

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO DA BARITA E DO VIDRO CRISTAL COMO
ATENUADORES NA BLINDAGEM DAS RADIAÇÕES X E GAMA**

AIRTON TAVARES DE ALMEIDA JUNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOÃO ANTÔNIO FILHO
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. WALDECIRO COLAÇO

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

MARÇO – 2005

**CARACTERIZAÇÃO DA BARITA E DO VIDRO CRISTAL COMO
ATENUADORES NA BLINDAGEM DAS RADIAÇÕES X E GAMA**

AIRTON TAVARES DE ALMEIDA JUNIOR

**CARACTERIZAÇÃO DA BARITA E DO VIDRO CRISTAL
COMO ATENUADORES NA BLINDAGEM DAS
RADIAÇÕES X E GAMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOÃO ANTÔNIO FILHO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. WALDECIRO COLAÇO

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

MARÇO – 2005

Almeida Junior, Airton Tavares de

Caracterização da barita e do vidro cristal como atenuadores na blindagem das radiações X e Gama / Airton Tavares de Almeida Junior. – Recife : O Autor, 2005.

vii, 53 folhas : il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Energia Nuclear, 2005.

Inclui bibliografia e anexos.

1. Energia nuclear – Dosimetria e instrumentação nuclear. 2. Sala de radiodiagnóstico – Blindagem das radiações X e Gama – Barita e vidro cristal. 3. Radioproteção – Curvas de atenuação e transmissão da barita e do vidro cristal. I. Título.

621.039

CDU (2.ed.)

UFPE

621.480289

CDD (22.ed.)

BC2005-223

**CARACTERIZAÇÃO DA BARITA E DO VIDRO CRISTAL
COMO ATENUADORES NA BLINDAGEM DAS
RADIAÇÕES X E GAMA**

Airton Tavares de Almeida Junior

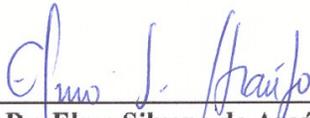
APROVADO EM: 15.03.2005

**ORIENTADOR : Prof. Dr. João Antonio Filho
CO-ORIENTADOR : Prof. Dr. Waldeciro Colaço**

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Clovis Abrahão Hazin – DEN/UFPE



Prof. Dr. Elmo Silvano de Araújo - DEN/UFPE



Profa. Dra. Ana Paula Lima Pacheco – CRCN/CNEN

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, com carinho especial para Airton, Jacira, Patrícia, Mônica, Débora, Lucas, Gabriel e Maria Carolina, pela confiança e incentivo, e por estarem sempre tão presentes em minha vida compartilhando o amor, o respeito, a amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Amigo de todas as horas, por me proporcionar tanto esta como todas as oportunidades de minha vida.

Ao Mestre Jesus, por nos servir de Guia e Modelo, em toda e qualquer circunstância.

À minha família, especialmente aos meus pais, Airton e Jacira, pelo amor e confiança dispensados em todas as fases da minha existência.

Ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, pela formação e oportunidade de elaboração desta dissertação.

Ao Professor Dr. João Antônio Filho, pela orientação segura durante todo o processo de elaboração deste trabalho. Obrigado, professor, por expor as diretrizes a serem seguidas sem abrir mão da fraternidade inerente às relações humanas duradouras.

Ao amigo Marcus Aurélio Pereira dos Santos, Tecnologista do Centro Regional de Ciências Nucleares, pela amizade, dedicação, sugestões e incentivo dispensados e que tanto colaborou para a realização deste trabalho.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear, através do Laboratório de Metrologia do Centro Regional de Ciências Nucleares, por compartilhar suas instalações e pelo empenho do Pesquisador Clayton Benevides, chefe da Metrologia, em conciliar a rotina de trabalho no laboratório com a aquisição dos dados experimentais desta dissertação.

Ao Ministério do Trabalho e Emprego e aos colegas da Delegacia Regional do Trabalho em Pernambuco, especialmente aos amigos Giselda Ferreira de Almeida e Hércules de Almeida Seixas, pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento desta dissertação, principalmente pela compreensão no que se refere à liberação do trabalho, mesmo que de forma parcial, sempre que precisei.

Aos professores que compuseram a banca examinadora (Dr. Clóvis Abrahão Hazin, Dr. Elmo Silvano de Araújo e Dra. Ana Paula Lima Pacheco) pelas sugestões apresentadas durante os seminários e que foram tão construtivas para defesa desta dissertação.

Ao Professor Dr. Waldeciro Colaço, co-orientador deste trabalho, por apresentar sugestões para aperfeiçoamento desta dissertação.

Aos professores, funcionários e a todos os colegas do Departamento de Energia Nuclear, especialmente aos amigos Mário Augusto e José Wilson, pela atenção, ajuda, amizade e excelente convívio ao longo de minhas atividades no Departamento.

Aos amigos do Núcleo Espírita Auta de Souza, pelas vibrações carinhosas de inventivo e motivação para concluir mais esta etapa em minha vida.

E àqueles que, aparentemente ausentes, sempre estiveram presentes inspirando-me coragem e perseverança e dando-me a força necessária para prosseguir na caminhada.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 PRINCÍPIOS GERAIS DE RADIOPROTEÇÃO	2
2.2 PRINCIPAIS GRANDEZAS E UNIDADES DA RADIOPROTEÇÃO	2
2.2.1 ATIVIDADE (A)	3
2.2.2 EXPOSIÇÃO (X)	3
2.2.3 DOSE ABSORVIDA (D)	3
2.2.4 DOSE EQUIVALENTE (Equivalent Dose) (H_T)	4
2.2.5 KERMA (K)	4
2.2.6 DOSE EFETIVA (E)	4
2.3 RADIOPROTEÇÃO NO BRASIL	5
2.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO X E GAMA COM A MATÉRIA	7
2.5 CURVAS DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO PARA FINS DE BLINDAGEM EM RADIOPROTEÇÃO	8
2.6 PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÕES IONIZANTES	10
2.6.1 LIMITAÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO	11
2.6.2 DISTÂNCIA DA FONTE DE RADIAÇÃO	11
2.6.3 BLINDAGEM DA FONTE DE RADIAÇÃO	11
2.6.4 CAMADA SEMI-REDUTORA	12
2.7 VIDRO CRISTAL E ARGAMASSA DE BARITA	13
2.7.1 VIDRO CRISTAL	13
2.7.2 ARGAMASSA DE BARITA	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 CÁLCULO DA DENSIDADE ESPECÍFICA	17
3.2 EQUIPAMENTOS	18
3.3 ARRANJO EXPERIMENTAL DE IRRADIAÇÃO	19
3.3.1 APARELHO DE RAIOS-X PANTAK	19
3.3.2 FONTE DE ^{60}Co	21
3.4 QUALIDADES DE FEIXES DE RADIAÇÃO UTILIZADAS	22
3.5 DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES X E GAMA	23
3.5.1 TESTES INICIAIS DO SISTEMA DE MEDIDAS	23
3.5.1.1 TESTE DA CORRENTE DE FUGA	23
3.5.1.2 TESTE DA ESTABILIDADE	23
3.5.2 MEDIDAS DAS ATENUAÇÕES DOS FEIXES DE RADIAÇÃO	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 DENSIDADE	25
4.2 ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO	25
4.3 CAMADAS SEMI-REDUTORAS (CSR) E DECI-REDUTORAS (CDR)	35
5 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

ANEXO I: EQUAÇÕES OBTIDAS PELA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS DA BARITA E DO VIDRO CRISTAL	42
ANEXO II: VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE A ARGAMASSA DE BARITA (TRAÇO I), QUANDO IRRADIADA COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA	43
ANEXO III: VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE A ARGAMASSA DE BARITA (TRAÇO II), QUANDO IRRADIADA COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA	45
ANEXO IV: VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE O CONCRETO DE BARITA (TRAÇO III), QUANDO IRRADIADO COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA	47
ANEXO V: VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE O VIDRO CRISTAL, QUANDO IRRADIADO COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA	49
ANEXO VI: VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE A BARITA (TRAÇOS I, II, III) E SOBRE O VIDRO CRISTAL, QUANDO IRRADIADOS COM ^{60}Co , EM FUNÇÃO DA ESPESSURA	51
ANEXO VII: RESULTADO DOS TESTES DO SISTEMA DE MEDIDAS	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Camadas semi-redutoras e deci-redutoras	12
Tabela 2	- Análise granulométrica do minério do Bário	14
Tabela 3	- Características físicas da argamassa de barita	15
Tabela 4	- Composição e características do vidro cristal	16
Tabela 5	- Composição da argamassa e do concreto de barita – Traços I, II e III	16
Tabela 6	- Densidade específica para a barita – Traço I	17
Tabela 7	- Densidade específica para a barita – Traço II	17
Tabela 8	- Densidade específica para a barita – Traço III	18
Tabela 9	- Densidade específica para o vidro cristal	18
Tabela 10	- Especificações do aparelho de raios-X	18
Tabela 11	- Especificações do irradiador de ^{60}Co	19
Tabela 12	- Especificação das qualidades dos feixes de raios-X	22
Tabela 13	- Características do radionuclídeo ^{60}Co	23
Tabela 14	- Densidade específica – barita e vidro Cristal	25
Tabela 15	- Camadas semi-redutora e deci-redutora dos materiais estudados e consultados, para raios-X e raios gama do ^{60}Co	36
Tabela 16	- Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita – Traço I	42
Tabela 17	- Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita – Traço II	42
Tabela 18	- Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita – Traço III	42
Tabela 19	- Equações obtidas pela regressão linear dos dados do vidro cristal	42
Tabela 20	- Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita (Traços I, II, III) e do vidro cristal, quando irradiados com ^{60}Co	42
Tabela 21	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura	43
Tabela 22	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura	43
Tabela 23	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura	44
Tabela 24	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura	44
Tabela 25	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura	45
Tabela 26	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura	45
Tabela 27	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura	46
Tabela 28	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura	46

Tabela 29	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiado com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura	47
Tabela 30	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiado com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura	47
Tabela 31	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiado com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura	48
Tabela 32	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiado com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura	48
Tabela 33	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura	49
Tabela 34	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura	49
Tabela 35	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura	50
Tabela 36	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura	50
Tabela 37	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com ^{60}Co , em função da espessura	51
Tabela 38	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com ^{60}Co , em função da espessura	51
Tabela 39	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço III), quando irradiada com ^{60}Co , em função da espessura	52
Tabela 40	- Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com ^{60}Co , em função da espessura	52
Tabela 41	- Medida da Estabilidade	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Arranjo de irradiação com fonte de ^{60}Co	7
Figura 2	- Absorção de raios γ sob condições de geometria de feixe largo, mostrando que fótons espalhados também atingem o detector	8
Figura 3	- Atenuação dos feixes de raios-X de diferentes energias pelo concreto	9
Figura 4	- Fração de raios gama do ^{137}Cs , ^{60}Co , Ra, ^{198}Au e ^{192}Ir transmitidos através do concreto	10
Figura 5	- Esquema ilustrativo do arranjo de irradiação do corpo de prova com indicação dos componentes usados durante a exposição à radiação com raios-X	20
Figura 6	- Arranjo experimental de irradiação no laboratório do equipamento de raios-X (vista lateral direita)	20
Figura 7	- Esquema ilustrativo do arranjo de irradiação do corpo de prova com indicação dos componentes usados durante a exposição à radiação com ^{60}Co	21
Figura 8	- Arranjo experimental de irradiação no laboratório da fonte de ^{60}Co (vista lateral esquerda)	22
Figura 9	- Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,91 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo	27
Figura 10	- Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,95 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo	28
Figura 11	- Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura do concreto de barita ($\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo	28
Figura 12	- Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura do vidro cristal ($\rho = 2,08 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo	29
Figura 13	- Atenuação dos feixes de raios gama do ^{60}Co para diferentes composições da barita e do vidro cristal em função da espessura	29
Figura 14	- Fator de transmissão em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,91 \text{ g/cm}^3$), para feixes de referência de diferentes tensões do tubo	30
Figura 15	- Ampliação da Figura 14 no intervalo de 0 a 2 cm	31
Figura 16	- Fator de transmissão em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,95 \text{ g/cm}^3$), para feixes de referência de diferentes tensões do tubo	31
Figura 17	- Ampliação da Figura 16 no intervalo de 0 a 2 cm	32
Figura 18	- Fator de transmissão em função da espessura do concreto de barita ($\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$), para feixes de referência de diferentes tensões do tubo	32
Figura 19	- Ampliação da Figura 18 no intervalo de 0 a 2 cm	33
Figura 20	- Fator de transmissão em função da espessura do vidro cristal ($\rho = 2,08 \text{ g/cm}^3$), para feixes de referência de diferentes tensões do tubo	33
Figura 21	- Ampliação da Figura 20 no intervalo de 0 a 2 cm	34
Figura 22	- Fator de transmissão do feixe gama (^{60}Co) em função da espessura de cada composição da barita e do vidro cristal	34
Figura 23	- Ampliação da Figura 22 no intervalo de 0 a 10 cm	35

CARACTERIZAÇÃO DA BARITA E DO VIDRO CRISTAL COMO ATENUADORES NA BLINDAGEM DAS RADIAÇÕES X E GAMA

Airton Tavares de Almeida Junior

Orientador: Prof. Dr. João Antônio Filho

Co-Orientador: Prof. Dr. Waldeciro Colaço

RESUMO

Com objetivo de determinar as características de atenuação do minério sulfato de bário (BaSO_4) e do vidro cristal utilizados como blindagem contra as radiações ionizantes X e gama, em instalações radiográficas, foi realizado um estudo de atenuação com argamassa e concreto de barita, usados, respectivamente, no revestimento de paredes e em blocos; e com o vidro cristal usado em biombo e janelas. Para isso, foram analisadas 10 placas de argamassa de barita, 3 placas de concreto de barita, com área média útil de 900 cm^2 e espessura média de 1 a 5 cm, e 3 placas de vidro cristal, com área útil de 323 cm^2 , com espessuras de 1, 2 e 4 cm. As amostras foram irradiadas com raios-X, com potenciais de 60, 80, 110 e 150 quilovolts, e raios gama do ^{60}Co . As respostas de atenuação (mGy/mAmin) e (mGy/h) ambos a 1 metro, em função da espessura, resultaram na obtenção das curvas de atenuação e de transmissão. Além disso, foram determinadas as espessuras equivalentes das camadas semi e decim-reduzidas, tanto para o vidro cristal, como para a argamassa e o concreto de barita.

**CARACTERIZATION OF BARITE AND CRYSTAL GLASS AS
ATTENUATERS IN X-RAY AND GAMMA RADIATION
SHIELDINGS**

Airton Tavares de Almeida Junior

Advisor: Prof. Dr. João Antônio Filho

Co-Advisor: Prof. Dr. Waldeciro Colaço

ABSTRACT

Aiming to determine the barium sulphate (BaSO_4) ore and crystal glass attenuation features, both utilized as shieldings against ionizing X and gamma radiations in radiographic installations, a study of attenuation using barite plaster and barite concrete was carried out, which are used, respectively, on wall coverings and in block buildings. The crystal glass is utilized in screens and in windows. To do so, ten plates of barite plaster and three of barite concrete with 900 cm^2 and with an average thickness ranging from 1 to 5 cm, and three plates of crystal glass with 323 cm^2 and with thicknesses of 1, 2 and 4 cm were analyzed. The samples were irradiated with X-rays with potentials of 60, 80, 110 and 150 kilovolts, and also with ^{60}Co gamma rays. Curves of attenuation were obtained for barite plaster and barite concrete ($\text{mGy}/\text{mA}\cdot\text{min}$) and (mGy/h), both at 1 meter, as a function of thickness and curve of transmission through barite plaster and barite concrete as a function of the thickness. The equivalent thicknesses of half and tenth value layers for barite plaster, barite concrete and crystal glass for all X-Ray energies were also determined.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, têm sido estudadas por diversos pesquisadores [1-3] curvas de atenuação da radiação ionizante de diferentes energias, para chumbo, concreto, ferro, dentre outros materiais utilizados nas blindagens de instalações radiativas. Contudo, observa-se que a argamassa de barita (cimento, areia, água, sulfato de bário) vem sendo utilizada como blindagem de radiações X e gama, em virtude de apresentar algumas vantagens, tais como a alta eficiência na blindagem de radiação, aplicação de fácil manuseio, facilidade de ser encontrada no mercado nacional e baixo custo.

