²	18 Bq/hm ²

Figura 279. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Pietra de Jerusalém – superfície polida.

Tabela 105. Concentração específica em Bq/hm² – Pietra de Jerusalém – superfície rugosa.

Pietra de Jerusalem 06/10/2016			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	44 Bq/m ³	Concentração 1	36 Bq/m ³
Concentração 2	41 Bq/m ³	Concentração 2	30 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	31 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	31 Bq/m ³
Área	200 cm ²	Área	200 cm ²
Mínimo 1	13 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	96 Bq/m ³	Máximo 1	67 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	13 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	11 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	208 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	44 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	38 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	2 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	4 Bq/hm ²
Rn ²²²	31 Bq/hm ²	Rn ²²²	23 Bq/hm ²

Figura 280. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Pietra de Jerusalém – superfície rugosa. Tabela 106. Concentração específica em Bq/hm² – Rosso Lucido– superfície corte.

Rosso Lucido 16/03/2015			
Série	Superfície Corte		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	279 Bq/m ³	Concentração 1	175 Bq/m ³
Concentração 2	96 Bq/m ³	Concentração 2	53 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	32 Bq/m ³
Área	292,5 cm ²	Área	292,5 cm ²
Mínimo 1	200 Bq/m ³	Mínimo 1	117 Bq/m ³
Máximo 1	396 Bq/m ³	Máximo 1	237 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	30 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	24 Bq/m ³
Mínimo 2	31 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	208 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	41 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	43 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	82 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	55 Bq/hm ²
Rn ²²²	49 Bq/hm ²	Rn ²²²	27 Bq/hm ²

Figura 281. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Rosso Lucido– superfície corte.

Tabela 107. Concentração específica em Bq/hm² – Verde Ubatuba – superfície polida.

Verde Ubatuba 07/04/2016			
Paralelo	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	65 Bq/m ³	Concentração 1	59 Bq/m ³
Concentração 2	30 Bq/m ³	Concentração 2	27 Bq/m ³
Ambiente	47 Bq/m ³	Ambiente	47 Bq/m ³
Área	268,25 cm ²	Área	268,25 cm ²
Mínimo 1	0 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Maxímo 1	213 Bq/m ³	Maxímo 1	174 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	29 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	30 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	149 Bq/m ³	Maxímo 2	208 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	35 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	36 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	17 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	16 Bq/hm ²
Rn ²²²	17 Bq/hm ²	Rn ²²²	15 Bq/hm ²

Figura 282. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Verde Ubatuba– superfície polida.

Tabela 108. Concentração específica em Bq/hm² – Verde Ubatuba – superfície rugosa.

Verde Ubatuba 04/04/2016			
Paralelo		Superfície Rugosa	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	88 Bq/m ³	Concentração 1	72 Bq/m ³
Concentração 2	43 Bq/m ³	Concentração 2	38 Bq/m ³
Ambiente	46 Bq/m ³	Ambiente	46 Bq/m ³
Área	268,25 cm ²	Área	268,25 cm ²
Mínimo 1	0 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	326 Bq/m ³	Máximo 1	267 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	59 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	53 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	149 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	37 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	39 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	22 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	17 Bq/hm ²
Rn ²²²	24 Bq/hm ²	Rn ²²²	21 Bq/hm ²

Figura 283. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Verde Ubatuba– superfície rugosa. Tabela 109. Concentração específica em Bq/hm² – Capão Bonito GM – superfície polida.

Capão Bonito G. M. 20/03/2015			
Série		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,4 lmin ⁻¹	Fluxo	0,4 lmin ⁻¹
Concentração 1	6301 Bq/m ³	Concentração 1	4270 Bq/m ³
Concentração 2	2350 Bq/m ³	Concentração 2	1740 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	38 Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	38 Bq/m ³
Área	225 cm ²	Área	225 cm ²
Mínimo 1	5840 Bq/m ³	Mínimo 1	3993 Bq/m ³
Máximo 1	6725 Bq/m ³	Máximo 1	4755 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	135 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	116 Bq/m ³
Mínimo 2	1325 Bq/m ³	Mínimo 2	1060 Bq/m ³
Máximo 2	3590 Bq/m ³	Máximo 2	2702 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	340 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	190 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	3697 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	2367 Bq/hm ²
Rn ²²²	2507 Bq/hm ²	Rn ²²²	1856 Bq/hm ²

Figura 284. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Capão Bonito GM – superfície polida.

Tabela 110. Concentração específica em Bq/hm² – Bege Dunas – superfície polida.

Bege Dunas 10/11/2016			
Paralelo	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	2072 Bq/m ³	Concentração 1	1243 Bq/m ³
Concentração 2	597 Bq/m ³	Concentração 2	380 Bq/m ³
Ambiente	47 Bq/m ³	Ambiente	47 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	1644 Bq/m ³	Mínimo 1	825 Bq/m ³
Maxímo 1	2625 Bq/m ³	Maxímo 1	1649 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	154 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	125 Bq/m ³
Mínimo 2	354 Bq/m ³	Mínimo 2	237 Bq/m ³
Maxímo 2	914 Bq/m ³	Maxímo 2	590 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	143 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	67 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	485 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	284 Bq/hm ²
Rn ²²²	224 Bq/hm ²	Rn ²²²	143 Bq/hm ²

Figura 285. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Bege Dunas – superfície polida.

Tabela 111. Concentração específica em Bq/hm² – Bege Dunas – superfície polida com PEK BIO.

Beges Dunas PEKBIO 08/11/2016			
Paralelo	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	1014 Bq/m ³	Concentração 1	614 Bq/m ³
Concentração 2	268 Bq/m ³	Concentração 2	177 Bq/m ³
Ambiente	47 Bq/m ³	Ambiente	47 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	639 Bq/m ³	Mínimo 1	359 Bq/m ³
Maxímo 1	1379 Bq/m ³	Maxímo 1	899 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	127 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	91 Bq/m ³
Mínimo 2	31 Bq/m ³	Mínimo 2	1 Bq/m ³
Maxímo 2	590 Bq/m ³	Maxímo 2	443 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	101 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	77 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	245 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	144 Bq/hm ²
Rn ²²²	101 Bq/hm ²	Rn ²²²	66 Bq/hm ²

Figura 286. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Bege Dunas – superfície polida com PEK BIO. Tabela 112. Concentração específica em Bq/hm² – Juparaná Gold – superfície polida.

Juparana Gold 16/11/2016			
Paralelo	Superfície Polida		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,15 lmin ⁻¹	Fluxo	0,15 lmin ⁻¹
Concentração 1	346 Bq/m ³	Concentração 1	272 Bq/m ³
Concentração 2	118 Bq/m ³	Concentração 2	114 Bq/m ³
Ambiente	Bq/m ³	Ambiente	0 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	156 Bq/m ³	Mínimo 1	52 Bq/m ³
Maxímo 1	584 Bq/m ³	Maxímo 1	499 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	67 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	76 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	375 Bq/m ³	Maxímo 2	381 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	70 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	77 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	45 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	31 Bq/hm ²
Rn ²²²	27 Bq/hm ²	Rn ²²²	26 Bq/hm ²

Figura 287. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Juparaná Gold – superfície polida.

Tabela 113. Concentração específica em Bq/hm² – Juparaná Gold – superfície polida com PEK BIO.

Juparana Gold PEKBIO 18/11/2016			
Paralelo		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,15 lmin ⁻¹	Fluxo	0,15 lmin ⁻¹
Concentração 1	285 Bq/m ³	Concentração 1	213 Bq/m ³
Concentração 2	100 Bq/m ³	Concentração 2	105 Bq/m ³
Ambiente	Bq/m ³	Ambiente	0 Bq/m ³
Área	400 cm ²	Área	400 cm ²
Mínimo 1	223 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Maxímo 1	397 Bq/m ³	Maxímo 1	274 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	23 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	24 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	250 Bq/m ³	Maxímo 2	293 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	56 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	72 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	37 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	21 Bq/hm ²
Rn ²²²	23 Bq/hm ²	Rn ²²²	24 Bq/hm ²

Figura 288. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Juparaná Gold – superfície polida com PEK BIO.

Tabela 114. Concentração específica em Bq/hm² – Barroco Juruena – superfície polida.

Barroco Juruena 15/09/2016			
Paralelo	Superfície Polido		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	91 Bq/m ³	Concentração 1	63 Bq/m ³
Concentração 2	62 Bq/m ³	Concentração 2	45 Bq/m ³
Ambiente	26 Bq/m ³	Ambiente	26 Bq/m ³
Área	276 cm ²	Área	276 cm ²
Mínimo 1	41 Bq/m ³	Mínimo 1	27 Bq/m ³
Maxímo 1	156 Bq/m ³	Maxímo 1	126 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	19 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	16 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	237 Bq/m ³	Maxímo 2	178 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	53 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	44 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	14 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	9 Bq/hm ²
Rn ²²²	34 Bq/hm ²	Rn ²²²	24 Bq/hm ²

Figura 289. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Barroco Juruena – superfície polida. Tabela 115. Concentração específica em Bq/hm² – Barroco Juruena – superfície polida com PEK BIO.

Barroco Juruena PEKBIO 18/11/2016			
Paralelo	Superfície Polido		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,305 lmin ⁻¹	Fluxo	0,305 lmin ⁻¹
Concentração 1	86 Bq/m ³	Concentração 1	75 Bq/m ³
Concentração 2	59 Bq/m ³	Concentração 2	34 Bq/m ³
Ambiente	45 Bq/m ³	Ambiente	45 Bq/m ³
Área	276 cm ²	Área	276 cm ²
Mínimo 1	11 Bq/m ³	Mínimo 1	6 Bq/m ³
Maxímo 1	193 Bq/m ³	Maxímo 1	193 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	34 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	75 Bq/m ³
Mínimo 2	1 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	208 Bq/m ³	Maxímo 2	90 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	65 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	34 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	16 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	24 Bq/hm ²
Rn ²²²	39 Bq/hm ²	Rn ²²²	23 Bq/hm ²

Figura 290. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Barroco Juruena – superfície polida com PEK BIO.

