



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

JORGE ALEXANDRE GOMES LINS

**APLICAÇÃO DO MATERIAL GESSO E DA MISTURA GESSO E BARITA COMO
BLINDAGEM PARA BAIXAS ENERGIAS NA ÁREA DE RADIODIAGNÓSTICO**

Recife

2019

JORGE ALEXANDRE GOMES LINS

**APLICAÇÃO DO MATERIAL GESSO E DA MISTURA GESSO E BARITA COMO
BLINDAGEM PARA BAIXAS ENERGIAS NA ÁREA DE RADIODIAGNÓSTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Indústria e Medicina.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Aurélio Pereira dos Santos

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

- L759a Lins, Jorge Alexandre Gomes.
Aplicação do material gesso e da mistura gesso e barita como blindagem para baixas energias na área de radiodiagnóstico. / Jorge Alexandre Gomes Lins. - Recife, 2019.
96 f. : il.
- Orientador: Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima.
Coorientador: Prof. Dr. Marcus Aurélio Pereira dos Santos.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2019.
Inclui referências.
1. Engenharia nuclear. 2. Gesso. 3. Barita. 4. Mistura. 5. Blindagem. 6. Qualidades de raios X. I. Lima, Fernando Roberto de Andrade, orientador. II. Santos, Marcus Aurélio Pereira dos, coorientador. III. Título.

JORGE ALEXANDRE GOMES LINS

**APLICAÇÃO DO MATERIAL GESSO E DA MISTURA GESSO E BARITA COMO
BLINDAGEM PARA BAIXAS ENERGIAS NA ÁREA DE RADIODIAGNÓSTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 05/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Helen Jamil Khoury (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. José Wilson Viera (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco e Universidade de Pernambuco

Prof^o. Dr. Alex Cristóvão Holanda de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos e também dificuldades encontradas no caminho por mim trilhado, pela cruz carregada e pelo senso de resiliência que isso me trouxe ao final de tudo.

Gratidões eternas a Laurinete Lins e Aurino Lins que sempre foram verdadeiros pais, ainda que avós. Por todo puxão de orelha e incentivo ao estudo acima de tudo, pela compreensão, carinho e amor, nos pequenos e grandes detalhes. Por me tornarem uma pessoa melhor “apenas” com o afeto. A eles devo tudo, pois sem eles, não seria quem sou hoje.

Aos meus orientadores Dr. Fernando Lima e Dr. Marcus Aurélio agradeço por me mostrarem que pesquisa científica e humanidade podem e devem andar juntas. Por serem bons modelos de pessoas, profissionais e pesquisadores, ao qual tenho a honra de poder ter conhecido e usá-los como espelho no decorrer da minha vida.

Aos amigos e colegas Victor, Álvaro, Whoody, Isis e tantos outros que me ajudaram direta ou indiretamente no decorrer de todo trabalho, sempre me dando uma palavra de apoio ou confiança.

A Katarzina e a todos os colaboradores diretos e indiretos do ITEP, ao qual me proporcionaram variados conhecimentos.

Agradecimento mais do que especial a João, ao qual me ajudou muito, proporcionando que o trabalho fosse em frente com a doação do material barita.

Aos servidores do CRCN-NE ao qual sempre foram muito amigáveis e solícitos diante de minhas dúvidas e pedidos nos mais diversos setores. Agradeço a Renata, “Jimmy” e Roberto por me abrirem as portas e os mais variados ensinamentos na área da Metrologia. Agradeço ao Dr. Elvis pelo auxílio nas leituras de diversas amostras, assim como todos os técnicos do DIAMB. Estendo também os agradecimentos para Jô e Márcio, no qual foram de fundamental importância na reta final da Dissertação.

A todos os servidores do DEN, em especial a Dr^a. Helen, que abriu as portas da Metrologia e deu diversas sugestões para melhora do trabalho. As gratidões também se estendem a todos os técnicos da Metrologia que sempre me ajudaram em muito nessa importante etapa da pesquisa.

Ao Dr. Wilson por ter aberto as portas para pesquisa científica ainda na minha graduação e que sempre esteve disposto a ajudar aqueles que verdadeiramente querem virar pesquisadores.

Assim como agradeço a utilização sempre que necessário do Laboratório de Dosimetria Numérica e as pessoas que de lá fazem parte.

Agradeço ao Dr. Alex Oliveira por toda ajuda, sugestões e críticas acerca do trabalho.

Fico grato a todos os Doutores que fizeram parte da banca desde o primeiro seminário até a defesa do Mestrado. Todas as sugestões e críticas fizeram deste, um trabalho melhor!

