

DETERMINAÇÃO DE FATORES DE ATENUAÇÃO PARA ARGAMASSA DE BARITA EM TERMOS DO EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTAL E DOSE EFETIVA

ALMEIDA JR, AIRTON T.^{1,2,5}, ARAÚJO, F. G. S.², SANTOS, M. A. P.³, NOGUEIRA,
M. S.⁴, CAMPOS, L. L. R.⁵

¹ FUNDACENTRO - Fundação Jorge Duprat Figueiredo, de Segurança e Medicina do Trabalho, Av. Guajajaras, 40, Centro, Belo Horizonte, Brazil,
airtontavares@uol.com.br

² Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP / REDEMAT, Minas Gerais, Brazil.,

³ CRCN/CNEN - Centro Regional de Ciências Nucleares. Av. Prof. Luiz Freire, 200, Cidade Universitária, Recife, Brazil

⁴ CDTN/CNEN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Av. Antônio Carlos, 1667, Pampulha, CAMPUS UFMG, Belo Horizonte MG, Brasil
mnogue@cdtn.br

⁵ IPEN/CNEN – Instituto de Pesquisa Energéticas Nucleares, Cid Universitária, São Paulo, SP, Brasil

Palavras - chave: Curva de atenuação, dose efetiva, cálculo de blindagem.

ABSTRACT

This work addresses the characterization of barite mortars used as x-ray shielding materials through the following quantities: mass attenuation coefficient, air kerma, effective dose and ambient dose - $H^*(10)$. The experiment was carried out with the use of the following reference qualities: RQR4, RQR6, RQR9 e RQR10, specified in accordance with norm IEC 61267: Medical diagnostic x-ray equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics. In this study values was determined experimentally for the attenuation of the Cream barite (density 2.99g/cm³, collected in the state of São Paulo), Purple barite (density 2.95g/cm³, collected in the state of Bahia) and White barite (density 3.10g/cm³, collected in the state of Paraíba). These materials, in the form of mortar, were disposed in the form of squares namely proof bodies, whose dimensions were 10 x 10 cm and thickness ranging from 3 to 15 mm approximately. In the experimental procedure, these proof bodies were irradiated with a Pantak, model HF320 industrial x-ray apparatus. The potentials applied to the respective X-ray tube were: 60kV, 80kV, 120kV and 150kV at a constant current of 1mA. The attenuation responses in function of thickness, for each of the materials analyzed, were used to draw the attenuation and transmission curves. The efficiency of the barites studied concerning the capacity to attenuate x-ray radiation for x-ray beams ranging from 60 to 150 kV indicated.

1. INTRODUÇÃO

O mineral barita é um sal de bário de fórmula química simplificada (BaSO₄), cuja composição média teórica contém 65,7% de monóxido de bário. Possui brilho vítreo, resinoso e sua cor mais comum varia entre branca e cinza claro, quando isenta de impurezas,

podendo também, ter coloração cinza escuro ou rosa, conforme a presença de matéria carbonosa e óxidos de ferro [1]. A argamassa é um composto de areia, cimento e aglomerante, destinado a regularizar ou preencher uma superfície qualquer na construção civil. A argamassa de barita é um composto que, por ter agregado a barita, minério de alta densidade, é utilizada como blindagem em proteção radiológica. A aplicação dessa argamassa é feita de forma manual e não se pode garantir a homogeneidade, nem a espessura uniforme em todas as paredes dos serviços de radiologia. A homogeneização, na formação da argamassa, é feita manualmente ou com pás, conforme o percentual da cada matéria-prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea. O teor de umidade da argamassa deve estar entre 25% e 30% [1]. No cenário atual, a barita é explorada em cerca de 66 países, sendo a China (3,5 milhões de toneladas/ano); a Índia (0,9 milhões de toneladas/ano) e os Estados Unidos (0,4 milhões de toneladas/ano), os maiores produtores mundiais, como também, os detentores das maiores reservas [2].

No Brasil, o perfil típico de utilização da barita tem a seguinte distribuição: indústria química (50%); indústria petrolífera (35%); outros (tinta, papéis, borracha, vidros, abrasivos) (15%). Em média, a produção nacional de barita bruta é de 68 mil toneladas/ano, representando apenas 1% da produção mundial. Sendo que, o Estado da Bahia responde por cerca de 90% da produção nacional brasileira [1].