Tabela 116. Concentração específica em Bq/hm² – Preto Absoluto – superfície polida.

Preto Absoluto 26/08/2016			
Paralelo		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	36 Bq/m ³	Concentração 1	38 Bq/m ³
Concentração 2	50 Bq/m ³	Concentração 2	31 Bq/m ³
Ambiente	33 Bq/m ³	Ambiente	33 Bq/m ³
Área	200 cm ²	Área	200 cm ²
Mínimo 1	0 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	208 Bq/m ³	Máximo 1	237 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	36 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	41 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	237 Bq/m ³	Máximo 2	149 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	41 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	36 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	0 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	5 Bq/hm ²
Rn ²²²	38 Bq/hm ²	Rn ²²²	23 Bq/hm ²

Figura 291. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Preto Absoluto – superfície polida.

Tabela 117. Concentração específica em Bq/hm² – Preto Absoluto – superfície polida com PEK BIO.

Preto Absoluto PEKBIO 10/11/2016			
Paralelo	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,15 lmin ⁻¹	Fluxo	0,15 lmin ⁻¹
Concentração 1	99 Bq/m ³	Concentração 1	108 Bq/m ³
Concentração 2	56 Bq/m ³	Concentração 2	81 Bq/m ³
Ambiente	Bq/m ³	Ambiente	Bq/m ³
Área	200 cm ²	Área	200 cm ²
Mínimo 1	31 Bq/m ³	Mínimo 1	28 Bq/m ³
Maxímo 1	203 Bq/m ³	Maxímo 1	225 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	31 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	35 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Maxímo 2	156 Bq/m ³	Maxímo 2	264 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	55 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	66 Bq/m ³
Concentração Específica			
Rn ²²⁰	17 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	11 Bq/hm ²
Rn ²²²	25 Bq/hm ²	Rn ²²²	36 Bq/hm ²

Figura 292. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Preto Absoluto – superfície polida com PEK BIO. Tabela 118. Concentração específica em Bq/hm² – Cinza Novo Mundo – superfície polida com PEK BIO.

Cinza Novo Mundo PEK BIO 06/06/2016			
Paralelo	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	8443 Bq/m ³	Concentração 1	4468 Bq/m ³
Concentração 2	1501 Bq/m ³	Concentração 2	1211 Bq/m ³
Ambiente	45 Bq/m ³	Ambiente	45 Bq/m ³
Área	190 cm ²	Área	190 cm ²
Mínimo 1	6766 Bq/m ³	Mínimo 1	3884 Bq/m ³
Maxímo 1	8443 Bq/m ³	Maxímo 1	5085 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	252 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	196 Bq/m ³
Mínimo 2	1501 Bq/m ³	Mínimo 2	769 Bq/m ³
Maxímo 2	2620 Bq/m ³	Maxímo 2	1678 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	254 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	175 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	4807 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	2256 Bq/hm ²
Rn ²²²	1185 Bq/hm ²	Rn ²²²	956 Bq/hm ²

Figura 293. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Cinza Novo Mundo – superfície polida com PEK BIO.

Tabela 119. Concentração específica em Bq/hm² – Lusera Fiammata – superfície polida com PEK BIO.

Lusera Fiammata PEKBIO 22/11/2016			
Série	Superfície Rugosa		
Radon Mapper 1	Radon Mapper 2		
Fluxo	0,15 lmin ⁻¹	Fluxo	0,15 lmin ⁻¹
Concentração 1	847 Bq/m ³	Concentração 1	571 Bq/m ³
Concentração 2	279 Bq/m ³	Concentração 2	188 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³	Ambiente	0 Bq/m ³
Área	212,8 cm ²	Área	212,8 cm ²
Mínimo 1	630 Bq/m ³	Mínimo 1	356 Bq/m ³
Máximo 1	1111 Bq/m ³	Máximo 1	813 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	77 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	71 Bq/m ³
Mínimo 2	93 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	531 Bq/m ³	Máximo 2	440 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	107 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	81 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	211 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	142 Bq/hm ²
Rn ²²²	118 Bq/hm ²	Rn ²²²	80 Bq/hm ²

Figura 294. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Lusera Fiammata – superfície polida com PEK BIO.

Tabela 120. Concentração específica em Bq/hm² – Capão Bonito – superfície polida com PEK BIO.

Capão Bonito PEK BIO 21/11/2016			
Paralelo		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	3428 Bq/m ³	Concentração 1	2104 Bq/m ³
Concentração 2	764 Bq/m ³	Concentração 2	482 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³
Área	217 cm ²	Área	217 cm ²
Mínimo 1	2266 Bq/m ³	Mínimo 1	1207 Bq/m ³
Máximo 1	4502 Bq/m ³	Máximo 1	3061 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	401 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	311 Bq/m ³
Mínimo 2	501 Bq/m ³	Mínimo 2	237 Bq/m ³
Máximo 2	1178 Bq/m ³	Máximo 2	687 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	148 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	103 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1615 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	984 Bq/hm ²
Rn ²²²	528 Bq/hm ²	Rn ²²²	333 Bq/hm ²

Figura 295. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Capão Bonito – superfície polida com PEK BIO. Tabela 121. Concentração específica em Bq/hm² – Branco Cristal – superfície polida com PEK BIO.

Bianco Cristal PEKBIO 21/11/2016			
Série		Superfície Polida	
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,15 lmin ⁻¹	Fluxo	0,15 lmin ⁻¹
Concentração 1	1357 Bq/m ³	Concentração 1	870 Bq/m ³
Concentração 2	325 Bq/m ³	Concentração 2	248 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³
Área	270 cm ²	Área	270 cm ²
Mínimo 1	531 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	2250 Bq/m ³	Máximo 1	1558 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	244 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	203 Bq/m ³
Mínimo 2	62 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	563 Bq/m ³	Máximo 2	381 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	118 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	97 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	302 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	182 Bq/hm ²
Rn ²²²	108 Bq/hm ²	Rn ²²²	83 Bq/hm ²

Figura 296. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Branco Cristal – superfície polida com PEK BIO.

Tabela 122. Concentração específica em Bq/hm² – Verde Maritaca – superfície polida com PEK BIO.

Verde Maritaca PEKBIO 24/11/2016			
Série	Superfície Polida		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,15 lmin ⁻¹	Fluxo	0,15 lmin ⁻¹
Concentração 1	3125 Bq/m ³	Concentração 1	1950 Bq/m ³
Concentração 2	822 Bq/m ³	Concentração 2	487 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³
Área	161 cm ²	Área	161 cm ²
Mínimo 1	2187 Bq/m ³	Mínimo 1	0 Bq/m ³
Máximo 1	4250 Bq/m ³	Máximo 1	2940 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	371 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	303 Bq/m ³
Mínimo 2	406 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	1313 Bq/m ³	Máximo 2	940 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	172 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	137 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1129 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	717 Bq/hm ²
Rn ²²²	460 Bq/hm ²	Rn ²²²	272 Bq/hm ²

Figura 297. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Verde Maritaca – superfície polida com PEK BIO.

Tabela 123. Concentração específica em Bq/hm² – Verde Maritaca – superfície polida.

Verde Maritaca 24/11/2016	
Série	Superfície Polida
Radon Mapper 1	
Fluxo	0,29 lmin ⁻¹
Concentração 1	6096 Bq/m ³
Concentração 2	1524 Bq/m ³
Área	442,55 cm ²
Concentração Específica	
Rn ²²⁰	1577 Bq/hm ²
Rn ²²²	599 Bq/hm ²

Figura 298. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Verde Maritaca – superfície polida. Tabela 124. Concentração específica em Bq/hm² – Rosso Lucido – superfície polida com PEK BIO.

Rosso Lucido PEK BIO 24/03/2015			
Série	Superfície Polido		
Radon Mapper 1		Radon Mapper 2	
Fluxo	0,25 lmin ⁻¹	Fluxo	0,25 lmin ⁻¹
Concentração 1	152 Bq/m ³	Concentração 1	101 Bq/m ³
Concentração 2	91 Bq/m ³	Concentração 2	76 Bq/m ³
Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³	Ambiente (<i>background</i>)	Bq/m ³
Área	212,75 cm ²	Área	212,75 cm ²
Mínimo 1	31 Bq/m ³	Mínimo 1	26 Bq/m ³
Máximo 1	291 Bq/m ³	Máximo 1	227 Bq/m ³
Desvio Padrão 1	40 Bq/m ³	Desvio Padrão 1	31 Bq/m ³
Mínimo 2	0 Bq/m ³	Mínimo 2	0 Bq/m ³
Máximo 2	237 Bq/m ³	Máximo 2	208 Bq/m ³
Desvio Padrão 2	51 Bq/m ³	Desvio Padrão 2	53 Bq/m ³
Concentração Específica		Concentração Específica	
Rn ²²⁰	38 Bq/hm ²	Rn ²²⁰	15 Bq/hm ²
Rn ²²²	64 Bq/hm ²	Rn ²²²	54 Bq/hm ²

Figura 299. Gráfico das concentrações de gases radônio e torônio em Bq/m³ – Rosso Lucido – superfície polida com PEK BIO.

APÊNDICE C
ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS PLACAS DE ROCHA

Figura 300. Amostra e perfil – Azul Bahia – superfície mais rugosa.

Figura 301. Amostra e perfil – Azul Bahia – superfície menos rugosa.

Figura 302. Amostra e perfil – Azul Bahia Escuro – superfície mais rugosa.