E uma gratidão mais que especial a CAPES pelo apoio financeiro ofertado, a UFPE e em especial ao DEN, por ter sido instrumento mais do que necessário para que eu pudesse conquistar algo tão importante em minha vida, meu título de Mestre.

RESUMO

Ao longo dos últimos anos, diversos materiais utilizados em alvenaria, tais como o chumbo, concreto, blocos cerâmicos e tijolo, têm sido estudados para utilização como blindagem contra as radiações ionizantes de diferentes energias em instalações radioativas. Na área de radiodiagnóstico, o chumbo e a barita são os materiais mais utilizados como blindagem, porém para feixes de radiação X de baixa energia, como em mamografia e odontologia, o material gesso pode ser empregado, como afirma o Conselho Nacional sobre Proteção Radiológica e Medidas (*National Council on Radiation Protection & Measurements*) por meio do seu relatório de número 147 (NCRP Report N° 147). Esse trabalho desenvolveu materiais de gesso e também de mistura gesso e barita com formatos de placas com área de 10 x 10 centímetros, tendo como objetivo caracterizar físico-quimicamente e verificar a viabilidade do uso desses materiais como blindagem contra a radiação X de baixas energias, utilizando-se de feixes de raios X odontológicos e mamográficos padronizados em laboratórios de metrologia. A partir da irradiação foi possível obter as curvas de transmissão, determinar as camadas semirredutoras (CSR) e decirredutoras (CDR), bem como adquirir os diferentes espectros para cada material. O material de mistura gesso e barita teve uma melhor resposta de blindagem em relação ao material de gesso puro, contudo ambos podem ser considerados como bons atenuadores contra a radiação X de baixas energias.

Palavras-chave: Gesso. Barita. Mistura. Blindagem. Qualidades de raios X.

ABSTRACT

Over the past few years, various materials used in masonry, such as lead, concrete, ceramic blocks and brick, have been studied for use as shielding against ionizing radiation from different energies in radioactive facilities. In the area of diagnostic radiology, lead and barite are the most used materials as shielding, but for bundles of low energy X radiation, as in mammography and dentistry, plaster material can be used, as affirmed by the National Council on Radiological Protection and Measures through its report number 147 (NCRP Report N° 147). This work developed plaster phantoms as well as gypsum & barite mixing with plate formats with a 10 x 10 centimeter area, aiming to characterize physico-chemically and verify the feasibility of using these materials as shielding against low-energy X-ray radiation, using standard dental and mammographic X-ray bundles in metrology laboratories. From the irradiation, it was possible to obtain the transmissions curves, to discover the Half Value Layers (HVL) and the Tenth Value Layers (TVL), as well as to acquire the different spectra for each material. The gypsum & barite mixing material had a better shielding response compared to pure gypsum material, however both can be considered as good attenuators against low energy X radiation.

Keyword: Gypsum. Barite. Mixture. Shielding. Qualities of X-ray.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema do efeito fotoelétrico.....	24
Figura 2 –	Esquema do efeito Compton	25
Figura 3 –	Esquema de feixes de raios X em condição de boa geometria	26
Figura 4 –	Regiões do Polo Industrial Gesseiro de Araripina em Pernambuco	33
Figura 5 –	Montagem física de sala de radiodiagnóstico com folhas de Chumbo	36
Figura 6 –	Construção de sala de raios X com argamassa de barita.....	37
Figura 7 –	Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.....	40
Figura 8–	Arranjo experimental da equivalência em chumbo, utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos	40
Figura 9 –	Molde de acrílico vazado para obtenção da placa de gesso	45
Figura 10 –	Esquema de corte para obtenção de 3 placas de gesso 10x10 cm ²	45
Figura 11 –	Peneira para separação granulométrica	46
Figura 12 –	Aparelho de Vicat modificado com agulha para medição do tempo de pega	47
Figura 13 –	Secagem da placa de mistura gesso e barita.....	48
Figura 14 –	Moagem de placa	50
Figura 15 –	Peneira.....	50
Figura 16 –	Amostras em recipientes lacrados	51
Figura 17 –	Pesagem da amostra	51
Figura 18 –	Leitura das amostras no EDXRF.....	52
Figura 19 –	Arranjo experimental para irradiação das placas de gesso.....	54
Figura 20 –	Posicionamento da Câmara de ionização	54
Figura 21 –	Esquema do arranjo experimental em condições de boa geometria no CRCN-NE	55
Figura 22 –	Arranjo experimental para irradiação das placas de gesso e gesso e barita	59
Figura 23 –	Esquema do arranjo experimental em condições de boa geometria no DEN/UFPE.....	60
Figura 24 –	Exemplo de espectros no software usado.....	62
Figura 25 –	Esquema de calibração de um detector CdTe	63
Figura 26 –	Posicionamento do detector CdTe a partir do laser lateral	63