O dimensionamento da argamassa e do concreto de barita utilizados no revestimento e na construção de paredes, respectivamente, é determinado pelo princípio da equivalência de espessura em relação ao concreto ou chumbo. Esse procedimento ocasiona um dimensionamento superestimado, tendo em vista a possibilidade de ocorrer erros bastante significativos, em função da diferença de densidade específica entre o chumbo ou concreto e a barita, além de produzir, muitas vezes, sobrecarga na estrutura da instalação. Esse fato é decorrente da literatura técnica ainda carecer de dados específicos referentes às características de blindagens utilizando a argamassa de barita, frente às diversas energias de radiações X. Assim, o conhecimento das características de atenuação da barita é fundamental, tanto do ponto de vista da radioproteção quanto da viabilização, da elaboração e execução de projetos de blindagens contra as radiações ionizantes em instalações radiativas.

O equivalente de dose ambiental é a grandeza operacional, indicado por normas internacionais [3, 4, 5] recomendada para monitoração do ambiente de trabalho com radiação. No campo da Proteção Radiológica operacional, uma situação onde se faz necessário estimar a dose efetiva através de uma grandeza operacional, em pontos representativos de pessoas expostas ocorre quando se projetam blindagem para as salas de radiodiagnóstico, onde os aparelhos de raios X utilizados geram feixes de fótons no intervalo de 50 a 150 kVp [6]. Conseqüentemente, nesta faixa de energia, as ações que asseguram a limitação da dose efetiva, como o dimensionamento de barreiras, e que haja modificação do espectro do feixe de raios X dificultam a utilização da grandeza definida no ar como estimativas da grandeza definida no receptor. Uma solução consiste em direcionar o calculo diretamente para a grandeza no receptor. O uso da grandeza equivalente de dose ambiente como grandeza operacional para o calculo de blindagem requer que os rendimentos dos aparelhos de raios X e os fatores de atenuação sejam determinados em termos desta grandeza operacional [7].

Este trabalho tem o propósito de caracterizar amostras de barita roxa, creme e branca, provenientes de diferentes regiões do País, que são utilizadas em radioproteção, como materiais de blindagens contra a radiação X, e determinar os fatores de atenuação dos materiais estudados, em termos da grandeza operacional equivalente de dose ambiental, para comparar os resultados obtidos entre as amostras estudadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 expressa os materiais utilizados nesta pesquisa, como também, o Estado de procedência de cada um deles. Salientando que, dos materiais estudados neste trabalho, a barita roxa, proveniente do Estado da Bahia, é o que apresenta a maior dificuldade no processo de extração. Os fornecedores da matéria prima confeccionaram placas com espessuras variando aproximadamente de 3mm a 16mm, para os três tipos de barita.

Neste trabalho foram utilizados: um equipamento de raios X, sistemas de medidas, sistemas auxiliares e acessórios, pertencentes ao laboratório de metrologia do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE) (Fig. 1). As características principais do equipamento de raios X utilizado são: Equipamento de raios X industrial, marca Pantak, modelo HF320, constituído por um gerador Pantak, modelo HF320, série 9710-2779-CG,

acoplado a um tubo de raios X, marca Comet, modelo 340005, série 49-3198, com janela de 3mmBe (filtração inerente) e alvo de tungstênio. A variação permitida da corrente de tubo é de 1,0 a 30 mA e a tensão nominal de operação de 5 a 320 kV com *ripple* de tensão menor que $\pm 0,15\%$ e potência nominal de 3,2kW; corrente máxima no tubo para a voltagem máxima no valor de 13,1mA, filtração inerente de 7mm de Berílio; e ângulo de feixe emergente no valor de 40°.

Tabela 1. Materiais utilizados como blindagens contra a radiação X

<i>Materiais de Blindagem</i>	<i>Origem</i>
Argamassa de barita branca	Estado da Paraíba
Argamassa de barita creme	Estado de São Paulo
Argamassa de barita roxa	Estado da Bahia

Neste trabalho foram utilizadas as seguintes qualidades de raios X de referência, indicadas na norma IEC 61267 [8] (RQR - nível radiodiagnóstico), que também estão implantadas no laboratório de metrologia do CRCN, conforme expresso na Tabela 2.