Figura 303. Amostra e perfil – Azul Bahia Escuro – superfície menos rugosa.

Figura 304. Amostra e perfil – Basaltite– superfície menos rugosa.

Figura 305. Amostra e perfil – Basaltite– superfície mais rugosa.

Figura 306. Amostra e perfil – Bege Ipanema.

Figura 307. Amostra e perfil – Blinder Cinza Escuro.

Figura 308. Amostra e perfil – Blinder Vermelho Claro.

Figura 309. Amostra e perfil – Branco Ceará– superfície menos rugosa.

Figura 310. Amostra e perfil – Branco Ceará– superfície mais rugosa.

Figura 311. Amostra e perfil – Branco Cristal– superfície mais rugosa.

Figura 312. Amostra e perfil – Branco Cristal– superfície mais rugosa.

Figura 313. Amostra e perfil – Branco Marfim– superfície menos rugosa.

Figura 314. Amostra e perfil – Branco Marfim– superfície mais rugosa.

Figura 315. Amostra e perfil – Branco Siena– superfície menos rugosa.

Figura 316. Amostra e perfil – Branco Siena– superfície mais rugosa.

Figura 317. Amostra e perfil – Branco Suíça– superfície mais rugosa.

Figura 318. Amostra e perfil – Branco Suíça– superfície menos rugosa.

Figura 319. Amostra e perfil – Café Imperial Claro – superfície mais rugosa.

Figura 320. Amostra e perfil – Café Imperial Claro – superfície menos rugosa.

Figura 321. Amostra e perfil – Café Imperial – superfície menos rugosa.

Figura 322. Amostra e perfil – Café Imperial – superfície mais rugosa.

Figura 323. Amostra e perfil – Capão Bonito – superfície mais rugosa.

Figura 324. Amostra e perfil – Capão Bonito – superfície menos rugosa.

Figura 325. Amostra e perfil – Capão Bonito GM.

Figura 326. Amostra e perfil – Cinza Castelo– superfície menos rugosa.

Figura 327. Amostra e perfil – Cinza Castelo– superfície mais rugosa.

Figura 328. Amostra e perfil – Cinza Corumbá– superfície menos rugosa.

Figura 329. Amostra e perfil – Cinza Corumbá– superfície mais rugosa.

Figura 330. Amostra e perfil – Cinza Novo Mundo – superfície menos rugosa.

Figura 331. Amostra e perfil – Cinza Novo Mundo – superfície mais rugosa.

Figura 332. Amostra e perfil – Flor di Pesco.

Figura 333. Amostra e perfil – Iragna – superfície menos rugosa.

Figura 334. Amostra e perfil – Iragna – superfície mais rugosa.

Figura 335. Amostra e perfil – Lusera Fiammata – superfície menos rugosa.

Figura 336. Amostra e perfil – Lusera Fiammata – superfície mais rugosa.

Figura 337. Amostra e perfil – Maracujá – superfície menos rugosa.

Figura 338. Amostra e perfil – Maracujá – superfície menos rugosa.

Figura 339. Amostra e perfil – Marrom São Paulo.

Figura 340. Amostra e perfil – Mônaco Light.

Figura 341. Amostra e perfil – Onsernone Lucido – superfície menos rugosa.

Figura 342. Amostra e perfil – Onsernone Lucido – superfície mais rugosa.

Figura 343. Amostra e perfil – Pietra de Jerusalém – superfície menos rugosa.

Figura 344. Amostra e perfil – Pietra de Jerusalém – superfície mais rugosa.

Figura 345. Amostra e perfil – Pietra Lavica (1).

Figura 346. Amostra e perfil – Pietra Lavica.

Figura 347. Amostra e perfil – Rosa Capri – superfície menos rugosa.

Figura 348. Amostra e perfil – Rosa Capri – superfície mais rugosa.

Figura 349. Amostra e perfil – Rosso Lucido – superfície mais rugosa.

Figura 350. Amostra e perfil – Rosso Lucido – superfície menos rugosa.

Figura 351. Amostra e perfil – Sodalita.

Figura 352. Amostra e perfil – Verde Pavão – superfície menos rugosa.

Figura 353. Amostra e perfil – Verde Pavão – superfície mais rugosa.

Figura 354. Amostra e perfil – Verde Ubatuba – superfície mais rugosa.

Figura 355. Amostra e perfil – Verde Ubatuba – superfície menos rugosa.

Figura 356. Amostra e perfil – Vermelho Bragança – superfície mais rugosa.

Figura 357. Amostra e perfil – Vermelho Bragança – superfície menos rugosa.

Figura 358. Amostra e perfil – Vermelho Jacarandá – superfície menos rugosa.

Figura 359. Amostra e perfil – Vermelho Jacarandá – superfície mais rugosa.

APÊNDICE D**CORRELAÇÕES DE SPEARMAN PARA O OBJETIVO 6**

Tabela 125. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte I.

