AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avaliação da radioatividade natural em tintas de uso comercial no Brasil

Leandro Milhomens da Fonseca

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

Orientadora:

**Profa. Dra. Brigitte Roxana Soreanu
Pecequilo**

São Paulo

2016

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Avaliação da radioatividade natural em tintas de uso comercial no Brasil

Leandro Milhomens da Fonseca

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

Orientadora:

**Profa. Dra. Brigitte Roxana Soreanu
Pecequilo**

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2016

Dedico este trabalho a todos que participaram
diretamente ou indiretamente dele,
principalmente a meus pais, meus irmãos
e meus amigos e em memória de meus avôs
falecidos José Malva da Fonseca e
Agenor de Sousa Milhomens e de minha
avó falecida Palmira Alves da Fonseca.

AGRADECIMENTOS

- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e à Comissão Nacional de Energia Nuclear pela oportunidade e condições para realizar este trabalho.
- À minha orientadora, Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequillo, pela orientação, pelas oportunidades, pelo profissionalismo e por todo conhecimento passado que são bases para meu crescimento profissional.
- À CAPES pelo auxílio fornecido durante o período do trabalho, o que possibilitou uma maior e melhor dedicação.
- À Associação Brasileira de Fabricantes de Tintas (ABRAFATI) e aos membros do Laboratório de Tintas Imobiliárias do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), principalmente ao Sr. Jurandir Queiroz da Silva e ao Sr. Marco Antonio Tupinambá Bertonha Trindade, pelas amostras cedidas para este trabalho.
- Aos meus pais, Rosinha Milhomens da Fonseca e Roberto Alves da Fonseca, e aos meus irmãos Marcelo Milhomens da Fonseca e Eduardo Milhomens da Fonseca, por toda convivência, amor e carinho durante minha vida.
- À Dra. Bárbara Pacci Mazzilli pelo uso da infraestrutura do Laboratório de Radiometria Ambiental para a realização deste trabalho.
- À Dra. Elisabeth Mateus Yoshimura por ter me iniciado na pesquisa no início de minha graduação e ter me ensinado muito durante os anos que trabalhamos juntos.
- A todos que me ajudaram no Laboratório de Radiometria Ambiental, Dr. Ademar de Oliveira Ferreira, Dra. Sandra Regina Damatto, Dr. Marcelo Francis Máduar, Dra. Márcia Pires de Campos, Dr. Reginaldo Ribeiro de Aquino, M.Sc. Marcelo Bessa, M.Sc. Marcos Medrado Alencar e aos demais membros deste laboratório.

- Ao Arthur Athayde Meneghini por sua experiência na indústria de tintas e por sempre me ajudar com conceitos e formulações.
- Às minhas amigas do laboratório que sempre me ajudaram com tudo e sempre estiveram por perto com conversas, bolos e almoços M.Sc. Fernanda Cavalcante e Crislene Mateus.
- A meu amigo Vinícius Rodrigues Debastiani pelas conversas empolgantes sobre tudo, de física a café.
- A meu amigo Octavio Pacheco Valsechi pela ajuda no final do trabalho e pelo apoio.
- A todos meus amigos que estiveram o tempo todo ao meu lado, mesmo quando eu não podia estar ao lado deles.
- À minha namorada Monique Monteiro de Souza, por estar sempre do meu lado e por todo o carinho.

“Os poetas reclamam que a ciência retira a beleza das estrelas. Mas eu posso vê-las de noite no deserto e senti-las. Vejo menos ou mais?”

Richard Philips Feynman

“Nada na vida deve ser temido, somente compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos.”

Marie Sklodowska Curie

“O aspecto mais triste da vida de hoje é que a ciência ganha em conhecimento mais rapidamente que a sociedade em sabedoria.”

Isaac Asimov

AVALIAÇÃO DA RADIOATIVIDADE NATURAL EM TINTAS DE USO COMERCIAL NO BRASIL.

Leandro Milhomens da Fonseca

RESUMO

A radioatividade natural presente em solos, rochas e materiais de construção, devida ao ^{40}K e às séries radioativas do ^{232}Th e ^{238}U é a principal contribuição à exposição externa aos seres humanos. Neste trabalho, determinou-se as concentrações de atividade de ^{226}Ra (da série do ^{238}U), ^{232}Th e ^{40}K presentes em 50 amostras de tintas látex de cor branca comercializadas no Brasil, especificamente, 15 do tipo econômico, 15 do tipo standard, 20 do tipo premium e em uma amostra de dióxido de titânio. As amostras foram seladas e armazenadas por um período mínimo de 30 dias para se alcançar o equilíbrio radioativo secular nas séries do ^{238}U e do ^{232}Th e medidas pela técnica analítica de espectrometria gama de alta resolução. As concentrações de atividade foram calculadas utilizando-se as médias ponderadas pelas incertezas do ^{214}Pb e ^{214}Bi para o ^{226}Ra e médias ponderadas pelas incertezas do ^{228}Ac , ^{212}Pb e ^{212}Bi para o ^{232}Th . A concentração de atividade do ^{40}K foi determinada pela sua transição única de 1460,8 keV. Fatores de autoatenuação gama foram calculados e utilizados para correção da concentração de atividade das amostras com densidade maior que $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$. Os índices radiológicos equivalente em rádio (Ra_{eq}), índice de concentração de atividade (I_{γ}), índice de risco à exposição gama interna (H_{in}), o índice de risco à exposição gama externa (H_{ex}) e a taxa de dose (D) e dose efetiva anual (D_{ef}) foram calculados a partir das concentrações de atividade do ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K . As concentrações de atividade de ^{226}Ra das tintas variaram entre valores abaixo da atividade mínima detectável e $38,7 \text{ Bq.kg}^{-1}$, as de ^{232}Th variaram entre valores abaixo da atividade mínima detectável e $101,2 \text{ Bq.kg}^{-1}$ e as de ^{40}K variaram entre valores abaixo da atividade mínima detectável e 256 Bq.kg^{-1} . O Ra_{eq} variou entre $1,41 \text{ Bq.kg}^{-1}$ e 203 Bq.kg^{-1} , o I_{γ} variou entre 0,0047 e 0,720, o

H_{in} variou entre 0,0076 e 0,653 e o H_{ex} variou entre 0,0038 e 0,549. A taxa de dose variou de 0,170 nGy.h⁻¹ a 21,3 nGy.h⁻¹ e a dose efetiva anual variou entre 0,83 μSv.a⁻¹ e 104,2 μSv.a⁻¹. Estes resultados mostram que as concentrações de atividades das tintas utilizadas neste estudo estão abaixo dos limites recomendados por Hassan et al. para Ra_{eq} (370 Bq.kg⁻¹), pela Comissão Européia para o I_{γ} (limite de 2 para materiais superficiais) e pela Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento para H_{in} e para H_{ex} (ambos com limite de 1), para todas as 50 amostras estudadas, mostrando assim a segurança destas tintas com relação a proteção radiológica.

ASSESSMENT OF NATURAL RADIOACTIVITY IN WALL PAINTS OF COMMERCIAL USE IN BRAZIL.

Leandro Milhomens da Fonseca

ABSTRACT

Natural radioactivity in soils, rocks and construction materials, due to ^{40}K and the natural series of ^{232}Th and ^{238}U , is the main contribution to external exposure in mankind. In this work, activity concentrations of ^{226}Ra (^{238}U serie), ^{232}Th and ^{40}K were determined for 50 white latex wall paints samples, commercialized in Brazil, namely 15 Economic quality samples, 15 Standard quality samples and 20 Premium quality samples and for a single titanium dioxide sample. The samples were tightly sealed and stored for a minimum period of 30 days, to reach the radioactive secular equilibrium from ^{238}U and ^{232}Th series, then measured by high resolution gamma ray spectrometry. The activity concentration was determined using the weighted average concentrations of ^{214}Pb and ^{214}Bi for ^{226}Ra and ^{228}Ac , ^{212}Pb and ^{212}Bi for ^{232}Th . The ^{40}K activity concentration was determined by its single transition of 1460.8 keV. Self attenuation correction factors of the samples whose densities are higher than 1.0 g.cm^{-3} , were determined and used to make the necessary corrections. The radiological indices radium equivalent activity (Ra_{eq}), activity concentration index (I_{γ}), internal exposure risk index (H_{in}) and external exposure risk index (H_{ex}) and also the absorbed dose rate (D) and annual effective dose (D_{ef}) were calculated from the activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K . The activity concentration values for ^{226}Ra ranged from under the minimum detectable activity to 38.7 Bq.kg^{-1} , for ^{232}Th from under the minimum detectable activity to 101.2 Bq.kg^{-1} and for ^{40}K from under the minimum detectable activity to 256 Bq.kg^{-1} . Ra_{eq} ranged from 1.41 Bq.kg^{-1} to 203 Bq.kg^{-1} , I_{γ} ranged from 0.0047 to 0.720, H_{in} from 0.0076 to 0.653 and H_{ex} from 0.0038 to 0.549. The absorbed dose rate ranged from 0.170 nGy.h^{-1} and 21.3 nGy.h^{-1} and the annual effective dose ranged from $0.83 \text{ }\mu\text{Sv}$ and $104.2 \text{ }\mu\text{Sv}$. The results show that the

activity concentrations of the wall paints studied in this work are below the recommended limits by Hassan et al. for Ra_{eq} (370 Bq.kg^{-1}), by European Commission for I_γ (limit of 2 for superficial materials) and by the Organisation for Economic Co-operation and Development for H_{in} and H_{ex} (both with limit of 1), for all the 50 samples, assuring the safety of these wall paints with respect to radiological protection.

SUMÁRIO

	Página
1 – INTRODUÇÃO.....	16
1.1 – Radioatividade natural e séries radioativas.....	16
1.2 – Atividade e equilíbrio secular	19
1.3 – Decaimento gama.....	21
1.4 – Tintas.....	22
1.4.1 – Composição básica.....	22
1.4.2 – Tipos de pigmentos	24
1.4.3 – Pigmentos inorgânicos.....	24
1.4.4 – Dióxido de titânio.....	24
1.4.4.1 – Rutilo e ilmenita.....	26
1.4.4.2 – Monazita.....	27
1.4.5 – Formulação básica das tintas.....	28
1.4.6 – Regulamentações para definição de qualificação das tintas...28	
1.5 – Justificativa do trabalho.....	29
1.6 – Objetivos do trabalho.....	30
2 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
2.1 – Disponibilidade das amostras.....	31
2.2 – Espectrometria gama.....	32
2.3 – Fatores de autoatenuação.....	33
2.4 – Cálculo das atividades.....	35
2.5 – Índices radiológicos.....	36
2.5.1 – Equivalente em rádio (Ra_{eq}).....	37
2.5.2 – Índice de concentração de atividade (I_v).....	37
2.5.3 – Índices de exposição interna (H_{in}) e externa (H_{ex}).....	38
2.5.4 – Taxa de dose e dose efetiva anual.....	39
3 – PARTE EXPERIMENTAL.....	40
3.1 – Preparo das amostras.....	40
3.2 – Espectrômetro gama.....	41
3.3 – Autoatenuação.....	43
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 – Densidades das amostras.....	48

4.2 – Fatores de autoatenuação.....	49
4.3 – Concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K	52
4.4 – Índices radiológicos.....	55
4.4.1 – Equivalente em rádio.....	55
4.4.2 – Índice de concentração de atividade.....	56
4.4.3 – Índices de risco a exposição gama interna e externa.....	57
4.5 – Dose efetiva anual.....	58
4.6 – Dados da amostra de dióxido de titânio.....	59
5 – CONCLUSÕES.....	61
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
APÊNDICE A – Densidade das amostras de tinta deste estudo.....	67
APÊNDICE B – Fatores de autoatenuação das amostras de tinta e do TiO_2	68
APÊNDICE C – Concentração de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K nas amostras de tinta.....	78