O dimensionamento da argamassa e do concreto de barita, utilizados no revestimento e construções de paredes, é determinado pelo princípio da equivalência de espessura em relação ao concreto ou ao chumbo, o que o torna superestimado pela utilização desse princípio. Isso leva a erros bastante significativos, em função da diferença de densidade específica entre o chumbo ou o concreto e a barita, acarretando muitas vezes sobrecarga na estrutura da instalação. Este fato decorre de não se dispor, na literatura técnica, de dados característicos sobre a blindagem com argamassa de barita, frente às diversas energias de radiações X e gama.

O vidro cristal também tem sido amplamente utilizado como barreira de proteção, em substituição ao vidro pumblífero, que possui alto custo. Porém, não se dispõe, na literatura técnica especializada, de dados sobre a blindagem das radiações X e gama, para este material.

O conhecimento das características de atenuação do vidro cristal e da barita é de grande importância, tanto do ponto de vista da radioproteção, quanto da viabilização, elaboração e execução de projetos de blindagem das radiações externas nas instalações radiativas. Desse modo, este trabalho tem por objetivo determinar os fatores de atenuação e transmissão do vidro cristal e da argamassa de barita, bem como obter as suas respectivas camadas semi-redutoras e deci-redutoras, de forma a assegurar a eficiência e a qualidade dos projetos de blindagem, garantindo a segurança dos trabalhadores ocupacionalmente expostos às radiações e dos indivíduos do público.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PRINCÍPIOS GERAIS DE RADIOPROTEÇÃO

As recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), publicação nº 26 [4] e publicação nº 60 [5] servem de base para as normas de proteção radiológica atualmente utilizadas no Brasil. A radioproteção está fundamentada em três princípios básicos:

Justificação: “nenhuma prática que envolva exposição à radiação deve ser adotada a menos que produza um benefício líquido positivo ao indivíduo exposto ou à sociedade.”

Otimização: “todas as exposições às radiações devem ser tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, levando-se em conta fatores sociais e econômicos.” A aplicação desse princípio requer a otimização da proteção radiológica em todas as situações onde possam ser controlados por medidas de proteção, particularmente na seleção, planejamento de equipamentos, operações e sistemas de proteção. Os esforços envolvidos na proteção e o detrimento da radiação podem ser considerados em termos de custos; desta forma uma otimização em termos quantitativos pode ser realizada com base numa análise custo-benefício.

Limitação da dose individual: “As doses individuais de trabalhadores e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de equivalente de dose efetiva estabelecidos na Norma 3.01 - Diretrizes Básicas de Radioproteção”, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) [6], que estabelece:

- Trabalhadores: 50 *mSv/ano*;
- Indivíduos do público: 1 *mSv/ano*

2.2 PRINCIPAIS GRANDEZAS E UNIDADES DA RADIOPROTEÇÃO

Na utilização das radiações ionizantes, uma das questões iniciais é como realizar uma medição de grandezas utilizando a própria radiação ou os efeitos e subprodutos de suas interações com a matéria [7].

2.2.1 ATIVIDADE (A) [7]

A atividade de um material radioativo é definida como sendo o número de transformações nucleares que ocorrem em uma dada amostra, por unidade de tempo.

$$A = \lambda N \quad (1)$$

N : número de átomos radioativos, contido na amostra ou material.

$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ (constante de desintegração)

$T_{1/2}$: Tempo de Meia-Vida (é o intervalo de tempo necessário para que a atividade inicial de um radioisótopo decresça à metade)

A unidade adotada pelo Sistema Internacional (SI) para a Atividade é o becquerel (Bq), que corresponde a uma desintegração radioativa por segundo.

2.2.2 EXPOSIÇÃO (X) [7]

A exposição é a grandeza física definida como sendo a quantidade total de cargas elétricas “ dQ ” por unidade de massa “ dm ”, de todos os íons de um mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados pelos fótons no elemento de volume de ar são completamente freados no ar, isto é:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2)$$

A unidade de exposição no SI é C/kg. A unidade antiga de exposição tem como símbolo “R” (roentgen), sendo:

$$1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg.}$$

2.2.3 DOSE ABSORVIDA (D) [7]

A dose absorvida é a quantidade de energia depositada (dE) pela radiação ionizante em qualquer meio, por unidade de massa (dm) do material absorvedor. E expressa por:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (3)$$

No SI, a unidade de dose absorvida é o gray (1Gy = 1J/kg).

2.2.4 DOSE EQUIVALENTE (Equivalent Dose) (H_T) [7]

A dose equivalente é a medida da equivalência em energia absorvida pelo tecido biológico, considerando a eficácia biológica relativa (RBE), isto é, atribui-se à dose absorvida um peso característico da radiação absorvida (ω_R)

A necessidade desta grandeza decorre do fato de que doses iguais de radiações podem produzir danos biológicos de diferentes intensidades. Para fins de proteção radiológica, considera-se o limite superior do fator RBE para cada tipo de radiação e o seu efeito.

$$H_T = D \cdot \omega_R \quad (4)$$

A unidade especial da dose equivalente é o sievert, cujo símbolo é “Sv”. No SI, a unidade é J/kg, sendo: 1Sv = 1 J/kg.

2.2.5 KERMA (K) [7]

Kerma (*kinetic energy released in matter*) é definido como sendo a soma das energias cinéticas iniciais (dE) de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa (dm).

$$K = \frac{dE}{dm} \quad (5)$$

O kerma tem dimensões de energia por unidade de massa e se exprime por gray (Gy), sendo: 1 Gy = 1 J/kg.

2.2.6 DOSE EFETIVA (E) [7]

De acordo com a lei básica da radiobiologia [8], elaborada por J. Bergonié e L. Tribondeau, “A radiosensibilidade das células é diretamente proporcional à sua atividade reprodutiva e inversamente proporcional ao seu grau de diferenciação”.

Assim, com o objetivo de comparar o dano biológico devido a uma exposição não uniforme, com o dano causado por uma exposição uniforme (corpo inteiro), a ICRP na sua publicação 60 [5], definiu a dose efetiva (E) para vários tecidos e órgãos do corpo, como sendo:

$$E = \Sigma W_T H_T \quad (6)$$

sendo:

W_T : é o fator de ponderação para órgãos ou tecidos.

H_T : é a dose equivalente (equivalent dose) no tecido ou órgão. A unidade de dose efetiva no SI é a mesma da dose equivalente H_T .

2.3 RADIOPROTEÇÃO NO BRASIL

Em radioproteção, a aplicação dos regulamentos constitui um pré-requisito para a utilização de fontes de radiação. As autoridades competentes de cada país devem estabelecer as regras necessárias aplicáveis para as práticas, instalações, fontes e equipamentos de radiação, como também para profissionais, indivíduos do público e meio ambiente em função do grau de risco associado.

No Brasil, as atividades de controle regulatório no uso e aplicações de fontes radioativas estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. Compete à CNEN as atividades regulatórias das instalações nucleares, emitir regulamentos técnicos relativos à proteção radiológica e segurança nuclear, fiscalizar e autorizar o funcionamento de instalações que utilizam produtos radioativos, controlar o comércio desses produtos, armazenar rejeitos radioativos, entre outras [6].

A Norma CNEN-NE-3.01, (Resolução nº 12, de 1988), estabelece as diretrizes básicas gerais de proteção radiológica no Brasil a partir do sistema de limitação de doses para exposições ocupacionais e do público. Também estabelece requisitos para controles básicos, responsabilidades e atribuições da direção e da supervisão de proteção radiológica em instalações nucleares e radiológicas. O sistema de limitação de dose adotado integra a justificação da prática, a otimização da proteção radiológica e a limitação das doses individuais para trabalhadores e indivíduos do público [6].

Em conformidade com a legislação nuclear, a CNEN não executa atividades regulatórias nas instalações de radiodiagnóstico. Entretanto, ciente da vasta utilização dos raios-X na área de radiologia, responsável por mais de 90% das exposições da população às fontes de radiação ionizante produzidas pelo homem, a CNEN tem desenvolvido competência técnico-científica e promove desde 1974 várias ações de proteção radiológica nessa área. A Resolução nº 6, de 1988, do Conselho Nacional de Saúde [9], regulamenta para as autoridades sanitárias os processos de licenciamento e

fiscalização dos estabelecimentos de saúde públicos e privados de medicina nuclear, radioterapia e radiodiagnóstico, estabelecendo formalmente uma complementaridade nas ações regulatórias desenvolvidas pela CNEN.

No âmbito da saúde do trabalhador, o Ministério da Saúde e o Ministério do Trabalho e Emprego exercem atividades regulatórias específicas e consideram, como guia, as normas de proteção radiológica da CNEN [6, 10] . As responsabilidades do Sistema Único de Saúde (SUS) relativas à saúde do trabalhador [11] incluem as ações de Vigilância Sanitária e Epidemiológica, promoção e proteção da saúde, recuperação e reabilitação dos trabalhadores submetidos a riscos e agravos das condições de trabalho. Em 1998, as Diretrizes de Proteção Radiológica para Radiodiagnóstico Médico e Odontológico [12] foram estabelecidas através da Portaria nº 453, do Ministério da Saúde. O escopo e os requisitos estabelecidos nesse regulamento estão baseados nas recomendações da ICRP [4, 5, 13] e nas recomendações [14, 15] internacionais de segurança.

O Ministério do Trabalho e Emprego instituiu através da Lei nº 6.514, de 22.12.1977 [16], as Normas Regulamentadoras – NR, aprovadas pela Portaria nº 3.214, de 08.06.1978 [17], em que enquadrou as atividades laborais com radiações ionizantes como perigosas (NR-16) [18] e estabeleceu a obrigatoriedade da elaboração e implementação, por parte de todos os empregadores e instituições que admitam trabalhadores como empregados, do Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional – PCMSO - (NR-7) [19], com o objetivo de promoção e preservação da saúde do conjunto dos seus trabalhadores. Além disso, obriga a empresa a fornecer aos empregados, gratuitamente, equipamentos de proteção individual (NR-6) [20] adequados ao risco e em perfeito estado de conservação e funcionamento, sempre que as medidas de ordem geral não ofereçam completa proteção contra os riscos de acidentes e danos à saúde dos trabalhadores.

No âmbito das normas não compulsórias, deve-se destacar o sistema desenvolvido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que, através de seus comitês específicos formados por representantes das empresas associadas, elabora normas técnicas brasileiras de caráter voluntário, aplicáveis aos vários segmentos da indústria. Essas normas seguem os regulamentos e determinações legais do governo e consideram os padrões internacionais.

Na área nuclear, o Comitê Brasileiro de Energia Nuclear da ABNT tem um papel importante na padronização das especificações da fabricação e ensaios de equipamentos

e fontes de radiação ionizante. No âmbito de protocolos de guias de prática, pode-se destacar a atuação do Colégio Brasileiro de Radiologia e da Associação Brasileira de Física Médica.

2.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO X E GAMA COM A MATÉRIA

A radiação X ou gama pode ter a sua intensidade significativamente reduzida quando é utilizado um absorvedor de alta densidade. Se medidas de atenuação dos raios-X ou gama são feitas sob condições de boa geometria, ou seja, com um feixe de radiação bem colimado e estreito, como apresentado na Figura 1, a relação entre a intensidade inicial (I_0) e a intensidade final (I) é dada pela equação 7.

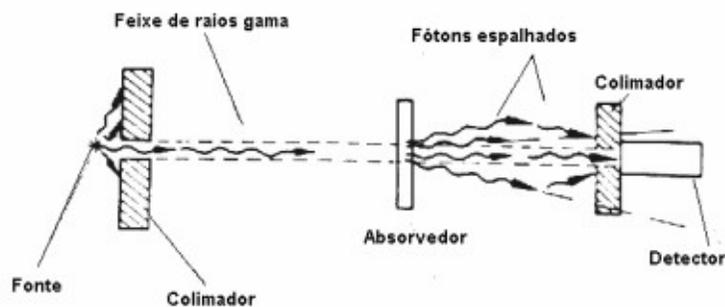


Figura 1: Arranjo de irradiação com fonte de ^{60}Co [7]

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (7)$$

sendo:

I_0 : intensidade da radiação X ou gama sem o absorvedor

x : espessura do absorvedor

I : intensidade da radiação X ou gama transmitida através de um absorvedor com espessura x

μ : coeficiente de atenuação linear (cm^{-1})

Porém, quando não se tem uma condição de boa geometria, como ilustrado na Figura 2, e o feixe de radiação é polienergético, a equação 7 não é aplicada, uma vez

que a mesma não considera os fótons que são espalhados e atingem o detector como radiação secundária. Em geral, uma fração dos fótons espalhados reincide também na direção do detector, contribuindo para o feixe transmitido e alterando o comportamento exponencial da atenuação do feixe. Essa contribuição aditiva representa efetivamente um crescimento da intensidade do feixe em relação ao valor esperado. A diferença pode ser corrigida por um fator, denominado fator de crescimento (fator de *buildup*), que depende da energia da radiação, do material de blindagem e da sua espessura.

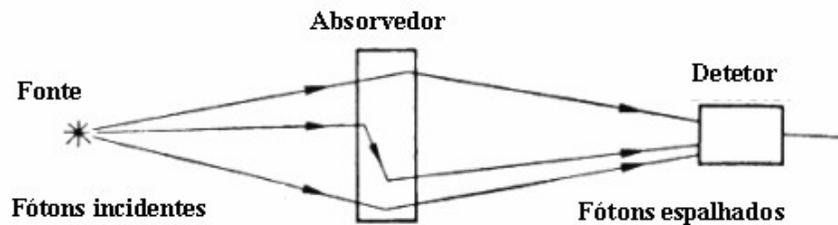


Figura 2: Absorção de raios γ sob condições de geometria de feixe largo, mostrando que fótons espalhados também atingem o detector. [7]

Dessa forma, a lei de atenuação pode ser escrita como:

$$I = BI_0 e^{-\mu x} \quad (8)$$

Em que B é o fator de *buildup*, definido como a razão entre a intensidade da radiação, incluindo tanto a primária quanto a espalhada, em qualquer ponto de um feixe, e a intensidade primária que seria medida naquele ponto.

2.5 CURVAS DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO PARA FINS DE BLINDAGEM EM RADIOPROTEÇÃO

As Figuras 3 e 4 mostram a fração de radiação atenuada e transmitida através do concreto, em função da espessura do absorvedor, para algumas energias das radiações X e gama, respectivamente.

Observa-se na Figura 4, por exemplo, que para reduzir a intensidade do feixe de radiação gama do ^{60}Co , por um fator de 10 (camada deci-redutora), deve ser utilizada uma espessura de concreto, de aproximadamente, 25,4 cm.