	KFt (%)	Pgo (%)	Nfl (%)	Bot (%)	Hba (%)	Prx (%)	Sda (%)	Ops (%)	Apa (%)	Tta (%)	Mvt (%)	Clt (%)	Cbt (%)
KFt (%)	1,000												
Pgo (%)	-0,593	1,000											
Nfl (%)			1,000										
Bot (%)	-0,556	0,173		1,000									
Hba (%)	0,900	-0,600		-0,600	1,000								
Prx (%)	-1,000	0,600		0,500		1,000							
Sda (%)			-0,500				1,000						
Ops (%)	-0,173	0,497		-0,519	-0,577	0,872		1,000					
Apa (%)	-0,075	0,284		0,154	0,000	0,866		0,624	1,000				
Zro (%)													
Tta (%)	-0,447	0,447		0,866	0,000			0,577	0,943	1,000			
Mvt (%)	-0,051	-0,006		0,394							1,000		
Clt (%)	-0,778	0,463		0,845								1,000	
Cbt (%)													1,000
As (ppm)	-0,493	0,293		-0,429		1,000		0,975	0,800		-0,866		
Ba (ppm)	0,124	-0,151	0,500	0,331	0,900	-0,429	0,500	-0,057	-0,111	0,447	-0,294	0,338	-0,821
Br (ppm)	0,047	0,017	0,500	0,053			0,500	-0,707	-0,866		0,258	0,775	-0,051
Ca (%)	-0,401	0,386	-0,500	0,346	-0,800	0,486	1,000	0,302	0,358	0,000	0,192	0,845	0,821
Ce (ppm)	0,271	-0,201	0,500	0,079	0,800	-0,429	0,500	-0,140	-0,531	-0,894	0,447	-0,304	-0,410
Co (ppm)	-0,183	0,037	0,500	0,234	-0,500	0,029	0,500	0,478	0,062	-0,894	0,268	0,676	-0,154
Cr (ppm)	-0,087	0,074	-0,500	0,123	-0,200	0,543	1,000	0,025	-0,124	0,000	-0,204	-0,169	-0,154
Cs (ppm)	0,067	0,125		-0,392	0,800	0,500		0,275	0,487	0,894	-0,299	-0,135	-0,866
Eu (ppm)	-0,011	0,067	0,500	0,222	1,000	-0,429	0,500	0,180	-0,049	0,000	0,013	0,676	-0,410
Fe (%)	-0,240	0,273	0,500	0,478	-0,800	0,657	0,500	0,690	0,704	0,447	0,013	0,845	-0,718
Hf (ppm)	0,215	-0,114		0,010	0,500	-0,943		-0,029	-0,704	-0,894	0,102	-0,676	-0,949
La (ppm)	0,177	-0,073	0,500	0,154	0,600	-0,086	0,500	-0,165	-0,667	-0,894	0,664	-0,439	-0,410
Lu (ppm)	0,251	-0,135		-0,172	0,900	-0,543		0,029	-0,259	0,000	0,064	-0,845	-0,949
Na (%)	-0,199	0,334	0,500	0,391	0,300	0,029	0,500	0,345	0,457	0,447	0,064	0,845	-0,667
Nd (ppm)	0,317	-0,243	0,500	-0,032	0,800	-0,371	0,500	-0,115	-0,531	-0,894	0,753	-0,372	-0,410
Rb (ppm)	0,116	-0,175		-0,235	0,900	-0,600		-0,287	-0,235	0,000	-0,026	-0,778	-0,866
Sb (ppm)	-0,266	0,163	0,500	0,133	-0,500	0,200	0,500	0,221	0,299	0,866	-0,038	0,707	0,211
Sc (ppm)	-0,036	0,097	0,500	0,264	-0,500	0,543	0,500	0,665	0,642	0,894	-0,268	0,845	-0,051
Se (ppm)	-0,024	0,181		0,069	0,400	-0,400		-0,386	0,187	0,447	0,359	0,068	0,738
Sm (ppm)	0,202	-0,106	-0,500	0,109	1,000	-0,429	1,000	0,050	-0,198	0,000	0,485	-0,135	-0,667
Ta (ppm)	0,177	-0,156	0,500	0,094	0,600	0,200	-1,000	-0,503	-0,173	0,000	0,102	-0,169	0,718
Tb (ppm)	0,559	-0,437	0,500	-0,288	1,000	0,029	0,500	0,334	0,296	0,000	0,447	-0,778	-0,051
Yb (ppm)	0,211	-0,156	-0,500	-0,076	1,000	-0,200	1,000	-0,297	-0,321	0,000	0,192	-0,676	-0,316
Zn (ppm)	-0,026	-0,074	0,500	0,230	0,400	-0,029	0,500	0,068	-0,037	0,447	-0,204	0,845	0,154
Zr (ppm)	0,109	-0,166	0,500	0,162	0,500	-0,943	0,500	-0,200	-0,507	-0,894	-0,064	-0,372	-0,316
Rn-total (Bq/hm2)	0,011	0,142	0,500	-0,159	0,112	0,667	0,500	0,159	-0,130	-0,894	0,485	-0,845	-0,205
Rn-222 (Bq/hm2)	-0,041	0,102	0,500	-0,153	-0,359	0,200	0,500	0,036	-0,081	-0,447	0,485	-0,823	0,051
Rn-220 (Bq/hm2)	0,063	0,068	0,500	-0,179	0,600	0,771	0,500	0,239	-0,062	-0,894	0,664	-0,845	-0,564
Index	0,270	-0,106	0,500	-0,239	0,800	-0,600	0,500	-0,338	-0,568	-0,894	0,485	-0,676	-0,205
U (ppm)	-0,079	0,124	-0,500	-0,085	0,300	0,000	-0,500	-0,121	0,099	0,000	-0,038	-0,507	-0,051
Th (ppm)	0,075	-0,036	0,500	-0,158	0,500	-0,143	0,500	-0,481	-0,667	-0,894	0,421	-0,845	-0,154
K (%)	0,365	-0,307		-0,302	0,900	-0,300		0,476	-0,062	0,000	-0,192	-0,778	-0,949
F (%)	-0,800	0,800		0,866									
Na2O (%)	0,037	0,112	0,500	0,259	0,300	-0,257	0,500	0,251	0,049	0,000	0,192	0,778	-0,316
MgO (%)	-0,358	0,279		0,577	-0,700	0,371		0,539	0,494	0,447	0,056	0,845	-0,359
Al2O3 (%)	-0,266	0,231	0,500	0,231	-0,600	-0,714	-1,000	0,693	0,494	0,894	-0,161	0,845	-0,821
SiO2 (%)	0,225	-0,184	0,500	-0,441	0,500	-0,829	-1,000	-0,409	-0,865	-0,894	0,026	-0,845	-0,975
P2O5 (%)	-0,280	0,134		0,478	0,100	-0,257		0,244	0,296	0,447	0,243	0,845	-0,103
SO3 (%)	0,073	-0,186	-0,500	0,256	-0,800	0,086	1,000	0,129	0,124	0,894	-0,872	0,894	0,000
Cl (%)	0,179	-0,278	-0,500	0,219	-0,949	-0,667	1,000	0,299	0,089	-0,236	-0,224	-0,135	-0,316
K2O (%)	0,381	-0,375	-0,500	-0,417	1,000	-0,657	-0,500	-0,115	-0,235	0,000	0,294	-0,778	-0,975
CaO (%)	-0,233	0,189	-0,500	0,432	-0,500	0,714	1,000	0,406	0,494	0,000	0,026	0,845	0,975
TiO2 (%)	-0,239	0,224		0,502	-0,600	0,486		0,686	0,667	0,894	0,549	0,845	-0,866
MnO (%)	0,033	0,319		0,300		0,500		0,632	-0,105		0,866	-0,775	
Cr2O3 (%)	-0,451	0,197		0,251	-0,500	-0,359		0,088	0,738		0,000	0,775	0,866
Fe2O3 (%)	-0,349	0,323	-0,500	0,275	-0,900	0,143	1,000	0,431	0,618	0,000	-0,294	0,338	-0,410
NiO (%)	-0,009	0,162		0,296	-0,300	0,800		0,679	0,150	-0,447	0,000	-0,500	-0,500
CuO (%)	0,033	-0,101		-0,295	-0,775	1,000		-0,582	-0,516	-0,500	-0,500	0,000	
ZnO (%)	-0,416	0,586		0,234	-0,632	0,600		0,632	0,704	0,447	0,816	0,816	-0,056
Ga2O3 (%)	-0,104	0,127		0,513	-0,616	0,600		0,631	0,176	-0,236		-0,500	-0,500
Br (%)	-0,139	0,186	1,000	0,542	-0,800	0,800	-0,500	0,382	-0,092	-0,866	0,158		-0,632
Rb2O3 (%)	-0,376	0,219		0,013	-0,775	0,105		0,108	0,000	0,500	-0,335	-0,775	
SrO (%)	-0,871	0,659		0,581	-0,500	0,000		0,030	0,616	0,866	0,866	0,775	0,500
Y2O3 (%)	-0,205	0,200		0,800									
ZrO2 (%)	-0,040	0,047		-0,154	0,800	-0,500		-0,266	-0,198	0,000	0,626	-0,541	
Nb2O5 (%)	0,250	-0,221	-1,000	0,043	0,700	-0,029	0,500	0,254	-0,124	0,000	0,223	0,068	-0,667
BaO (%)	-0,332	0,441		-0,077	-0,866			0,435	1,000	1,000	-0,949	0,316	
La2O3 (%)	-0,194	0,188		0,318	-0,800	-1,000		-0,120	-0,395	-0,866	0,000		
CeO2 (%)	-0,009	0,075		-0,297	-0,866			0,188	0,287		-0,866		
Pr2O3 (%)	0,500	-0,500									0,000		
Nd2O3 (%)	-0,102	-0,095		0,321	0,400	-1,000		-0,376	0,152	0,866	1,000	0,000	
PbO (%)	-0,247	0,244		0,340				-0,152	-1,000		1,000	-0,632	
ThO2 (%)													
WO3 (%)	-0,168	-0,170		-0,266	-0,800	-0,800		-0,718	-0,820	-0,866	0,316		
PF	-0,092	0,235	-0,500	0,352	-0,500	0,600	1,000	0,270	0,865	0,894	-0,026	0,676	0,975

Tabela 126. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte II.

	As (ppm)	Ba (ppm)	Br (ppm)	Ca (%)	Ce (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cs (ppm)	Eu (ppm)	Fe (%)	Hf (ppm)	La (ppm)	Lu (ppm)	Na (%)	Nd (ppm)	Rb (ppm)	Sb (ppm)	Sc (ppm)	Se (ppm)	Sm (ppm)	Ta (ppm)	Tb (ppm)	Yb (ppm)	Zn (ppm)	Zr (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
As (ppm)	1,000																											
Ba (ppm)	-0,106	1,000																										
Br (ppm)	-0,179	-0,132	1,000	-0,136																								
Ca (%)	-0,322	0,010	-0,136	1,000																								
Ce (ppm)	-0,094	0,830	-0,070	-0,105	1,000																							
Co (ppm)	-0,098	0,453	-0,492	0,420	0,261	1,000																						
Cr (ppm)	-0,271	0,019	0,131	-0,053	0,011	-0,257	1,000																					
Cs (ppm)	0,437	-0,022	0,170	-0,669	0,021	-0,443	0,066	1,000																				
Eu (ppm)	-0,117	0,749	-0,318	0,290	0,665	0,663	-0,141	-0,317	1,000																			
Fe (%)	-0,116	0,725	-0,241	0,359	0,512	0,702	-0,024	-0,251	0,828	1,000																		
Hf (ppm)	0,232	0,391	0,062	-0,364	0,451	0,102	-0,141	0,356	0,096	0,217	1,000																	
La (ppm)	-0,081	0,760	-0,124	-0,006	0,940	0,314	-0,053	-0,079	0,747	0,530	0,413	1,000																
Lu (ppm)	0,301	0,243	0,012	-0,517	0,265	-0,210	0,090	0,671	-0,212	-0,092	0,564	0,121	1,000															
Na (%)	0,076	0,090	-0,058	-0,062	-0,026	0,004	-0,033	0,030	0,231	0,320	-0,021	0,078	-0,199	1,000														
Nd (ppm)	-0,065	0,748	-0,142	-0,106	0,963	0,340	-0,073	-0,027	0,701	0,481	0,444	0,942	0,215	-0,070	1,000													
Rb (ppm)	0,299	0,059	0,164	-0,671	0,215	-0,352	0,117	0,767	-0,320	-0,262	0,561	0,060	0,767	-0,184	0,157	1,000												
Sb (ppm)	0,217	0,190	0,134	-0,064	0,251	0,021	0,060	0,195	0,305	0,150	0,116	0,364	0,022	0,225	0,254	0,078	1,000											
Sc (ppm)	-0,124	0,593	-0,273	0,376	0,290	0,608	-0,128	-0,382	0,746	0,763	-0,116	0,345	-0,133	0,211	0,282	-0,432	0,159	1,000										
Se (ppm)	0,266	-0,200	0,190	0,104	-0,249	-0,060	0,097	-0,066	-0,303	-0,202	0,091	-0,234	0,011	-0,107	-0,259	0,102	0,062	-0,331	1,000									
Sm (ppm)	0,026	0,683	-0,164	-0,091	0,859	0,259	-0,198	0,086	0,677	0,445	0,348	0,907	0,285	0,069	0,873	0,130	0,325	0,346	-0,280	1,000								
Ta (ppm)	0,315	-0,107	0,329	0,010	-0,034	-0,157	0,089	-0,036	-0,224	-0,174	0,158	-0,018	0,023	-0,048	-0,055	0,132	0,234	-0,359	0,909	-0,062	1,000							
Tb (ppm)	0,238	0,473	-0,182	-0,216	0,611	0,158	-0,069	0,118	0,346	0,247	0,206	0,477	0,460	-0,104	0,650	0,242	0,119	0,290	-0,155	0,594	-0,003	1,000						
Yb (ppm)	0,253	0,224	0,269	-0,416	0,335	-0,313	0,129	0,526	-0,123	-0,047	0,334	0,209	0,772	0,054	0,273	0,583	0,265	-0,047	0,043	0,386	0,214	0,559	1,000					
Zn (ppm)	-0,054	0,396	0,106	0,261	0,147	0,450	-0,231	-0,173	0,419	0,521	-0,010	0,158	-0,113	0,065	0,146	-0,349	0,255	0,629	-0,107	0,205	-0,059	0,184	0,063	1,000				
Zr (ppm)	0,059	0,592	0,204	-0,217	0,657	0,175	-0,283	0,202	0,450	0,434	0,729	0,631	0,216	0,260	0,630	0,278	0,343	0,128	-0,187	0,576	0,036	0,284	0,311	0,269	1,000			
U (ppm)	0,531	-0,366	0,219	-0,261	-0,253	-0,557	0,121	0,586	-0,560	-0,451	0,177	-0,268	0,443	-0,029	-0,323	0,560	0,131	-0,572	0,431	-0,161	0,454	-0,137	0,386	-0,489	-0,118	1,000		
Th (ppm)	0,107	0,124	0,297	-0,390	0,500	-0,323	0,134	0,403	-0,070	-0,195	0,330	0,414	0,539	-0,171	0,488	0,677	0,238	-0,302	-0,008	0,410	0,183	0,462	0,655	-0,320	0,321	0,340	1,000	
K (%)	0,478	0,318	-0,311	-0,585	0,285	0,058	-0,321	0,538	0,091	-0,033	0,449	0,232	0,572	0,027	0,268	0,511	0,139	-0,011	-0,176	0,425	-0,125	0,308	0,390	-0,084	0,373	0,261	0,167	1,000

Tabela 127. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte III.