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Série de decaimento radioativo do ^{238}U (adaptado de LNHB, 2016).	17
Figura 2: Série de decaimento radioativo do ^{232}Th (adaptado de LNHB, 2016).....	18
Figura 3: Esquema de decaimento do ^{40}K para ^{40}Ar e ^{40}Ca (adaptado de LNHB, 2016).....	21
Figura 4: Dióxido de titânio (Acervo pessoal).....	26
Figura 5: Cristal de ilmenita em quartzo (a) e cristais de rutilo em quartzo (b) (Machado et al., 2013).....	27
Figura 6: Cristal de monazita (Machado et al., 2013).....	27
Figura 7: Algumas amostras de tintas descaracterizadas cedidas pelo SENAI para o estudo.....	31
Figura 8: Esquema geral de um sistema de detecção de radiação gama.....	33
Figura 9: Amostras de tintas, seladas e envoltas em filme plástico transparente.....	40
Figura 10: Detector HPGe com <i>pescoço de cisne</i> e com pré-amplificador utilizado para aquisição de dados (a) com detalhe do interior da blindagem de baixa radiação de fundo de Pb-Cu, da janela de Be e do suporte de amostras de lucite (b).....	41
Figura 11: Eletrônica associada ao detector Canberra XtRa GX2520. Da esquerda para a direita, fonte de alta tensão, analisador multicanal e amplificador.....	42

Figura 12: Saída do programa WinnerGamma para a amostra de tinta Premium P03 mostrando picos de alguns radionuclídeos utilizados.....	43
Figura 13: Detector HPGe (detector EG&G ORTEC GEM 20180-S) utilizado para autoatenuação das amostras de tinta com a montagem do arranjo de autoatenuação.....	44
Figura 14: Eletrônica associada ao sistema do detector EG&G ORTEC GEM 20180-S. Da esquerda para a direita, amplificador e fonte de alta tensão.....	45
Figura 15: Montagem experimental para determinação dos fatores de autoatenuação.....	46
Figura 16: Colimador com uma fonte radioativa de ^{152}Eu utilizados para autoatenuação.....	47
Figura 17: Densidades aparentes das amostras de tintas Econômica, Standard e Premium, analisadas neste trabalho.....	48
Figura 18: Curva do fator de autoatenuação para a amostra de TiO_2 , à esquerda o modelo ExpDec1 e à direita o modelo ExpDec2.....	50
Figura 19: Fator de autoatenuação em função da energia para as amostras de tinta E02, S12 e P04 de densidade $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$	51
Figura 20: Fator de autoatenuação em função da energia para as amostras de tinta P02, P12 e P19 de densidade $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$	51
Figura 21: Concentrações de atividade de ^{232}Th nas 50 amostras de tintas estudadas.....	52
Figura 22: Concentrações de atividade de ^{226}Ra nas 50 amostras de tintas estudadas.....	53

Figura 23: Concentrações de atividade de ^{40}K nas 50 amostras de tintas estudadas.....	53
Figura 24: Correlação entre concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{232}Th para todas as amostras de tintas estudadas.....	54
Figura 25: Atividade equivalente em rádio (Ra_{eq}) para todas as amostras de tinta; a linha vermelha representa o limite de 370 Bq.kg^{-1} segundo Hassan et al.....	55
Figura 26: Índice de concentração de atividade (I_γ) para as 50 amostras de tinta estudadas; a linha vermelha representa o limite de 2 estipulado pela Comissão Europeia.....	56
Figura 27: Índices de risco a exposição gama interna das 50 tintas estudadas; a linha vermelha representa o limite de 1 determinado pela OECD.....	57
Figura 28: Índices de risco a exposição gama externa das 50 tintas estudadas; a linha vermelha representa o limite de 1 determinado pela OECD.....	58
Figura 29: Dose efetiva anual das amostras de tinta para um quarto padrão; a linha vermelha representa o limite de $1000 \mu\text{Sv.a}^{-1}$ determinado pelo ICRP....	59

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1: Documentos normativos e requisitos de desempenho para as tintas látex (ABRAFATI, 2016).....	29
Tabela 2: Fontes radioativas utilizadas para determinar os fatores de autoatenuação, com suas respectivas energias e intensidades.....	34
Tabela 3: Transições gama utilizadas para determinação das concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K	36
Tabela 4: Limites para o equivalente em rádio de materiais de construção (Hassan et al., 2010).....	37
Tabela 5: Critérios de dose estipulados para materiais de construção (EC, 1999).....	38
Tabela 6: Coeficientes de correlação de Pearson entre concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{232}Th para os diferentes tipos de tinta.....	54
Tabela 7: Dados da amostra de dióxido de titânio.....	60

1. INTRODUÇÃO

1.1. Radioatividade natural e séries radioativas

A radioatividade, descoberta por Henri Becquerel em 1896, consiste em um processo em que o núcleo instável se transmuta em outro núcleo, podendo ser este também um núcleo instável ou um estável. Se este núcleo filho é instável, ele irá decair para outro núcleo, processo que se caracteriza como uma série radioativa (Podgorsak, 2009).

Há 4,8 bilhões de anos, quando a Terra foi formada, os chamados radionuclídeos primordiais estavam presentes na composição da massa original. Desde então, estes radionuclídeos vêm decaindo e, atualmente, na natureza existem ainda somente os radionuclídeos de meias-vidas acima de 100 milhões de anos ou os radionuclídeos originários das séries destes, como o ^{40}K (meia-vida de 1,26 bilhões de anos), o ^{238}U (meia-vida de 4,5 bilhões de anos) e o ^{232}Th (meia-vida de 13,9 bilhões de anos) (Eisenbud, 1987).

Os radionuclídeos de origem terrestre podem ocorrer de duas formas, isolados ou em cadeias radioativas; o radionuclídeo isolado de maior importância é o ^{40}K , pois, além de amplamente distribuído na crosta terrestre, é encontrado em todos os sistemas biológicos (Kathren, 1998).

Na natureza encontramos três séries radioativas ainda existentes, consideradas de origem terrestre, a do ^{238}U (abundância natural: 99,27%) que pode ser visualizada na FIG. 1, a do ^{235}U (abundância natural: 0,7%) e a do ^{232}Th (abundância natural: 100%) que pode ser visualizada na FIG. 2.

FIGURA 1: Série de decaimento radioativo do ^{238}U (adaptado de LNHB, 2016).

FIGURA 2: Série de decaimento radioativo do ^{232}Th (adaptado de LNHB, 2016).

Os radionuclídeos naturais (^{40}K e séries do ^{238}U e ^{232}Th) são a maior fonte da exposição interna e externa aos seres humanos (UNSCEAR, 1993, 2000, 2008), o que mostra a importância da avaliação correta da dose de radiação devida às fontes naturais. A radiação externa é oriunda de raios cósmicos e radiação terrestre, enquanto que a ingestão e a inalação de radionuclídeos naturais e/ou artificiais levam à dose por radiação interna. A principal ocorrência de dose interna é devido a inalação do ^{222}Rn , um gás nobre que é oriundo do decaimento do ^{226}Ra da cadeia do ^{238}U (UNSCEAR, 2000).

O ^{238}U representa 99,27% do urânio natural que é encontrado em toda a crosta terrestre na forma de minérios de urânio e em quantidades traço em

todos os tipos de rochas e minerais. O tório é encontrado em diversas rochas e solos com 100% de ^{232}Th (Kathren, 1998).

Edifícios e casas são muito importantes na vida humana, pois grande parte do tempo de vida é gasto em casa e/ou no escritório. Praticamente todo material de construção contém os radionuclídeos naturais ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K . O conhecimento dos níveis de radioatividade natural em materiais de construção é importante para a avaliação da exposição da população à radioatividade natural, visto que a maioria passa 80% de sua vida dentro das residências.

Tanto os edifícios como as casas, são pintados, seja externamente, seja no seu interior.

Diversos trabalhos já foram realizados avaliando a radioatividade natural em materiais de construção como rochas, granitos, mármore, areias, etc..(Veiga et al., 2006; El Arabi, 2007; Aquino, 2010; Aquino, 2015; Aquino e Pecequillo, 2011; Barros et al., 2011; Ferreira e Pecequillo, 2011; Ferreira, 2013; Jalad, 2015), contudo, até o momento, não há estudos sobre a radioatividade natural que, eventualmente, as tintas usadas nas construções poderiam conter.

1.2. Atividade e equilíbrio secular

A atividade de uma amostra radioativa representa uma taxa com que os átomos radioativos desta amostra se desintegram e sua unidade no SI (Sistema Internacional de Medidas) é o becquerel (Bq), que é expresso em desintegrações por segundo.

Sendo, num instante de tempo t , N o número de átomos de um determinado isótopo radioativo e λ a constante de desintegração deste átomo, há uma probabilidade λdt de o átomo se desintegrar num intervalo de tempo dt , sendo portanto a quantidade de átomos que se desintegram neste intervalo dt denotado por dN e dado pela equação 1 (Schechter e Bertulani, 2007).

$$dN(t) = -\lambda N dt \quad (1)$$

O sinal negativo é a indicação do decréscimo do número de átomos do tipo N no decorrer do tempo.

A taxa de desintegração pelo tempo portanto será como a dada pela equação 2 e é medida pela atividade A(t).

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2)$$

Integrando-se a equação 1, obtém-se o resultado para N como na equação 3.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Utilizando o resultado da equação 3 na equação 2 tem-se que:

$$A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

A equação 4 representa a atividade A(t) de uma amostra em um tempo t qualquer, onde A₀ é a atividade inicial da amostra.

Quando temos um conjunto de radioisótopos de uma série dentro de uma amostra, o equilíbrio secular acontece quando o número de átomos de cada espécie é praticamente constante, fazendo com que as razões da atividade do nuclídeo pai e do nuclídeo filho sejam 1 para um tempo relativamente grande (Schechter e Bertulani, 2007).

O equilíbrio secular se caracteriza por um isótopo de meia-vida longa, como os radionuclídeos naturais, decaindo sucessivamente em outros de

meias-vidas mais curtas. Este equilíbrio pode ser encontrado em amostras naturais como solos, rochas e etc. (Schechter e Bertulani, 2007).

1.3. Decaimento gama

Ao ocorrer um decaimento α , um decaimento β ou uma captura eletrônica, o radionuclídeo pai pode decair diretamente para um nuclídeo filho no estado fundamental ou para um nuclídeo filho num estado excitado, que irá posteriormente para o estado fundamental. Esta transição de um estado excitado para o estado fundamental pode ocorrer com dois processos, decaimento gama, onde o excesso de energia é liberado pela produção de um raio gama característico desta energia de excitação ou por conversão interna, que é a transferência da energia de excitação para um elétron do átomo (Podgorsak, 2009).

Na FIG. 3 pode-se observar um esquema do decaimento do ^{40}K , onde os raios gama são emitidos pela desexcitação do ^{40}Ar .

FIGURA 3: Esquema de decaimento do ^{40}K para ^{40}Ar e ^{40}Ca (adaptado de LNHB, 2016).

1.4. Tintas

1.4.1. Composição básica

De modo geral, a tinta pode ser considerada como uma mistura estável de uma parte sólida (que forma a película aderente à superfície a ser pintada) com um componente volátil (água ou solventes orgânicos) (CETESB, 2006). Os aditivos, embora representando uma pequena percentagem da composição, são responsáveis pela obtenção de propriedades importantes tanto nas tintas quanto no revestimento.

De acordo com o mercado atendido e tecnologias mais representativas, as tintas podem ser assim classificadas:

- 1 - Tintas imobiliárias: tintas e complementos destinados à construção civil;
- 2 - Tintas industriais do tipo OEM (original equipment manufacturer);
- 3 - Tintas especiais: abrange os outros tipos de tintas, como por exemplo tintas para demarcação de tráfego, tintas marítimas, tintas para madeira, etc..

A tinta é uma preparação, o que significa que há uma mistura de vários insumos na sua produção. A combinação dos elementos sólidos e voláteis define as propriedades de resistência e de aspecto, bem como o tipo de aplicação e custo do produto final.

As matérias-primas básicas para a produção de quase todos os tipos de tintas são constituídas pelas resinas, pigmentos, solventes e aditivos (CETESB, 2006; Anghinetti, 2012).

As resinas são formadoras da película da tinta e são responsáveis pela maioria das características físicas e químicas desta, pois determinam o brilho, a resistência química e física, a secagem, a aderência e outras. As resinas

mais usuais são as alquídicas, epóxi, poliuretânicas, acrílicas, poliéster, vinílicas e nitrocelulose.