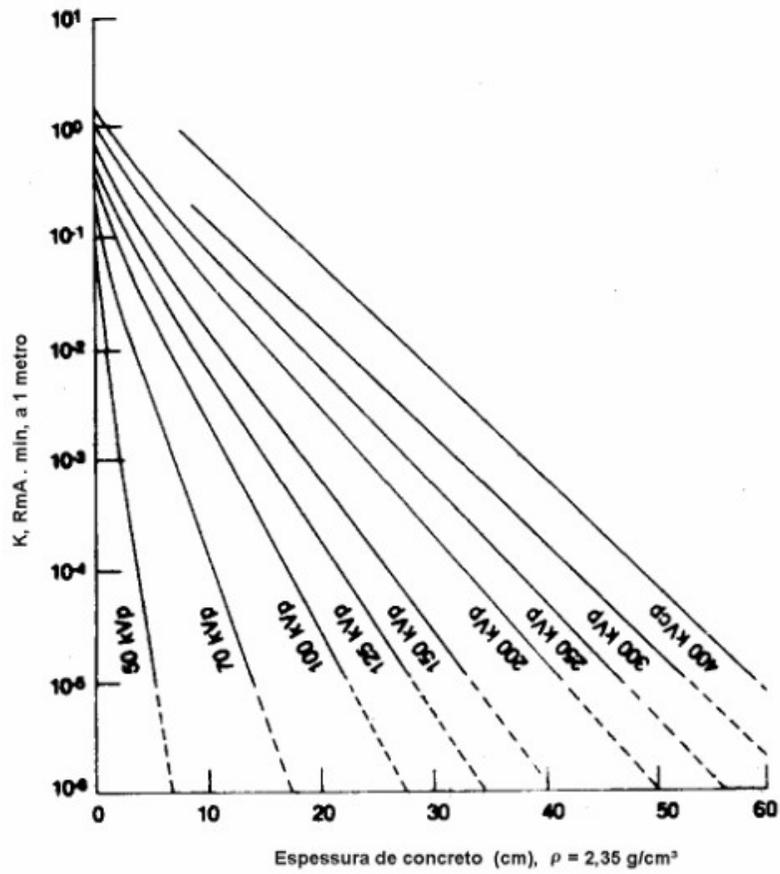


Figura 3: Atenuação dos feixes de raios-X de diferentes energias pelo concreto [7]

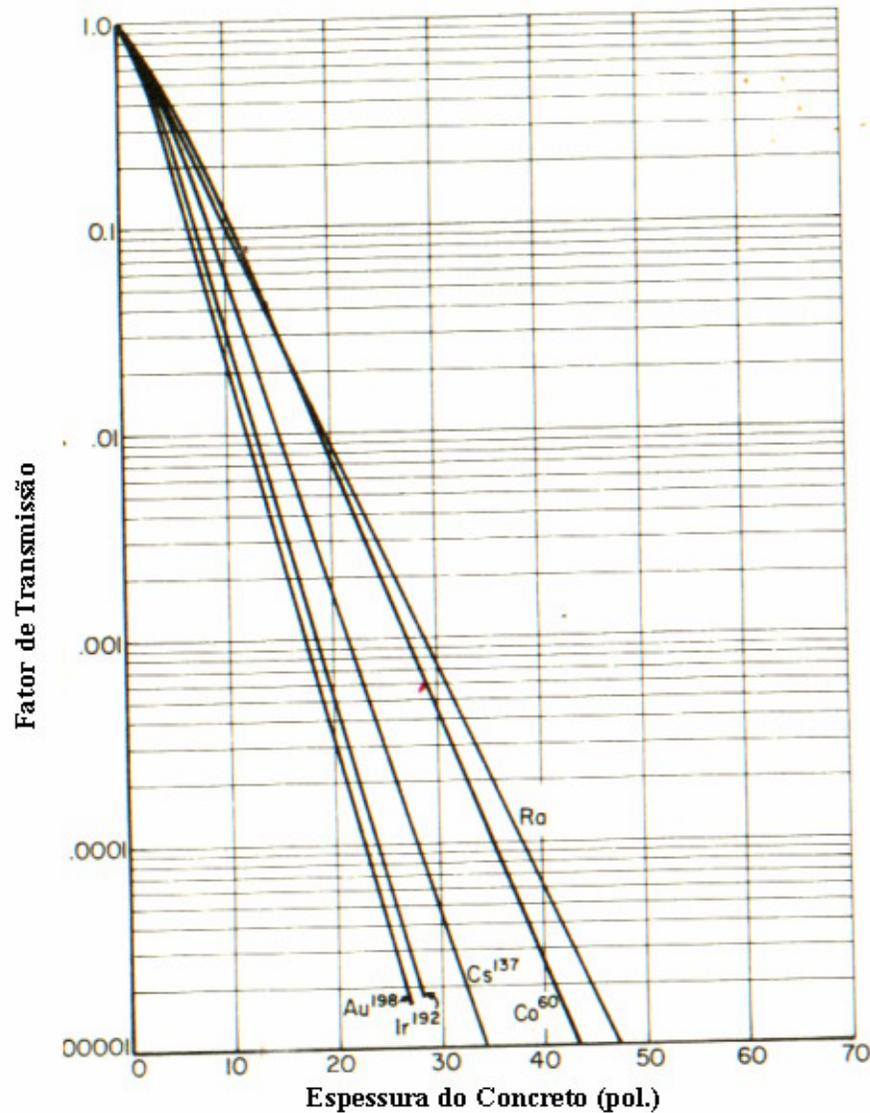


Figura 4: Fração de raios gama do ^{137}Cs , ^{60}Co , Ra, ^{198}Au e ^{192}Ir transmitidos através do concreto [7]

2.6 PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÕES IONIZANTES

A prática da proteção radiológica é um aspecto especial do controle dos perigos para a saúde do homem e do seu ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante. No ambiente industrial, o primeiro procedimento habitual a se implementar é a eliminação do perigo. Se não é possível eliminá-lo, deve-se tentar isolá-lo. Se ambas as técnicas falharem, então é necessário proteger o trabalhador. A maneira exata de como se aplicam esses princípios gerais depende de cada situação em particular [6, 8].

A radiação externa se origina de máquinas de raios-X e de outras fontes especialmente designadas para produção de radiação, e a exposição de pessoas a essas fontes de radiação ionizante deve ser submetida à aplicação de uma ou mais das seguintes técnicas [7]:

- Limitação do tempo de exposição;
- Maximização da distância da fonte de radiação;
- Blindagem da fonte de radiação.

2.6.1 LIMITAÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO

No ambiente de trabalho, onde existe uma fonte de radiação ionizante, com uma determinada taxa de dose, verifica-se que a dose acumulada por uma pessoa exposta a essa radiação, nesse ambiente, é diretamente proporcional ao tempo que ela permanece na área e pode ser controlada pela limitação desse tempo. A restrição do tempo de exposição é necessária para que o indivíduo exposto à radiação ionizante não exceda o valor máximo de dose admitido fazendo com que o trabalho seja realizado de acordo com os critérios de segurança do ponto de vista da radioproteção.

2.6.2 DISTÂNCIA DA FONTE DE RADIAÇÃO

A exposição à radiação decresce com o inverso do quadrado da distância entre a fonte e o alvo [7]. Assim, a maximização da distância da fonte de radiação é uma providência que visa proteger o homem, reduzindo o nível de radiação ao qual estaria sujeito.

2.6.3 BLINDAGEM DA FONTE DE RADIAÇÃO

A redução do nível de radiação ionizante, em um ambiente onde existe uma fonte de radiação, é alcançada através da blindagem dessa fonte [7].

Entretanto, a eficiência da blindagem da instalação depende, dentre outros fatores, do material a ser utilizado e do tipo de radiação emitida pela fonte.

2.6.4 CAMADA SEMI-REDUTORA

O coeficiente de atenuação total (μ) depende do material atenuador e da energia do feixe incidente. No caso de uma fonte que emite fótons de várias energias, devem-se utilizar diferentes valores de (μ), correspondentes às diversas energias do feixe e às diversas taxas de emissão de cada fonte de radiação. Na determinação da espessura de um material absorvedor para ser utilizado na blindagem ou atenuação da radiação, para feixe monoenergético e de boa geometria, pode-se utilizar o método da camada semi-redutora (CSR), definida como sendo a espessura de material que reduz à metade a intensidade do feixe de fótons de raios-X ou gama [8].

A Tabela 1 mostra valores de camadas semi-redutoras e deci-redutoras para diferentes tensões do tubo de raios-X e fontes emissoras de raios gama para chumbo, concreto e ferro [7].

Tabela 1: Camadas semi-redutoras e deci-redutoras

Voltagem de pico (kV)	MATERIAL ATENUADOR					
	CHUMBO (cm) $\rho = 11,35 \text{ g/cm}^3$		CONCRETO (cm) $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$		FERRO (cm) $\rho = 7,80 \text{ g/cm}^3$	
	x_{CSR}	x_{CDR}	x_{CSR}	x_{CDR}	x_{CSR}	x_{CDR}
50	0,60	1,70	0,43	1,50	-	-
70	1,70	5,20	0,84	2,80	-	-
100	2,70	8,80	1,60	5,30	-	-
125	2,80	9,30	2,00	6,60	-	-
150	3,00	9,90	2,24	7,40	-	-
200	5,20	17,00	2,50	8,40	-	-
250	8,80	29,00	2,80	9,40	-	-
300	14,70	48,00	3,10	10,40	-	-
400	25,00	83,00	3,30	10,90	-	-
500	36,00	119,00	3,60	11,70	-	-
1000	79,00	260,00	4,40	14,70	-	-
2000	125,00	420,00	6,40	21,00	-	-
3000	145,00	485,00	7,40	24,50	-	-
4000	160,00	530,00	8,80	29,20	2,70	9,10
6000	169,00	560,00	10,40	34,50	3,00	9,90
8000	169,00	560,00	11,40	37,80	3,10	10,30
10000	166,00	550,00	11,90	39,60	3,20	10,50
^{137}Cs	65,00	216,00	4,80	15,70	1,60	5,30
^{60}Co	120,00	400,00	6,20	20,60	2,10	6,90
Rádio	166,00	550,00	6,90	23,40	2,20	7,40

A relação entre μ e CSR é dada pela equação:

$$\mu = \frac{\ln 2}{CSR} \quad (9)$$

Da mesma forma que a CSR, outro parâmetro muito utilizado no cálculo de espessuras de blindagem é a camada deci-redutora (CDR) definida como sendo a espessura de material que atenua por um fator de 10, a intensidade do feixe de fótons de radiação X ou gama.

2.7 VIDRO CRISTAL E ARGAMASSA DE BARITA

2.7.1 VIDRO CRISTAL

Em instalações radiológicas, existe a necessidade da observação do paciente por parte do trabalhador da instalação, durante as intervenções radiológicas, sendo necessário se ter paredes, ou partes dessas, transparentes. Para isso utiliza-se o vidro plumbífero. Entretanto, esse material possui um custo muito alto e não é produzido no Brasil, de forma que se tem utilizado em substituição ao mesmo o vidro cristal, que tem mostrado eficiência significativa de atenuação da radiação, apesar de não haver nenhuma informação na literatura de suas características no que diz respeito à blindagem da radiação ionizante.

2.7.2 ARGAMASSA DE BARITA

A argamassa de barita [22] (cimento, areia, água, sulfato de bário) vem sendo utilizada como blindagem de radiações X e gama, em virtude de apresentar algumas vantagens, tais como: a alta eficiência na blindagem de radiação e aplicação de fácil manuseio, podendo também ser facilmente encontrada no mercado nacional.

As baritas comercializadas nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste do Brasil são oriundas dos estados da Bahia, Piauí e Minas Gerais, conforme especificado [23] na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise granulométrica do minério de Bário

Estado de origem	Barita	Composição granulométrica do minério de Bário						ρ (g/cm ³)
		% argila	% silte	% a. m. f.	% a. f.	% a. m.	% a. g.	
Piauí	Branca	1	46	35	16	2	0	1,6
Bahia	Roxa	0	33	16	3	34	14	2,12
Minas Gerais	Cinza	2	46	46	6	-	-	1,6
Minas Gerais	Creme	2	47	41	10	-	-	1,9

a.m.f.: areia muito fina; a.f.: areia fina; a.m.: areia média; a.g.: areia grossa

Por outro lado, às características físicas dessas argamassas, tais como: trabalhabilidade, resistência à compressão, densidade, traços de argamassas, percentuais de conglomerado (cimento, areia, BaSO₄ e H₂O) estão apresentadas [24] na Tabela 3.

Tabela 3 – Características físicas da argamassa de barita

Tipo de Ensaio						
H ₂ O (g)	Argamassa	I. C. (cm)	Plasticidade (cm) ⁻¹	Densidade ρ (g/cm ³)	R. Compressão (Mpa)	
				28 dias	7 dias	28 dias
230	A (PiauÍ)	21,00	0,0476	2,17	9,70	10,0
	B (PiauÍ)	*-		-	-	-
	C (Minas Gerais) Creme	21,25	0,0470	2,13	8,10	9,40
	D (Minas Gerais) Creme	19,75	0,0500	2,14	7,70	13,70
	E (Minas Gerais) Cinza	22,25	0,0449	2,10	7,90	8,70
	F (Minas Gerais) Cinza	21,00	0,0476	2,25	9,20	11,30
	G (Bahia)	20,25	0,0493	2,40	12,30	14,80
235	A (PiauÍ)	22,05	0,0453	2,16	10,20	11,40
240	A (PiauÍ)	22,25	0,0449	2,17	9,10	9,30
245	A (PiauÍ)	23,75	0,0421	2,17	10,00	11,10
250	A (PiauÍ)	23,75	0,0421	2,13	9,30	10,40
	B (PiauÍ)	18,25	0,0548	2,18	16,40	16,70
	H (Bahia)	28,75	0,0347	-	-	-
260	B (PiauÍ)	20,90	0,0478	2,20	10,60	17,00
270	B (PiauÍ)	21,25	0,0470	2,19	15,10	17,60

* Não existe condição de trabalhabilidade; A – 200 g de cimento + 4 partes de areia + 6 partes de BaSO₄; B – 400 g de cimento + 5 partes de areia + 5 partes de BaSO₄; C – 200 g de cimento + 3 partes de areia + 7 partes de BaSO₄; D – 300 g de cimento + 3 partes de areia + 7 partes de BaSO₄; E – 200 g de cimento + 3 partes de areia + 7 partes de (BaSO₄)_{CINZA}; F – 300 g de cimento + 3 partes de areia + 7 partes de (BaSO₄)_{CINZA}; G – 200 g de cimento + 5 partes de areia + 5 partes de (BaSO₄)_{ROXA}; H – 300 g de cimento + 5 partes de areia + 5 partes de (BaSO₄)_{ROXA}.

I. C.: índice de compressão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado como material de blindagem das radiações X e gama o vidro cristal, de procedência comercial [21], adquirido em forma de lâminas nas dimensões (20,0 x 18,0) cm² e espessuras de 1,0 cm; 2,0 cm; 3,0 cm e 4,0 cm, cuja especificação está descrita na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição e características do vidro cristal

VIDRO CRISTAL		ESPESSURA (cm)			
% de Cério	% de outros Compostos*	Vidro Cristal			
0,5	99,5	1,0	2,0	3,0	4,0

* Nefetina, Sienita, Oxalato Ferroso, Petalita, Pirita, Nitrato de Sódio, Selênio, Soda Cáustica, Sulfato de Sódio, Óxidos de Silício, Chumbo, Antimônio, Cobalto, Cuproso, Níquel, Zinco.

Outro material também usado foi a barita branca proveniente do estado do Piauí, em forma de placas. Mesmo tendo sido observado que a barita roxa proveniente do estado da Bahia [23, 24], apresentou um melhor desempenho que a barita branca, a mesma não foi utilizada devido ao fato de que a mina está desativada por apresentar alto custo operacional.

No estudo da barita foram utilizados 3 (três) conjuntos de placas quadradas (corpo de prova) de composições diferenciadas, Traços I, II e III, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Composição da argamassa e do concreto de barita – Traços I, II e III

COMPOSIÇÃO DA BARITA					
Composição	BaSO ₄ (g)	Cimento (g)	Areia(g)	H ₂ O (ml)	Brita de Barita (g)
TRAÇO I	600	200	400	270	—
TRAÇO II	500	300	500	300	—
TRAÇO III	300	200	300	400	400

Foram confeccionados para cada Traço contém vinte corpos de prova, com dimensões de (30x 30) cm² e espessuras variando de, aproximadamente, 1,0 a 5,1 cm. As diferentes composições de barita foram obtidas modificando os percentuais dos

componentes no conglomerado (%cimento + %areia + %água + %BaSO₄), tendo em vista a sua aplicabilidade na construção civil.

As curvas de atenuação e de transmissão foram obtidas utilizando as equações apresentadas no Anexo I, utilizando os dados obtidos, que estão expostos nas Tabelas dos Anexos II a VI.

As espessuras acima de cinco centímetros foram obtidas com placas justapostas, de acordo com as espessuras desejadas, isto é: 6 cm = 5 + 1; 7 cm = 5 + 2; 15 cm = 3 placas de 5 cm, e assim por diante.

As placas foram confeccionadas de acordo com as normas da ABNT [25-27].

3.1 CÁLCULO DA DENSIDADE ESPECÍFICA

Após a confecção dos corpos de prova foram determinadas as respectivas densidades pelo Método do Torrão [28-29]. As placas foram pesadas antes (m_1) e após (m_2) a impermeabilização em parafina, e em seguida, medido o volume de cada placa através da diferença de volume do líquido deslocado, em um recipiente graduado na escala de mililitros. O volume real de cada placa foi determinado pela diferença entre o volume do líquido deslocado e o volume da parafina usada na impermeabilização.

As Tabelas de 6 a 9 especificam as características da densidade específica, para a barita e para o vidro cristal.