	Fe2O3 (%)	NiO (%)	CuO (%)	ZnO (%)	Ga2O3 (%)	Br (%)	Rb2O3 (%)	SrO (%)	Y2O3 (%)	ZrO2 (%)	Nb2O5 (%)	BaO (%)	La2O3 (%)	CeO2 (%)	Pr2O3 (%)	Nd2O3 (%)	PbO (%)	ThO2 (%)	WO3 (%)	PF	
Fe2O3 (%)	1,000																				
NiO (%)	0,391	1,000																			
CuO (%)	-0,724	-0,639	1,000																		
ZnO (%)	0,652	-0,142	-0,199	1,000																	
Ga2O3 (%)	0,695	0,558	-0,761	0,304	1,000																
Br (%)	0,620	0,692	-0,736	0,080	0,808	1,000															
Rb2O3 (%)	0,650	-0,426	-0,559	0,069	0,345	-0,175	1,000														
SrO (%)	0,879	-0,436	-0,209	0,564	0,277	-0,019	0,291	1,000													
Y2O3 (%)	0,714	-0,700	0,866	-0,500	0,600	-0,800	0,738	-0,500	1,000												
ZrO2 (%)	0,029	-0,652	0,173	0,316	-0,440	-0,377	0,380	0,203	-0,400	1,000											
Nb2O5 (%)	-0,543	0,782	-0,480	-0,183	0,417	0,396	-0,505	-0,439	-0,290	-0,238	1,000										
BaO (%)	0,821	-0,873	0,179	0,469	0,537	-0,267	0,630	0,719	0,872	0,446	-0,638	1,000									
La2O3 (%)	0,311	0,260	-0,143	0,287	0,030	0,431	-0,109	0,294	-1,000	-0,149	-0,139	-0,401	1,000								
CeO2 (%)	0,413	-0,436	0,379	0,289	-0,130	0,218	0,674	0,632	0,200	0,377	-0,492	0,612	0,307	1,000							
Pr2O3 (%)	-0,100	0,900	-0,289			-0,400				-0,400	0,200	-1,000	0,500	-1,000	1,000						
Nd2O3 (%)	-0,275	0,136	-0,237	-0,360	-0,256	0,108	-0,475	-0,435	-1,000	-0,137	0,511	-0,655	0,557	0,638	-0,500	1,000					
PbO (%)	-0,692	0,359	0,654	0,498	-0,692	-0,564	-0,255	-0,004	-1,000	0,043	0,802	-0,503	0,360	-0,400	1,000	0,934	1,000				
ThO2 (%)																		1,000			
WO3 (%)	-0,691	-0,663	0,773	-0,527	-0,843	-0,664	-0,119	-0,265	1,000	0,400	-0,701	0,445	-0,023	0,000	0,600	-0,079	0,029		1,000		
PF	0,137	-0,134	-0,087	0,395	0,278	0,212	0,304	0,196	0,143	0,083	0,047	0,607	0,059	0,686	-0,872	0,139	-0,450		-0,532	1,000	

Tabela 128. Correlações dados mineralogia, elementos, óxidos e radioatividade – parte IV.

	Rn-total	Rn-222	Rn-220	Index	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	F (%)	Na2O (%)	MgO (%)	Al2O3 (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	SO3 (%)	Cl (%)	K2O (%)	CaO (%)	TiO2 (%)	MnO (%)	Cr2O3 (%)
Rn-total (Bq/hm2)	1,000																			
Rn-222 (Bq/hm2)	0,955	1,000																		
Rn-220 (Bq/hm2)	0,967	0,878	1,000																	
Index	0,755	0,772	0,736	1,000																
U (ppm)	0,237	0,282	0,179	0,291	1,000															
Th (ppm)	0,795	0,804	0,777	0,903	0,337	1,000														
K (%)	0,133	0,108	0,162	0,223	0,122	0,201	1,000													
F (%)	0,800	1,000	0,800	1,000	0,600	1,000	-0,400	1,000												
Na2O (%)	-0,290	-0,234	-0,348	-0,200	-0,128	-0,322	-0,057	-0,200	1,000											
MgO (%)	-0,326	-0,395	-0,295	-0,413	-0,507	-0,365	0,044	-0,400	0,300	1,000										
Al2O3 (%)	-0,205	-0,198	-0,240	-0,100	-0,170	-0,220	0,047	-0,400	0,583	0,529	1,000									
SiO2 (%)	0,531	0,507	0,552	0,476	0,309	0,540	0,100	0,400	-0,330	-0,677	-0,434	1,000								
P2O5 (%)	-0,142	-0,226	-0,090	-0,232	-0,429	-0,236	0,115	-0,400	0,024	0,847	0,474	-0,374	1,000							
SO3 (%)	-0,485	-0,501	-0,465	-0,417	-0,486	-0,400	-0,062	-0,600	0,146	0,455	0,153	-0,386	0,255	1,000						
Cl (%)	-0,046	0,052	-0,116	0,301	-0,200	0,060	0,139	0,400	0,304	0,198	0,468	-0,337	0,036	0,150	1,000					
K2O (%)	0,465	0,427	0,534	0,650	0,180	0,547	0,512	-0,400	-0,481	-0,268	-0,082	0,514	0,212	-0,361	-0,061	1,000				
CaO (%)	-0,503	-0,568	-0,438	-0,577	-0,460	-0,551	-0,178	-0,400	0,087	0,725	0,168	-0,794	0,496	0,464	-0,056	-0,471	1,000			
TiO2 (%)	-0,205	-0,320	-0,134	-0,308	-0,494	-0,365	0,051	-0,400	0,191	0,912	0,530	-0,534	0,936	0,328	0,040	-0,010	0,698	1,000		
MnO (%)	0,300	0,211	0,382	-0,064	0,264	0,168	-0,437	0,500	0,021	-0,336	-0,559	0,539	-0,336	-0,385	-0,554	-0,350	-0,375	-0,191	1,000	
Cr2O3 (%)	0,257	0,421	0,156	0,411	0,319	0,344	0,099	0,500	0,081	-0,311	0,321	0,080	-0,283	-0,145	0,173	0,057	-0,240	-0,374	-0,323	1,000
Fe2O3 (%)	0,197	0,153	0,180	0,095	0,100	0,115	0,038	0,800	-0,095	0,157	0,266	-0,023	0,125	0,143	0,020	-0,051	0,019	-0,037	0,011	0,832
NiO (%)	-0,118	-0,283	0,027	-0,291	-0,010	-0,252	-0,047		-0,210	0,345	0,359	-0,079	0,621	0,165	-0,142	0,108	0,168	0,721	0,500	-0,306
CuO (%)	0,255	0,323	0,173	0,225	0,315	0,331	-0,074		0,169	-0,645	-0,264	0,468	-0,651	-0,371	0,184	-0,023	-0,435	-0,630	-0,800	0,400
ZnO (%)	0,179	0,165	0,124	-0,012	-0,171	-0,132	-0,070	1,000	0,454	0,295	0,454	-0,427	0,014	0,000	0,152	-0,421	0,204	0,286	-0,286	0,355
Ga2O3 (%)	-0,181	-0,460	-0,078	-0,397	-0,242	-0,249	-0,002		0,103	0,691	0,311	-0,375	0,605	0,700	-0,005	-0,233	0,429	0,698	0,478	-0,689
Br (%)	0,052	-0,157	0,133	-0,142	-0,369	-0,067	0,067		0,003	0,725	0,439	-0,399	0,741	0,392	0,238	-0,128	0,317	0,615	0,154	-0,574
Rb2O3 (%)	0,459	0,505	0,406	0,490	0,532	0,544	0,088	0,800	-0,523	-0,372	-0,328	0,334	-0,390	-0,040	0,061	0,112	-0,486	-0,509	-0,094	0,381
SrO (%)	0,192	0,257	0,179	-0,046	-0,235	0,094	-0,386	0,600	0,123	0,349	0,192	-0,288	0,130	-0,026	-0,051	-0,488	0,326	0,156	0,063	0,649
Y2O3 (%)	0,143	0,143	-0,086	0,257	0,029	0,257	0,100		-0,200	0,300	-0,600	-0,086	0,000	0,486	-0,800	0,086	0,486	0,600	-0,500	-0,500
ZrO2 (%)	0,485	0,597	0,414	0,645	0,407	0,507	0,291	0,600	-0,032	-0,406	-0,085	0,143	-0,387	-0,606	0,211	0,391	-0,573	-0,404	-0,174	0,426
Nb2O5 (%)	-0,307	-0,343	-0,233	-0,182	-0,269	-0,349	0,007	-0,200	0,287	0,410	0,302	-0,404	0,477	0,253	0,314	0,031	0,422	0,618	-0,524	-0,466
BaO (%)	0,267	0,316	0,248	0,412	0,187	0,366	0,051	-0,500	-0,246	-0,040	0,048	-0,060	-0,158	-0,078	0,251	0,007	-0,031	-0,266	-0,498	0,785
La2O3 (%)	0,267	0,297	0,173	0,245	-0,108	0,256	-0,041		0,022	0,069	0,310	-0,257	0,304	-0,312	0,705	-0,039	0,008	0,011	0,800	0,410
CeO2 (%)	0,272	0,379	0,214	0,293	0,084	0,432	-0,006		0,357	-0,119	0,450	-0,218	-0,425	-0,006	0,946	-0,357	-0,107	-0,320	0,500	0,949
Pr2O3 (%)	0,700	0,700	0,700	-0,700	0,000	-0,700	0,000		-0,872	0,000	-0,100	0,100	0,900	-0,400	-1,000	0,900	0,000	0,800		
Nd2O3 (%)	-0,440	-0,327	-0,380	0,066	-0,094	-0,037	0,057		0,056	0,262	0,471	-0,309	0,468	0,025	0,586	0,184	0,125	0,348	-0,800	-0,696
PbO (%)	0,135	0,105	0,164	0,369	-0,020	0,157	0,239	0,500	0,395	0,340	0,406	-0,046	0,389	-0,358	0,266	0,371	0,113	0,477	-0,236	0,218
ThO2 (%)																				
WO3 (%)	0,577	0,725	0,544	0,483	0,032	0,573	-0,015		-0,349	-0,767	-0,674	0,848	-0,700	-0,590	0,004	0,323	-0,631	-0,686	-1,000	0,410
PF	-0,297	-0,292	-0,363	-0,265	-0,010	-0,289	-0,142	-0,800	0,222	0,330	0,125	-0,653	-0,176	0,348	0,500	-0,587	0,354	0,058	-0,267	-0,071