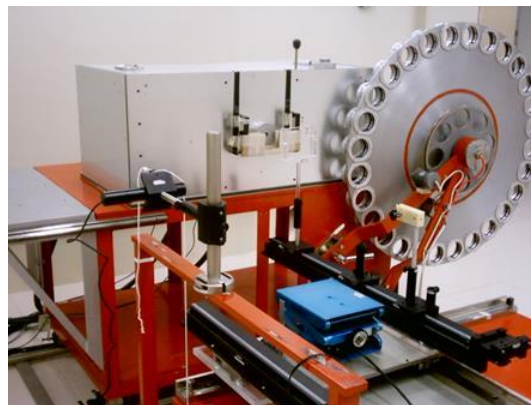


Figura 1. Sistema de raios X de potencial constante instalado no laboratório de raios X 320 kV.

Tabela 1. Características das qualidades RQR, implantadas no CRCN/CNEN.

<i>Qualidades</i>	<i>Tensão (kV)</i>	<i>Filtração adicional (mm Al)</i>	<i>1° CSR (mm Al)</i>	<i>2° CSR (mm Al)</i>
RQR4	60	2,90	2,19	2,96
RQR6	80	3,05	3,01	4,36
RQR9	120	3,90	5,00	7,40
RQR10	150	4,40	6,57	9,13

Os espectros de raios X que serviram de base para expressar a atenuação dos materiais utilizados nessa pesquisa foram determinados por meio de espectrometria com um detector de

CdTe. Para realizar as medidas de espectros de raios X, tanto dos feixes incidentes quanto transmitidos pelas amostras foi utilizado o seguinte sistema de espectrometria constituído por:- Sistema de detecção – composto por um detector de CdTe, acoplado a um pré-amplificador, marca Amptek, modelo XR-100T-CdTe, série N2933. A calibração do espectrômetro foi realizada a partir dos espectros medidos com fontes radioativas padrão, emissoras de raios X e gama dentro da faixa de energia de utilização do sistema. Os tempos de irradiação foram determinados de modo que os erros associados à estatística de contagens se mantivessem inferiores a 5% para os picos mais intensos. Os espectros primários e os transmitidos foram corrigidos pela resposta em energia do espectrômetro e por fatores geométricos utilizando um programa computacional escrito em Matlab (The MathWorks Inc.).

As medidas das grandezas equivalentes de Equivalente de dose ambiental, kerma no ar e dose efetiva foram calculadas utilizando os espectros de raios X medidos para feixe primários e atenuados com os três tipos de barita, coletados nas três regiões do Brasil já mencionadas na Tab. 1.

Nesta pesquisa, os valores de atenuação para espectros primários e atenuados por diferentes espessuras de placas para três os tipos de barita foram calculados em termos do kerma no ar, equivalente de dose ambiental, fluência de fótons e dose efetiva. A atenuação em termos do kerma no ar foi obtida seguindo a metodologia de Peixoto [7]. Os valores de kerma, calculados dos espectros medidos para as diferentes espessuras de placas de barita foram determinados como segue:

$$A_{Kar} = \frac{[K_{ar}]_0}{[K_{ar}]_1} \quad (1)$$

Onde:

$[K_{ar}]_0$ = kerma no ar devido ao espectro primário e

$[K_{ar}]_1$ - kerma no ar devido ao espectro transmitido pela placa de barita

O desvio padrão do valor de atenuação em cada espessura de placa de barita foi calculado como segue:

$$S_{Kar} = \frac{K_{ar(0)}}{K_{ar(1)}} \sqrt{\frac{1}{\phi_1}} \quad (2)$$

Onde ϕ_1 é a fluência para o feixe transmitido pela placa de barita.

Os valores de atenuação em termos da grandeza equivalente de dose ambiental, $H^*(10)$, foram calculados seguindo a metodologia de Peixoto [7] para os espectros primários e transmitidos pelas placas de barita, como segue:

$$A_{H^*/\phi} = \frac{[H^*/\phi]_0}{[H^*/\phi]_1} \times \frac{\phi_0}{\phi_1} \quad (3)$$

Onde

ϕ_0 é a fluência para o espectro primário;

ϕ_1 é a fluência para o feixe transmitido pela placa de barita.