As cargas são minerais industriais com características adequadas de brancura e granulometria, sendo as propriedades físicas e químicas também importantes. As cargas são importantes na produção de tintas látex e seus complementos, esmaltes sintéticos foscos e acetinados, tintas a óleo, tintas de fundo, etc..

Os minerais mais utilizados são: carbonato de cálcio, agalmatolito, caulim, barita, etc.. Também são importantes os produtos de síntese (cargas sintéticas) como por exemplo: carbonato de cálcio precipitado, sulfato de bário, sílica, silico-aluminato de sódio, etc..

Os solventes são compostos (orgânicos ou água) responsáveis pelo aspecto líquido da tinta com uma determinada viscosidade. Após a aplicação da tinta, o solvente evapora deixando uma camada de filme seco sobre o substrato.

Este grupo de produtos químicos envolve uma vasta gama de componentes que são empregados em baixas concentrações (geralmente <5%), que têm funções específicas como conferir importantes propriedades às tintas e aos revestimentos respectivos, tais como: aumento da proteção anticorrosiva, bloqueadores dos raios UV, catalisadores de reações, dispersantes e umectantes de pigmentos e cargas, melhoria de nivelamento, preservantes e antiespumantes.

Os pigmentos são substâncias insolúveis no meio em que são utilizados (orgânico ou aquoso) e têm como finalidades principais conferir cor ou cobertura às tintas. Os corantes são substâncias geralmente solúveis em água e são utilizados para conferir cor a um determinado produto ou superfície.

1.4.2. Tipos de pigmentos

Os pigmentos podem ser classificados como pigmentos inorgânicos (dióxido de titânio, amarelo óxido de ferro, vermelho óxido de ferro, cromatos e molibdatos de chumbo, negro de fumo, azul da Prússia, etc.), pigmentos orgânicos (azul ftalocianinas azul e verde, quinacridona violeta e vermelha, perilenos vermelhos, toluidina vermelha, aril amídicos amarelos, etc.) e pigmentos de efeito (alumínio metálico, mica, etc.).

1.4.3. Pigmentos inorgânicos

Os pigmentos inorgânicos são todos os pigmentos brancos, cargas e uma grande faixa de pigmentos coloridos, sintéticos ou naturais, de classe química de compostos inorgânicos (Fazenda et al., 2009).

Entre os pigmentos inorgânicos pode-se citar, entre muitos outros, o dióxido de titânio, os óxidos de ferro, os cromatos de chumbo, cromatos de zinco e o fosfato de zinco.

O pigmento inorgânico mais importante é o dióxido de titânio, por apresentar ampla faixa de aplicação (Fazenda et al., 2009).

1.4.4. Dióxido de titânio

O nosso interesse são as tintas imobiliárias, destinadas à construção civil, principalmente por causa do dióxido de titânio, um dos mais importantes pigmentos brancos produzidos, usado na indústria das tintas para opacificar e branquear (McNulty, 2008).

O dióxido de titânio é um composto inorgânico simples, produzido como um pó branco puro que pode ser visto na FIG. 4. A produção do TiO_2 pode ser realizada por dois processos distintos, o *caminho do sulfato* e o *caminho do cloreto*, ambos partindo de matérias-primas que contêm concentrações moderadas de radionuclídeos naturais (McNulty, 2008). O *caminho do cloreto*

(Carp et al., 2004) utiliza rutilo escavado ou produzido a partir da ilmenita pelo processo Becher. O processo Becher consiste em reduzir o óxido de ferro da ilmenita para ferro metálico, então o reoxida para óxido de ferro separando o dióxido de titânio como rutilo sintético com pureza alta (entre 91% e 93%). O processo envolve um forno em alta temperatura para aquecer a ilmenita com carvão e com a adição de ácido sulfúrico. A lama da ilmenita reduzida, que consiste em uma mistura de ferro e dióxido de titânio na água, é oxidada e separada em tanques de decantação. O óxido de ferro (que compunha pelo menos 40% da ilmenita) é devolvido para o local de mineração como refugo e para o processo de preenchimento do solo. O rutilo reage com cloro para produzir tetracloreto de titânio, que é purificado e reoxidado, produzindo dióxido de titânio muito puro. O gás cloro é então reciclado.

O *caminho do sulfato* (Carp et al., 2004) utiliza a ilmenita, que é transformada em sulfatos de ferro e de titânio por reações com ácido sulfúrico produzindo hidróxido de titânio que é precipitado por hidrólise, filtrado e calcinado a 900 °C. A hidrólise rende apenas anatase na calcinação. Para obter rutilo, sais gerados por hidrólise alcalina de sulfato de titânio ou tetracloreto de titânio, são adicionados durante a etapa de hidrólise. O *caminho do sulfato* rende uma substancial quantidade de rejeitos de sulfetos de ferro e TiO_2 de baixa qualidade.

A escolha do método a ser utilizado leva em conta alguns fatores, como disponibilidade das matérias-primas, custos de eliminação de resíduos e frete. O processo cloreto é o mais utilizado nos dias de hoje e é menos invasivo ambientalmente (Carp et al., 2004).

FIGURA 4: Dióxido de titânio (Acervo pessoal).

O dióxido de titânio pode ser obtido de cinco minerais de titânio para uso comercial, a ilmenita (FeTiO_2), o leucóxênio, o rutilo (TiO_2), o anatásio (TiO_2) e a perovskita (CaTiO_3) (MME, 2010).

1.4.4.1. Rutilo e ilmenita

A ilmenita, cujo cristal pode ser visto na FIG. 5, é responsável por cerca de 92% da demanda mundial por minerais de titânio, enquanto o restante é praticamente todo de rutilo (Bedinger, 2013).

O rutilo sintético é produzido a partir da ilmenita pelo processo Becher que consiste em redução do óxido de ferro da ilmenita para ferro metálico e subsequente oxidação para formação de óxido de ferro. Nesse processo, o dióxido de titânio é removido da ilmenita formando o rutilo sintético, com concentração de 91% a 93% de dióxido de titânio (Ferreira, 2006). Um cristal de rutilo é mostrado na FIG. 5.

FIGURA 5: Cristal de ilmenita em quartzo (a) e cristais de rutilo em quartzo (b) (Machado et al., 2013).

1.4.4.2. Monazita

O principal contaminante radioativo de concentrados de ilmenita é a monazita (Ferreira, 2006). A monazita consiste em fosfato de cério, lantânio, tório ou neodímio que ocorre como mineral acessório em granitos, gnaisses, aplitos, pegmatitos e em depósitos sedimentares (Dana, 1951; Machado et al., 2013), sendo a principal fonte de dióxido de tório em concentrações de 1% a 20%. Traços de urânio também são detectados na monazita (Dana, 1951). Um cristal de monazita é mostrado na FIG. 6.

FIGURA 6: Cristal de monazita (Machado et al., 2013).

1.4.5. Formulação básica das tintas

A formulação das tintas passa por processos básicos de planejamento, como a definição do objetivo, pesquisa e levantamento de informações importantes e do estudo da compreensão das relações entre os fatos e variáveis envolvidas. A formulação, portanto, consiste no resultado de um equilíbrio de propriedades desejáveis (Fazenda et al., 2009).

Uma fórmula pronta disponível na literatura (Fazenda et al., 2009) apresenta valores de porcentagem da massa total da tinta de 60% para resinas, 24% para pigmentos, 2% para aditivos e 14% para solventes. Variando-se estes valores básicos, as formulações mais complexas são então realizadas, onde controla-se valores de densidade, de sólidos em peso, sólidos em volume, pigmentos sobre sólidos, entre outras diversas características.

1.4.6. Regulamentações para definição de qualificação das tintas

As tintas látex, objetos de estudo deste trabalho, podem ser classificadas pela sua qualidade por Econômica, Standard e Premium, em ordem crescente de qualidade. O que define a qualidade da tinta são testes físicos de desgaste e cobertura realizados a partir de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para definir os requisitos e critérios mínimos para os três tipos de tintas, a Associação Brasileira de Fabricantes de Tintas (ABRAFATI) adota a norma NBR ABNT 15079:2011 “Tintas para construção civil - Especificação dos requisitos mínimos de desempenho de tintas para edificações não industriais - Tinta látex nas cores claras” (ABRAFATI, 2016). Os documentos normativos que especificam os critérios técnicos para cada tipo de teste a ser realizado com as tintas são apresentados na TAB. 1.

TABELA 1: Documentos normativos e requisitos de desempenho para as tintas látex (ABRAFATI, 2016).

Tipo	Documento Normativo	Requisito de desempenho	Especificação
Econômica	14942:2013	Determinação do poder de cobertura de tinta seca	Mínimo de $4,0 \text{ m}^2.\text{L}^{-1}$
	14943:2003	Determinação do poder de cobertura de tinta úmida	Mínimo de 55,0%
	15078:2006	Determinação da resistência à abrasão úmida sem pasta abrasiva	Mínimo de 100 ciclos
Standard	14942:2013	Determinação do poder de cobertura de tinta seca	Mínimo de $5,0 \text{ m}^2.\text{L}^{-1}$
	14943:2003	Determinação do poder de cobertura de tinta úmida	Mínimo de 85,0%
	14940:2010	Determinação da resistência à abrasão úmida com pasta abrasiva	Mínimo de 40 ciclos
Premium	14942:2013	Determinação do poder de cobertura de tinta seca	Mínimo de $6,0 \text{ m}^2.\text{L}^{-1}$
	14943:2003	Determinação do poder de cobertura de tinta úmida	Mínimo de 90,0%
	14940:2010	Determinação da resistência à abrasão úmida com pasta abrasiva	Mínimo de 100 ciclos

1.5. Justificativa do trabalho

Diversos trabalhos foram realizados para avaliar a exposição ocupacional dos trabalhadores na indústria de produção do titânio (Harisadan et al., 2008; McNulty, 2008; Bolivar et al., 2011; Gázquez et al., 2011), mas não foi avaliado o efeito da radioatividade natural das tintas usadas na construção civil sobre os indivíduos do público nos edifícios e casas.

O Brasil é um dos cinco maiores mercados mundiais para tintas; fabricam-se no país tintas destinadas às mais variadas aplicações, sendo que

os dez maiores fabricantes respondem por 75% do total das vendas (ABRAFATI, 2016).

No Brasil, o uso do dióxido de titânio está dividido em 82,5% para o uso em tintas, esmaltes e vernizes, 8,6% para a siderurgia, 6,4% para ferro-ligas, 1,6% para eletrodos e 0,8% para pisos e revestimentos (Neto, 2012).

Na literatura, foi observado que a maior preocupação com as tintas é referente somente aos trabalhadores que as usam, isto é, os pintores (CETESB, 2006; ABRAFATI, 2016), com relação à toxicidade das tintas, sem estudar os possíveis níveis de radioatividade presentes e suas implicações.

Desta maneira, é realizado este estudo para avaliar os efeitos sobre os indivíduos do público com relação à radioatividade natural nas tintas imobiliárias destinadas à construção civil.

1.6. Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Determinar as concentrações de atividade de prováveis radionuclídeos naturais presentes em diferentes tintas imobiliárias comercializadas no mercado brasileiro para a formação de um banco de dados;
- Calcular, a partir das concentrações de atividades obtidas para ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , os índices radiológicos, para avaliar as implicações radiológicas do uso das tintas imobiliárias comercializadas no mercado brasileiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Disponibilidade das amostras

Como adquirir tintas no comércio é altamente custoso devido ao número considerável de amostras que devem ser avaliadas, o nosso primeiro contato foi com a Associação Brasileira de Fabricantes de Tintas (ABRAFATI), que autorizou o Laboratório de Tintas Imobiliárias do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) “Mario Amato”, a ceder as amostras para este trabalho. O trabalho dispôs de um universo de cinquenta tintas látex, sendo 15 do tipo “Econômica”, 15 do tipo “Standard” e 20 do tipo “Premium”. Todas as amostras são de tinta branca e foram cedidas descaracterizadas de suas embalagens originais e sem nenhuma identificação sobre fabricante como é mostrado na FIG. 7.

FIGURA 7: Algumas amostras de tintas descaracterizadas cedidas pelo SENAI para o estudo.

Uma amostra de dióxido de titânio utilizado na indústria da tinta também foi obtida, por meio de um fabricante de tintas, para a realização deste trabalho.