Tabela 6 – Densidade específica para a barita Traço I

Espessura (cm)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	m_1 (antes) (g)	m_2 (depois) (g)	Volume (cm ³)	ρ (g/cm ³)
1,15	30,00	30,00	2.050	2.195	1.145	2,08
1,70	30,00	30,00	2.285	2.395	1.390	1,80
2,80	30,00	30,00	4.760	4.900	2.650	1,90
3,85	30,00	30,00	6.490	6.650	3.850	1,76
5,10	30,00	30,00	8.240	8.425	4.295	2,01

Tabela 7 – Densidade específica para a barita Traço II

Espessura (cm)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	m_1 (antes) (g)	m_2 (depois) (g)	Volume (cm ³)	ρ (g/cm ³)
1,00	30,00	30,00	1.610	1.700	1.000	1,79
1,90	30,00	30,00	3.000	3.150	1.640	2,04
2,90	30,00	30,00	4.660	4.790	2.540	1,94
3,80	30,00	30,00	6.390	6.530	3.250	2,06
5,00	30,00	30,00	8.280	8.470	4.500	1,93

Tabela 8 – Densidade específica para a barita Traço III

Espessura (cm)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	m ₁ (antes) (g)	m ₂ (depois) (g)	Volume (cm ³)	ρ (g/cm ³)
3,00	30,00	30,00	6.000	6.070	2.730	2,26
4,00	30,00	30,00	7.750	7.990	3.630	2,30
5,00	30,00	30,00	9.500	9.625	4.390	2,23

Tabela 9 – Densidade específica para o vidro cristal

Espessura (cm)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	ρ (g/cm ³)
1,00	20,05	18,00	750	360	2,08
2,00	20,05	18,00	1.500	720	2,08
4,00	20,05	18,00	3.000	1.440	2,08

3.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados na irradiação dos corpos de prova foram um aparelho de raios-X e um irradiador de ⁶⁰Co, cujas especificações técnicas, estão descritas nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 – Especificações do aparelho de raios-X

Item	Especificação
Fabricante	PANTAK
Modelo / N° de série	HF-160 / 9710 – 2779
Tubo	COMET AG, tipo MXR-160
Filtração inerente do tubo	1mmBe
Material da janela do tubo	Berílio
Faixa de kV	5 – 160 kV
Faixa de corrente	0,5 – 50 mA
Sistema de retificação	Potencial constante
Anodo	Rotatório
Potência máxima	3,2 kW
Tamanho de ponto focal	1,2 mm e 3,0 mm

Tabela 11 – Especificação do irradiador de ^{60}Co

Item	Especificação
Fonte	^{60}Co
Fabricante	IPEN / CNEN
Modelo / Série	616 / CoS132
Blindagem da fonte	Chumbo
Sistema de abertura do irradiador	Pneumático

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

O sistema de medidas utilizado para realização da dosimetria é constituído por um eletrômetro, modelo NE 2670, série 148; uma câmara de ionização de 600cc, modelo NE 2575C, série 518, polaridade -250 Volts, e uma fonte de referência de ^{90}Sr , modelo 2576A, série 330, com atividade de 1,11 MBq, em 22.01.1996. Todo o sistema de medidas foi fabricado pela NE (Nuclear Enterprise). O eletrômetro possui certificado de calibração emitido pelo NRPB (National Radiological Protection Board) e a câmara de ionização possui certificação emitida pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD/CNEN.

Os acessórios utilizados foram: um termômetro / higrômetro, da marca Fisher Scientific; um barômetro, modelo DPI 740, da marca Druck e um cronômetro, da marca Technos.

3.3 ARRANJO EXPERIMENTAL DE IRRADIAÇÃO

3.3.1 APARELHO DE RAIOS-X PANTAK

O arranjo experimental do laboratório em que o aparelho de raios-X está instalado é formado por trilhos de aço fixados no piso, cujo comprimento é de 4,5 m. Sobre esses trilhos existe um carrinho móvel que é composto de trilhos ópticos para fixação do conjunto suporte-câmara de ionização.

A distância foco-câmara de ionização utilizada foi de 1,0 m. O corpo de prova estava posicionado sobre a mesa a uma distância de 0,5 m do ponto focal.

Um colimador cilíndrico de chumbo, de 20 mm de diâmetro, foi colocado na saída do aparelho de raios-X, com a finalidade de limitar o tamanho do campo sobre a

câmara de ionização (condição de boa geometria), sendo este tamanho de campo de 121,2 mm. Após o colimador foram introduzidos os filtros representativos de cada qualidade do feixe de raios-X, utilizados em radioproteção, segundo a norma ISO 4037-1 (série W). [30]

As Figuras 5 e 6 mostram como foi montado esse arranjo experimental.

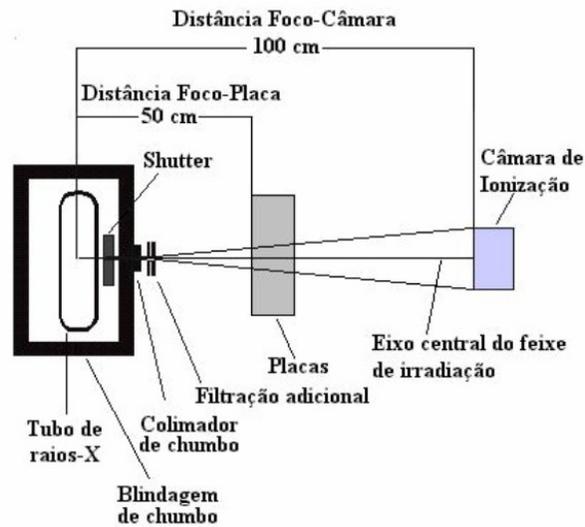


Figura 5: Esquema ilustrativo do arranjo de irradiação da placa (corpo de prova) com indicação dos componentes usados durante a exposição à radiação com raios-X

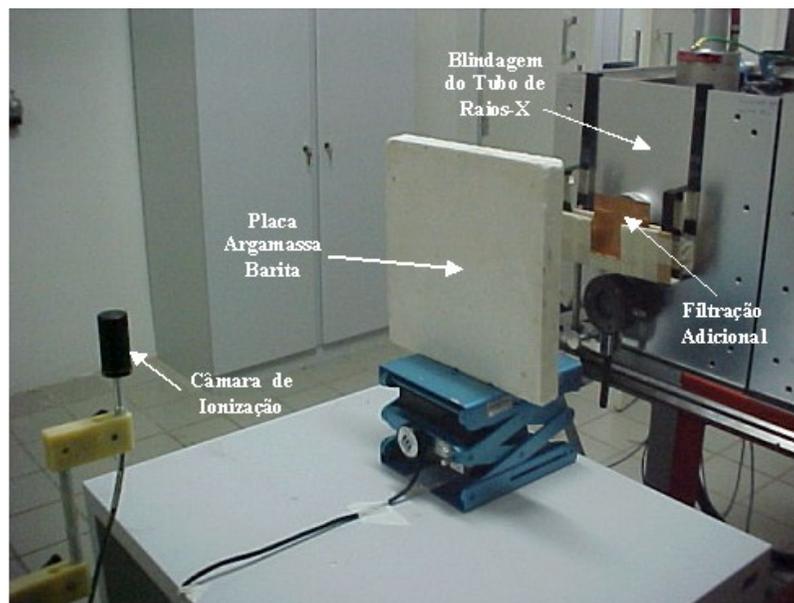


Figura 6: Arranjo experimental de irradiação no laboratório do equipamento de raios-X (vista lateral direita)

3.3.2 FONTE DE ^{60}Co

O arranjo experimental do laboratório de metrologia em que a fonte de ^{60}Co está instalada é de alumínio, enquanto que, no laboratório do aparelho de raios-X, o arranjo é feito em aço. A distância fonte-câmara de ionização utilizada foi de 1,0 m e a mesa com rodas deslizantes também foi usada para posicionar as placas utilizadas no experimento, a uma distância de 0,5 m da fonte.

O sistema de blindagem da fonte de ^{60}Co não possui colimadores, portanto o tamanho de campo do feixe de irradiação na saída do mesmo é limitado pelo diâmetro de abertura, que é de 64 mm.

As Figuras 7 e 8 mostram como foi montado esse arranjo experimental

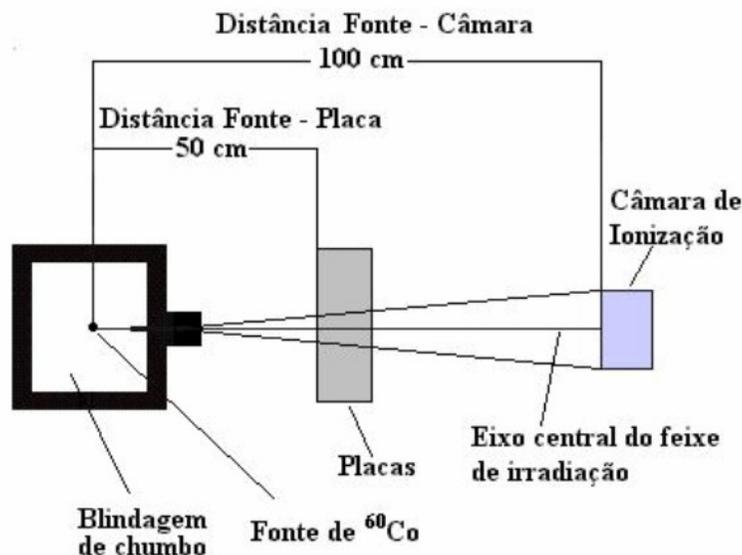


Figura 7: Esquema ilustrativo do arranjo de irradiação do corpo de prova com indicação dos componentes usados durante a exposição à radiação com ^{60}Co

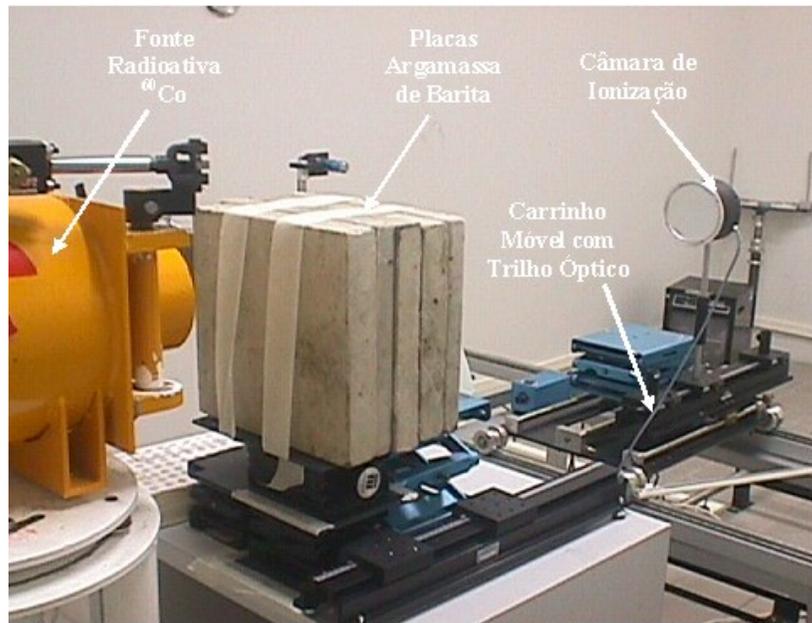


Figura 8: Arranjo experimental de irradiação no laboratório da fonte de ^{60}Co (vista lateral esquerda)

3.4 QUALIDADES DE FEIXES DE RADIAÇÃO UTILIZADAS

As qualidades de feixes de raios-X utilizadas neste trabalho para fins de dosimetria foram determinadas de acordo com a norma ISO 4037-1 [30], cujas características estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Especificação das qualidades dos feixes de raios-X

Qualidade ISO 4037-1	Energia Efetiva Média	Potencial do Tubo	Filtração Inerente (mmAl)	Filtração Adicional	1ª CSR (mmCu)	2ª CSR (mmCu)
W60	45 KeV	60 kV	3,912	0,297mmCu	0,18	0,21
W80	57 KeV	80 kV	3,912	0,507mmCu	0,35	0,44
W110	79 KeV	110 kV	3,912	1,988mmCu	0,96	1,11
W150	104 KeV	150 kV	3,912	1,030mmSn	1,86	2,10

O feixe de radiação gama utilizado foi o proveniente de uma fonte de ^{60}Co , cujas propriedades características desse radionuclídeo estão descritas na Tabela 13.

Tabela 13 – Características do radionuclídeo ^{60}Co

Radionuclídeo	Energia média da Radiação (MeV)	Meia-vida (anos)	Constante de Taxa de Kerma no ar ($\mu\text{Gym}^2/\text{h.MBq}$)	Atividade, em 07/01/1998
^{60}Co	1,25	5,3	0,31	17,17 GBq

3.5 DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES X E GAMA

3.5.1 TESTES INICIAIS DO SISTEMA DE MEDIDAS

Antes de se utilizar qualquer sistema de medidas de radiação ionizante, faz-se necessário averiguar se o mesmo oferece condições de leitura. Para isso, são utilizados dois tipos de testes: o teste de corrente de fuga e o teste de estabilidade.

Os resultados dos respectivos testes estão apresentados no Anexo VII.

3.5.1.1 TESTE DA CORRENTE DE FUGA

Como o próprio nome diz, esse teste verifica se o sistema de medidas está com fuga, ou seja, se está medindo cargas, mesmo que este não esteja em presença de radiação ionizante. Esse teste deve ser realizado antes de cada conjunto de leituras que se deseje realizar. Para isso, coloca-se o eletrômetro no modo “carga” e a câmara de ionização é irradiada até a leitura no eletrômetro alcançar alguns nC. Após cessar a irradiação, afere-se a leitura inicial, e decorrido um tempo de aproximadamente 1.500s, afere-se a leitura final. A razão entre a variação de carga obtida no sistema de medidas (leitura final menos a leitura inicial) e o tempo decorrido fornece a corrente de fuga. Esse valor, segundo o fabricante, deve ser da ordem de 10^{-14} ampére ou menor.

3.5.1.2 TESTE DA ESTABILIDADE

Este teste indica se o sistema de medidas está operando em perfeitas condições de uso, podendo assim averiguar se o sistema está repetitivo e reprodutível. Esse teste é

realizado mensalmente para que se possa ter um histórico das condições do sistema de medidas. Para esse teste é utilizada uma fonte de referência de ^{90}Sr , onde são realizadas 10 leituras, de 1 minuto, com o eletrômetro no modo carga, sendo cada leitura corrigida pelo fator de temperatura e pressão.

No caso do teste de repetitividade, o intuito é observar como o sistema se comporta quando são realizadas essas medidas sucessivas, verificando assim a variação dessas leituras. O valor do desvio-padrão percentual das medidas deve estar abaixo de 1%. Quanto ao teste de reprodutibilidade, o objetivo é avaliar se os resultados das leituras obtidos em uma determinada data estão similares com os resultados obtidos em uma data anterior (chamada data de referência), quando corrigidos pelo decaimento da fonte. Dessa forma, a média das leituras obtidas numa determinada data deve estar em concordância com $\pm 98\%$ daquela obtida na data de referência.

3.5.2 MEDIDAS DAS ATENUAÇÕES DOS FEIXES DE RADIAÇÃO

Após os testes iniciais das correntes de fuga e de estabilidade, foram realizadas as medidas das atenuações dos feixes de radiação. Para cada qualidade de radiação foi realizada a dosimetria na ausência das placas, obtendo-se a média de doze leituras em taxa de kerma no ar, corrigidas pelos seus respectivos fatores de temperatura e pressão.

De forma similar foram obtidas as médias das leituras com a presença de cada placa e da combinação delas, de forma a obter espessuras de até 20 cm, para cada Traço descrito no item 3.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DENSIDADE

Na Tabela 14 estão apresentadas as composições da argamassa de barita (Traços I e II), do concreto de barita (Traço III) e do vidro cristal estudados. Observa-se que o Traço III foi o que apresentou a maior densidade específica ($2,26 \text{ g/cm}^3$), enquanto que, os materiais utilizados para revestimento de paredes, Traços I e II, apresentaram densidades de $1,91 \text{ g/cm}^3$ e $1,95 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Os resultados encontrados, quando comparados com aqueles apresentados nas Tabelas 3 e 4, item 2.7.2, são semelhantes.

Tabela 14 – Densidade específica – barita e vidro cristal

MATERIAL		
	Caracterização	Densidade $\rho(\text{g/cm}^3)$
Traço I	Argamassa de barita	$1,91 \pm 0,12$
Traço II	Argamassa de barita	$1,95 \pm 0,10$
Traço III	Concreto de barita	$2,26 \pm 0,03$
Vidro Cristal	Placa de vidro	2,08

4.2 ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO

Nas Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 são apresentadas as curvas de atenuação em função da espessura, para as diferentes composições da barita (argamassa – Traços I e II; concreto – Traço III) e do vidro cristal, irradiados com raios-X em diferentes quilovoltagens (60 kV, 80 kV, 110 kV e 150 kV) e raios gama do ^{60}Co .

Essas curvas são utilizadas para determinar a espessura das paredes ou do seu revestimento, de forma a atender o nível de radiação desejado em uma instalação radiográfica. Como exemplo, na elaboração de um projeto voltado à construção de uma clínica radiológica, cujo equipamento de raios-X opera sob uma tensão de 150 kV, tem-se para a intensidade da atenuação(K) um valor correspondente a $K = 7,8 \times 10^{-3}$

mGy/mA.min, a 1,0 metro. Esta intensidade de atenuação é calculada utilizando-se a fórmula:

$$K = \frac{Pd^2}{WUT} \quad (10)$$

Sendo P a taxa de exposição máxima permissível para a área não controlada, d a distância da máquina de raios-x à área não controlada, W a carga de trabalho, U o fator de uso e T o fator de ocupação [7]. Com esse resultado, observa-se na Figura 9 que a espessura necessária para atenuar a radiação à intensidade mencionada é de 10,4 cm de argamassa de barita, e de aproximadamente 9,3 cm de concreto de barita, conforme Figura 11.