Figura 27 –	Detector CdTe e o seu conjunto de colimadores.....	64
Figura 28 –	Arranjo para obtenção dos espectros de raios X	64
Figura 29 –	Exemplo do arquivo .mca	65
Figura 30 –	Curva de calibração canal/energia	65
Figura 31 –	Exemplo de gráfico retratando um espectro medido.....	66
Figura 32 –	Placas de gesso com suas espessuras aproximadas: 2,5 mm, 5 mm e 8 mm	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Importância relativa dos diversos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material	23
Gráfico 2 –	Curva de atenuação de um feixe de raios X em um material absorvedor para determinação das CS.	27
Gráfico 3 –	Curva de atenuação obtida para a qualidade W60 em função da espessura da barita.....	28
Gráfico 4 –	Curvas de transmissão em função da espessura da argamassa de barita.....	31
Gráfico 5 –	Curvas de transmissão em função da espessura do concreto de barita	31
Gráfico 6 –	Comparação entre as curvas de atenuação para cada tipo de placa do material gesso em função da espessura na qualidade N60.....	39
Gráfico 7 –	Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.....	41
Gráfico 8 –	Exemplo da construção de uma curva de transmissão	57
Gráfico 9 –	Comparação de espectros até 28 keV com e sem filtração adicional	75
Gráfico 10 –	Comparação de espectros até 35 keV com e sem filtração adicional	76
Gráfico 11 –	Espectro gerado em alvo de Tungstênio com e sem filtro adicional de Rh	77
Gráfico 12 –	Espectros de feixes diretos (sem filtração adicional).....	77
Gráfico 13 –	Espectros na qualidade RQR-M2.....	78
Gráfico 14 –	Comparação de espectros na qualidade WMV 28 – Placas de gesso	79
Gráfico 15 –	Comparação de espectros na qualidade WMV 28 – Placas de mistura gesso e barita.....	80
Gráfico 16 –	Comparação de espectros na qualidade WMV 35 – Placas de gesso	82
Gráfico 17 –	Comparação de espectros na qualidade WMV 35 – Placas de mistura gesso e barita.....	83
Gráfico 18 –	Comparação das curvas de transmissão para DRQ1.....	85
Gráfico 19 –	Comparação das curvas de transmissão para DRQ2.....	86
Gráfico 20 –	Comparação das curvas de transmissão para DRQ3.....	86
Gráfico 21 –	Comparação das curvas de transmissão para WMV28	88
Gráfico 22 –	Comparação das curvas de transmissão para WMV35.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Limites de doses anuais	19
Tabela 2 –	Interações possíveis de ocorrer para radiação eletromagnética ionizante e consequências das interações	23
Tabela 3 –	Qualidade dos feixes de raios X, nível de radioproteção	28
Tabela 4 –	CSR e CDR das placas de barita nas qualidades da ISO 4037	28
Tabela 5 –	Exigências químicas do gesso para construção civil segundo ABNT/NBR – 13207	33
Tabela 6 –	Reserva e produção mundial da Barita no ano de 2014 e 2015	35
Tabela 7 –	Média das densidades de materiais utilizados na construção de salas de radiodiagnóstico	36
Tabela 8 –	Espessuras (mm) de materiais equivalentes ao chumbo aproximada para vários materiais, em condições de feixes largos	38
Tabela 9 –	Qualidades de raios X odontológico implantadas no Laboratório de Raios X Odontológico do CRCN-NE	42
Tabela 10 –	Qualidades de raios X odontológico implantadas no Laboratório de raios X 320 kV do CRCN-NE	43
Tabela 11 –	Espessuras das placas de gesso com granulometria do fabricante utilizadas no ensaio e suas combinações	56
Tabela 12 –	Espessuras das placas de gesso com granulometria de 200 mesh utilizadas no ensaio e suas combinações	56
Tabela 13 –	Espessuras das placas de gesso com granulometria de 325 mesh utilizadas no ensaio e suas combinações	57
Tabela 14 –	Qualidades dos feixes de mamografia (WMV) implantados no LMRI-DEN/UFPE.....	59
Tabela 15 –	Espessuras das placas de mistura gesso e barita utilizados no ensaio e suas combinações	61
Tabela 16 –	Espessuras das placas de gesso com granulometria do fabricante utilizadas no ensaio e suas combinações	61
Tabela 17 –	Caracterização física das placas de gesso com granulometria do fabricante	68
Tabela 18 –	Caracterização física das placas de gesso com granulometria 200 mesh.....	68