2.2. Espectrometria gama

A técnica utilizada para realizar as medições deste trabalho foi a da espectrometria gama de alta resolução. A espectrometria gama é uma técnica analítica muito utilizada em laboratórios de medidas nucleares, pois possui vantagens significativas, como não destruir a amostra e por sua capacidade de analisar diversos radionuclídeos, presentes nas amostras, numa mesma medição (Gilmore e Hemingway, 1995; Knoll, 2000).

Os fótons ao incidirem no detector e perderem sua energia nele, geram pulsos elétricos que são amplificados e analisados, sendo então registrados. A altura do pulso é diretamente proporcional à energia gama do fóton incidente no detector, desta forma picos de absorção total são formados pela acumulação destes pulsos e o conjunto destes picos é então o espectro de raios gama da amostra. Neste espectro é possível identificar o radionuclídeo pela sua posição. As atividades são proporcionais à área de cada pico do espectro (Knoll, 2000).

Este trabalho usou um arranjo experimental tradicional com um detector de alta resolução para radiação gama, dentro de uma blindagem de chumbo, para reduzir a radiação de fundo o máximo possível, ligado a uma fonte de alta tensão e a um pré-amplificador, que envia o sinal para um amplificador, seguindo para um analisador multicanal de alturas de pulsos e finalmente para um sistema de registro de dados. A calibração em eficiência é feita com uma solução aquosa radioativa padrão multi-elementar e a radiação de fundo foi determinada com água ultrapura. Tanto para a solução aquosa quanto para a água ultrapura foi utilizada a mesma geometria utilizada com as amostras de tinta. Este sistema pode ser visualizado na FIG. 8.

FIGURA 8: Esquema geral de um sistema de detecção de radiação gama.

2.3. Fatores de autoatenuação

A radiação gama da amostra será atenuada devido ao material da própria amostra. Quando as amostras apresentam densidades maiores que a da solução padrão aquosa, faz-se necessário realizar uma correção na eficiência devido a autoatenuação de cada amostra, pelo fato da curva de eficiência ter sido feita com solução radioativa padrão aquosa (Barros e Pecequillo, 2014).

O fator de autoatenuação foi calculado pelo método de Cutshall (Cutshall, 1983). Para utilizar este método são necessárias duas considerações. A primeira é a de que a fonte, a amostra e o detector devem estar alinhados coaxialmente e a segunda é a de que os fótons devem atingir o detector perpendicularmente, ou ao menos próximo disto.

Para cada amostra foram ajustadas curvas para definir o fator de autoatenuação em cada energia e assim poder corrigir corretamente os valores

de cada transição de interesse. Utilizou-se fontes de ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{133}Ba e ^{60}Co como fontes pontuais (Barros e Pecequillo, 2014), cujas energias utilizadas podem ser vistas na TAB. 2.

TABELA 2: Fontes radioativas utilizadas para determinar os fatores de autoatenuação, com suas respectivas energias e intensidades.

Fonte padrão	Energia (keV)	Intensidade (%)
IAEA	(INTERWINNER 6.0, 2004)	(INTERWINNER 6.0, 2004)
^{152}Eu	121,78	28,4
	244,69	7,54
	344,28	26,52
	778,90	12,94
	867,39	4,21
	964,05	14,6
	1085,84	10,0
	1112,08	13,56
	1408,03	20,8
^{60}Co	1173,24	99,89
	1332,50	99,98
^{137}Cs	661,66	85,20
^{133}Ba	80,99	34,10
	276,39	7,17
	302,84	18,32
	356,01	62,00
	383,85	8,93

O fator de autoatenuação foi calculado pela equação 5 (Cutshall, 1983).

$$f = \frac{\ln\left(\frac{A}{P}\right)}{\left(\frac{A}{P} - 1\right)} \quad (5)$$

onde f é o fator de autoatenuação, A a intensidade do feixe que atravessa a amostra e P a intensidade do feixe que atravessa o padrão de água ultrapura.

Calculando-se todos os fatores para as transições da TAB. 2, é então feito um ajuste de curva para o fator de autoatenuação em função da energia, podendo-se calcular o fator para a energia desejada a partir da curva ajustada.

2.4. Cálculos das atividades

As atividades foram obtidas pela equação 6 (Knoll, 2000).

$$A(E_\gamma) = \frac{C}{\varepsilon_\gamma \cdot I_\gamma \cdot t \cdot m} \times f(E_\gamma) \quad (6)$$

onde $A(E_\gamma)$ é a concentração de atividade (Bq.kg^{-1}), C a área líquida do pico de interesse, ε_γ é a eficiência de detecção, I_γ a probabilidade de emissão, t o tempo de aquisição, m a massa da amostra (kg) e $f(E_\gamma)$ o fator de autoatenuação para a transição gama relacionada.

A atividade do ^{40}K foi calculada pela sua transição gama única. A atividade do ^{226}Ra foi determinada pela média das atividades ponderadas pelas incertezas das transições do ^{214}Pb e do ^{214}Bi . A atividade do ^{232}Th foi determinada pela média das atividades ponderadas pelas incertezas das transições gama do ^{228}Ac , ^{212}Pb e do ^{212}Bi . As transições utilizadas podem ser observadas na TAB. 3 e o cálculo das atividades é exemplificado na equação 7 (Knoll, 2000).

TABELA 3: Transições gama utilizadas para determinação das concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K .

Radionuclídeo	Isótopo	Transições (keV) (INTERWINNER 6.0, 2004)
^{226}Ra	^{214}Pb	295,21
		351,92
	^{214}Bi	609,32
^{232}Th	^{228}Ac	338,40
		911,07
		968,90
	^{212}Pb	238,63
		300,09
	^{212}Bi	727,33
^{40}K		1460,83

$$A = \frac{\frac{A_1}{\sigma_1^2} + \frac{A_2}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{A_n}{\sigma_n^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{\sigma_n^2}} \quad (7)$$

onde $A_1, \dots, A_n$ são as atividades determinadas a partir de cada transição e $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ são suas respectivas incertezas calculadas como na equação 8 (Knoll, 2000).

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{\sigma_n^2}}} \quad (8)$$

2.5. Índices radiológicos

Neste trabalho são utilizados quatro índices radiológicos para melhor compreender os riscos que as tintas podem ou não causar, equivalente em rádio (R_{eq}), índice de concentração de atividade (I_v) e os índices de risco a exposição gama interna e externa (H_{in} e H_{ex}).

2.5.1. Equivalente em rádio (Ra_{eq})

Como a distribuição de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K não é uniforme em amostras ambientais, dependendo de suas composições mineralógicas, utiliza-se a atividade equivalente em rádio (Ra_{eq}) (Beretka e Mathew, 1985). Considerando que 370 Bq.kg^{-1} de ^{226}Ra , 259 Bq.kg^{-1} de ^{232}Th e 4810 Bq.kg^{-1} de ^{40}K representam a mesma dose de $1,5 \text{ mSv.a}^{-1}$ em materiais de construção, utiliza-se este índice como mostrado na equação 9. Este índice é útil na avaliação de normas de segurança de proteção radiológica para os indivíduos do público.

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43A_{Th} + 0,077A_K \quad (9)$$

Sendo A_{Ra} , A_{Th} e A_K as concentrações de atividade, respectivamente, do ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , em Bq.kg^{-1} .

Para este índice, os limites variam conforme a utilização do material estudado. Estes limites podem ser vistos na TAB. 4.

TABELA 4: Limites para o equivalente em rádio de materiais de construção (Hassan et al., 2010).

$Ra_{eq} (\text{Bq.kg}^{-1})$	Classe	Aplicação
< 370	1	Residencial
370 - 740	2	Industrial
740 - 2220	3	Estradas e pontes
2220 - 3700	4	Fundação ou não residencial
> 3700	5	Sem aplicação

2.5.2. Índice de concentração de atividade (I_V)

Como as tintas são classificadas como materiais de construção, pode-se avaliar os limites de dose utilizando-se o índice de concentração de atividade (I_V), que é introduzido pela Comissão Europeia de Proteção Radiológica (EC, 1999). Este índice leva em consideração a dose anual devida a radiação

gama externa e é calculada como na equação 10. Os critérios de dose estipulados para os materiais de construção podem ser vistos na TAB. 5.

$$I_{\gamma} = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000} \quad (10)$$

Sendo A_{Ra} , A_{Th} e A_K as concentrações de atividade respectivamente do ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , em Bq.kg^{-1} .

TABELA 5: Critérios de dose estipulados para materiais de construção (EC, 1999).

Critério de dose	0,3 mSv.a⁻¹ (Isenção)	1 mSv.a⁻¹ (Controle)
Materiais estruturais	$I_{\gamma} \leq 0,5$	$I_{\gamma} \leq 1$
Materiais superficiais	$I_{\gamma} \leq 2$	$I_{\gamma} \leq 6$

2.5.3. Índice de risco a exposição gama interna (H_{in}) e externa (H_{ex})

Como há o risco de inalação por acúmulo de radônio e seus produtos de decaimento de meia vida curta, utiliza-se o índice de risco a exposição gama interna (H_{in}) como na equação 11 (Beretka e Mathew, 1985) e também o índice de risco a exposição gama externa (H_{ex}) devido a exposição externa gama como na equação 12 (Beretka e Mathew, 1985). Estes dois índices tem como limite 1, para se evitar uma exposição maior que os limites de segurança estipulados de $1,5 \text{ mSv.a}^{-1}$ (OECD, 1979).

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \leq 1 \quad (11)$$

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \leq 1 \quad (12)$$

Sendo A_{Ra} , A_{Th} e A_K as concentrações de atividade, respectivamente, do ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , em Bq.kg^{-1} .

2.5.4. Taxa de dose e dose efetiva anual

Para complementar a avaliação do risco radiológico, calculou-se a taxa de dose e a dose efetiva anual das amostras de tinta. Para isto, considerou-se o modelo sugerido pela Comissão Europeia de Proteção Radiológica de um quarto padrão (EC, 1999), com quatro paredes, desconsiderando a porta e as janelas. A altura das paredes é de 2,8 m, duas paredes possuem comprimento de 5 m e as outras duas paredes possuem comprimento de 4 m. Neste modelo, foi escolhido o cenário de menor espessura do material da parede (3 cm) e densidade ($2,6 \text{ g.cm}^{-3}$). A espessura de 3 cm para as tintas excede os valores costumeiros usados numa construção, contudo representa valores conservativos, priorizando assim a segurança radiológica.

Para este quarto padrão, é utilizada a equação 13 (EC, 1999) para o cálculo da taxa de dose absorvida.

$$D = 0,12A_{Ra} + 0,14A_{Th} + 0,0096A_K \quad (13)$$

onde D é a taxa de dose absorvida em nGy.h^{-1} , A_{Ra} é a concentração de atividade de ^{226}Ra em Bq.kg^{-1} , A_{Th} é a concentração de atividade de ^{232}Th em Bq.kg^{-1} e A_K é a concentração de atividade de ^{40}K em Bq.kg^{-1} . Os fatores que multiplicam as concentrações de atividade são dadas em $\text{nGy.kg.Bq}^{-1}.\text{h}^{-1}$. Estes índices são calculados por um modelo matemático que leva em consideração os aspectos das dimensões e propriedades das paredes (Markkanen, 1995).

Para a dose efetiva anual, foi considerado um tempo de ocupação de 7000 h em um ano (equivalente a aproximadamente 80% do tempo de um ano) e um fator de conversão de Gy para Sv de 0,7, como visto na equação 14 (EC,1999).

$$D_{ef} = D \times 0,7 \times 7000 \quad (14)$$

onde D_{ef} é a dose efetiva anual em nSv.a^{-1} e D é a taxa de dose absorvida em nGy.h^{-1} .

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Preparo das amostras

Todas as amostras de tintas foram acondicionadas em frascos de polietileno de alta densidade de 100 ml com batoque e tampa rosqueada e fortemente seladas com fita isolante, como pode ser visto na FIG. 9, e foram armazenadas por no mínimo 30 dias para assegurar o equilíbrio radioativo secular (ver item 1.2) (Evans, 1972). As amostras devem ser hermeticamente seladas, pois as concentrações de atividade do ^{226}Ra e ^{232}Th são determinadas, em equilíbrio secular, pelas concentrações de atividade do ^{214}Pb e ^{214}Bi e ^{228}Ac , ^{212}Pb e ^{212}Bi respectivamente, portanto devemos nos assegurar que o ^{222}Rn (ver FIG. 1) e o ^{220}Rn (ver FIG. 2) não escapem da amostra.