Por outro lado, usando os dados disponíveis na literatura e usando o princípio da equivalência de material [7], a espessura de barita para o revestimento da situação acima mencionada, usa-se a curva da Figura 3, item 2.5, onde se encontra uma espessura de 16,0 cm de concreto ($\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$), o equivalente a 9,0 cm de barita ($\rho_b = 3,6 \text{ g/cm}^3$ – menor densidade da barita especificada [1, 2] na literatura), e de 16,1 cm ($\rho_b = 2,26 \text{ g/cm}^3$) – concreto de barita.

Dessa forma, pode-se verificar que a diferença de espessura do concreto de barita, no segundo caso, é bastante significativa, ou seja, 7,1 cm (16,1 – 9,0), ocasionando uma superestimação no dimensionamento de quantidade de material a ser utilizado e conseqüentemente um aumento do custo da proteção. Resultados semelhantes podem ser observados para outras energias das curvas referenciadas acima. Os valores das medidas para obtenção das curvas de atenuação e transmissão da intensidade de radiação estão listados nas Tabelas dos Anexos II a VI.

Observa-se na Figura 12 que a espessura de vidro cristal necessária para atenuar um feixe de radiação com intensidade de $4,0 \times 10^{-2}$ mGy/mA.min a 1 m, produzido por um aparelho de raios-X operando com tensão de 150 kV é de 8,0 cm. Entretanto, quando se utiliza o princípio de equivalência de material, verifica-se na Figura 3, item 2.5, que para esta intensidade encontra-se uma espessura de 6,5 cm de concreto ($\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$), que é equivalente a 7,3 cm de vidro cristal. Desta forma, pode-se observar que a diferença neste caso não é significativa, em razão das densidades específicas estarem muito próximas. Porém, mesmo assim, o valor encontrado da espessura de vidro necessário para a blindagem seria substituído.

As figuras 13 e 22 representam as curvas de atenuação e de transmissão do feixe de radiação gama (^{60}Co) para as diversas composições da barita - Traços I, II e III e do vidro cristal, em função da espessura de cada material.

Observa-se que as curvas, tanto de atenuação quanto de transmissão para as diversas composições apresentadas, situam-se bem próximas umas das outras, o que não ocorrem com os feixes de radiação X.

Isso se deve ao fato de que as densidades dos materiais estudados situam-se numa faixa bem próxima ($1,91 \text{ g/cm}^3$ a $2,26 \text{ g/cm}^3$) e de que o feixe de radiação gama do ^{60}Co possui energia média de $1,25 \text{ MeV}$, sendo portanto mais penetrante que os feixes de raios-X.

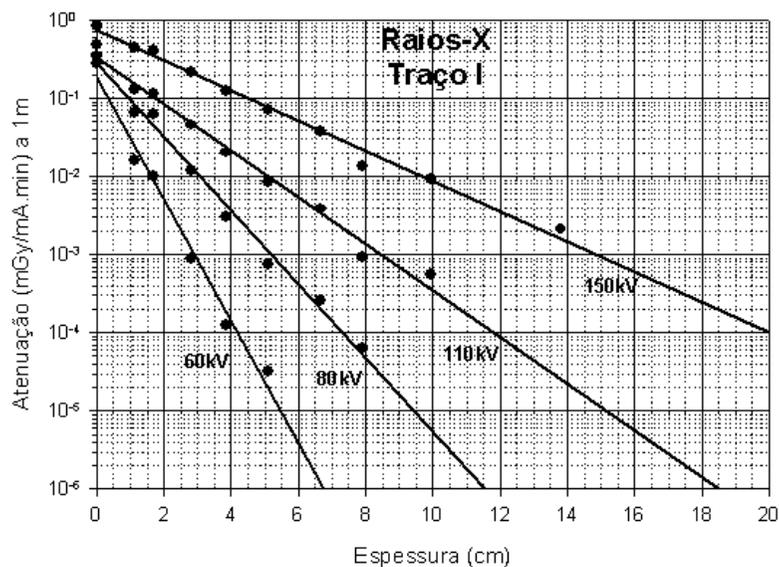


Figura 9 – Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,91 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo

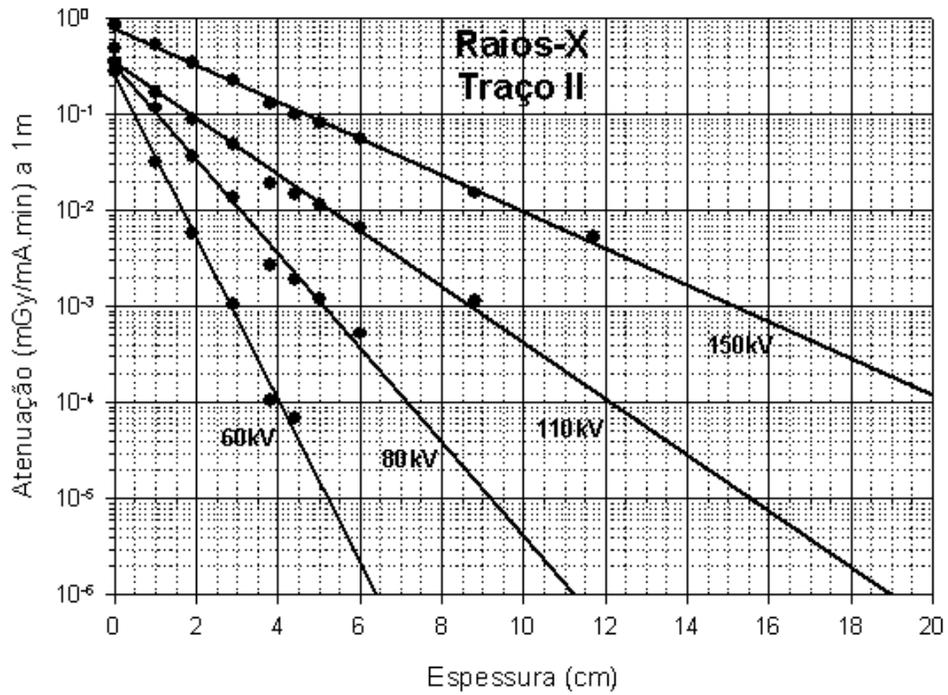


Figura 10 – Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,95 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo

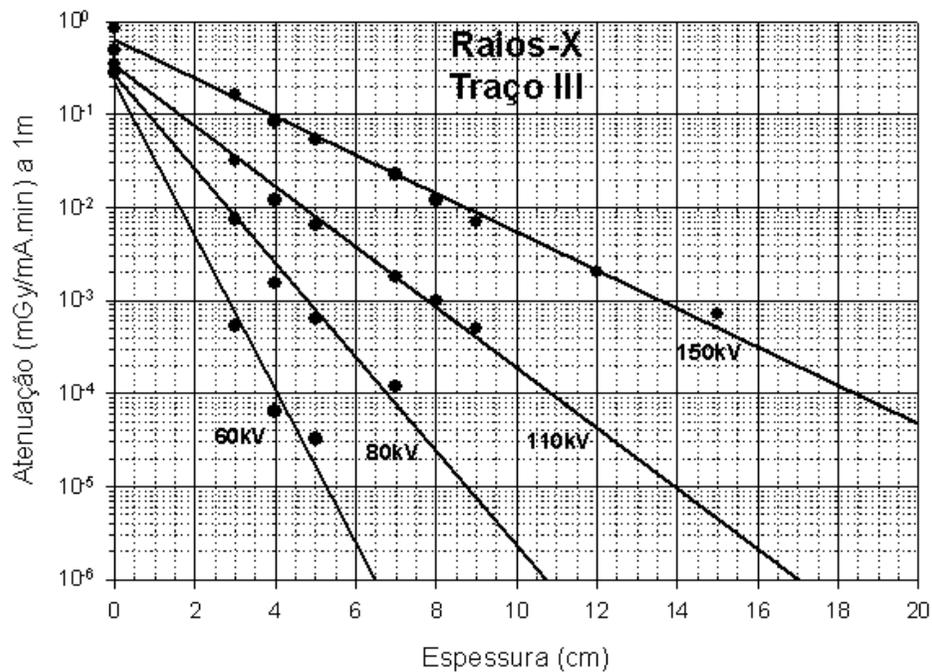


Figura 11 – Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura do concreto de barita ($\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo

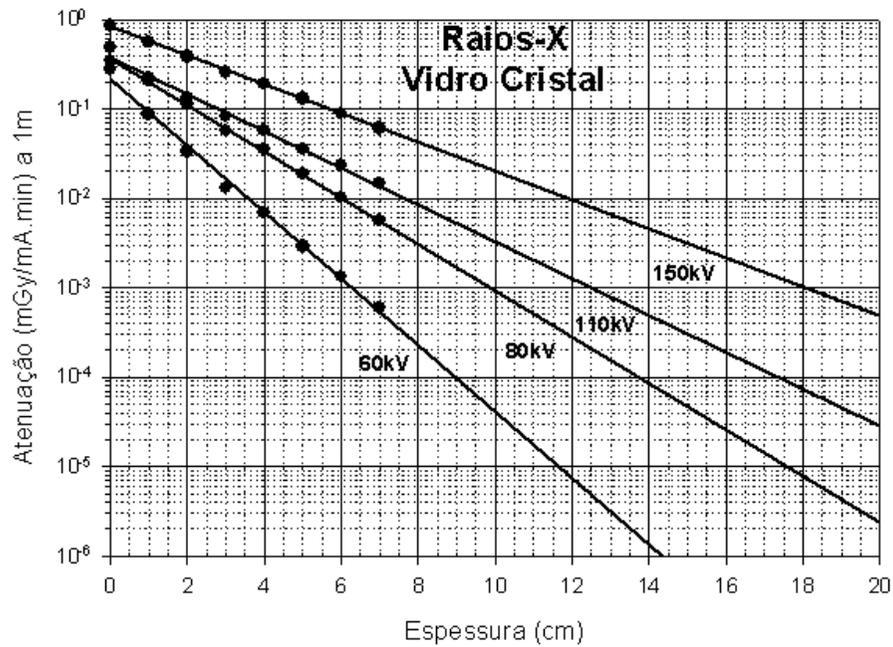


Figura 12 – Atenuação de feixes de raios-X em função da espessura do vidro cristal ($\rho = 2,08 \text{ g/cm}^3$) para diferentes tensões do tubo

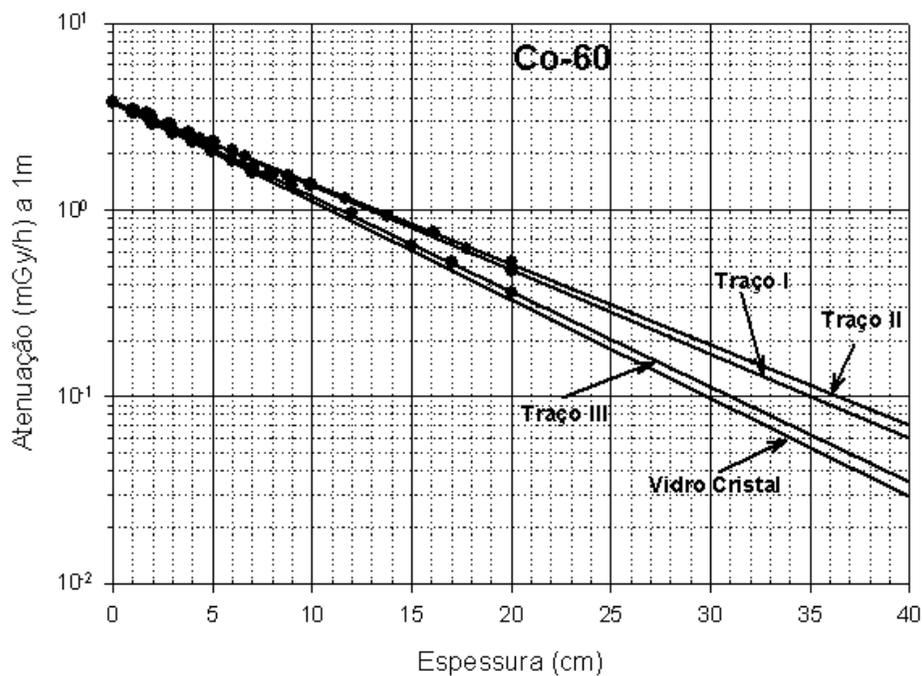


Figura 13 – Atenuação do feixe de raios gama do ^{60}Co para diferentes composições da barita e do vidro cristal em função da espessura

Nas Figuras 14, 16, 18, 20 e 22 são apresentadas as curvas de transmissão em função da espessura para as várias composições de barita e vidro cristal para diferentes energias dos raios-X e do ^{60}Co estudadas. Com essas curvas pode-se determinar, de maneira fácil e simples, as camadas semi e deci-redutoras.

Na Figura 18, pode-se observar que para um fator de transmissão de 8×10^{-2} , encontra-se na mesma Figura uma espessura de 21,8 cm. Entretanto, quando se utiliza a curva de transmissão da Figura 4, item 2.5, encontra-se para o concreto, uma espessura de 30 cm. Para a barita [1, 2] com densidade ($\rho_b = 3,6 \text{ g/cm}^3$), obtém-se uma espessura de 19,58 cm; e para uma barita com densidade ($\rho = 1,91 \text{ g/cm}^3$) deste trabalho, a espessura é de 38,52 cm.

Comparando os resultados, observa-se na Tabela 15, item 4.3, que a diferença é significativa, ou seja, de aproximadamente, 16,7 cm.

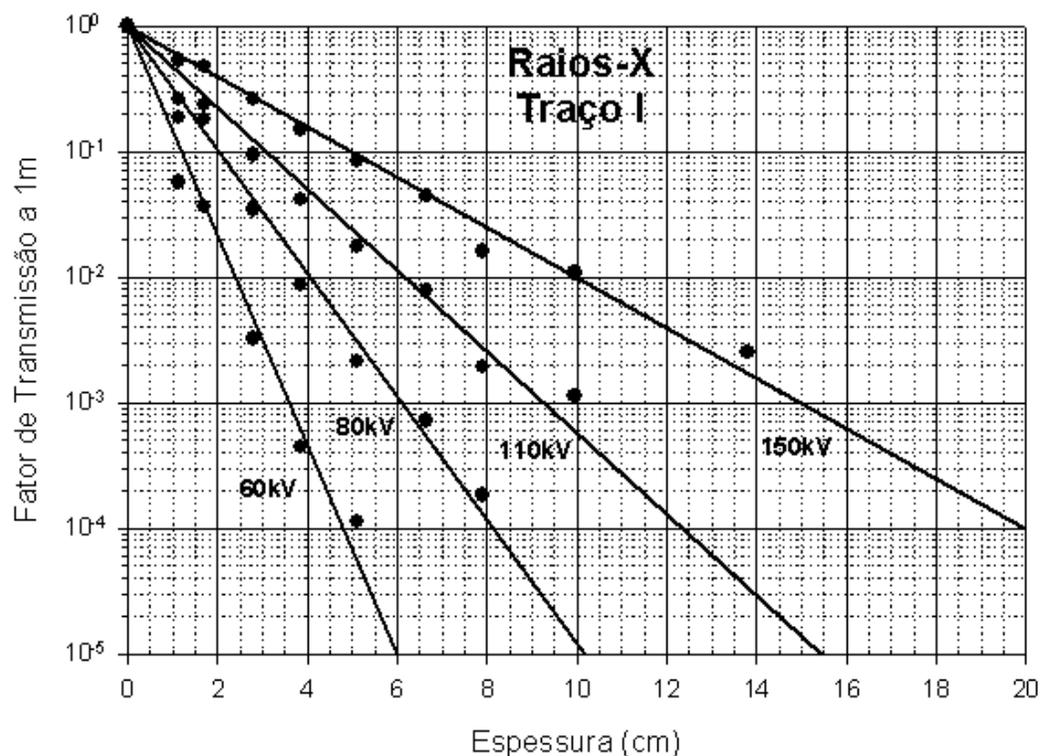


Figura 14 - Fator de transmissão em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,91 \text{ g/cm}^3$), para feixes de referência de diferentes tensões do tubo