O desvio padrão para as atenuações foram calculados seguindo a relação abaixo:

$$S_{[H^*/\phi]} = \frac{[H^*/\phi]_0}{[H^*/\phi]_1} \sqrt{\frac{1}{[H^*/\phi]_0^2} \times S_{[H^*/\phi]}^2 + \frac{1_0}{[H^*/\phi]_1^2} \times S_{(H^*/\phi)_1}^2} \quad (4)$$

Onde:

$S_{[H^*/\phi]_0}$ = desvio padrão de $H^*(10)/\phi_0$ para o espectro primário;

$S_{(H^*/\phi)_1}$ = desvio padrão de $H^*(10)/\phi_1$ para o espectro transmitido

Sendo a razão de $\frac{\phi_0}{\phi_1}$ igual a:

$$S_\phi = \frac{\phi_0}{\phi_1} \sqrt{\frac{1}{\phi_0}} \quad (5)$$

O valor final para o desvio padrão foi determinado pela relação [5]:

$$S = \sqrt{\left(\frac{[H^*/\phi]_0}{[H^*/\phi]_1}\right)^2 \times S_\phi^2 + \left(\frac{\phi_0}{\phi_1}\right)^2 \times S_{[H^*/\phi]}^2} \quad (6)$$

A atenuação em termos da dose efetiva, devido às várias espessuras de placas de barita foi determinado pelo quociente entre os valores de dose efetiva $A_{E/\phi}$ do espectro primário pelo o valor de $[E/\phi]_0$, para o espectro transmitido nas diferentes placas de barita, como segue [7]:

$$A_{E/\phi} = \frac{[E/\phi]_0}{[E/\phi]_1} \times \frac{\phi_0}{\phi_1} \quad (7)$$

Onde

ϕ_0 é a fluência para o espectro primário;

ϕ_1 é a fluência para o feixe transmitido pela placa de barita.

O cálculo do desvio padrão da atenuação em termos da dose efetiva levou em consideração tanto a razão de $\frac{[E/\phi]_0}{[E/\phi]_1}$ bem como a razão de $\frac{\phi_0}{\phi_1}$ e foi determinado pela relação abaixo:

$$S_{[E/\phi]} = \frac{[E/\phi]_0}{[E/\phi]_1} \sqrt{\frac{1}{[E/\phi]_0^2} \times S_{[E/\phi]}^2 + \left(\frac{\phi_0}{\phi_1}\right)^2 \times S_{(\phi)}^2} \quad (8)$$

Onde:

$S_{[E/\phi]_0}$ = desvio padrão de E/ϕ_0 para o espectro primário;

$S_{(\phi)}$ = desvio padrão de E/ϕ_1 para o espectro transmitido

O cálculo final do desvio padrão da atenuação para a dose efetiva seguiu a relação [7]:

$$S = \sqrt{\left(\frac{[E/\phi]_0}{[E/\phi]_1}\right)^2 \times S_{\phi}^2 + \left(\frac{\phi_0}{\phi_1}\right)^2 \times S_{[E/\phi]}^2} \quad (9)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma melhor comparação e visualização a Figura 2 mostra os resultados da análise química das amostras de barita utilizadas nesta pesquisa. O bário é o elemento químico mais comum e abundante, presente no composto com um percentual em torno de 62% para a barita branca. No entanto, a presença de outros elementos químicos pode reduzir este teor significativamente. Quando isenta de impurezas, a cor mais comum da barita é branca a cinza

clara. Entretanto, devido à presença de matéria carbonosa e óxidos de ferro (presentes nas baritas: branca, creme e roxa), a coloração desse mineral pode variar ao cinza escuro ou rosa.