ANEXO A
ESPECTROMETRIA GAMA - IRA

STS 315

S SCHWEIZERISCHER PRÜFSTELLENDIENST
T SERVICE SUISSE D'ESSAI
S SERVIZIO DI PROVA IN SVIZZERA
S SWISS TESTING SERVICE

Rapport n°gm140807

Page 1/4

RAPPORT DE MESURE D'ACTIVITE

Requérant	: IRA, groupe de radioprotection, Thammiris MOHAMAD EL HAJJ
Echantillons analysés	: Matériaux de construction
Quantité analysée	: Echantillons remis
Préparation des échantillons	: Scellage sous plastique étanche un mois avant la mesure
Numéro d'échantillon	: GRM/140729
Méthode de mesure utilisée	: mesure de l'activité de l'échantillon au moyen d'un spectromètre gamma HPGe sur une durée de 1 à 3 jours
Rattachement métrologique	: spectromètres rattachés aux étalons primaires de l'activité
Grandeur déterminée	: activité spécifique de l'échantillon en Bq/kg
Date de la mesure	: 29.7-6.8.2014

1. Résultats

Les géométries de mesure ne correspondaient pas exactement aux géométries étalonnées. Les mesures ont donc été réalisées à 10 cm de distance source-détecteur pour minimiser l'effet de ces différences. En outre, une correction estimée sur la base de l'angle solide entre la source et le détecteur a été appliquée.

La matrice des échantillons ne correspondaient pas non plus aux sources d'étalonnage (solution aqueuse). Une correction pour tenir compte de l'autoatténuation du rayonnement dans les échantillons a été appliquée. Elle est basée sur l'atténuation dans du sable de densité donnée par celle de l'échantillon mesuré. Le calcul est effectué par le logiciel de spectrométrie gamma InterWinner.

Dans plusieurs cas, l'activité des radionucléides primordiaux des séries de radioactivité naturelle est déterminée à partir de celles de ses filles.

Les résultats sont donnés dans les tableaux 2 à 5 et la méthode d'évaluation est expliquée ci-dessous.

Série U-238

L'activité de l'U-238 est déduite à partir de l'activité du Th-234, les deux éléments pouvant être supposés à l'équilibre.

L'U-234 n'est pas mesurable par spectrométrie gamma. Il n'émet aucune ligne et ses filles Th-230 et Ra-226 ont des périodes trop longues pour qu'on puisse admettre un équilibre radioactif avec lui. On peut considérer en première approximation qu'il est en abondance isotopique naturelle et que son activité est proche de celle de U-238. Dans le tableau des résultats, on indique donc la même activité que pour l'U-238.

L'activité du Ra-226 a été déterminée à partir de la mesure du Ra-226 lui-même (ligne à 186 keV), ainsi que de ses filles Pb-214 et Bi-214 à l'équilibre avec Ra-226 lors de la mesure.

Notons que le Pb-210, qui fait partie de la même série de radioactivité naturelle, est aussi observé dans certains échantillon mais n'est pas à l'équilibre radioactif avec Ra-226 étant donné la présence de radon (gazeux) dans la chaîne de désintégration. On admet en première approximation que ses filles Bi-210 et Po-210 sont à l'équilibre avec lui.

Tél. + 41 21 314 80 68
Fax + 41 21 314 82 99
Mail ira.info@chuv.ch
Web http://www.chuv.ch/ira

Série U-235

L'U-235 est observé dans certains échantillons à partir de ses lignes de 163 et 205 keV, en plus de sa ligne de 186 keV quasiment commune avec celle du Ra-226.

Une faible activité de Th-227 est parfois relevée.

Série de Th-232

Le Th-232 n'a pas été relevé dans les échantillons. La limite de détection donnée pour Th-232 dans les résultats a été évaluée avec sa ligne de 64 keV.

L'activité du Ra-228 a été déterminée à partir de sa fille Ac-228, aisément mesurable. Le Th-232 n'est pas forcément à l'équilibre avec Ra-228, vu la période de ce dernier (5.7 ans).

L'activité du Th-228 a été déterminée par ses filles Pb-212 et Bi-212 en admettant l'équilibre radioactif. Une confirmation est apportée par le Tl-208 (en tenant compte du facteur d'embranchement de 0.362). Le Ra-224 a été relevé dans les échantillons no 1 et 2. Il confirme le résultat de Pb-212 et Bi-212.

Tableau 1. Liste des échantillons mesurés

1. Blue Bahia	118x82x25 mm, 616±3g, masse volumique 2.55 g/cm ³
2. Basaltite	78x78x10 mm, 137.5±1.5g, masse volumique 2.26 g/cm ³
3. Laine de roche (basalte)	145x145xenv20 mm, 41±3g, masse volumique env. 0.04 g/cm ³
4. Iragua	260x35x20 mm, 462±2g, masse volumique 2.53 g/cm ³

Tableau 2. Echantillon **Blue Bahia**

Radionucléide	Activité [Bq/kg]	Incertitude relative
K-40	1100	6%
<i>Série U-238 :</i>		
U-238 et ses filles Th-234 et Pa-234m	123	20%
U-234	123	20%
Ra-226 et ses filles jusqu'au Po-214	126	8%
Pb-210 et ses filles Bi-210 et Po-210	104	30%
<i>Série U-235 :</i>		
U-235 et sa fille Th-231	9	35%
Th-227	7	40%
<i>Série Th-232 :</i>		
Th-232	< 360	-
Ra-228 et sa fille Ac-228	28	10%
Th-228 et ses filles jusqu'au Pb-208	30	10%

Tableau 3. Echantillon **Basaltite**

Radionucléide	Activité [Bq/kg]	Incertitude relative
K-40	2060	6%
<i>Série U-238 :</i>		
U-238 et ses filles Th-234 et Pa-234m	213	20%
U-234	213	20%
Ra-226 et ses filles jusqu'au Po-214	168	8%
Pb-210 et ses filles Bi-210 et Po-210	161	30%
<i>Série U-235 :</i>		
U-235 et sa fille Th-231	11	25%
Th-227	5.5	95%
<i>Série Th-232 :</i>		
Th-232	< 760	-
Ra-228 et sa fille Ac-228	272	8%
Th-228 et ses filles jusqu'au Pb-208	266	8%

Tableau 4. Echantillon **Iragna**

Radionucléide	Activité [Bq/kg]	Incertitude relative
K-40	1130	6%
<i>Série U-238 :</i>		
U-238 et ses filles Th-234 et Pa-234m	107	25%
U-234	107	20%
Ra-226 et ses filles jusqu'au Po-214	117	8%
Pb-210 et ses filles Bi-210 et Po-210	155	30%
<i>Série U-235 :</i>		
U-235 et sa fille Th-231	5	95%
Th-227	< 8	-
<i>Série Th-232 :</i>		
Th-232	< 920	-
Ra-228 et sa fille Ac-228	52	10%
Th-228 et ses filles jusqu'au Pb-208	48	8%

Tableau 5. Echantillon laine de roche de basalte

Radionucléide	Activité [Bq/kg]	Incertitude relative
K-40	432	30%
<i>Série U-238 :</i>		
U-238 et ses filles Th-234 et Pa-234m	< 330	-
U-234	< 330	-
Ra-226 et ses filles jusqu'au Po-214	16	80%
Pb-210 et ses filles Bi-210 et Po-210	< 600	-
<i>Série U-235 :</i>		
U-235 et sa fille Th-231	< 80	-
Th-227	< 80	-
<i>Série Th-232 :</i>		
Th-232	< 4000	-
Ra-228 et sa fille Ac-228	25	90%
Th-228 et ses filles jusqu'au Pb-208	18	80%

Notes

Lorsque plusieurs radionucléides sont mentionnés dans une ligne du tableau, l'activité donnée est valable pour chacun d'eux individuellement.

La date de référence pour les activités est la date de mesure.