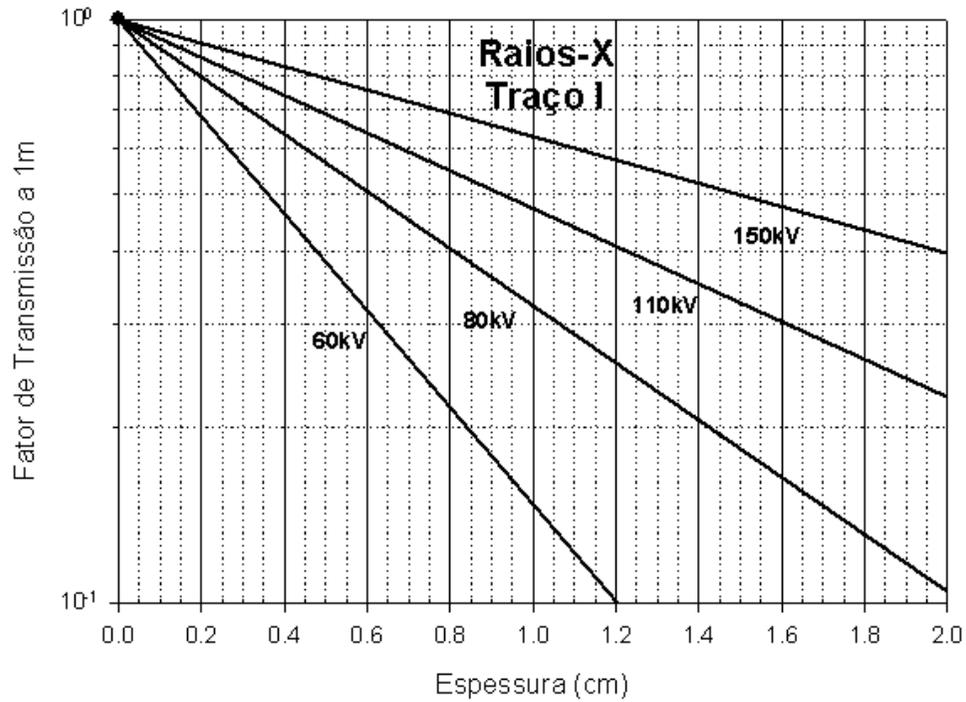


Figura 15 – Ampliação da Figura 14 no intervalo de 0 a 2 cm

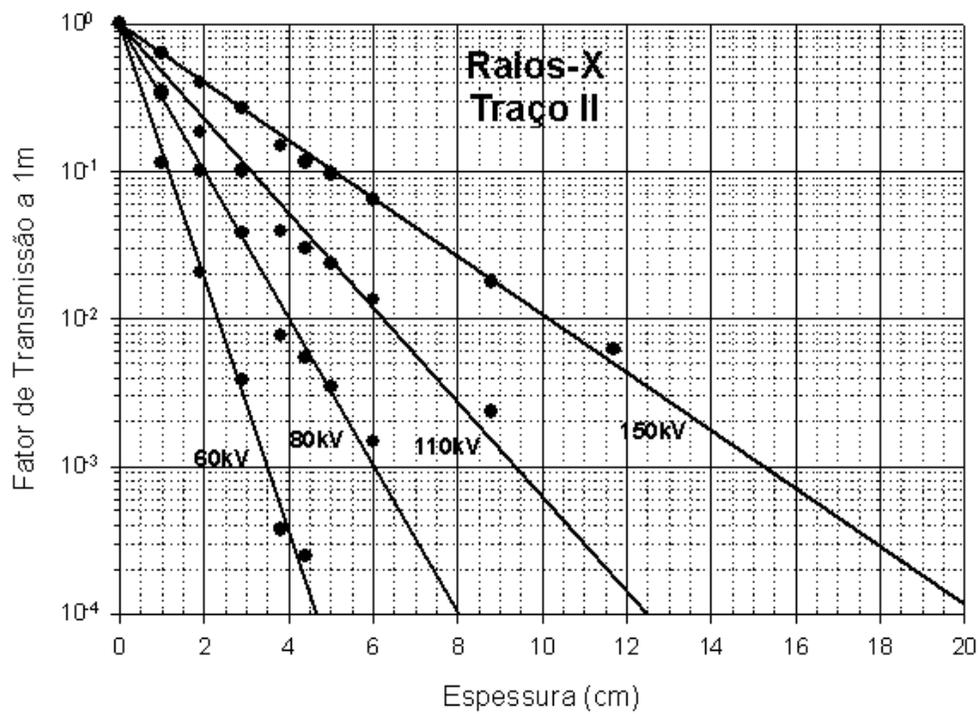


Figura 16 - Fator de transmissão em função da espessura da argamassa de barita ($\rho = 1,95 \text{ g/cm}^3$), para feixes de referência de diferentes tensões do tubo

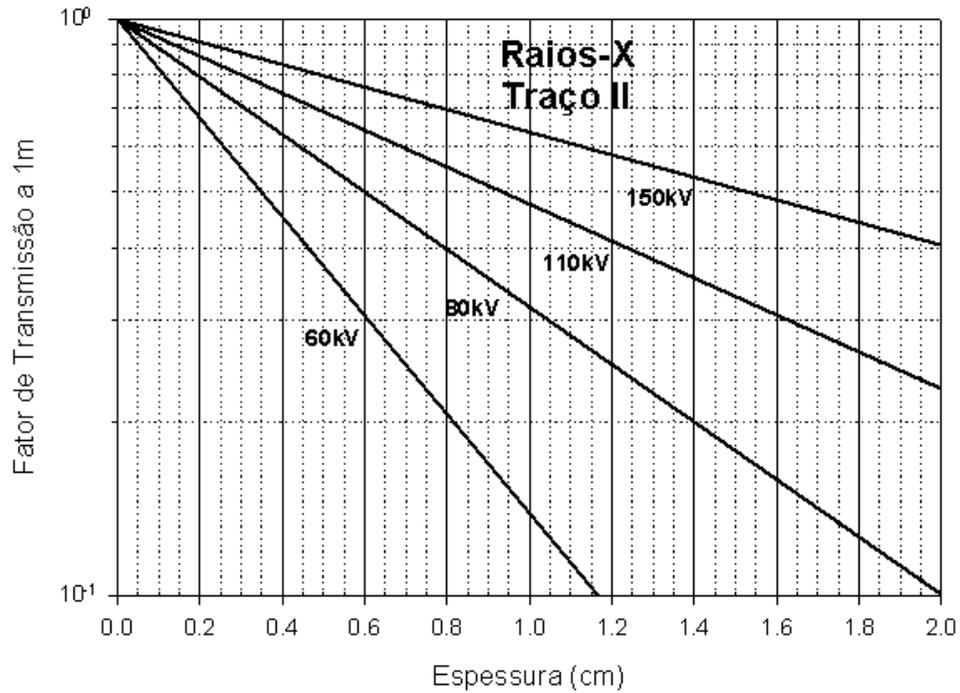


Figura 17 – Ampliação da Figura 16 no intervalo de 0 a 2 cm

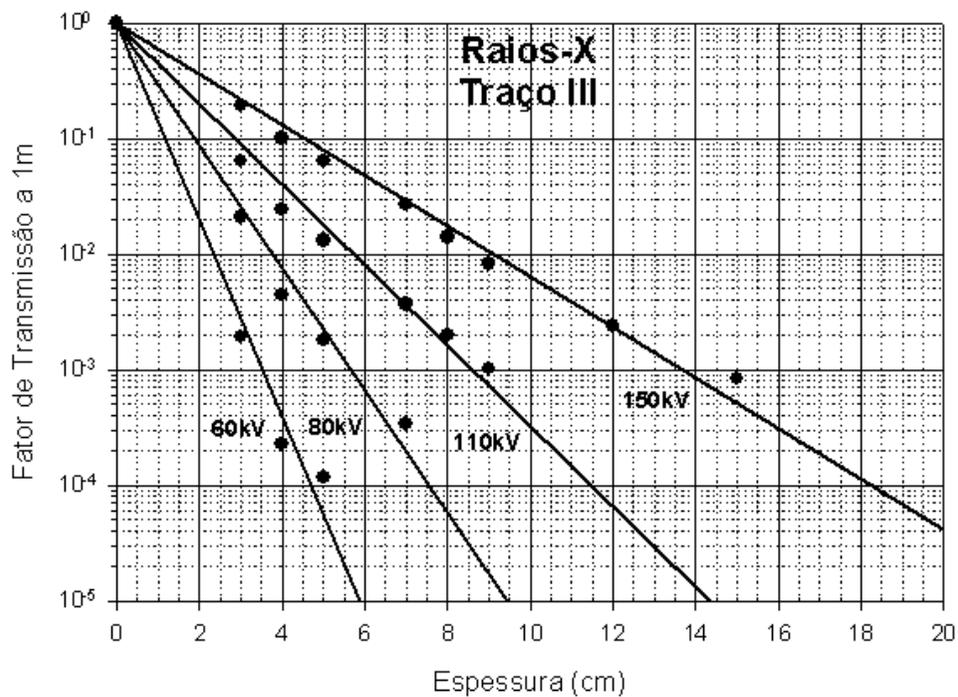


Figura 18 - Fator de transmissão em função da espessura do concreto de barita ($\rho = 2,26 \text{ g/cm}^3$), para feixes de referência de diferentes tensões do tubo

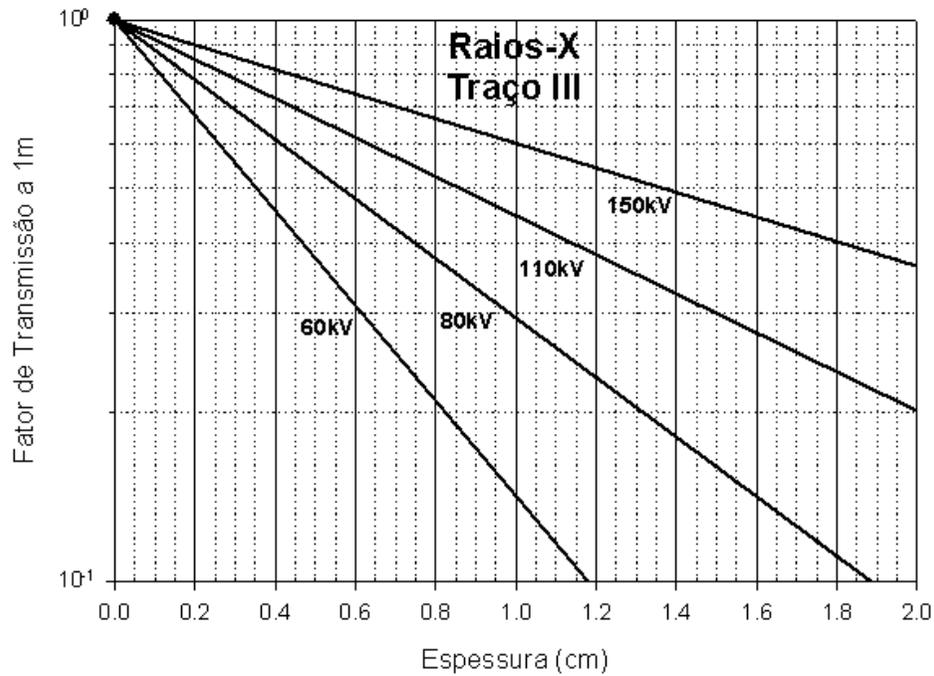


Figura 19 – Ampliação da Figura 18 no intervalo de 0 a 2 cm

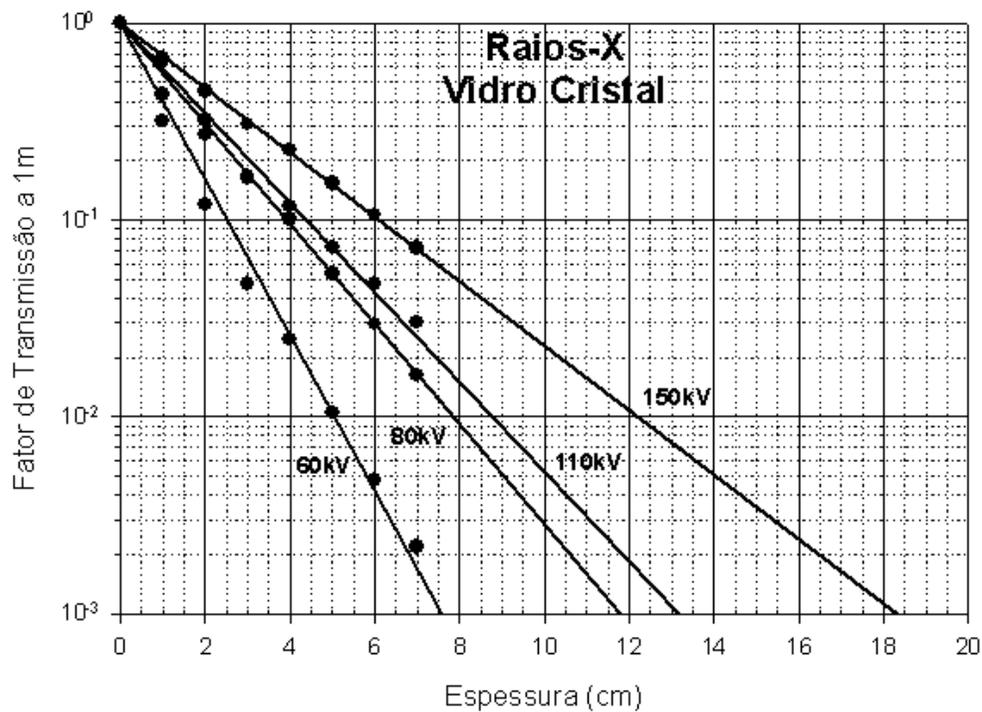


Figura 20 - Fator de transmissão em função da espessura do vidro cristal ($\rho = 2,08 \text{ g/cm}^3$) para feixes de referência de diferentes tensões do tubo

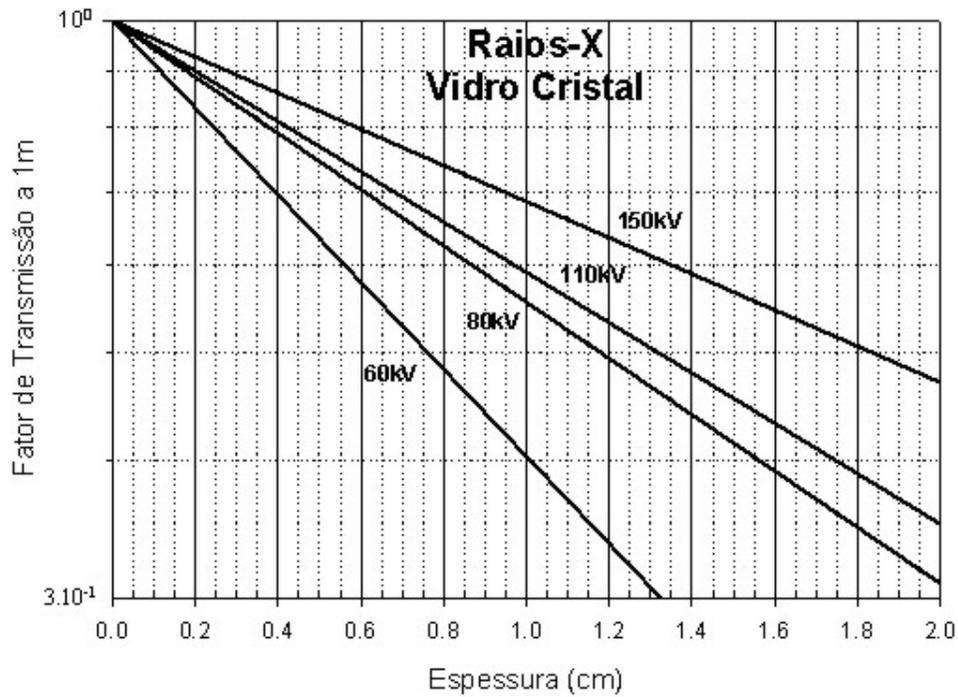


Figura 21 – Ampliação da Figura 20 no intervalo de 0 a 2 cm

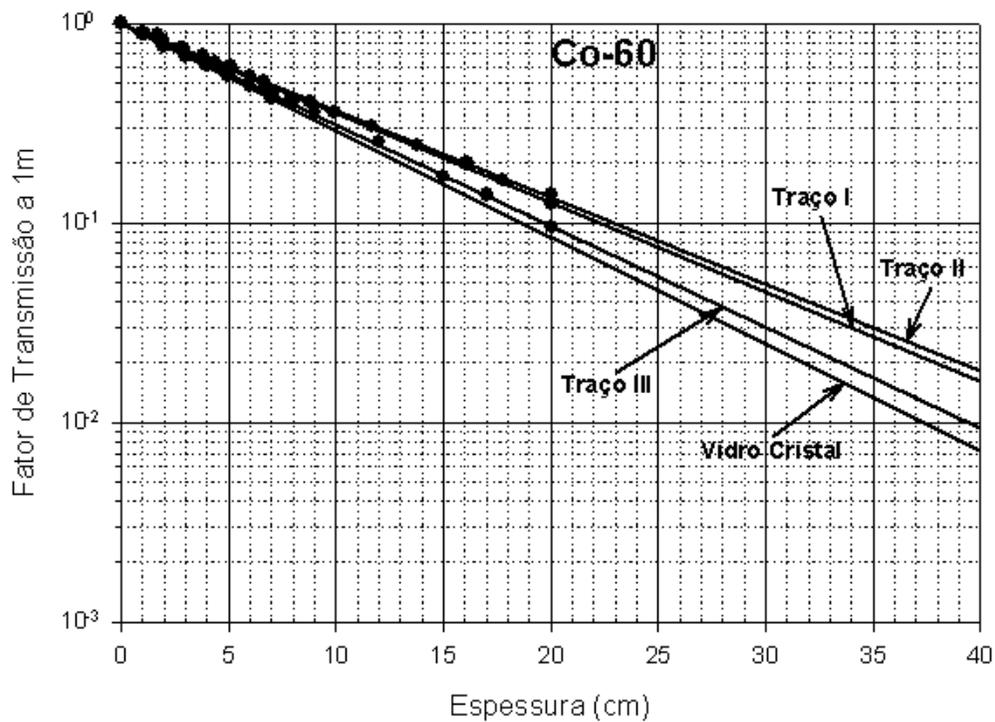


Figura 22 – Fator de transmissão do feixe gama (^{60}Co) em função da espessura de cada composição da barita e do vidro cristal