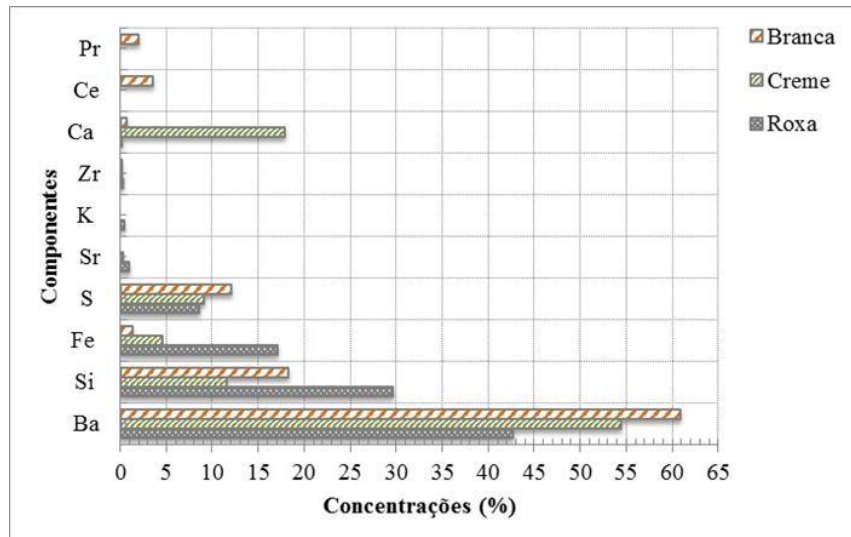


Figura 2. Elementos químicos encontrados nas amostras de baritas.

Os fatores de atenuação determinados neste trabalho foram realizados de acordo com o procedimento já descrito na metodologia para as barita: branca, creme e roxa utilizando várias espessuras destes materiais. Os valores de atenuação foram calculados pelo quociente entre o valor da grandeza sem atenuação e o valor desta grandeza obtida após atenuação com espessura de barita. Nas figuras 3 e 4 estão apresentados os fatores de atenuação para as baritas branca, creme e roxa, em função das espessuras destes materiais, para as qualidades RQR 4 e 6 da IEC [8]. Pode ser observado nas figuras de atenuação que as grandezas estudadas neste trabalho seguem, em termos de atenuação, primeiramente a fluência seguida pelo kerma no ar para os três materiais, em todas as qualidades de radiação, como já foi demonstrado no trabalho de Peixoto [7] que utilizou o chumbo como material atenuador. A diferença entre estas duas grandezas está relacionada com a aplicação do coeficiente mássico de transferência de energia, μ_{tr}/ρ no cálculo do kerma no ar do espectro de fluência medido. Este coeficiente depende das energias que compõem os espectros transmitidos. Os resultados de atenuação aqui determinados mostram que as grandezas dosimétricas, kerma e fluência, quando comparadas com as grandezas de proteção, $H^*(10)$ e dose efetiva, não tem o mesmo comportamento quando o feixe de radiação atravessa as diferentes placas de barita. Ainda,

em termos de atenuação, observando-se que a barita creme apresenta melhor eficiência, seguida pela barita branca e roxa.

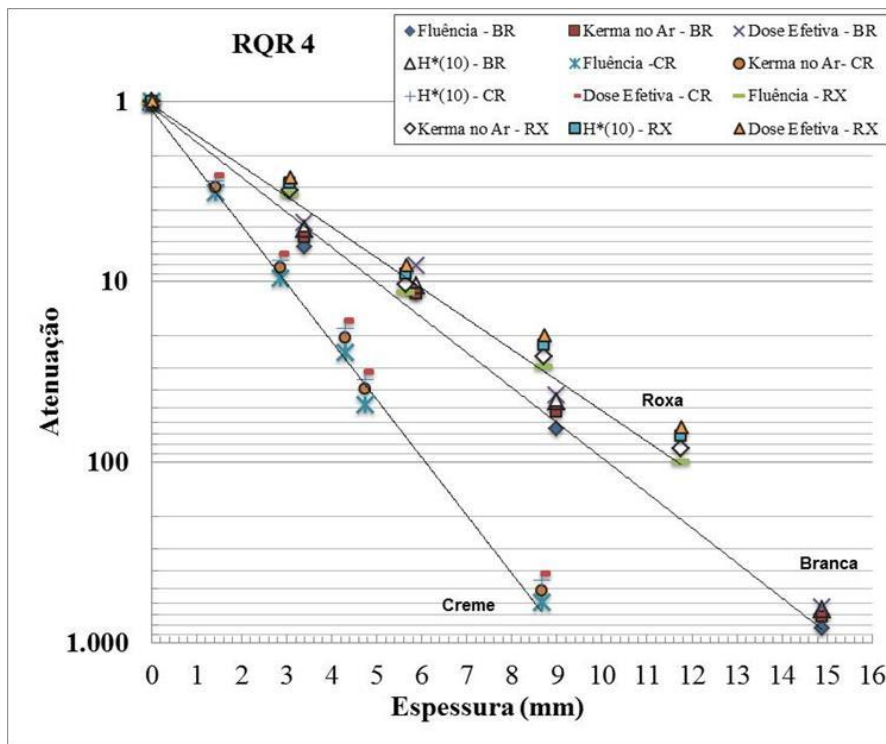


Figura 3. Fatores de atenuação para os matérias de barita branca, creme e roxo em termos Fluência, Kerma no ar, H*(10) e dose efetiva para a qualidade RQR 4.