Tabela 19 –	Caracterização física das placas de gesso com granulometria de 325 mesh....	69
Tabela 20 –	Caracterização física das placas de mistura gesso e barita	70
Tabela 21 –	Comparação entre o Certificado de Análise e a leitura obtida para o SRM99a no EDXRF	71
Tabela 22 –	Análise do pó de gesso	72
Tabela 23 –	Análise da placa de gesso.....	72
Tabela 24 –	Análise do pó de barita.....	73
Tabela 25 –	Análise da placa de mistura gesso e barita.....	74
Tabela 26 –	Comparação entre os picos do espectro medido WMV28 e NIST	75
Tabela 27 –	Comparação entre os picos do espectro medido WMV35 e NIST	76
Tabela 28 –	Número total de fótons de raios X em diferentes placas – WMV 28.....	81
Tabela 29 –	Número total de fótons de raios X em diferentes placas – WMV 35.....	84
Tabela 30 –	CSR e CDR das placas de gesso nas qualidades DRQ1	87
Tabela 31 –	CSR e CDR das placas de gesso e mistura gesso barita nas qualidades WMV	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	18
2.1.1	Princípios básicos da proteção radiológica	18
2.1.2	Fatores básicos da proteção radiológica	20
2.2	PROTEÇÃO RADIOLÓGICA NO BRASIL	20
2.3	INTERAÇÃO DAS RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS IONIZANTES COM A MATÉRIA	21
2.3.1	Efeito fotoelétrico.....	24
2.3.2	Efeito Compton (ou espalhamento inelástico).....	25
2.4	CAMADA SEMIRREDUTORA (CSR)	26
2.5	COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO	29
2.5.1	Coeficiente de atenuação linear (μ).....	29
2.6	CURVAS DE TRANSMISSÃO PARA FINS DE BLINDAGEM EM RADIOPROTEÇÃO	30
2.7	O GESSO.....	32
2.8	A BARITA.....	34
2.9	O USO DE MATERIAIS COMO BLINDAGEM NA ÁREA DE RADIODIAGNÓSTICO	35
2.10	QUALIDADES DE FEIXES DE RAIOS X DIAGNÓSTICOS	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	CONFECÇÃO DAS PLACAS	44
3.1.1	Placas de gesso.....	44
3.1.2	Placas de mistura gesso e barita	48
3.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS.....	49
3.2.1	Moagem	49
3.2.2	Pesagem e preparação das amostras.....	51

3.2.3	Leitura no EDXRF	52
3.3	IRRADIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PLACAS	52
3.3.1	Irradiação experimental das placas de gesso no CRCN-NE.....	53
3.3.2	Irradiação e espectrometria das placas de gesso e mistura gesso e barita no DEN.....	58
3.3.2.1	Irradiação das placas de gesso e mistura gesso e barita.....	58
3.3.2.2	Espectrometria das placas de gesso e mistura gesso e barita.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	CONFECÇÃO DAS PLACAS	67
4.1.1	Placas de gesso.....	67
4.1.2	Placas de mistura gesso e barita	69
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS.....	70
4.2.1	Resultados da caracterização quali-quantitativa dos materiais	70
4.3	ESPECTROMETRIA DAS PLACAS DE GESSO E DA MISTURA GESSO E BARITA IRRADIADAS NO DEN.....	74
4.4	CURVAS DE TRANSMISSÃO PARA AS PLACAS DE GESSO E DA MISTURA GESSO E BARITA	84
4.4.1	Curvas de transmissão para as placas de gesso irradiadas no CRCN-NE.....	84
4.4.2	Curvas de transmissão para as placas de gesso e da mistura gesso e barita irradiadas no DEN.....	88
5	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Wright (1998) e Barros (2001), conforme citado por Gondim (2009), a radiologia diagnóstica está em evolução contínua, em resposta ao desenvolvimento tecnológico, permitindo diagnósticos com qualidade cada vez melhor. Entretanto, faz-se necessário o estudo de materiais aplicados como barreiras de proteção, objetivando reduzir a intensidade das radiações ionizantes quando Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE), Indivíduos do Público (IP) e pacientes em geral são expostos, além de aperfeiçoar o dimensionamento e aumentar o conhecimento das propriedades de atenuação para outros materiais.