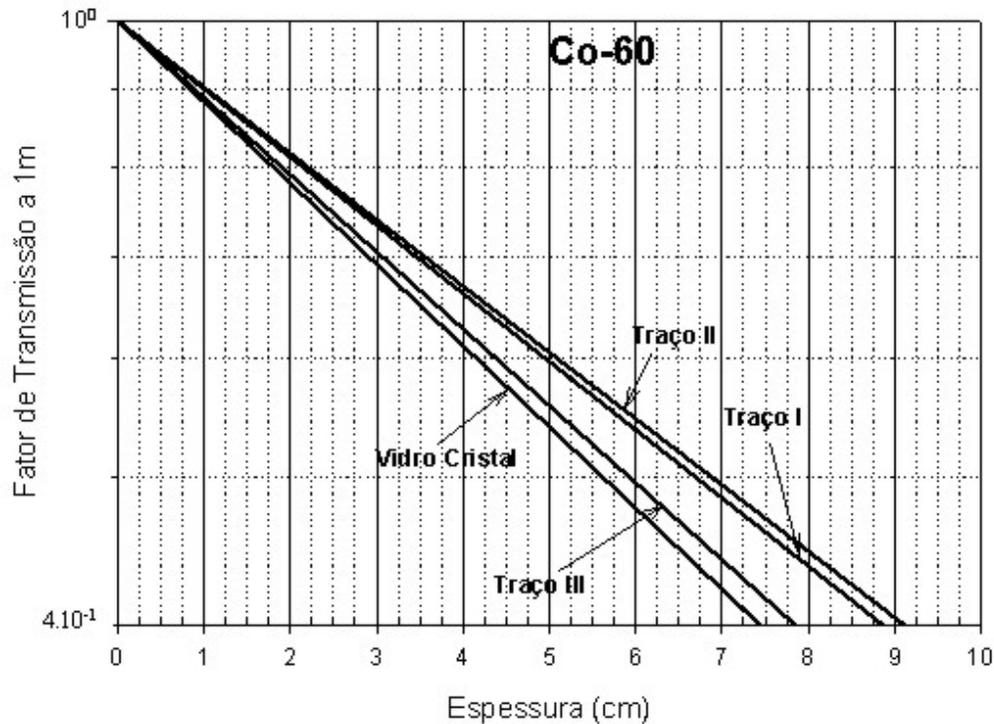


Figura 23 – Ampliação da Figura 22 no intervalo de 0 a 10 cm

As Figuras 15, 17, 19, 21 e 23 são respectivamente partes das Figuras 14, 16, 18, 20 e 22 anteriormente apresentadas, onde as curvas representativas do fator de transmissão foram ampliadas, apenas no intervalo de espessura de 0 a 2 cm, para raios-X, e de 0 a 10 cm para raios gama do ^{60}Co , para melhor visualização da camada semi-redutora (CSR). Pode-se observar na Figura 15, por exemplo, que para o material composto do Traço I e energia equivalente de 60 kV, a CSR é de 0,36 cm, ou seja, a espessura de 0,36 cm desta argamassa reduz 50% da intensidade do feixe de radiação. Resultados semelhantes podem ser aferidos nas Figuras 17, 19, 21 e 23.

4.3 CAMADAS SEMI-REDUTORAS (CSR) E DECI-REDUTORAS

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados das espessuras das camadas semi-redutoras e deci-redutoras obtidos para a barita e para o vidro cristal estudados para as diferentes energias e alguns resultados apresentados na literatura, para efeito de comparação, mesmo que esses sejam diferentes em todos os aspectos, isto é, no tipo de material, nas energias efetivas estudadas e densidades específicas. Entretanto, pode-se observar na mesma Tabela 15, que o comportamento das camadas semi-redutoras e

deci-redutoras em função da energia é semelhante. Por outro lado, verifica-se também, que para a energia do ^{60}Co as espessuras das camadas semi-redutoras e deci-redutoras da barita, praticamente não diferem em relação à do concreto, apesar das diferenças de densidade, exceto para a do concreto de barita, cuja diferença chega 14,5% e 3,9% para as camadas semi-redutoras e deci-redutoras da barita, respectivamente, o que já era esperado.

Tabela 15 – Camadas semi-redutoras e deci-redutoras dos materiais estudados e consultados, para raios-X e raios gama do ^{60}Co

	RESULTADOS OBTIDOS						LITERATURA			RESULTADOS OBTIDOS	
	BARITA						CONCRETO			VIDRO CRISTAL	
	CSR (cm) - Traço			CDR (cm) - Traço			Tensão	CSR (cm)	CDR (cm)	CSR (cm)	CDR (cm)
	1,91 g/cm ³	1,95 g/cm ³	2,26 g/cm ³	1,91 g/cm ³	1,95 g/cm ³	2,26 g/cm ³					
TENSÃO	I	II	III	I	II	III	2,35 g/cm ³			2,08 g/cm ³	
60 kV	0,36	0,35	0,35	1,20	1,20	1,20	50 kV	0,43	1,50	0,79	2,50
80 kV	0,61	0,60	0,57	2,00	2,00	1,90	70 kV	0,84	2,80	1,20	3,90
110 kV	0,93	0,94	0,86	3,10	3,10	2,90	100 kV	1,60	5,30	1,30	4,10
150 kV	1,50	1,50	1,40	5,00	5,10	4,60	150 kV	2,24	7,40	1,80	6,10
^{60}Co	6,70	6,90	5,90	22,30	22,90	19,80	^{60}Co	6,90	20,60	5,60	18,70

5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- A densidade específica da barita estudada ($2,26 \text{ g/cm}^3$), largamente utilizada no país, possui valores relativamente inferiores ao intervalo citado na literatura ($3,6 \text{ g/cm}^3$ a $4,1 \text{ g/cm}^3$);
- O valor da densidade específica obtida neste trabalho está em consonância com os valores obtidos em outros trabalhos para o mesmo tipo de material estudado;
- As curvas de atenuação, Transmissão e as espessuras das camadas semi e decimredutora são inéditas para os tipos de materiais (argamassa de barita, concreto de barita e vidro cristal) estudados, o que vai permitir a sua utilização no dimensionamento das blindagens para a radiação externa X e gama com precisão e segurança sem elevar o custo de proteção;
- O dimensionamento e o revestimento de paredes contra as radiações externas X e gama realizado pelo método da espessura equivalente, superestima os valores das espessuras das blindagens, acarretando elevação do custo de proteção e sobrecarga da estrutura do prédio da instalação;
- As curvas de atenuação e transmissão obtidas neste trabalho para a argamassa de barita, concreto de barita e vidro cristal apresentaram características e formatos coerentes e semelhantes aos obtidos na literatura para outros materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DOUGLAS J. SIMPKIN. **General solution to the shielding of medical X and γ ray by the NCRP report 49 methods** Health Physics, New York, v. 52, n.4, p. 431 - 436, 1987.
2. JAEGER, R.G.; BLIZARD, E. P.; CHILTON, A. B.; GROTENHUIS, M.; HÖNIG, A.; JAEGER, TH. A.; EISENLOHR, H. H. **Engineering compendium on radiation shielding**, v. 2, p. 1 - 262, Springer-Verlag, New York, 1975.
3. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENT, **REPORT 49: Structural Shielding Design and Evaluation for medical use of X rays of energies up to 10 MeV**, 1975.
4. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Report 26**, ICRP Publications. Elmsford, NY, Pergamon Press, 1977.
5. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Report 60**, ICRP Publications. Elmsford, NY, Pergamon Press, 1990.
6. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR: **Diretrizes básicas de radioproteção**. CNEN/NE - 3.01, 1988.
7. CEMBER H. **Introduction to Health Physics**. Third edition, USA: Pergamon Press, p. 418-462, 1996.
8. SCAFF, L. **Bases físicas da radiologia: diagnóstico e terapia**. São Paulo: Sarvier, 1979. 334p
9. BRASIL: CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE. **Resolução nº 6, de 1988. Normas técnicas gerais sobre o sistema nacional de vigilância sanitária**. Brasília, DF. 1988.

10. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR: **Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear.** CNEN/NE-3.05, 1996.
11. ALMEIDA, C. D.; ALMEIDA, C. E. **Metodologia para implantação do programa de controle e garantia de qualidade na radiologia de um hospital universitário.** In: Encontro Nacional de Aplicações Nucleares, v.2, p. 1161-1166, São Paulo, 1995.
12. BRASIL: MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 453, de 06 de junho de 1978: **Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico,** Brasília, DF, 1978.
13. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Radiological protection and safety in medicine,** ICRP Report 73, ICRP Publications. Elmsford, NY, Pergamon Press, 1996.
14. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: **Recommendations for the safe use and regulation of radiation sources in industry, medicine, research and teaching.** Safety Series, Nº 102, Viena, 1990.
15. UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION: **Sources and effects of ionizing radiation.** Report to the General Assembly, with Scientific annexes, New York: United Nations, 1993.
16. BRASIL: Lei Ordinária nº 6.514, de 22 de dezembro 1977. **Altera o Capítulo V do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo à segurança e medicina do trabalho.** Brasília, 1977.
17. BRASIL: MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **Aprova as normas regulamentadoras - NR, do Capítulo V do Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo à segurança e medicina do trabalho.** Brasília, 1978.

18. BRASIL: MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **NR-16: Atividades e operações perigosas**, Brasília, DF, 1978.

19. BRASIL: MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **NR-7: Programa de controle médico de saúde ocupacional**, Brasília, DF, 1978.

20. BRASIL: MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **NR-6: Equipamento de proteção individual**, Brasília, DF, 1978.

21. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS DISTRIBUIDORES DE VIDROS E CRISTAIS PLANOS. **Especificações sobre o vidro plano**. Impressão W. Roth S.A., p. 284-316, São Paulo, 1997.

22. FALCÃO, B. **Materiais de construção**. Editora Ao Livro Técnico S.A., vol. 1 e 2, Rio de Janeiro, 1992.

23. SILVEIRA, P. B.; FILHO, J. A. **Obtenção das características físicas do sulfato de bário, na argamassa de barita utilizada na blindagem das radiações externas X e γ** , TERCEIRA MOSTRA DE PESQUISA DE PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO, UNICAP, Pernambuco, 2002.

24. GOMES, J. S.; FILHO, J. A. **Obtenção das características físicas e químicas do sulfato de bário, na argamassa de barita utilizada na blindagem das radiações externas X e γ** , TERCEIRA MOSTRA DE PESQUISA DE PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO, UNICAP, Pernambuco, 2002.

25. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento de preparo, aplicação e manutenção de paredes e tetos com argamassas e materiais**. NBR 7222, Rio de Janeiro, 1994, 53p.

26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Método de ensaio de confecção e cura de corpos de prova cilíndricos e prismáticos.** NBR 5738, Rio de Janeiro, 1990, 41p.

27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos e prismáticos.** NBR 5739, Rio de Janeiro, 1990, 39p.

28. BLACK, G. R. **Methods of Soil Analysis**, p.371-391, Madison, 1983.

29. EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo**, 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. p.17-18

30. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and determining their response as a function of photon energy**, part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1, Viena, 1996.

ANEXO I: EQUAÇÕES OBTIDAS PELA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS DA BARITA E DO VIDRO CRISTAL

Tabela 16 – Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita – Traço I

RAIOS-X QUALIDADE	FATOR TRANSMISSÃO (EQUAÇÃO)	ATENUAÇÃO	
		EQUAÇÃO	r ²
W60	Y = - 0,8302X	Y = - 0,7794X - 0,7394	0,98549
W80	Y = - 0,4904X	Y = - 0,4724X - 0,5522	0,99102
W110	Y = - 0,3236X	Y = - 0,2993X - 0,4719	0,98504
W150	Y = - 0,2000X	Y = - 0,1931X - 0,1318	0,98929

Tabela 17 – Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita – Traço II

RAIOS-X QUALIDADE	FATOR TRANSMISSÃO (EQUAÇÃO)	ATENUAÇÃO	
		EQUAÇÃO	r ²
W60	Y = - 0,8563X	Y = - 0,8390X - 0,6131	0,99355
W80	Y = - 0,4989X	Y = - 0,4888X - 0,4978	0,98907
W110	Y = - 0,3202X	Y = - 0,2921X - 0,4648	0,98739
W150	Y = - 0,1966X	Y = - 0,1903X - 0,1177	0,99623

Tabela 18 – Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita – Traço III

RAIOS-X QUALIDADE	FATOR TRANSMISSÃO (EQUAÇÃO)	ATENUAÇÃO	
		EQUAÇÃO	r ²
W60	Y = - 0,8480X	Y = - 0,8224X - 0,6612	0,98231
W80	Y = - 0,5300X	Y = - 0,5047X - 0,5862	0,98469
W110	Y = - 0,3483X	Y = - 0,3244X - 0,4711	0,98802
W150	Y = - 0,2191X	Y = - 0,2063X - 0,1980	0,99211

Tabela 19 – Equações obtidas pela regressão linear dos dados do vidro cristal

RAIOS-X QUALIDADE	FATOR TRANSMISSÃO (EQUAÇÃO)	ATENUAÇÃO	
		EQUAÇÃO	r ²
W60	Y = - 0,3946X	Y = - 0,3717X - 0,6718	0,99483
W80	Y = - 0,2545X	Y = - 0,2593X - 0,4325	0,99865
W110	Y = - 0,2275X	Y = - 0,2063X - 0,4164	0,98899
W150	Y = - 0,3946X	Y = - 0,1611X - 0,0853	0,99917

Tabela 20 – Equações obtidas pela regressão linear dos dados da barita (Traços I, II, III) e do vidro cristal, quando irradiados com ⁶⁰Co

MATERIAL	FATOR TRANSMISSÃO (EQUAÇÃO)	ATENUAÇÃO	
		EQUAÇÃO	r ²
ARGAMASSA BARITA TRAÇO I	Y = - 0,0449X	Y = - 0,0450X - 0,5812	0,99838
ARGAMASSA BARITA TRAÇO II	Y = - 0,0436X	Y = - 0,0433X - 0,5764	0,99951
CONCRETO BARITA TRAÇO III	Y = - 0,0506X	Y = - 0,0510X - 0,5826	0,99958
VIDRO CRISTAL	Y = - 0,0534X	Y = - 0,0528X - 0,5720	0,99919

r²: coeficiente de regressão linear

ANEXO II – VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE A ARGAMASSA DE BARITA (TRAÇO I), QUANDO IRRADIADA COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA

Tabela 21 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	2,78E-01	8,33E-05	1,00E+00
1,15	1,57E-02	7,12E-06	5,65E-02
1,70	1,00E-02	5,60E-06	3,59E-02
2,80	9,02E-04	2,80E-06	3,24E-03
3,85	1,23E-04	2,15E-06	4,42E-04
5,10	3,15E-05	1,59E-06	1,13E-04
6,65	2,36E-05	7,20E-07	8,48E-05
7,90	2,12E-05	1,23E-06	7,63E-05
9,95	2,03E-05	1,77E-06	7,28E-05
13,80	1,77E-05	1,38E-06	6,35E-05
17,75	1,51E-05	1,58E-06	5,44E-05
20,05	1,47E-05	1,36E-06	5,29E-05