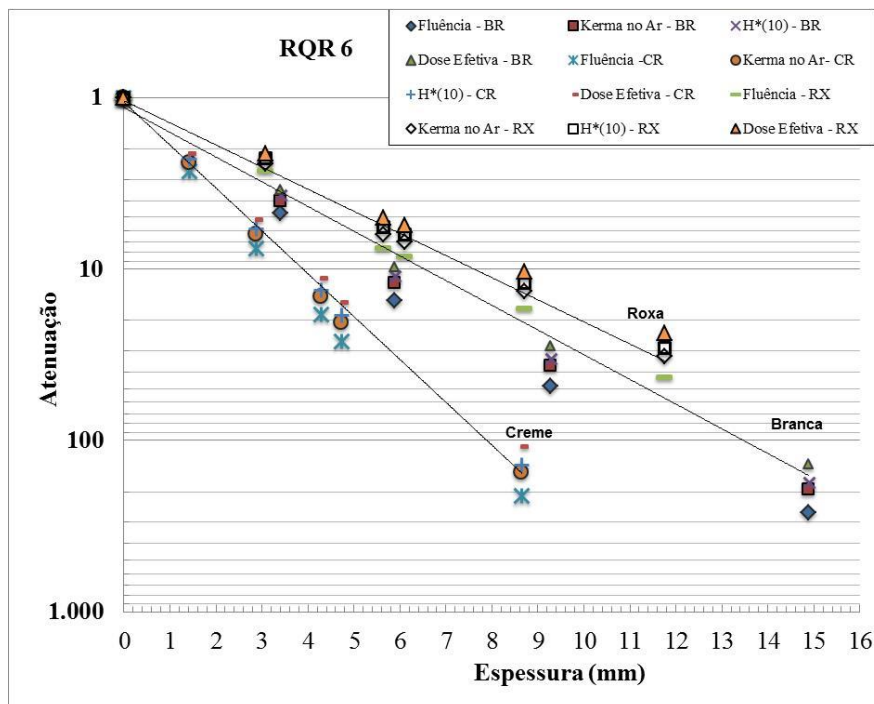


Figura 4. Fatores de atenuação para os matérias de barita branca, creme e roxo em termos Fluência, Kerma no ar, H*(10) e dose efetiva para a qualidade RQR 6.

Nas tabelas de 2 a 4 são apresentados os valores de atenuação e seus respectivos coeficiente de variação (CV) em porcentagem para os três tipos de barita estudado, na qualidade 9 da IEC.

Tabela 2. Fatores de atenuação para o material de barita branco em termos Fluência, Kerma no ar, H*(10) e dose efetiva para a qualidade RQR 9.

Espessura (mm)	FATOR DE ATENUAÇÃO PARA RQR 9 – BARITA BRANCA							
	Φ		K _{ar}		H*(10)		E	
	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)
3,392	2,51	0,253	2,11	0,122	2,24	7,442	2,01	5,945
5,891	5,49	0,406	4,26	0,119	4,46	19,487	4,02	17,924
8,989	9,65	0,560	7,18	0,119	7,46	21,749	6,79	20,014
9,283	10,86	0,599	8,02	0,120	8,32	36,627	7,59	33,755

Tabela 3. Fatores de atenuação para o material de barita creme em termos Fluência, Kerma no ar, H*(10) e dose efetiva para a qualidade RQR 9.

Espessura (mm)	FATOR DE ATENUAÇÃO PARA RQR 9 – BARITA CREME							
	Φ		K _{ar}		H*(10)		E	
	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)
1,428	1,77	0,202	1,57	0,128	2,73	7,999	1,51	7,320
2,868	3,80	0,323	3,07	0,119	3,25	25,081	2,91	23,092
4,296	5,97	0,424	4,62	0,118	4,83	33,807	4,35	31,154
4,733	8,26	0,512	6,23	0,119	6,48	50,719	5,88	46,655
8,656	27,69	1,002	19,52	0,121	20,29	95,604	18,87	91,421

Tabela 4. Fatores de atenuação para o material de barita roxa em termos Fluência, Kerma no ar, H*(10) e dose efetiva para a qualidade RQR 9.