A blindagem serve para atenuar o nível de radiação no ambiente que se deseja controlar. A eficiência de uma blindagem depende do material a ser utilizado, do tipo de radiação e da energia emitida pela fonte, assim como da geometria do campo irradiado (ANDRADE, 2011).

Em salas de radiodiagnóstico utilizam-se materiais como argamassas baritadas, concreto e até mesmo folhas de chumbo para blindá-las contra feixes de raios X, uma vez que os mesmos apresentam uma alta densidade ($\rho = 3$ a $4,6 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 2,35$ a $2,5 \text{ g/cm}^3$ e $\rho = 11,4 \text{ g/cm}^3$, respectivamente), característica importante quando se leva em conta a radioproteção. Porém, além da eficiência de blindagem, é necessário que o material utilizado atenda as necessidades específicas de construção e/ou aplicação visando um bom custo-benefício, onde o material gesso destaca-se por seu baixo custo econômico. Segundo a *National Council on Radiation Protection & Measurements* (NCRP 147, 2004), placas de gesso apesar de sua baixa densidade (quando comparado aos materiais normalmente usados como blindagem no radiodiagnóstico), podem ser usadas como blindagem se levado em conta feixes de raios X de baixas energias no radiodiagnóstico, como os utilizados na área de mamografia com feixes entre 28 keV a 35 keV e odontologia na faixa de 46 keV a 65 keV.

A motivação para o desenvolvimento desta dissertação partiu da necessidade do estudo de novos materiais e de suas características físico-químicas para utilização na área de radiodiagnóstico. Desta forma, a avaliação do material gesso, como blindagem, faz-se de grande valia, visto que o presente estudo científico foi realizado no estado de Pernambuco, onde está situado o Pólo Gesseiro do Araripe, no qual se tem a maior produção de gesso do Brasil e onde esse material pode ser encontrado com um grande percentual de pureza. Além do gesso puro, foi utilizada uma mistura de gesso com barita com o objetivo de se alcançar uma maior densidade do material irradiado, obtendo-se assim uma melhor atenuação.

As medidas experimentais foram realizadas em diferentes laboratórios de metrologia as quais tinham qualidades de referência WMV implantadas (a nomenclatura WMV significa que

o alvo do equipamento deve ser de tungstênio (W) com filtro de molibdênio (Mo) para feixes diretos (V)) – qualidades de raios X que caracterizam feixes de mamografia de acordo com os padrões do laboratório Alemão Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), além de feixes de raios X aplicados na área de odontologia, agregando, desta forma, valor e confiabilidade aos dados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O estudo visa caracterizar dois tipos diferentes de materiais, o gesso e uma mistura de gesso e barita, como blindagem contra feixes de raios X de baixa energia utilizando qualidades de raios X odontológicas e de mamografia (feixes de referência WMV).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física e quimicamente o material gesso e o material gesso e barita;
- Irradiar o material gesso em diferentes qualidades de odontologia;
- Irradiar os dois tipos de materiais em diferentes qualidades de mamografia;
- Construir curvas de transmissão para o material gesso e mistura gesso e barita;
- Obter e comparar as camadas semirredutora e decirredutora para cada tipo de material;
- Obter e comparar os espectros para o material gesso e da mistura gesso e barita para a qualidade WMV 28 e WMV 35;
- Otimizar: facilidade e tempo de construção da blindagem em relação a um bom material atenuador para baixas energias, agregado a um baixo custo financeiro;
- Comparar o desempenho em relação a blindagem dos dois materiais usados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A manutenção de níveis de radiação ionizante nos limites exigidos pelas normas nacionais e internacionais é um tema amplamente abordado pela comunidade científica de todo o mundo, sendo algumas delas: *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), *Internacional Commission on Radiaton Units & Measurements* (ICRU), *National Council on Radiation Protection & Measurements* (NCRP), *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR), *International Atomic Energy Agency* (IAEA), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Ministério da Saúde/Agência Nacional de Vigilância Sanitária (MS/ANVISA).

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) foi criada em 1928, durante o Congresso Internacional de Radiologia, com o nome de Comitê Internacional de Proteção aos Raios-X e Rádio (IXRPC). Em 1950, os nomes e a estrutura dessa comissão foram mudados através das recomendações do Segundo Comitê Internacional de Proteção aos Raios-X e Rádio, passando a se chamar *International Commission on Radiological Protection* (ICRP). A ICRP é uma organização sem fins lucrativos cujo principal objetivo é a sistematização de recomendações de radioproteção. Para atingir este objetivo, a ICRP tem trabalhado em conjunto com a Comissão Internacional de Unidades e Medidas das Radiações (ICRU) que define as unidades utilizadas em radioproteção (ICRP, 2007).