Tabela 22 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,52E-01	8,84E-05	1,00E+00
1,15	6,58E-02	5,71E-05	1,87E-01
1,70	6,27E-02	3,91E-05	1,78E-01
2,80	1,21E-02	8,35E-06	3,44E-02
3,85	3,07E-03	4,23E-06	8,74E-03
5,10	7,42E-04	2,72E-06	2,11E-03
6,65	2,53E-04	1,86E-06	7,19E-04
7,90	6,41E-05	1,86E-06	1,82E-04
9,95	5,13E-05	1,61E-06	1,46E-04
13,80	4,25E-05	1,65E-06	1,21E-04
17,75	3,62E-05	1,73E-06	1,03E-04
20,05	3,55E-05	1,37E-06	1,01E-04

Tabela 23 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	4,88E-01	9,24E-05	1,00E+00
1,15	1,28E-01	8,82E-05	2,61E-01
1,70	1,14E-01	5,54E-05	2,33E-01
2,80	4,56E-02	2,83E-05	9,34E-02
3,85	2,03E-02	9,78E-06	4,15E-02
5,10	8,56E-03	5,83E-06	1,75E-02
6,65	3,85E-03	3,09E-06	7,89E-03
7,90	9,38E-04	2,07E-06	1,92E-03
9,95	5,55E-04	1,68E-06	1,14E-03
13,80	1,54E-04	2,17E-06	3,16E-04
17,75	9,99E-05	1,19E-06	2,04E-04
20,05	9,01E-05	1,47E-06	1,84E-04

Tabela 24 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	8,45E-01	1,27E-04	1,00E+00
1,15	4,47E-01	1,93E-04	5,29E-01
1,70	4,03E-01	5,73E-04	4,76E-01
2,80	2,17E-01	8,61E-05	2,57E-01
3,85	1,26E-01	4,49E-05	1,49E-01
5,10	7,11E-02	1,74E-05	8,42E-02
6,65	3,78E-02	2,36E-05	4,47E-02
7,90	1,36E-02	1,80E-05	1,61E-02
9,95	9,10E-03	6,50E-06	1,08E-02
13,80	2,12E-03	3,06E-06	2,51E-03
17,75	6,42E-04	2,16E-06	7,60E-04
20,05	3,76E-04	2,11E-06	4,44E-04

ANEXO III – VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE A ARGAMASSA DE BARITA (TRAÇO II), QUANDO IRRADIADA COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA

Tabela 25 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	2,78E-01	8,88E-05	1,00E+00
1,00	3,16E-02	6,54E-05	1,13E-01
1,90	5,70E-03	4,52E-06	2,05E-02
2,90	1,07E-03	3,43E-06	3,84E-03
3,80	1,04E-04	1,70E-06	3,72E-04
4,40	6,78E-05	1,24E-06	2,43E-04
5,00	4,07E-05	1,06E-06	1,46E-04
6,00	2,54E-05	1,03E-06	9,13E-05
8,80	1,98E-05	1,57E-06	7,13E-05
11,70	1,81E-05	1,45E-06	6,49E-05
16,10	1,55E-05	1,69E-06	5,57E-05
20,00	1,35E-05	2,08E-06	4,84E-05

Tabela 26 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,52E-01	8,60E-05	1,00E+00
1,00	1,16E-01	4,03E-05	3,31E-01
1,90	3,56E-02	1,85E-05	1,01E-01
2,90	1,33E-02	1,57E-05	3,80E-02
3,80	2,72E-03	4,61E-06	7,73E-03
4,40	1,90E-03	2,68E-06	5,41E-03
5,00	1,21E-03	2,45E-06	3,44E-03
6,00	5,19E-04	1,84E-06	1,48E-03
8,80	7,18E-05	1,47E-06	2,04E-04
11,70	4,78E-05	2,02E-06	1,36E-04
16,10	3,92E-05	1,93E-06	1,11E-04
20,00	3,64E-05	1,42E-06	1,04E-04

Tabela 27 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	4,89E-01	1,77E-04	1,00E+00
1,00	1,68E-01	4,57E-05	3,44E-01
1,90	8,92E-02	2,79E-05	1,82E-01
2,90	4,91E-02	3,30E-05	1,00E-01
3,80	1,91E-02	1,93E-05	3,90E-02
4,40	1,46E-02	1,40E-05	2,99E-02
5,00	1,16E-02	9,00E-06	2,36E-02
6,00	6,64E-03	5,88E-06	1,36E-02
8,80	1,14E-03	2,08E-06	2,34E-03
11,70	3,41E-04	1,67E-06	6,97E-04
16,10	1,18E-04	7,17E-07	2,41E-04
20,00	9,33E-05	1,49E-06	1,91E-04

Tabela 28 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	8,46E-01	1,54E-04	1,00E+00
1,00	5,28E-01	1,49E-04	6,25E-01
1,90	3,38E-01	5,65E-05	4,00E-01
2,90	2,27E-01	1,06E-04	2,68E-01
3,80	1,27E-01	5,62E-05	1,50E-01
4,40	9,79E-02	4,56E-05	1,16E-01
5,00	8,05E-02	2,40E-05	9,52E-02
6,00	5,44E-02	3,15E-05	6,43E-02
8,80	1,50E-02	1,82E-05	1,78E-02
11,70	5,27E-03	1,19E-05	6,23E-03
16,10	1,12E-03	6,88E-06	1,33E-03
20,00	4,19E-04	2,21E-06	4,96E-04

ANEXO IV – VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE O CONCRETO DE BARITA (TRAÇO III), QUANDO IRRADIADO COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA

Tabela 29 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiada com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	2,79E-01	1,29E-04	1,00E+00
3,00	5,34E-04	2,41E-06	1,91E-03
4,00	6,39E-05	1,35E-06	2,29E-04
5,00	3,22E-05	1,71E-06	1,16E-04
7,00	2,05E-05	1,51E-06	7,36E-05
8,00	2,12E-05	2,17E-06	7,62E-05
9,00	2,06E-05	1,28E-06	7,40E-05
12,00	1,90E-05	1,37E-06	6,80E-05
15,00	1,78E-05	1,41E-06	6,39E-05
17,00	1,62E-05	1,63E-06	5,81E-05
20,00	1,59E-05	2,06E-06	5,70E-05

Tabela 30 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiada com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,51E-01	8,83E-05	1,00E+00
3,00	7,37E-03	5,15E-06	2,10E-02
4,00	1,54E-03	2,55E-06	4,39E-03
5,00	6,38E-04	2,13E-06	1,82E-03
7,00	1,19E-04	1,93E-06	3,38E-04
8,00	6,95E-05	1,87E-06	1,98E-04
9,00	5,15E-05	1,81E-06	1,47E-04
12,00	4,28E-05	1,55E-06	1,22E-04
15,00	4,11E-05	1,48E-06	1,17E-04
17,00	3,93E-05	1,57E-06	1,12E-04
20,00	3,64E-05	1,51E-06	1,04E-04

Tabela 31 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiada com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	4,91E-01	9,31E-05	1,00E+00
3,00	3,14E-02	1,35E-05	6,40E-02
4,00	1,20E-02	9,74E-06	2,44E-02
5,00	6,39E-03	7,25E-06	1,30E-02
7,00	1,81E-03	2,54E-06	3,68E-03
8,00	9,82E-04	2,62E-06	2,00E-03
9,00	5,03E-04	1,99E-06	1,02E-03
12,00	1,64E-04	1,54E-06	3,33E-04
15,00	1,08E-04	9,39E-07	2,20E-04
17,00	9,95E-05	1,43E-06	2,03E-04
20,00	9,07E-05	1,70E-06	1,85E-04

Tabela 32 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiada com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	8,45E-01	1,51E-04	1,00E+00
3,00	1,62E-01	5,56E-05	1,92E-01
4,00	8,51E-02	4,71E-05	1,01E-01
5,00	5,37E-02	3,15E-05	6,35E-02
7,00	2,25E-02	2,17E-05	2,66E-02
8,00	1,19E-02	8,10E-06	1,40E-02
9,00	6,95E-03	4,38E-06	8,22E-03
12,00	2,03E-03	2,98E-06	2,40E-03
15,00	7,11E-04	1,65E-06	8,41E-04
17,00	4,01E-04	1,59E-06	4,74E-04
20,00	2,77E-04	1,51E-06	3,28E-04

ANEXO V – VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE O VIDRO CRISTAL, QUANDO IRRADIADO COM RAIOS-X, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA

Tabela 33 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W60, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	2,77E-01	3,75E-05	1,00E+00
1,00	8,78E-02	8,01E-05	3,17E-01
2,00	3,33E-02	2,24E-05	1,20E-01
3,00	1,30E-02	5,63E-06	4,71E-02
4,00	6,81E-03	3,53E-06	2,46E-02
5,00	2,89E-03	4,59E-06	1,04E-02
6,00	1,32E-03	2,70E-06	4,76E-03
7,00	6,02E-04	1,53E-06	2,17E-03

Tabela 34 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W80, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,50E-01	6,71E-05	1,00E+00
1,00	2,24E-01	1,18E-03	6,40E-01
2,00	1,13E-01	4,72E-05	3,22E-01
3,00	5,68E-02	2,73E-05	1,62E-01
4,00	3,52E-02	2,04E-05	1,01E-01
5,00	1,86E-02	2,13E-05	5,33E-02
6,00	1,03E-02	8,31E-06	2,95E-02
7,00	5,64E-03	4,35E-06	1,61E-02

Tabela 35 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W110, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	4,89E-01	1,48E-04	1,00E+00
1,00	2,12E-01	8,01E-05	4,33E-01
2,00	1,33E-01	2,69E-05	2,71E-01
3,00	8,18E-02	4,16E-05	1,67E-01
4,00	5,74E-02	3,12E-05	1,17E-01
5,00	3,56E-02	6,86E-05	7,28E-02
6,00	2,31E-02	5,11E-05	4,72E-02
7,00	1,47E-02	1,01E-05	3,00E-02

Tabela 36 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com raios-X, Qualidade W150, em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/mA min)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	8,47E-01	1,86E-04	1,00E+00
1,00	5,63E-01	1,47E-04	6,64E-01
2,00	3,84E-01	1,93E-04	4,53E-01
3,00	2,57E-01	5,52E-05	3,04E-01
4,00	1,92E-01	4,83E-05	2,26E-01
5,00	1,30E-01	1,14E-04	1,53E-01
6,00	8,97E-02	3,87E-05	1,06E-01
7,00	6,09E-02	3,50E-05	7,18E-02

ANEXO VI – VALORES DE ATENUAÇÃO E TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO SOBRE A BARITA (TRAÇOS I, II, III) E SOBRE O VIDRO CRISTAL, QUANDO IRRADIADOS COM ^{60}Co , EM FUNÇÃO DA ESPESSURA

Tabela 37 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço I), quando irradiada com ^{60}Co , em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/h)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,80E+00	4,80E-03	1,00E+00
1,15	3,34E+00	3,92E-03	8,80E-01
1,70	3,31E+00	4,42E-03	8,71E-01
2,80	2,86E+00	5,71E-03	7,52E-01
3,85	2,54E+00	9,17E-03	6,67E-01
5,10	2,31E+00	2,93E-03	6,07E-01
6,65	1,92E+00	4,03E-03	5,06E-01
7,90	1,56E+00	2,64E-03	4,12E-01
9,95	1,36E+00	4,77E-03	3,57E-01
13,80	9,22E-01	3,50E-03	2,42E-01
17,75	6,22E-01	2,81E-03	1,64E-01
20,05	4,71E-01	2,07E-03	1,24E-01

Tabela 38 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre a argamassa de barita (Traço II), quando irradiada com ^{60}Co , em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/h)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,80E+00	4,80E-03	1,00E+00
1,00	3,43E+00	3,58E-03	9,02E-01
1,90	3,14E+00	4,79E-03	8,26E-01
2,90	2,85E+00	3,59E-03	7,51E-01
3,80	2,60E+00	3,67E-03	6,83E-01
4,40	2,41E+00	3,39E-03	6,33E-01
5,00	2,29E+00	4,64E-03	6,02E-01
6,00	2,06E+00	3,69E-03	5,42E-01
8,80	1,52E+00	2,67E-03	4,01E-01
11,70	1,15E+00	3,57E-03	3,03E-01
16,10	7,54E-01	3,00E-03	1,98E-01
20,00	5,25E-01	3,38E-03	1,38E-01

Tabela 39 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o concreto de barita (Traço III), quando irradiada com ^{60}Co , em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/h)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,78E+00	7,46E-03	1,00E+00
3,00	2,68E+00	5,12E-03	7,07E-01
4,00	2,36E+00	3,60E-03	6,24E-01
5,00	2,13E+00	3,44E-03	5,63E-01
7,00	1,68E+00	3,26E-03	4,43E-01
8,00	1,52E+00	4,49E-03	4,02E-01
9,00	1,35E+00	3,16E-03	3,57E-01
12,00	9,62E-01	3,30E-03	2,54E-01
15,00	6,47E-01	1,98E-03	1,71E-01
17,00	5,21E-01	2,94E-03	1,38E-01
20,00	3,60E-01	2,58E-03	9,51E-02

Tabela 40 – Valores de atenuação e transmissão da radiação sobre o vidro cristal, quando irradiado com ^{60}Co , em função da espessura

Espessura (cm)	Atenuação (mGy/h)	δ (desvio padrão)	Fator de Transmissão
0,00	3,76E+00	6,18E-03	1,00E+00
1,00	3,30E+00	3,57E-03	8,78E-01
2,00	2,91E+00	4,75E-03	7,73E-01
3,00	2,55E+00	2,04E-03	6,79E-01
4,00	2,32E+00	4,31E-03	6,17E-01
5,00	2,04E+00	3,42E-03	5,42E-01
6,00	1,81E+00	3,93E-03	4,80E-01
7,00	1,59E+00	4,40E-03	4,22E-01

ANEXO VII: RESULTADO DOS TESTES DO SISTEMA DE MEDIDAS

Medida da Corrente de Fuga

$L_i = 2,39 \text{ E}+00\text{nC}$ (leitura inicial)

$L_f = 2,41 \text{ E}+00\text{nC}$ (leitura final)

Tempo de leitura (contagem) = 1500 s

$I_{\text{fuga}} = 9,87 \times 10^{-15} \text{ A}$ (corrente de fuga)

Corrente de controle da câmara NE 2575C, Série 518

Data: 16/04/2003

Eletrômetro NE 2670, Série 148

$F_e = 1\text{C/ue}$

Polaridade da câmara -250 Volts, 600cc

Fonte Radioativa de Sr-90 mod. NE 2576A, Série 330

Tabela 41 - Medida da Estabilidade

Medidas	Leitura (nC)	Tempo (s)	Corrente (A)	Temperatura (graus C)	Pressão (kPa)	phy (t , p)	Corrente Corrigida (A)
1	8,93E-01	60	1,489E-11	22,2	1010,02	1,011	1,505E-11
2	8,93E-01	60	1,489E-11	22,2	1010,00	1,011	1,505E-11
3	8,94E-01	60	1,489E-11	22,2	1009,99	1,011	1,505E-11
4	8,94E-01	60	1,489E-11	22,2	1010,01	1,011	1,506E-11
5	8,94E-01	60	1,489E-11	22,2	1010,03	1,011	1,505E-11
6	8,94E-01	60	1,489E-11	22,2	1010,04	1,011	1,505E-11
7	8,94E-01	60	1,489E-11	22,2	1010,04	1,011	1,505E-11
8	8,94E-01	60	1,490E-11	22,2	1010,00	1,011	1,506E-11
9	8,94E-01	60	1,490E-11	22,2	1010,01	1,011	1,506E-11
10	8,94E-01	60	1,490E-11	22,0	1009,98	1,010	1,505E-11
Média							1,505E-11
desvio							3,116E-15
C.Var.%							0,02

Leitura da corrente de referência da fonte radioativa “ L_C ”

$L_C = 1,623 \times 10^{-11}$ Ampére, em 14/12/1999

Correção para o decaimento radioativo da fonte de Sr-90

Meia vida da fonte “ $T_{1/2}$ ” = 10402,5 dias

Tempo decorrido (ΔT) = 1219,00 dias

Fator de correção = 1,0846

Leitura da corrente de referência corrigida da fonte radioativa “ L_{CR} ”

$L_{CR} = 1,633 \times 10^{-11}$ Ampére

Diferença para a corrente de referência (ΔL)

$\Delta L = 0,62 \%$