As massas foram medidas utilizando-se uma balança semianalítica GEHAKA BK6000.

FIGURA 9: Amostras de tintas, seladas e envoltas em filme plástico transparente.

3.2. Espectrômetro gama

As amostras de tintas foram medidas utilizando-se um detector de germânio hiper-puro de faixa estendida (HPGe) com um pescoço de cisne (detector Canberra XtRa GX2520) em uma blindagem de baixa radiação de fundo ($1,99(9) \cdot 10^{-3}$ cps para a energia de 1460,72 keV do ^{40}K), ligado a um conjunto eletrônico convencional e um analisador multicanal 4k EG&G ORTEC 919 Spectrum Master, que podem ser visualizados nas FIG. 10 e 11. Cada amostra foi envolta em filme de plástico transparente (ver FIG. 9) para prevenir contaminação do detector e foi contada (live time) por 150000 segundos.

FIGURA 10: Detector HPGe com *pescoço de cisne* e com pré-amplificador utilizado para aquisição de dados (a) com detalhe do interior da blindagem de baixa radiação de fundo de Pb-Cu, da janela de Be e do suporte de amostras de lucite (b).

FIGURA 11: Eletrônica associada ao detector Canberra XtRa GX2520. Da esquerda para a direita, fonte de alta tensão, analisador multicanal e amplificador.

Os espectros foram analisados com o software WinnerGamma (INTERWINNER 6.0, 2004). Uma saída do programa pode ser vista na FIG. 12.

FIGURA 12: Saída do programa WinnerGamma para a amostra de tinta Premium P03 mostrando picos de alguns radionuclídeos utilizados.

3.3. Autoatenuação

Os fatores de autoatenuação das amostras de tintas foram determinados em um detector HPGe (detector EG&G ORTEC GEM 20180-S) ligado a uma eletrônica convencional e um analisador multicanal ACE-2K, como visto nas FIG. 13 e 14, utilizando-se tempos de contagem (live time) de 2000 segundos. Os fatores de autoatenuação da amostra de dióxido de titânio foram determinadas em um detector HPGe (detector EG&G ORTEC GEM 15190) ligado a uma eletrônica convencional e um analisador multicanal 4k EG&G ORTEC 919 Spectrum Master. As montagens experimentais consistem em se colocar uma fonte puntual acima da amostra, e esta amostra é colocada acima do detector, para isto foi utilizado um suporte de lucite com estante móvel, para regular altura da fonte, e um colimador (detalhe do colimador com a fonte podem ser vistos na FIG. 16) para a fonte poder ser considerada puntual, como ilustrado na FIG. 15. É feito o mesmo processo com uma amostra de água ultrapura na mesma geometria das amostras de tinta, para servir como padrão.

FIGURA 13: Detector HPGe (detector EG&G ORTEC GEM 20180-S) utilizado para autoatenuação das amostras de tinta com a montagem do arranjo de autoatenuação.

FIGURA 14: Eletrônica associada ao sistema do detector EG&G ORTEC GEM 20180-S. Da esquerda para a direita, amplificador e fonte de alta tensão.

FIGURA 15: Montagem experimental para determinação dos fatores de autoatenuação.

FIGURA 16: Colimador com uma fonte radioativa de ^{152}Eu utilizados para autoatenuação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Densidades das amostras

A densidade aparente de cada amostra foi determinada como na equação 13.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

onde ρ é a densidade aparente em g.cm^{-3} , m é a massa da amostra em g e V é o volume da amostra em cm^3 . Utilizaram-se frascos de 100 mL, que equivalem a 100 cm^3 . As incertezas das densidades aparentes são de 3%.

Na FIG. 17 estão representados os valores das densidades com suas respectivas incertezas para todas as amostras analisadas neste trabalho.

FIGURA 17: Densidades aparentes das amostras de tintas Econômica, Standard e Premium, analisadas neste trabalho.

Observa-se uma amostra que está abaixo de $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$ de densidade. Esta amostra apresentou duas fases ao ficar em repouso por alguns dias, este comportamento pode ser devido pela ausência ou insuficiência de aditivos responsáveis pela homogeneidade da tinta. Ao se preparar esta amostra ela foi homogeneizada manualmente utilizando-se uma espátula de madeira.

As densidades variaram entre $1,15 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,40 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ para as amostras do tipo Econômica, entre $0,97 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,45 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ para as amostras do tipo Standard e entre $1,26 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,46 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ para as amostras do tipo Premium. Todos os valores de densidades das amostras deste estudo estão presentes no APÊNDICE A.

O comportamento das densidades, divididas entre os 3 tipos de tintas estudadas, não apresenta um comportamento em que se veja uma diferença entre os tipos de tintas.

4.2. Fatores de autoatenuação

Os fatores de autoatenuação foram determinados por ajuste de curvas exponenciais ajustadas pelo programa OriginPro 8.0 (ORIGINLAB, 2008). Na FIG. 18 pode-se visualizar duas curvas típicas de autoatenuação. No APÊNDICE B é possível ver as tabelas dos valores dos fatores de autoatenuação para todas as amostras.

Os fatores de autoatenuação encontrados neste trabalho são representados por curvas de decaimento exponencial simples (modelo ExpDec1) e por curvas de decaimento exponencial dupla (modelo ExpDec2), escolhidas pelos valores de R^2 e por avaliação visual de cada curva.

FIGURA 18: Curva do fator de autoatenuação para a amostra de TiO_2 , à esquerda o modelo ExpDec1 e à direita o modelo ExpDec2.

Para amostras cujas densidades são iguais (ver APÊNDICE A), analisou-se o comportamento dos fatores de autoatenuação (ver APÊNDICE B). Observou-se amostras com densidades iguais, como, por exemplo, as amostras E02, S12 e P14 de tipos diferentes de tintas que possuem a mesma densidade de $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$, e as amostras de mesma densidade de $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$ e mesmo tipo de tinta como as amostras P02, P12 e P19.

Nas FIG. 19 e 20 são mostrados, respectivamente, os fatores de autoatenuação em função da energia para os grupos de amostras E02, S12 e P14 de densidade $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$ e P02, P12 e P19 de densidade $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$.

FIGURA 19: Fator de autoatenuação em função da energia para as amostras de tinta E02, S12 e P04 de densidade $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$.

FIGURA 20: Fator de autoatenuação em função da energia para as amostras de tinta P02, P12 e P19 de densidade $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$.

Observa-se nas FIG. 19 e 20 que fatores de autoatenuação de amostras de mesma densidade variam entre si para as mesmas energias, tanto para amostras do mesmo tipo de tinta como para amostras de tipos diferentes de tintas. Este fato é justificado pela dependência dos fatores com o número atômico médio de cada amostra e não apenas com a densidade, ou seja, a variabilidade da composição elementar entre as amostras, mais do que qualquer outra coisa.

Desta maneira, os fatores de autoatenuação devem ser determinados individualmente para todas as amostras.

4.3. Concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K

As concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K para as 50 amostras deste trabalho podem ser visualizadas nas FIG. 21, 22 e 23.

FIGURA 21: Concentrações de atividade de ^{232}Th nas 50 amostras de tintas estudadas.

FIGURA 22: Concentrações de atividade de ^{226}Ra nas 50 amostras de tintas estudadas.

FIGURA 23: Concentrações de atividade de ^{40}K nas 50 amostras de tintas estudadas.

A correlação linear entre a concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{232}Th nas amostras é apresentada na FIG. 24.

FIGURA 24: Correlação entre concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{232}Th para todas as amostras de tintas estudadas.

Foram calculados os valores dos fatores de correlação de Pearson (Mukaka, 2012) entre a concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{232}Th para os três tipos de tintas. Na TAB. 6 estão os valores dos coeficientes e as faixas a que pertencem.

TABELA 6: Coeficientes de correlação de Pearson entre concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{232}Th para os diferentes tipos de tinta.

Tipo de tinta	Coeficiente de correlação	Correlação positiva muito alta (0,90 - 1,00) (Mukaka, 2012)	Correlação positiva moderada (0,50 – 0,70) (Mukaka, 2012)
Econômica	0,60		X
Standard	0,96	X	
Premium	0,97	X	

A amostra E08 mostra um comportamento diferente de todas as outras amostras quando se observa o valor compatível com as amostras do tipo Econômica para ^{232}Th porém relativamente alto para ^{226}Ra (ver FIG. 21 e 22), sugerindo que além do dióxido de titânio, outro produto, que possui um elevado nível de componente relacionado com a série do ^{238}U , tenha sido utilizado na fabricação desta amostra. Esta divergência de comportamento pode ser observado também na correlação entre ^{232}Th e ^{226}Ra , como visto pelo ponto totalmente fora da curva na FIG. 24.

4.4. Índices radiológicos

4.4.1. Equivalente em rádio

A atividade equivalente em rádio, calculada pela equação 9 (ver item 2.5.1), pode ser visualizada na FIG. 25.

FIGURA 25: Atividade equivalente em rádio (Ra_{eq}) para todas as amostras de tinta estudadas; a linha vermelha representa o limite de 370 Bq.kg^{-1} segundo Hassan et al..

O limite recomendável para materiais de construção é de 370 Bq.kg^{-1} (Hassan et al., 2010) (ver TAB. 4, item 2.5.1).

4.4.2. Índice de concentração de atividade

A FIG. 26 apresenta os valores calculados pela equação 10 (item 2.5.2) para o índice de concentração de atividade (I_γ) para todas as 50 tintas estudadas neste trabalho.

FIGURA 26: Índice de concentração de atividade (I_γ) das 50 amostras de tinta estudadas; a linha vermelha representa o limite de 2 estipulado pela Comissão Europeia.

Para este índice o recomendável, para materiais superficiais, é de valores abaixo de 6 para controle, que corresponde a 1 mSv.a^{-1} , e abaixo de 2 para isenção, que corresponde a $0,3 \text{ mSv.a}^{-1}$ (EC, 1999), como visto na TAB. 5, item 2.5.2.

4.4.3. Índices de risco a exposição gama interna e externa

Os índices de risco à exposição gama interna calculados pela equação 11 (item 2.5.3) podem ser visualizados na FIG. 27, os índices de risco a exposição gama externa calculados pela equação 12 (item 2.5.3) podem ser visualizados na FIG. 28.

FIGURA 27: Índices de risco a exposição gama interna das 50 tintas estudadas; a linha vermelha representa o limite de 1 determinado pela OECD.

FIGURA 28: Índices de risco a exposição gama externa das 50 tintas estudadas; a linha vermelha representa o limite de 1 determinado pela OECD.

Para ambos os índices, o recomendável é de valores abaixo de 1 (OECD, 1979) quando a atividade equivalente em rádio for menor que 370 Bq.kg^{-1} .

4.5. Dose efetiva anual

As doses efetivas anuais das amostras de tinta para um quarto padrão (equação 14, item 2.5.4) podem ser visualizadas na FIG. 29.

FIGURA 29: Dose efetiva anual das amostras de tinta para um quarto padrão; a linha vermelha representa o limite de $1000 \mu\text{Sv.a}^{-1}$ determinado pelo ICRP.

A dose efetiva anual não pode exceder 1 mSv.a^{-1} ($1000 \mu\text{Sv.a}^{-1}$ na escala da FIG. 29) (ICRP, 1990) e podemos observar que todas as amostras estão abaixo deste valor. Considerando que no modelo aplicado, a espessura da camada de tinta seja de 3 cm, o que não corresponde à realidade, observa-se que, mesmo neste cenário conservador, os valores estão bem abaixo do limite recomendado, mostrando que as tintas deste estudo, mesmo neste parâmetro de dose, são seguras.

4.6. Dados da amostra de dióxido de titânio

Na TAB. 7 observa-se os valores obtidos para as concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K e os valores calculados dos índices radiométricos para a amostra de dióxido de titânio que foi obtida.

TABELA 7: Dados da amostra de dióxido de titânio.