Como explica Pereira, Kelecom e Pereira (2015), a ICRP mantém relações oficiais com o Comitê Científico sobre os Efeitos da Radiação Atômica da Organização das Nações Unidas (UNSCEAR) que pesquisa a literatura sobre os efeitos biológicos das radiações. Baseado nestas pesquisas, a ICRP publica suas recomendações. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), então, organiza as recomendações feitas pela ICRP como normas e guias. Finalmente, os países membros aceitam as recomendações da AIEA em suas próprias leis.

2.1.1 Princípios básicos da proteção radiológica

A proteção radiológica aplicada a práticas que envolvem fontes de radiação ionizante deve seguir as recomendações de conduta citadas pelos órgãos internacionais. Segundo a Publicação de número 103 da ICRP (ICRP, 2007), a proteção radiológica está baseada em três

princípios básicos e atualmente é adotada pela CNEN na sua Norma NN 3.01 - Resolução 164/14, Diretrizes Básicas de Radioproteção (CNEN, 2014):

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 quantos 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 pela ICRP-103 e no Brasil encontrada na Norma 3.01 – Resolução 164/14 (Tabela 1).

Tabela 1 – Limites de doses anuais.

Dose equivalente	Trabalhador (mSv)	Indivíduo do público (mSv)
Dose equivalente efetiva (corpo inteiro)	20	1
Dose equivalente para o cristalino	20	15
Dose equivalente para a pele	500	50
Dose equivalente nas extremidades	500	--

Fonte: CNEN NN 3.01, 164/14 (Adaptada).

Para que os limites de doses não sejam excedidos, paredes, biombos, visores, aventais, tetos e pisos de salas utilizadas em radiologia diagnóstica, radioterapia e medicina nuclear devem ser dimensionados e revestidos com materiais atenuadores que garantam que os níveis de radiação em suas adjacências sejam compatíveis com os limites de dose para o tipo de público ocupante da área em questão (ANDRADE, 2011).

2.1.2 Fatores básicos da proteção radiológica

A redução das doses nos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos e do Público segue os fatores básicos da proteção radiológica, tempo, distância e blindagem, que são (DANCE et al., 2014; CEMBER e JOHNSON, 2009):

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.

Maximização da distância da fonte de radiação: Garantir que a distância entre uma pessoa e a fonte emissora de radiação é mantida tão grande quanto possível. A exposição à radiação decresce com o inverso do quadrado da distância entre a fonte e o alvo, fazendo com que dobrar a distância signifique um quarto da dose, mas metade da distância significa quatro vezes a dose. 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.

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

Nem sempre é necessário adotar todos os três fatores. Haverá ocasiões em que apenas um ou dois devem ser considerados, mas igualmente haverá casos em que a aplicação do princípio "tão baixo quanto razoavelmente exequível" requer o uso de todos os três (DANCE et al., 2014).

2.2 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA NO BRASIL

No Brasil existem dois órgãos regulamentadores quando se fala de uso das radiações ionizantes, são eles: a CNEN e a ANVISA.

As Normas Básicas de Radioproteção, publicadas pela CNEN, abrangem tanto o radiodiagnóstico e a terapia na medicina, a indústria, a área nuclear, o estabelecimento dos

limites de exposição pública e ocupacional, unidades de medida e monitoração individual dos trabalhadores (NAVARRO, 2009).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) do Ministério da Saúde do Brasil (1998), publicou a Portaria SVS/MS 453/98, que estabelece requisitos de proteção radiológica e controle de qualidade para a radiologia médica, odontológica e intervencionista (LEYTON et al., 2014). O escopo e os requisitos estabelecidos nesse regulamento também estão baseados nas recomendações da ICRP e nas recomendações internacionais de segurança da IAEA e UNSCEAR (ALMEIDA JR, 2005), assim como as Normas da CNEN.

Além da CNEN e ANVISA, o Ministério do Trabalho e Emprego instituiu através da Lei nº 6.514, (BRASIL, 1977), as Normas Regulamentadoras (NR), aprovadas pela Portaria nº 3.214, (BRASIL, 1978), em que enquadrou as atividades laborais com radiações ionizantes como perigosas, a Norma Regulamentadora de Número 16, também conhecida como (NR-16) (BRASIL, 1978) 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) (BRASIL, 1978), 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) (BRASIL, 1978), 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 (ALMEIDA JR, 2005). Também existe a norma regulamentadora na qual fala sobre a Segurança e Saúde no Trabalho em Serviços de Saúde (NR-32) (BRASIL, 2011), que tem por finalidade estabelecer as diretrizes básicas para a implementação de medidas de proteção à segurança e à saúde dos trabalhadores dos serviços de saúde, bem como daqueles que exercem atividades de promoção e assistência à saúde em geral, incluindo os que trabalham com a radiação ionizante.