Espessura (mm)	FATOR DE ATENUAÇÃO PARA RQR 9 – BARITA ROXA							
	Φ		K _{ar}		H*(10)		E	
	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)	Fator	CV (%)
3,07	1,81	0,204	1,60	0,127	1,72	19,305	1,53	17,782
5,645	3,87	0,329	3,10	0,119	3,25	32,912	2,91	30,375
6,115	3,88	0,330	4,75	0,119	3,26	50,194	2,91	46,334
8,715	6,18	0,434	8,09	0,120	4,93	50,305	4,44	46,441
11,76	10,98	0,603	8,09	0,120	8,37	97,029	7,61	89,331

Na figura 5 estão apresentados os fatores de atenuação para as baritas branca, creme e roxa, em função das espessuras destes materiais, para as qualidades RQR 10 da IEC.

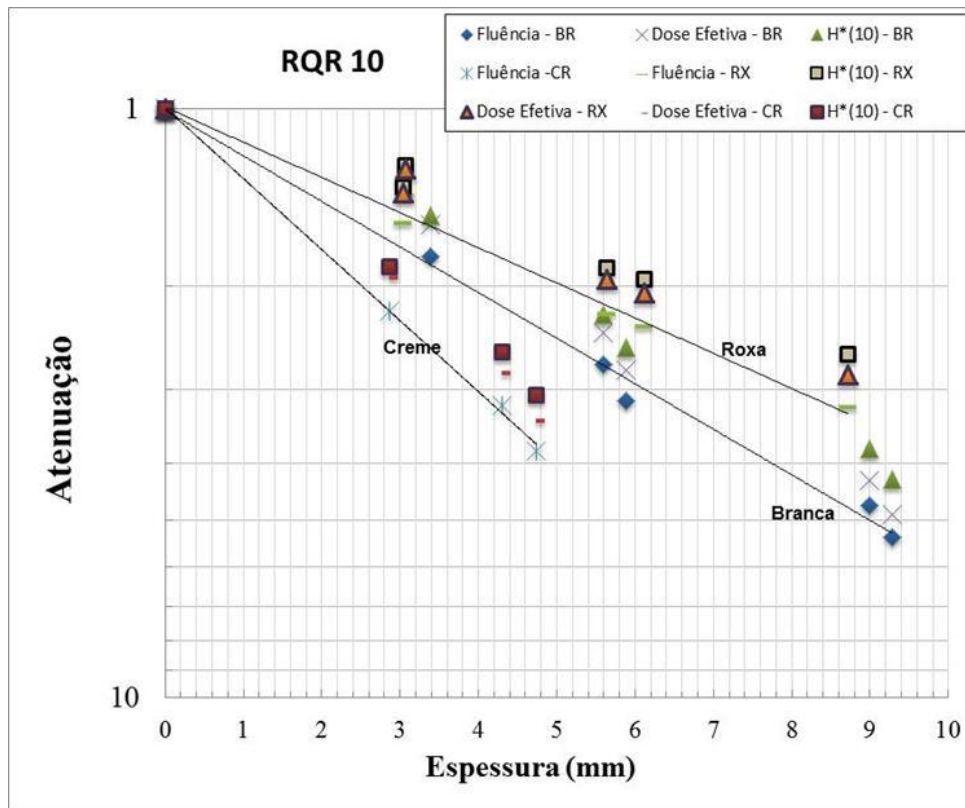


Figura 5. Fatores de atenuação para os materiais de barita branca, creme e roxo em termos de Fluência, Kerma no ar, $H^*(10)$ e dose efetiva para a qualidade RQR 10.

Foi possível mostrar nesta pesquisa que as características de atenuação da barita influenciam as curvas de transmissão no alcance de raios X diagnósticos. Ficou também demonstrado que a composição da barita influencia as curvas de transmissão dos raios X, demonstrando a importância de determinação da composição atômica destes materiais.

A prática corrente de determinação de fatores de atenuação em termos da grandeza dosimétrica padrão para fótons, kerma no ar, pode levar a uma sobre estimativa da atenuação obtida em termos da dose efetiva, E , considerando que, esta é a grandeza que deve ser limitada, devido à sua relação com o risco ocupacional devido à radiação, as blindagens de proteção em serviços de radiodiagnóstico devem ser projetadas para esta grandeza.