	<i>Valor</i>
Densidade	2,16(6) g.cm ⁻³
Concentração de atividade de ²³² Th	84,6(27) Bq.kg ⁻¹
Concentração de atividade de ²²⁶ Ra	86,4(23) Bq.kg ⁻¹
Concentração de atividade de ⁴⁰ K	< 11,4 Bq.kg ⁻¹ (AMD*)
Ra _{eq}	207(4) Bq.kg ⁻¹
I _γ	0,711(15)
H _{in}	0,794(16)
H _{ex}	0,560(12)

*AMD: Atividade mínima detectável (fornecida pela análise do espectro gama com InterWinner 6.0)

Estes dados mostram que o ⁴⁰K presente nas tintas pode não ser oriundo do dióxido de titânio do pigmento, podendo ser trazido por outros insumos da produção das tintas em sua produção. Também observa-se que há um equilíbrio na concentração de atividade de ²²⁶Ra e ²³²Th, podendo assim estimar que amostras que apresentam um desequilíbrio nestas concentrações de atividade, pode ser devido a presença de outros componentes que possuam elementos das famílias radioativas do ²³²Th e/ou do ²³⁸U, introduzidos no processo de fabricação.

Como visto no item 1.4.5, na formulação básica das tintas 24% da massa total representa o pigmento, o que faria com que a contribuição do dióxido de titânio na concentração de atividade fosse de 20,3 Bq.kg⁻¹ para ²³²Th e de 20,7 Bq.kg⁻¹ para ²²⁶Ra. Algumas amostras apresentam valores menores destas concentrações de atividade, o que pode mostrar o uso de outros pigmentos brancos na fabricação das tintas, já nas amostras que apresentam maior concentração de atividade pode ser pelo fato de utilizarem dióxido de titânio de proveniência diferente das amostras estudadas por nós.

5. CONCLUSÕES

A análise das 50 amostras de tintas látex brancas resultou em um banco de dados das concentrações de atividades de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K presentes no APÊNDICE C.

As concentrações de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K das amostras das 50 tintas estudadas mostram que, assim como esperado pela composição das tintas, há radionuclídeos presentes nas tintas, provavelmente devido ao dióxido de titânio do pigmento branco. Outros constituintes da tinta podem contribuir para estes níveis de radioatividade, como visto na amostra E08.

Os valores encontrados são considerados baixos, isto é devido a pouca quantidade de material utilizado na fabricação das tintas, o dióxido de titânio representa menos de 16% da composição da tinta em volume (24% da composição em massa).

Os índices radiológicos estudados mostram que nenhuma das tintas analisadas ultrapassou os limites estipulados para qualquer dos índices, sempre estando consideravelmente abaixo destes limites, considerando as tintas, portanto, seguras com o que se diz respeito à proteção radiológica. O mesmo pode ser afirmado com relação à dose efetiva anual.

No espectro geral das amostras aqui consideradas, não se verificou uma correlação com o tipo de tinta e os níveis de radiação presentes. Como a classificação comercial das tintas em *Econômica*, *Standard* e *Premium* é feita somente com base em testes físicos de desgaste e poder de cobertura, não há maiores informações sobre a origem e qualidade do dióxido de titânio com teor radioativo natural, usado no pigmento branco.

Para se apurar com maior precisão a origem das concentrações de atividade de cada amostra, seriam necessários estudos por espectrometria gama de amostras de dióxido de titânio de diferentes naturalidades e nacionalidades.

Ainda, a composição das tintas poderia ser determinada com técnicas como difratometria e fluorescência de raios-X, análise por ativação neutrônica e/ou espectrometria de massa.

As tintas comerciais brasileiras avaliadas neste estudo se mostram muito seguras para o uso residencial, ainda mais quando se considera que a fração da tinta que permanece na parede depois do processo de cura é ínfima perto de todo o material de construção utilizado na obra inteira.

Comparações com outras tintas em outros países ou mesmo no Brasil não são possíveis, visto que não há na literatura trabalhos análogos com valores de concentrações de radioatividade natural em tintas. Este ineditismo ressalta o pioneirismo deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAFATI, Associação Brasileira de Fabricantes de Tintas. Disponível em: <<http://www.abrafati.com.br>> Acesso em: 12 jan. 2016.

ANGHINETTI, I.C.B. Tintas, suas propriedades e aplicações imobiliárias. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2012.

AQUINO, R.R. **Avaliação da radioatividade natural em areias das Praias da Grande Vitória, Espírito Santo**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

AQUINO, R.R. **Avaliação da radioatividade natural em mármore e granitos comerciais do estado do Espírito Santo**. 2015. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

AQUINO, R.R., PECEQUILO, B.R.S. Natural radioactivity analysis in commercial marble samples of southeast region in Espírito Santo state: preliminary results. In: **2011 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2011**, Belo Horizonte.

BARROS, L.F., PECEQUILO, B.R.S. e AQUINO, R.R. Gamma radiation measurements in select sand samples from Camburi Beach – Vitória, Espírito Santo, Brasil: Preliminary results. In: **2011 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2011**, Belo Horizonte.

BARROS, L.F. e PECEQUILO, B.R.S. Self-Attenuation factors in gamma-ray spectrometry of select sand samples from Camburi Beach – Vitória, Espírito Santo, Brazil, **Radiation Physics and Chemistry**. v. 95, p. 339-341, 2014.

BEDINGER, G.M. Titanium Mineral Concentrates. U.S. Geological Survey, **Mineral Commodity Summaries**, 2013.

BERETKA, J. e MATHEW, P.J. Natural Radioactivity of Australian Building Materials, Industrial Wastes and By-products. **Health Physics**. v. 48(1), p.87-95, 1985.

BOLÍVAR, J.P., GARCÍA-TENORIO, R., MANTERO, J., GÁZQUEZ, M.J. e LOZANO, R. "Occupational exposure assessment at a titanium dioxide plant located in the south-west of Spain", **Proceedings of the sixth International Symposium on NORM**, Marrakesh, Morocco, 22-26 March 2010 (2011).

CARP, O., HUISMAN, C.L., RELLER, A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. **Progress in Solid State Chemistry**. v. 32, p. 33-177, 2004.

CETESB, Guia Técnico Ambiental Tintas e Vernizes – Série P+L, Governo do Estado de São Paulo, 2006.

CUTSHALL, N.H., LARSEN, I.L. e OLSEN, C.R. Direct analysis of ^{210}Pb in sediment samples: self-absorption corrections, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 206, p.309-312, 1983.

DANA, J. D. **Dana's System of Mineralogy**. V. 2, ed. 7, revisado por Charles Palache, Harry Berman, e Clifford Frondel. John Willey & Sons, 1951.

EC, European Comission. "Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials", **Radiation Protection Report RP-112**, Luxemburgo, 1999.

EISENBUD, M. **Environmental Radioactivity**. 2nd ed. Academic Press, 1987.

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

EVANS, R.D., **The Atomic Nucleus**, McGraw-Hill, New York, 1972.

FAZENDA, J.M.R. (coordenador) **Tintas – ciência e tecnologia**. ed. 4, São Paulo. Editora Blucher, 2009.

FERREIRA, A.O. e PECEQUILO, B.R.S., "Natural radioactivity assessment by gamma spectrometry in some commercially-used granites from Paraná State, Brazil: Preliminary results", **Radioprotection**, v.46, p. S43-S47, 2011.

FERREIRA, K. R. S. **Caracterização do concentrado de ilmenita produzido na Mina do Guaju, Paraíba, visando identificar inclusões de monazita e outros contaminantes**. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

FERREIRA, A.O. **Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do estado do Paraná e sua utilização na construção civil**. Tese (Doutorado) – IPEN. São Paulo, 2013.

GÁZQUEZ, M.J., BOLÍVAR, J.P., MANTERO, J., GARCÍA-TENORIO e R., VACA, F. "Physico-chemical and radioactive characterization of co-products from titanium dioxide NORM industry for their use in cement manufacturing", **Proceedings of the sixth International Symposium on NORM**, Marrakesh, Morrocco, 22-26 March 2010 (2011).

GILMORE, G., HEMINGWAY, J.D. **Practical gamma-ray spectrometry**. John Wiley, 1995.

HARISADAN, P.M.B., PILLAI, P.M.B., TRIPATHI, R.M., PURANIK, V.D. "Radiological implication due to thorium in titanium mineral separation and chemical processing", **Proceedings of the fifth International Symposium on NORM**, Seville, Spain, 19-22 March 2007 (2008).

HASSAN, N.M., ISHIKAWA, T., HOSODA, M., SORIMACHI, A., TOKONAMI, S., FUKUSHI, M. e SAHOO, S.K., Assessment of the natural radioactivity using

two techniques for the measurement of radionuclide concentration in building materials used in Japan, **J. Radioanal. Nucl. Chem.** v. 283, p. 15-21, 2010.

ICRP, International Commission on Radiological Protection, Recommendation of the ICRP, publication 60. Ed. Pergamon Press, Oxford, 1990.

INTERWINNER TM 6.0 MCA, 2004. Emulation, Data Acquisition and Analysis software for Gamma and Alpha Spectroscopy IW-B32. ORTEC. Oak Ridge, TN, USA.

JALAD, K. Radioactive characterization of sand samples from Failaka Island in Kuwait, **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**. V. 303, p. 733-741, 2015.

KATHREN, R.L. NORM Sources and Their Origins. **Applied Radiation and Isotopes**, v.49, p. 149-168, 1998.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection Measurements**. John Wiley, New York, 3rd ed. 2000.

LNHB, Laboratoire National Henri Becquerel. Disponível em <http://www.nuclide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm>. Acessado em 15 jan 2016.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.;GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Enciclopédia Multimídia de Minerais**. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>>. Acessado em 05 jan 2013.

MARKKANEN, M. **Radiation Dose Assesments for Materials with Elevated Natural Radioactivity**. Report STUK-B-STO 32. Technical Report, Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK, 1995.

McNULTY, G.S. Production of titanium dioxide. **Proceedings of the Fifth International Symposium on NORM**, Sevilha, Espanha, 19-22 Março 2007, IAEA, Vienna, 2008.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL-SGM. **DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DUODECENAL (2010 - 2030) DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. PRODUTO 16 Titânio**. Relatório Técnico 36 Perfil do Titânio.BANCO MUNDIAL BANCO INTERNACIONAL PARA A RECONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO - BIRD. Fevereiro de 2010 (versão 04).

MUKAKA, M.M. A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v.24(3), p.69-71, 2012.

NETO, A.A.A. "Titânio", **Sumário Mineral Brasileiro**, DNPM, 2012.

OECD, Organization for Economic Cooperation and Development. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. **Report by a Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency**, OECD, Paris, 1979.

ORIGINLAB, **Data Analysis and Graphing Software, version 8.0**. Copyright 2008 OriginLab Corporation, 2008.

PODGORSAK, E.B. **Radiation physics for medical physicists**. Springer Berlin Heidelberg, 2010.

SCHECHTER, H., BERTULANI, C.A. **Introdução à Física Nuclear**. Rio de Janeiro. Editora UFRJ. 2007.

UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 1993.

UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 2000.

UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 2008.

VEIGA, R., SANCHES, N., ANJOS, R.M., MACARIO, K., BASTOS, J., IGUATEMY, M., AGUIAR, J.G., SANTOS, A.M.A., MOSQUERA, C.C., BATISTA FILHO, M. e UMISEDÓ, N.K. "Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands", **Radiation Measurements**, v.41, p. 189-196, 2006.

APÊNDICE A: Densidades das amostras de tinta deste estudo.

Amostra	Densidade (g.cm ⁻³)	Incerteza (g.cm ⁻³)	Amostra	Densidade (g.cm ⁻³)	Incerteza (g.cm ⁻³)	Amostra	Densidade (g.cm ⁻³)	Incerteza (g.cm ⁻³)
E01	1,40	0,04	S01	0,97	0,03	P01	1,27	0,04
E02	1,35	0,04	S02	1,23	0,04	P02	1,31	0,04
E03	1,32	0,04	S03	1,37	0,04	P03	1,26	0,04
E04	1,17	0,03	S04	1,25	0,04	P04	1,32	0,04
E05	1,23	0,04	S05	1,27	0,04	P05	1,43	0,04
E06	1,33	0,04	S06	1,32	0,04	P06	1,46	0,04
E07	1,31	0,04	S07	1,28	0,04	P07	1,32	0,04
E08	1,23	0,04	S08	1,29	0,04	P08	1,27	0,04
E09	1,30	0,04	S09	1,41	0,04	P09	1,34	0,04
E10	1,26	0,04	S10	1,44	0,04	P10	1,43	0,04
E11	1,23	0,04	S11	1,45	0,04	P11	1,38	0,04
E12	1,22	0,04	S12	1,35	0,04	P12	1,31	0,04
E13	1,26	0,04	S13	1,33	0,04	P13	1,34	0,04
E14	1,16	0,03	S14	1,38	0,04	P14	1,35	0,04
E15	1,33	0,04	S15	1,29	0,04	P15	1,44	0,04
						P16	1,43	0,04
						P17	1,38	0,04
						P18	1,29	0,04
						P19	1,31	0,04
						P20	1,46	0,04

APÊNDICE B – Fatores de autoatenuação das amostras de tinta e do TiO₂.