Em geral, é possível dizer que em âmbito nacional as Normas estipuladas pela CNEN estão à frente da Portaria SVS/MS 453/98 da ANVISA, visto que, enquanto a ANVISA tem apenas uma Portaria regulamentadora para todas as práticas de radiodiagnóstico médico e odontológico, a CNEN tem variadas Normas de acordo com as diferentes áreas de utilização das radiações ionizantes (médicas, industriais e nuclear).

2.3 INTERAÇÃO DAS RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS IONIZANTES COM A MATÉRIA

Conforme esclarece Yoshimura (2009), na faixa de energias que inclui os raios X e gama, há várias interações possíveis com o átomo ou com elétrons atômicos ou ainda com o núcleo, mas há também a possibilidade de não-interação, ou seja, a interação da radiação eletromagnética (REM) pode atravessar distâncias consideráveis em um meio material sem modificá-lo e sem se modificar. As probabilidades de interação (e de não-interação) dependem de características do meio e da radiação. A REM ionizante é tratada, em boa parte dos casos, como um conjunto de partículas – os fótons. A cada energia de fóton corresponde um momento associado, e, dessa forma, podem ocorrer ‘colisões’ em que o fóton transfere energia e momento para outras partículas. A energia desses fótons geralmente é expressa em elétron-volts (eV). As principais interações que ocorrem na matéria com fótons de energias na faixa de poucos keV (quilo elétron-volts) até dezenas de MeV (mega elétron-volts) são: Espalhamento coerente, também conhecida como efeito Rayleigh, efeito fotoelétrico, efeito Compton, Produção de pares e reação fotonuclear.

A Tabela 2, mostra de modo resumido para cada efeito, quais são as consequências para o meio e para a radiação, assim como quais radiações ionizantes são produzidas ou liberadas em decorrência da interação. O fóton é absorvido nos processos de efeito fotoelétrico, produção de par e reações fotonucleares. Já sob o ponto de vista de probabilidades de ocorrência, a ordem em que estão apresentadas as interações, corresponde, segundo Yoshimura (2009), à prevalência de cada efeito em função da energia de fóton: os efeitos Rayleigh e fotoelétrico ocorrem com maior probabilidade para baixas energias, enquanto o efeito Compton ocorre para intermediárias. Produção de par e reações fotonucleares só acontecem acima de um limiar de energia: no primeiro caso, é necessário que o fóton tenha no mínimo 1,022 MeV de energia (equivalente a duas massas de repouso de elétron) para que toda sua energia se converta em massa de repouso e energia cinética do par ($e^- e^+$); já para as reações fotonucleares, a energia do fóton deve ser superior à energia de ligação de nucleons (ao menos alguns MeV, em geral mais de 10 MeV) para que um nêutron ou próton seja retirado do núcleo. (TAUHATA et al., 2014).

Fonte: Yoshimura, 2009 (Adaptada).

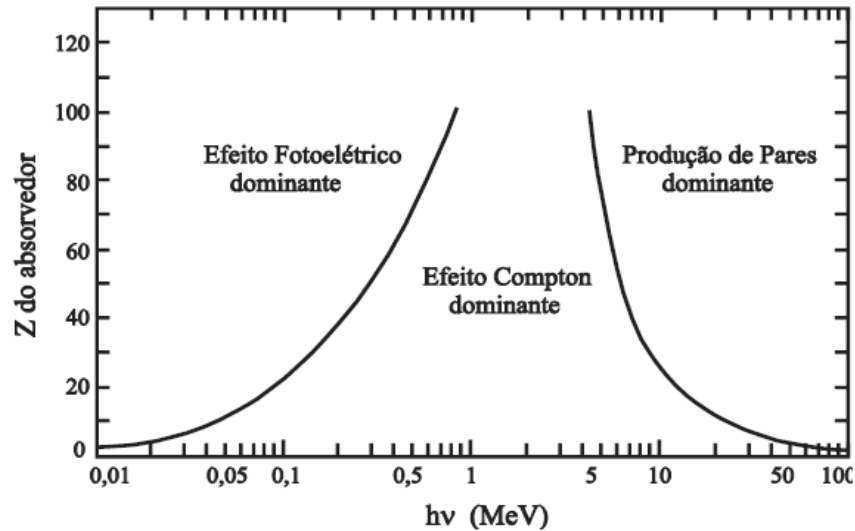
As interações fotoelétricas predominam para todos os materiais em energias de fótons suficientemente baixas, mas à medida que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais

Tabela 2 – Interações possíveis de ocorrer para radiação eletromagnética ionizante e consequências das interações.