É necessário incorporar às normas e aos manuais usados para o cálculo de barreiras de proteção contra a radiação X, tanto o rendimento padronizado em termos da grandeza operacional, equivalente de dose ambiental $H^*(d)$, como os fatores de atenuação determinados em termos da dose efetiva, E . Nesta pesquisa curvas de atenuação em termos do kerma no ar, K_{ar} , $H^*(10)$ e dose efetiva, E , também foram determinados para os três tipos de barita (branca, creme e roxa) em qualidades da IEC (RQR 4, 6, 9 e 10).

A incerteza experimental dos valores de atenuação neste trabalho teve grande contribuição da incerteza na espessura dos materiais, bem como dos valores da intensidade da radiação transmitida por estas espessuras, bem como da composição química das amostras que continha grande quantidade de elementos químicos de alto Z. No intervalo de energia considerado nessa pesquisa esses fatores de atenuação não são encontrados na literatura para os materiais de barita branca, creme e roxa, utilizados comercialmente como blindagem em salas de raios X diagnósticos. Assim, os valores aqui medidos serão de grande contribuição nesta área de proteção radiológica.

4. CONCLUSÕES

Foram obtidos experimentalmente dados de atenuação em termos das grandezas operacionais: equivalente de dose ambiental, $H^*(10)$, dose efetiva, E, e da grandeza primária kerma no ar, K, para espectros de raios X gerados nas qualidades IEC para RQR4, RQR6, RQR9 e RQR10 sem filtração e com diferentes espessuras de filtros de barita branca, creme e roxa, que correspondem aos feixes encontrados em instalações de raios X diagnósticos.

Foi possível mostrar nesta pesquisa que as características de atenuação da barita influenciam as curvas de transmissão no alcance de raios diagnósticos. Ficou também demonstrado que a composição da barita influencia as curvas de transmissão dos raios X, mostrando a importância de determinação da composição atômicas destes materiais.

Este trabalho trouxe uma contribuição significativa à comunidade científica, ao determinar as características de argamassas de barita brasileiras (roxa, branca e creme), como materiais de blindagem contra a radiação X. Essas características permitem determinar o cálculo das curvas de atenuação em unidades de equivalente de dose ambiente para diferentes energias na faixa de radiodiagnóstico, considerando-se as propriedades polienergéticas das radiações primária e secundária que atingem as barreiras protetoras.

Acknowledgment

Os autores agradecem aos diretores da FUDACENTRO, UFOP/REDEMAT, FAPEMIG, CRCN/CNEN, CDTN/CNEN, CAPES, CNPQ e GORCEIX pelo suporte financeiro e implementação desse trabalho. Os autores agradecem ao grupo GRX Brasil e G1000PE por providenciarem as amostras utilizadas nesta pesquisa. Agradecemos também ao IFUSP, na pessoa do Dr. Paulo Costa e sua equipe pela correção dos espectros medidos.

REFERÊNCIAS

- [1] GONDIM, P. C. A. Desenvolvimento de bloco de vedação com barita na composição de partida para blindagem de radiação X. Tese de Doutorado, UFRN, Rio Grande do Norte, 2009.
- [2] DUTRA, R. P. S.; ARAÚJO, P. A. S. Desenvolvimento de formulações de massas para a indústria de cerâmica vermelha do Rio Grande do Norte. *Cerâmica industrial*. v.11, n.3, p.15, 2006.
- [3] ICRU – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiation. ICRU Publicação 47. International Commission on Radiation and Measurements, Bethesda, Maryland 1992.
- [4] ICRU – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRU Publicação 57. International Commission on Radiation and Measurements, Bethesda, Maryland 1998a.
- [5] ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. ICRP Publication 103. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. *Annals of the ICRP*, 2007.
- [6] NOGUEIRA, M. S., CAMPOS L. L., MOTA H. C. Determination of conversion coefficients between air kerma or photon fluence and ambient dose equivalent for diagnostic X-ray beams. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 81 pp. 123-132, 1998.
- [7] PEIXOTO, J. E. Determinação dos fatores de conversão de kerma no ar e de fluência para o equivalente de dose ambiental para raios X gerados no intervalo de 50 kVp a 125 kVp. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

[8] IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61267: Medical diagnostic X-ray equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics. Geneva, Switzerland, 2005.