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Econômica.

Amostra	80,99 keV		121,78 keV		244,69 keV		276,39 keV		302,85 keV		344,28 keV	
	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
E01	1,198	0,006	1,123	0,003	1,083	0,007	1,093	0,009	1,095	0,005	1,085	0,003
E02	1,198	0,006	1,117	0,003	1,088	0,007	1,071	0,009	1,081	0,005	1,075	0,003
E03	1,160	0,006	1,097	0,003	1,073	0,007	1,063	0,009	1,070	0,005	1,066	0,003
E04	1,046	0,006	1,056	0,003	1,028	0,007	1,015	0,010	1,037	0,005	1,030	0,003
E05	1,117	0,007	1,088	0,003	1,051	0,007	1,032	0,010	1,045	0,005	1,050	0,003
E06	1,188	0,006	1,114	0,003	1,086	0,007	1,076	0,009	1,082	0,005	1,068	0,003
E07	1,147	0,007	1,101	0,003	1,058	0,007	1,045	0,010	1,050	0,005	1,051	0,003
E08	1,111	0,005	1,066	0,003	1,058	0,006	1,049	0,009	1,046	0,005	1,045	0,003
E09	1,148	0,007	1,052	0,003	1,024	0,007	1,040	0,010	1,050	0,005	1,024	0,003
E10	1,137	0,006	1,080	0,003	1,058	0,006	1,062	0,009	1,053	0,005	1,052	0,003
E11	1,085	0,007	1,054	0,003	1,031	0,007	1,012	0,010	1,028	0,005	1,031	0,003
E12	1,108	0,007	1,117	0,003	1,073	0,007	1,034	0,010	1,048	0,005	1,066	0,003
E13	1,109	0,005	1,088	0,003	1,068	0,007	1,039	0,009	1,042	0,005	1,060	0,003
E14	1,061	0,005	1,024	0,003	1,025	0,006	1,018	0,008	1,025	0,005	1,020	0,003
E15	1,171	0,007	1,042	0,003	1,018	0,007	1,047	0,010	1,069	0,006	1,021	0,003

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Econômica (continuação).

	356,01 keV		383,85 keV		661,66 keV		778,90 keV		867,39 keV		964,05 keV	
Amostra	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
E01	1,083	0,003	1,086	0,007	1,0601	0,0012	1,049	0,005	1,041	0,012	1,046	0,005
E02	1,064	0,003	1,052	0,007	1,0542	0,0012	1,048	0,005	1,041	0,012	1,041	0,005
E03	1,0626	0,0025	1,070	0,007	1,0509	0,0012	1,047	0,005	1,030	0,012	1,045	0,005
E04	1,030	0,003	1,012	0,007	1,0243	0,0011	1,029	0,006	1,012	0,012	1,019	0,005
E05	1,036	0,003	1,026	0,007	1,0289	0,0011	1,035	0,006	1,032	0,012	1,029	0,005
E06	1,068	0,003	1,076	0,007	1,0509	0,0012	1,054	0,006	1,055	0,012	1,052	0,005
E07	1,042	0,003	1,038	0,007	1,0415	0,0012	1,043	0,006	1,052	0,012	1,031	0,005
E08	1,0397	0,0024	1,048	0,007	1,0304	0,0011	1,034	0,005	1,034	0,012	1,024	0,005
E09	1,045	0,003	1,043	0,007	1,0413	0,0012	1,021	0,006	1,022	0,012	1,023	0,005
E10	1,0522	0,0025	1,043	0,007	1,0371	0,0011	1,029	0,005	1,036	0,012	1,031	0,005
E11	1,023	0,003	1,019	0,007	1,0270	0,0011	1,018	0,005	1,019	0,012	1,018	0,005
E12	1,041	0,003	1,030	0,007	1,0317	0,0011	1,036	0,006	1,040	0,012	1,029	0,005
E13	1,0357	0,0024	1,028	0,007	1,0390	0,0011	1,041	0,005	1,041	0,012	1,036	0,005
E14	1,0164	0,0024	1,024	0,007	1,0112	0,0011	1,015	0,005	1,002	0,012	1,009	0,005
E15	1,061	0,003	1,050	0,008	1,0511	0,0012	1,027	0,006	1,035	0,012	1,027	0,005

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Econômica (continuação).

Amostra	1085,84 keV		1112,08 keV		1173,24 keV		1332,50 keV		1408,02 keV	
	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
E01	1,046	0,008	1,039	0,006	1,053	0,008	1,051	0,008	1,043	0,004
E02	1,044	0,008	1,033	0,005	1,046	0,008	1,029	0,008	1,031	0,004
E03	1,043	0,008	1,030	0,005	1,038	0,007	1,037	0,008	1,034	0,004
E04	1,022	0,008	1,034	0,005	1,015	0,007	1,018	0,007	1,024	0,004
E05	1,021	0,008	1,034	0,005	1,020	0,007	1,021	0,007	1,031	0,004
E06	1,042	0,008	1,037	0,005	1,044	0,008	1,036	0,008	1,032	0,004
E07	1,029	0,008	1,050	0,006	1,023	0,007	1,010	0,007	1,021	0,004
E08	1,026	0,008	1,026	0,005	1,034	0,007	1,024	0,007	1,017	0,004
E09	1,020	0,008	1,017	0,005	1,022	0,007	1,030	0,007	1,020	0,004
E10	1,019	0,008	1,027	0,005	1,038	0,007	1,024	0,007	1,025	0,004
E11	1,009	0,008	1,019	0,005	1,011	0,007	1,017	0,007	1,012	0,004
E12	1,036	0,008	1,050	0,006	1,028	0,007	1,024	0,007	1,024	0,004
E13	1,031	0,008	1,033	0,005	1,030	0,007	1,022	0,008	1,025	0,004
E14	1,015	0,008	1,010	0,005	1,014	0,007	1,013	0,007	1,010	0,004
E15	1,030	0,008	1,028	0,006	1,027	0,007	1,037	0,007	1,016	0,004

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Standard.

	80,99 keV		121,78 keV		244,69 keV		276,39 keV		302,85 keV		344,28 keV	
Amostra	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
S01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S02	1,083	0,006	1,026	0,003	1,016	0,006	1,045	0,009	1,043	0,005	1,012	0,003
S03	1,180	0,006	1,125	0,003	1,089	0,007	1,088	0,009	1,086	0,005	1,068	0,003
S04	1,079	0,006	1,064	0,003	1,039	0,006	1,059	0,009	1,040	0,005	1,036	0,003
S05	1,160	0,006	1,089	0,003	1,057	0,006	1,051	0,009	1,053	0,005	1,049	0,003
S06	1,176	0,007	1,441	0,004	1,323	0,009	1,052	0,010	1,073	0,005	1,271	0,004
S07	1,164	0,007	1,369	0,004	1,263	0,008	1,052	0,009	1,074	0,005	1,230	0,004
S08	1,156	0,006	1,093	0,003	1,066	0,006	1,063	0,009	1,067	0,005	1,055	0,003
S09	1,212	0,007	1,130	0,003	1,090	0,007	1,105	0,010	1,086	0,005	1,079	0,003
S10	1,228	0,007	1,168	0,003	1,127	0,007	1,112	0,010	1,091	0,005	1,103	0,003
S11	1,227	0,007	1,620	0,005	1,495	0,011	1,082	0,010	1,088	0,005	1,388	0,004
S12	1,152	0,007	1,253	0,004	1,186	0,007	1,055	0,010	1,080	0,005	1,163	0,003
S13	1,174	0,006	1,098	0,003	1,059	0,006	1,070	0,009	1,066	0,005	1,060	0,003
S14	1,208	0,007	1,598	0,005	1,466	0,010	1,065	0,010	1,087	0,005	1,366	0,004
S15	1,149	0,006	1,088	0,003	1,064	0,006	1,057	0,009	1,058	0,005	1,051	0,003

Amostra S01 não necessitou do fator de autoatenuação por ter densidade menor que $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Standard (continuação).

	356,01 keV		383,85 keV		661,66 keV		778,90 keV		867,39 keV		964,05 keV	
Amostra	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
S01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S02	1,0369	0,0024	1,036	0,007	1,0360	0,0011	1,020	0,005	1,014	0,012	1,022	0,005
S03	1,072	0,003	1,067	0,007	1,0634	0,0011	1,049	0,005	1,039	0,012	1,048	0,005
S04	1,0341	0,0024	1,033	0,007	1,0336	0,0011	1,031	0,005	1,000	0,012	1,028	0,005
S05	1,0504	0,0025	1,046	0,007	1,0430	0,0011	1,038	0,005	1,029	0,012	1,044	0,005
S06	1,068	0,003	1,063	0,007	1,0576	0,0012	1,133	0,006	1,141	0,014	1,108	0,005
S07	1,058	0,003	1,045	0,007	1,0651	0,0012	1,125	0,006	1,111	0,013	1,098	0,005
S08	1,048	0,003	1,043	0,007	1,0332	0,0011	1,044	0,005	1,041	0,012	1,039	0,005
S09	1,081	0,003	1,078	0,007	1,0630	0,0011	1,059	0,006	1,045	0,012	1,066	0,005
S10	1,094	0,003	1,082	0,007	1,0688	0,0011	1,067	0,006	1,053	0,012	1,064	0,005
S11	1,085	0,003	1,078	0,007	1,0716	0,0012	1,170	0,006	1,171	0,014	1,147	0,006
S12	1,068	0,003	1,070	0,007	1,0546	0,0012	1,098	0,006	1,080	0,013	1,074	0,005
S13	1,066	0,003	1,070	0,007	1,0457	0,0011	1,043	0,005	1,036	0,012	1,035	0,005
S14	1,076	0,003	1,074	0,007	1,0814	0,0012	1,169	0,006	1,156	0,014	1,148	0,006
S15	1,056	0,003	1,046	0,007	1,0434	0,0011	1,049	0,005	1,038	0,012	1,045	0,005

Amostra S01 não necessitou do fator de autoatenuação por ter densidade menor que $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Standard (continuação).

	1085,84 keV		1112,08 keV		1173,24 keV		1332,50 keV		1408,02 keV	
Amostra	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
S01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S02	1,011	0,008	1,018	0,005	1,111	0,008	1,195	0,010	1,008	0,004
S03	1,040	0,008	1,045	0,006	1,056	0,008	1,043	0,008	1,038	0,004
S04	1,025	0,008	1,023	0,005	1,073	0,008	1,066	0,008	1,020	0,004
S05	1,041	0,008	1,031	0,005	1,092	0,008	1,117	0,009	1,020	0,004
S06	1,085	0,009	1,101	0,006	1,039	0,007	1,041	0,008	1,090	0,005
S07	1,070	0,009	1,088	0,006	1,031	0,007	1,034	0,007	1,071	0,005
S08	1,028	0,008	1,034	0,005	1,036	0,007	1,015	0,007	1,025	0,004
S09	1,042	0,008	1,046	0,005	1,056	0,007	1,043	0,008	1,040	0,004
S10	1,066	0,009	1,068	0,006	1,054	0,008	1,033	0,008	1,041	0,004
S11	1,127	0,009	1,136	0,006	1,046	0,007	1,053	0,008	1,113	0,005
S12	1,056	0,008	1,071	0,006	1,038	0,007	1,049	0,008	1,060	0,004
S13	1,030	0,008	1,045	0,006	1,056	0,008	1,035	0,008	1,025	0,004
S14	1,111	0,009	1,124	0,006	1,049	0,008	1,042	0,008	1,102	0,005
S15	1,032	0,008	1,032	0,005	1,034	0,007	1,024	0,007	1,023	0,004

Amostra S01 não necessitou do fator de autoatenuação por ter densidade menor que $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Premium.