Le symbole « < » signifie que l'activité de l'échantillon est inférieure à la limite de détection du système de mesure indiquée juste après.

L'incertitude de mesure élargie donnée est l'incertitude-type sur le résultat de la mesure multipliée par le facteur d'élargissement $k=2$ ce qui, pour une distribution gaussienne, correspond à un niveau de confiance d'environ 95%. Elle prend en compte l'étalonnage du détecteur, la statistique de comptage et les corrections de géométrie de mesure et d'autoatténuation effectuées.

2. Remarques

Aucune remarque

Lausanne, le 7 août 2014

Le responsable de la mesure

T. Buchillier

ANEXO B
CARTA DE APOIO GOVERNO FEDERAL DA SUÍÇA

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Federal Department of Home Affairs FDHA

Federal Office of Public Health FOPH
Consumer Protection Directorate

CH-3003 Bern
FOPH

Mauro Gandolla, Ing.dipl ETH/SIA
Docente - Università della Svizzera Italiana

Your reference:
Reference no./File no.:
Our reference: MC/BAF
Contact person: Christophe Murth
Bern, 18 September 2014

Thesis „Comparison between levels of radon gas radiation exhaled from brazilian and europe-an ores“ by Ms Thammiris Mohamad El Hajj

Dear Mr. Gandolla

On the occasion of our meeting on August 8, 2014 in Lausanne we had the opportunity to obtain information about the goals and intermediate results of the above mentioned thesis from Ms Mohamad El Hajj and yourself. The project is carried out in collaboration with the Institut de Radiophysique. You are developing a new technical method to estimate the amount of radon and thoron gas emitted by a specific rock. Such emissions can contribute to elevated radon concentrations in dwellings, if they are used as indoor building material. Your preliminary results are very encouraging and show among other things that in particular the surface treatment of the rocks has a significant impact on the emitted amount of radon or thoron gas.

We consider this investigation as very interesting, particularly in the context of the activity concentration index for construction material. The activity concentration index defines, which natural building materials can be used for the construction of houses and how they can be applied. However, the index only accounts for external radiation and does not include the radon potential of the material. It would therefore be very helpful to have a method that allows to estimate the radon potential of a rock and hence to complement the activity concentration index. This would prevent the application of a building material conferred right to use in dwellings by the index, but causing elevated radon concentrations and thus compromising the health of the inhabitants.

Federal Office of Public Health FOPH
Christophe Murth
Schwarzenburgstrasse 162, 3003 Bern
Phone +41 58 464 10 41, Fax no. +41 58 464 90 32
Christophe.Murth@bfg.admin.ch
www.bfg.admin.ch

The Federal Office of Public Health is willing to accompany this project on this basis and can also provide technical support for e.g. data analysis. We are confident that this investigation provides an important contribution to a better understanding of the influence of building materials to the radon and thoron problem and we wish Ms Mohamad El Hajj much success and gratification with her work.

Yours sincerely,

Division of Radiological Protection
Radiological Risk Section
Head

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Christophe Murith', with a stylized flourish extending to the right.

Christophe Murith

ANEXO C
PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE – ISO 25178

4 Field parameter definitions

In the terminological entries below, each term is followed by its parameter (abbreviated term), then its symbol. Whereas abbreviated terms can contain multiple letters, symbols consist only of a single letter with subscripts as needed. Symbols are used in the equations shown in this document. The reason for this differentiation is to avoid misinterpretation of compound letters as an indication of multiplication between quantities in equations. The parameters (abbreviated terms) are used in product documentation, drawings and data sheets.

4.1 Height parameters

All height parameters are defined over the definition area.

4.1.1

root mean square height of the scale-limited surface

Sq

S_q

root mean square value of the ordinate values within a definition area (A)

ISO 25178-2:2012(E)

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy}$$

4.1.2

skewness of the scale-limited surface

Ssk

S_{sk}

quotient of the mean cube value of the ordinate values and the cube of Sq within a definition area (A)

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x,y) dx dy \right]$$

4.1.3

kurtosis of the scale-limited surface

Sku

S_{ku}

quotient of the mean quartic value of the ordinate values and the fourth power of Sq within a definition area (A)

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x,y) dx dy \right]$$

4.1.4

maximum peak height of the scale limited surface

Sp

S_p

largest peak height value within a definition area

4.1.5

maximum pit height of the scale limited surface

Sv

S_v

minus the smallest pit height value within a definition area

4.1.6**maximum height of the scale-limited surface**

Sz

 S_z

sum of the maximum peak height value and the maximum pit height value within a definition area

4.1.7**arithmetical mean height of the scale limited surface**

Sa

 S_a arithmetic mean of the absolute of the ordinate values within a definition area (A)

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| \, dx dy$$

4.3 Hybrid parameters**4.3.1****root mean square gradient of the scale-limited surface**

Sdq

 S_{dq} root mean square of the surface gradient within the definition area (A) of a scale-limited surface

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

4.3.2**developed interfacial area ratio of the scale-limited surface**

Sdr

 S_{dr} ratio of the increment of the interfacial area of the scale-limited surface within the definition area (A) over the definition area

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \iint_A \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right] dx dy$$

NOTE For a practical implementation of this parameter, see Reference [10].

4.4 Functions and related parameters**4.4.1****areal material ratio function of the scale-limited surface**

function representing the areal material ratio of the scale-limited surface as a function of height

NOTE This function can be interpreted as the sample cumulative probability function of the ordinates $z(x,y)$ within the evaluation area.**ISO 25178-2:2012(E)****4.4.2****areal material ratio of the scale-limited surface**

Smr(c)

 $S_{mr}(c)$ ratio of the area of the material at a specified height c to the evaluation area

NOTE 1 Smr(c) is usually expressed as a percentage.

NOTE 2 Height is taken from the reference plane. See Figure 3.

NOTE 3 This function is related to the sample cumulative probability function of the ordinates.

4.4.3

inverse areal material ratio of the scale-limited surface

$S_{mc}(mr)$

$S_{mc}(mr)$

height c at which a given areal material ratio (mr) is satisfied

NOTE Height is taken from the reference plane. See Figure 4.

Figure 4 — Inverse areal material ratio

4.4.4

areal parameter for scale-limited stratified functional surfaces

parameter representing the areal material ratio of the scale-limited stratified functional surface as a function of height

4.4.4.1

core surface

scale-limited surface excluding core-protruding hills and dales

See Figure 5.

4.4.4.2

core height

S_k

distance between the highest and lowest level of the core surface

See Figure 5.

ISO 25178-2:2012(E)

Key

X	areal material ratio
Y	intersection line position
1	secant
2	secant with smallest gradient
3	equivalent straight line
S_k	core height
S_{mr1} , S_{mr2}	material ratios

This figure shows a profile instead of a surface area for ease of illustration. The principle is the same for a surface area.

Figure 5 — Calculation of S_k , S_{mr1} and S_{mr2}

4.4.5

void volume

$V_v(p)$

$V_v(p)$

volume of the voids per unit area at a given material ratio calculated from the areal material ratio curve

$$V_v(p) = \frac{K}{100\%} \int_p^{100\%} [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq$$

where K is a constant to convert to millilitres per metres squared

4.4.5.1

dale void volume of the scale-limited surface

V_{vv}

V_{vv}

dale volume at p material ratio

$$V_{vv} = V_v(p)$$

NOTE The default values of p can be found in ISO 25178-3.

ISO 25178-2:2012(E)

4.4.5.2

core void volume of the scale-limited surface

V_{vc}

V_{vc}

difference in void volume between p and q material ratio

$$V_{vc} = V_v(p) - V_v(q)$$

NOTE The default values of p and q are found in ISO 25178-3.

Key

LPL lower plateau limit

LVL lower dale limit

UPL upper plateau limit

UVL upper dale limit

Rmq relative material ratio at the plateau to dale intersection

Rpq slope of a linear regression performed through the plateau region

Rvq slope of a linear regression performed through the dale region

This figure shows a profile instead of a surface area for ease of illustration. The principle is the same for a surface area.

4.4.6

material volume

$V_m(p)$

$V_m(p)$

volume of the material per unit area at a given material ratio calculated from the areal material ratio curve

$$V_m(p) = \frac{K}{100\%} \int_0^p S_{mc}(q) - S_{dc}(p) dq$$

where K is a constant to convert to millilitres per metres squared

NOTE See Figure 8.

ISO 25178-2:2012(E)

Figure 8 — Void volume and material volume parameters

4.4.6.1

peak material volume of the scale-limited surface

V_{mp}

V_{mp}

material volume at p

NOTE The default value of p is found in ISO 25178-3.

4.4.6.1**peak material volume of the scale-limited surface** V_{mp} V_{mp} material volume at p NOTE The default value of p is found in ISO 25178-3.**4.4.6.2****core material volume of the scale-limited surface** V_{mc} V_{mc} difference in material volume between the p and q material ratio

$$V_{mc} = V_m(q) - V_m(p)$$

NOTE The default values of p and q are found in ISO 25178-3.