	80,99 keV		121,78 keV		244,69 keV		276,39 keV		302,85 keV		344,28 keV	
Amostra	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
P01	1,126	0,007	1,079	0,004	1,059	0,008	1,043	0,010	1,030	0,005	1,050	0,003
P02	1,162	0,007	1,105	0,003	1,079	0,007	1,071	0,010	1,056	0,005	1,064	0,003
P03	1,128	0,007	1,075	0,004	1,049	0,008	1,039	0,010	1,045	0,005	1,048	0,003
P04	1,185	0,007	1,065	0,004	1,032	0,008	1,061	0,010	1,055	0,005	1,033	0,003
P05	1,243	0,008	1,161	0,004	1,102	0,007	1,096	0,010	1,084	0,006	1,091	0,003
P06	1,265	0,008	1,153	0,003	1,121	0,007	1,114	0,011	1,089	0,006	1,093	0,003
P07	1,161	0,007	1,079	0,004	1,040	0,008	1,052	0,010	1,044	0,005	1,045	0,004
P08	1,136	0,007	1,087	0,003	1,063	0,006	1,072	0,010	1,052	0,005	1,055	0,003
P09	1,178	0,007	1,120	0,004	1,087	0,009	1,077	0,010	1,061	0,005	1,076	0,004
P10	1,213	0,007	1,113	0,004	1,067	0,009	1,089	0,010	1,086	0,006	1,073	0,004
P11	1,189	0,007	1,099	0,004	1,062	0,009	1,069	0,010	1,054	0,005	1,062	0,004
P12	1,165	0,007	1,075	0,004	1,044	0,009	1,071	0,010	1,063	0,005	1,048	0,004
P13	1,191	0,007	1,108	0,003	1,088	0,007	1,079	0,010	1,070	0,006	1,058	0,003
P14	1,171	0,007	1,100	0,003	1,076	0,006	1,063	0,010	1,055	0,005	1,060	0,003
P15	1,236	0,008	1,112	0,004	1,063	0,009	1,100	0,011	1,092	0,006	1,066	0,004
P16	1,245	0,008	1,140	0,004	1,096	0,009	1,100	0,010	1,084	0,006	1,088	0,004
P17	1,190	0,007	1,093	0,004	1,052	0,009	1,065	0,010	1,067	0,005	1,058	0,004
P18	1,136	0,007	1,085	0,004	1,060	0,008	1,071	0,010	1,050	0,005	1,057	0,003
P19	1,207	0,007	1,087	0,004	1,055	0,009	1,090	0,010	1,083	0,006	1,059	0,004
P20	1,235	0,008	1,147	0,004	1,088	0,009	1,099	0,010	1,092	0,006	1,093	0,004

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Premium (continuação).

	356,01 keV		383,85 keV		661,66 keV		778,90 keV		867,39 keV		964,05 keV	
Amostra	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
P01	1,031	0,003	1,033	0,007	1,0287	0,0011	1,027	0,006	1,029	0,013	1,041	0,005
P02	1,056	0,003	1,054	0,007	1,0531	0,0011	1,041	0,005	1,034	0,012	1,032	0,005
P03	1,039	0,003	1,046	0,007	1,0321	0,0011	1,031	0,006	1,033	0,013	1,041	0,005
P04	1,054	0,003	1,062	0,007	1,0418	0,0011	1,045	0,006	1,014	0,013	1,027	0,005
P05	1,087	0,003	1,080	0,008	1,0666	0,0012	1,067	0,006	1,059	0,013	1,052	0,005
P06	1,089	0,003	1,092	0,008	1,0811	0,0012	1,068	0,006	1,059	0,012	1,049	0,005
P07	1,049	0,003	1,052	0,007	1,0397	0,0011	1,035	0,006	1,003	0,013	1,028	0,005
P08	1,049	0,003	1,050	0,007	1,0389	0,0011	1,041	0,005	1,049	0,012	1,025	0,005
P09	1,063	0,003	1,068	0,007	1,0497	0,0011	1,044	0,006	1,051	0,013	1,048	0,005
P10	1,079	0,003	1,080	0,008	1,0624	0,0012	1,064	0,006	1,031	0,013	1,050	0,005
P11	1,059	0,003	1,058	0,007	1,0519	0,0012	1,049	0,006	1,019	0,013	1,043	0,005
P12	1,057	0,003	1,062	0,007	1,0435	0,0011	1,049	0,006	1,004	0,013	1,031	0,005
P13	1,061	0,003	1,068	0,007	1,0493	0,0011	1,037	0,005	1,032	0,012	1,036	0,005
P14	1,056	0,003	1,050	0,007	1,0389	0,0011	1,039	0,005	1,051	0,012	1,036	0,005
P15	1,085	0,003	1,081	0,008	1,0716	0,0012	1,055	0,006	1,026	0,013	1,052	0,005
P16	1,077	0,003	1,083	0,008	1,0679	0,0011	1,055	0,006	1,068	0,014	1,062	0,005
P17	1,060	0,003	1,061	0,007	1,0489	0,0011	1,048	0,006	1,024	0,013	1,044	0,005
P18	1,050	0,003	1,056	0,007	1,0428	0,0011	1,030	0,006	1,038	0,013	1,046	0,005
P19	1,071	0,003	1,080	0,008	1,0537	0,0012	1,044	0,006	1,029	0,013	1,046	0,005
P20	1,084	0,003	1,092	0,008	1,0672	0,0012	1,069	0,006	1,037	0,013	1,059	0,005

Fatores de autoatenuação das amostras de tintas do tipo Premium (continuação).

	1085,84 keV		1112,08 keV		1173,24 keV		1332,50 keV		1408,02 keV	
Amostra	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza	f	incerteza
P01	1,016	0,008	1,021	0,006	1,023	0,007	1,002	0,007	1,018	0,004
P02	1,042	0,008	1,041	0,006	1,038	0,008	1,033	0,008	1,031	0,004
P03	1,029	0,009	1,024	0,006	1,027	0,007	1,018	0,008	1,015	0,004
P04	1,024	0,009	1,033	0,006	1,028	0,007	1,022	0,007	1,035	0,005
P05	1,055	0,008	1,064	0,006	1,041	0,008	1,034	0,008	1,042	0,004
P06	1,056	0,008	1,048	0,006	1,065	0,008	1,051	0,008	1,048	0,004
P07	1,029	0,009	1,026	0,006	1,027	0,007	1,006	0,007	1,032	0,005
P08	1,027	0,008	1,026	0,005	1,013	0,007	1,017	0,008	1,027	0,004
P09	1,033	0,009	1,038	0,006	1,035	0,008	1,033	0,008	1,035	0,005
P10	1,039	0,009	1,045	0,006	1,040	0,008	1,036	0,008	1,045	0,005
P11	1,031	0,009	1,042	0,006	1,036	0,007	1,032	0,008	1,038	0,005
P12	1,031	0,009	1,030	0,006	1,030	0,007	1,028	0,008	1,027	0,005
P13	1,037	0,008	1,034	0,005	1,025	0,007	1,022	0,008	1,032	0,004
P14	1,035	0,008	1,045	0,005	1,034	0,008	1,010	0,007	1,022	0,004
P15	1,045	0,009	1,055	0,006	1,036	0,007	1,044	0,008	1,043	0,005
P16	1,040	0,009	1,047	0,006	1,046	0,008	1,039	0,008	1,038	0,005
P17	1,037	0,009	1,039	0,006	1,027	0,007	1,013	0,007	1,034	0,005
P18	1,025	0,009	1,024	0,006	1,033	0,008	1,012	0,007	1,025	0,004
P19	1,049	0,009	1,039	0,006	1,038	0,008	1,031	0,008	1,036	0,005
P20	1,056	0,009	1,054	0,006	1,053	0,008	1,051	0,008	1,046	0,005

Fatores de autoatenuação da amostra de TiO₂.

Energia (keV)	f	incerteza
80,99	1,936	0,015
121,78	1,482	0,004
244,69	1,307	0,007
276,39	1,260	0,011
302,84	1,283	0,006
344,28	1,249	0,003
356,01	1,247	0,003
383,85	1,230	0,008
661,66	1,1786	0,0010
778,9	1,171	0,005
867,39	1,165	0,011
964,05	1,154	0,004
1085,84	1,144	0,007
1112,08	1,138	0,005
1173,24	1,145	0,006
1332,5	1,143	0,003
1408,03	1,1083	0,0020

APÊNDICE C – Concentração de atividade de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K nas amostras de tinta.

Concentração de atividade ^{232}Th , ^{226}Ra e ^{40}K nas amostras do tipo Econômica

Amostra	^{232}Th (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)	^{226}Ra (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)
E01	*	-	1,41	0,17	*	-
E02	1,1	0,5	2,51	0,21	5,9	2,2
E03	1,9	0,4	3,09	0,21	*	-
E04	2,4	0,4	4,07	0,24	17	3
E05	2,6	0,4	6,23	0,27	9,5	2,7
E06	2,84	0,22	8,1	0,3	11,8	2,7
E07	3,2	0,4	6,35	0,28	10,3	2,7
E08	3,77	0,26	24,6	0,7	29	5
E09	4,08	0,26	2,29	0,20	48	7
E10	5,0	0,3	11,9	0,4	21	4
E11	15,1	0,6	12,4	0,4	40	6
E12	17,1	0,7	14,1	0,4	63	9
E13	29,7	1,0	13,1	0,4	134	19
E14	42,2	1,3	15,6	0,5	128	18
E15	46,7	1,5	19,6	0,7	160	23

*: Valor abaixo da atividade mínima detectável.

Concentração de atividade de ^{232}Th , ^{226}Ra e ^{40}K nas amostras do tipo Standard

Amostra	^{232}Th (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)	^{226}Ra (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)
S01	*	-	2,21	0,24	16	4
S02	*	-	4,40	0,25	7,5	2,6
S03	0,9	0,4	6,18	0,27	*	-
S04	1,11	0,21	3,44	0,22	8,4	2,6
S05	1,8	0,4	3,93	0,23	11,7	2,8
S06	2,1	0,5	2,25	0,22	*	-
S07	3,0	0,3	7,9	0,4	24	4
S08	9,0	0,4	5,34	0,26	6,8	2,3
S09	22,9	0,8	6,64	0,28	80	12
S10	23,3	0,8	7,5	0,3	44	7
S11	23,3	1,1	9,7	0,5	39	6
S12	31,2	1,1	12,8	0,5	96	14
S13	33,7	1,1	12,2	0,4	180	26
S14	51,6	2,2	20,1	1,1	143	21
S15	78,1	2,1	28,5	0,8	196	28

*: Valor abaixo da atividade mínima detectável.

Concentração de atividade ^{232}Th , ^{226}Ra e ^{40}K nas amostras do tipo Premium

Amostra	^{232}Th (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)	^{226}Ra (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)	^{40}K (Bq.kg ⁻¹)	incerteza (Bq.kg ⁻¹)
P01	*	-	2,29	0,26	16	4
P02	1,8	0,4	3,15	0,21	11,3	2,7
P03	2,1	0,4	4,99	0,25	7,1	2,5
P04	3,06	0,23	2,39	0,20	37	6
P05	3,82	0,25	9,9	0,3	42	6
P06	5,8	0,3	10,7	0,4	39	6
P07	8,3	0,4	4,41	0,23	47	7
P08	13,3	0,5	6,7	0,3	102	15
P09	14,6	0,6	5,28	0,26	42	6
P10	17,5	0,8	7,5	0,4	101	15
P11	20,5	0,7	11,8	0,4	70	10
P12	25,9	1,0	14,3	0,4	129	19
P13	32,7	1,1	14,3	0,5	114	16
P14	33,6	1,1	14,5	0,5	112	16
P15	34,6	1,1	15,8	0,5	126	18
P16	42	4	16,5	2,3	166	45
P17	44	4	18,2	2,2	155	37
P18	45	3	18,0	1,5	111	21
P19	55,7	1,6	23,3	0,7	155	22
P20	101,2	2,6	38,7	1,0	256	36

*: Valor abaixo da atividade mínima detectável.