ANEXO D
CERTIFICADOS ESPECTROMETRIA GAMA CNEN

RELATÓRIO DE ANÁLISE

222 / 2016

pag. 1 / 5

Cliente: Universidade Federal de Alfenas - Unifal/MG

Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999

Contato: Thamiris El Hajj

Material Recebido: Rocha

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

Solicitante: Thamiris El Hajj

Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Identificação da Amostra:

Maracujá

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	1196,7 $\pm$ 97,0	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Brânco Siena

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	995,8 $\pm$ 69,3	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Cinza Corumba

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	1024,3 $\pm$ 75,2	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Pietra Lavica

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	232,8 $\pm$ 44,4	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Café Imperial

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	1657,3 $\pm$ 106,6	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Rosa Capri

RELATÓRIO DE ANÁLISE

222 / 2016

pag. 2 / 5

Cliente: Universidade Federal de Alfenas - Unifal/MG

Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999

Contato: Thamiris El Hajj

Material Recebido: Rocha

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

Solicitante: Thamiris El Hajj

Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	$1156,2 \pm 85,4$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
Azul Bahia Escuro

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	$792,9 \pm 67,0$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
Cinza Novo Mundo

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	$1220,2 \pm 114,4$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
Lusna Fiammatta

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	$1017,9 \pm 73,16$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
Marrom São Paulo

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{40}K	$1145,3 \pm 83,4$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
Vermelho Jacarandá

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
-----------	-----------	---------	------------------------	-------------------------

RELATÓRIO DE ANÁLISE

222 / 2016

pag. 3 / 5

Cliente: Universidade Federal de Alfenas - Unifal/MG

Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999

Contato: Thamiris El Hajj

Material Recebido: Rocha

Solicitante: Thamiris El Hajj

Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

⁴⁰K	1318,7 ± 83,4	Bq kg⁻¹	2	70
-----	---------------	---------	---	----

 Identificação da Amostra:
 Verde Davão

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência %	Referência Metodológica
⁴⁰K	890,7 ± 65,6	Bq kg⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Café Imperial Claro

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência %	Referência Metodológica
⁴⁰K	1737,3 ± 100,0	Bq kg⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Verde Ubatuba

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
⁴⁰K	504,5 ± 50,0	Bq kg⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Branco Marfim

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência %	Referência Metodológica
⁴⁰K	1270,5 ± 90,8	Bq kg⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Pietra Jerusalem

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
⁴⁰K	<50	Bq kg⁻¹	2	70

RELATÓRIO DE ANÁLISE

222 / 2016

pag. 4 / 5

Cliente: Universidade Federal de Alfenas - Unifal/MG

Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999

Contato: Thamiris El Hajj

Material Recebido: Rocha

Data Rec. Amostr.: 03/05/2016

Solicitante: Thamiris El Hajj

Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Identificação da Amostra:

Pietre Lavica (1)

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
⁴⁰ K	84,0 ± 36,8	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Meñaco Light

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
⁴⁰ K	< 50	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Cinza Castelo

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
⁴⁰ K	1119,7 ± 77,0	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:

Onsunane Lucido

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
⁴⁰ K	513,0 ± 50,2	Bq kg ⁻¹	2	70

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à amostra analisada, nas condições especificadas, não sendo extensivos a outras amostras.

CNEN/LAPOC autoriza a reprodução deste certificado desde que qualquer cópia apresente o conteúdo original.

Poços de Caldas, 5 de setembro de 2016

 Dr. Nivaldo Carlos da Silva
 Setor de Radiação

LAPOC - Laboratório de Poços de Caldas

RELATÓRIO DE ANÁLISE

222 / 2016

pag. 5 / 5

Cliente: Universidade Federal de Alfenas - Unifal/MG

Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999

Contato: Thamiris El Hajj

Material Recebido: Rocha

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

Solicitante: Thamiris El Hajj

Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Setor de Radônio:

70 - PN-LAPOC-8001 rev.03, PN-LAPOC-8003 rev.02, Espectr. Gama - ASTM C999 - 05.

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza-padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k=2$, para uma distribuição e com t graus de liberdade efetivos v_{eff} corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação ISO-GUM (2008).

RELATÓRIO DE ANÁLISE

117 / 2016

pag. 1 / 6

Cliente: UNIFAL- Universidade Federal de Alfenas- Poços de Caldas
 Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999- Cidade Universitária
 Contato: Thamiris El Hajj
 Material Recebido: Rocha
 Solicitante: Thamiris El Hajj
 Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

Identificação da Amostra: Maracujá

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	$46,5 \pm 8,4$	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$53,3 \pm 2,0$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$274 \pm 16,0$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra: Branco Siena

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	< 10	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$44,9 \pm 3,6$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra: Cinza Corumba

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	$61,0 \pm 8,6$	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$69,1 \pm 2,4$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$56,4 \pm 4,2$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra: Pietra Lavica

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg^{-1}	2	70

RELATÓRIO DE ANÁLISE

117 / 2016

pag. 2 / 6

Cliente: UNIFAL- Universidade Federal de Alfenas- Poços de Caldas

Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999- Cidade Universitária

Contato: Thamiris El Hajj

Material Recebido: Rocha

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

Solicitante: Thamiris El Hajj

Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

^{226}Ra	< 10	Bq kg ⁻¹	2	70
^{228}Ra	< 25	Bq kg ⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Café Imperial

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg ⁻¹	2	70
^{226}Ra	11,7 ± 1,2	Bq kg ⁻¹	2	70
^{228}Ra	33,2 ± 3,4	Bq kg ⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Rosa Capri

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	56,9 ± 8,0	Bq kg ⁻¹	2	70
^{226}Ra	59,6 ± 2,2	Bq kg ⁻¹	2	70
^{228}Ra	206,1 ± 12,0	Bq kg ⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Azul Bahia Escuro

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	105,7 ± 9,8	Bq kg ⁻¹	2	70
^{226}Ra	88,2 ± 2,8	Bq kg ⁻¹	2	70
^{228}Ra	63,1 ± 4,8	Bq kg ⁻¹	2	70

 Identificação da Amostra:
 Cinza Novo Mundo

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
-----------	-----------	---------	------------------------	-------------------------

RELATÓRIO DE ANÁLISE

117 / 2016

pag. 3 / 6

Cliente: UNIFAL- Universidade Federal de Alfenas- Poços de Caldas
 Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999- Cidade Universitária
 Contato: Thamiris El Hajj
 Material Recebido: Rocha
 Solicitante: Thamiris El Hajj
 Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

^{210}Pb	< 35	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$40,7 \pm 1,6$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$111,4 \pm 7,0$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
 Lusna Fiammatta

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	$128,6 \pm 10,8$	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$119,3 \pm 3,4$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$124,5 \pm 7,6$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
 Marrom São Paulo

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	$51,3 \pm 7,8$	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$51,2 \pm 2,0$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$95,1 \pm 6,2$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
 Vermelho Jacarandá

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	$35,6 \pm 7,0$	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$40,0 \pm 1,8$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$131,1 \pm 8,0$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
 Verde Pavão

RELATÓRIO DE ANÁLISE

117 / 2016

pag. 4 / 6

Cliente: UNIFAL- Universidade Federal de Alfenas- Poços de Caldas
 Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999- Cidade Universitária
 Contato: Thamiris El Hajj
 Material Recebido: Rocha
 Solicitante: Thamiris El Hajj
 Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	$47,9 \pm 5,0$	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	< 10	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	< 25	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
 Café Imperial Claro

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$15,8 \pm 1,2$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$54,0 \pm 4,2$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
 Verde Ubatuba

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$12,7 \pm 1,2$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	< 25	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
 Branco Marfim

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$15,7 \pm 1,2$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$62,1 \pm 4,4$	Bq kg^{-1}	2	70

RELATÓRIO DE ANÁLISE

117 / 2016

pag. 5 / 6

Cliente: UNIFAL- Universidade Federal de Alfenas- Poços de Caldas
 Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999- Cidade Universitária
 Contato: Thamiris El Hajj
 Material Recebido: Rocha
 Solicitante: Thamiris El Hajj
 Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

Identificação da Amostra:
 Pietra de Jerusalém

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg ⁻¹	2	70
^{226}Ra	13,8 ± 1,2	Bq kg ⁻¹	2	70
^{228}Ra	83,1 ± 4,6	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:
 Pietra Lavica (1)

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg ⁻¹	2	70
^{226}Ra	< 10	Bq kg ⁻¹	2	70
^{228}Ra	< 25	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:
 Monaco Light

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg ⁻¹	2	70
^{226}Ra	17,7 ± 1,2	Bq kg ⁻¹	2	70
^{228}Ra	< 25	Bq kg ⁻¹	2	70

Identificação da Amostra:
 Cinza Castelo

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	< 35	Bq kg ⁻¹	2	70

RELATÓRIO DE ANÁLISE

117 / 2016

pag. 6 / 6

Cliente: UNIFAL- Universidade Federal de Alfenas- Poços de Caldas
 Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela nº 11.999- Cidade Universitária
 Contato: Thamiris El Hajj
 Material Recebido: Rocha
 Solicitante: Thamiris El Hajj
 Referência: Contato via e-mail (Nivaldo C. Silva)

Data Rec. Amostra: 03/05/2016

^{229}Ra	$25,8 \pm 1,4$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$69,0 \pm 4,8$	Bq kg^{-1}	2	70

Identificação da Amostra:
Onsunane Lucido

Parâmetro	Resultado	Unidade	Fator de Abrangência K	Referência Metodológica
^{210}Pb	$45,9 \pm 7,0$	Bq kg^{-1}	2	70
^{226}Ra	$48,7 \pm 1,8$	Bq kg^{-1}	2	70
^{228}Ra	$49,0 \pm 4,0$	Bq kg^{-1}	2	70

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à amostra analisada, nas condições especificadas, não sendo extensivos a outras amostras.

CNEN/LAPOC autoriza a reprodução deste certificado desde que qualquer cópia apresente o conteúdo original.

Poços de Caldas, 17 de agosto de 2016

Dr. Nivaldo C. Silva
Setor de Radônio

LAPOC - Laboratório de Poços de Caldas

Setor de Radônio:

70 - PN-LAPOC-8001 rev.03, PN-LAPOC-8003 rev.02, Espectr. Gama - ASTM C999 - 05.

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza-padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição e com 1 grau de liberdade efetivos v_{eff} corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação ISO-GUM (2008).

Figura 360. Calibrazione del RadonMapper per il Rn-222.

Figura 361. Calibração do RadonMapper para o Rn-220.