Interação – símbolo da seção de choque	O que muda no meio	O que muda na radiação incidente	Radiação Ionizante produzida
Espalhamento Rayleigh - σ_{Ray}	— — —	Direção de propagação	REM espalhada de mesma energia
Fotoelétrico – τ	Ionização e excitação do átomo, recuo do núcleo	Fóton é absorvido	Elétron rápido, Raios X característicos, elétrons Auger
Compton – σ_{Comp}	Ionização do átomo	Fóton perde energia e muda de direção	Elétron rápido, fóton com menor energia, espalhado
Produção de Pares – κ	Recuo do núcleo; aniquilação do pósitron	Fóton é absorvido	Elétron e pósitron rápidos, raios X de aniquilação
Reação fotonuclear	Núcleo modificado (Z ou A) e excitado	Fóton é absorvido	Partículas subnucleares, em geral nêutrons

rapidamente que o efeito Compton e este acaba se tornando o efeito predominante. Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton decresça em termos absolutos, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico. Acima da energia de alguns MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a principal contribuição para as interações de fótons (TAUHATA et al., 2014). No Gráfico 1 é possível ver as interações de fótons com a matéria mais conhecidas em função da energia do fóton e do número atômico do material.

Gráfico 1 – Importância relativa dos diversos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material.



Fonte: Tauhata et al. (2014).

Como visto no Gráfico 1, os efeitos predominantes para baixas e médias energias são: Rayleigh, fotoelétrico e Compton. Entretanto, a nível de feixes de Mamografia só será levado em consideração os efeitos fotoelétrico e Compton, pois são os efeitos mais significativos na interação da radiação com a matéria.

2.3.1 Efeito fotoelétrico

O fóton é absorvido pelo átomo e um elétron atômico é liberado para se mover no material que é expelido com uma energia cinética E_c bem definida (Equação 1). A energia cinética adquirida por esse elétron é a diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron ao átomo (Figura 1).

$$E_c = h \cdot \nu - B_e \quad (\text{Equação 1})$$

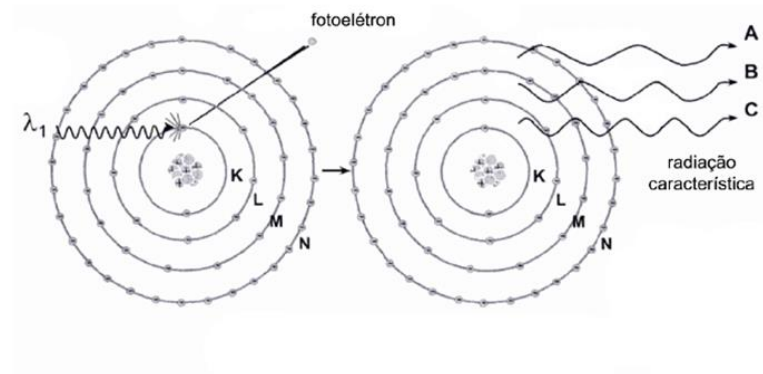
Onde:

$h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s (Constante de Planck);

ν = Frequência da radiação em hertz (Hz);

B_e = Energia de ligação do elétron orbital em joule ou elétron-volts (J ou eV).

Figura 1 – Esquema do efeito fotoelétrico.



Fonte: Adaptado de Alves (2015).

2.3.2 Efeito Compton (ou espalhamento inelástico)

Trata-se do espalhamento de um fóton por um elétron livre do material. Há transferência de parte da energia e do momento do fóton para o elétron, e um fóton com a energia restante é espalhado em outra direção (YOSHIMURA, 2009).

Como a transferência de energia depende da direção do elétron emergente e esta é randômica, de um fóton de energia fixa podem resultar elétrons com energia variável, com valores de zero até um valor máximo. A energia do fóton espalhado E'_γ depende da energia do fóton incidente E_γ e do ângulo de espalhamento θ , em relação à direção do fóton incidente (TAUHATA et al., 2014), dada pelas Equações 2 e 3.

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (\text{Equação 2})$$

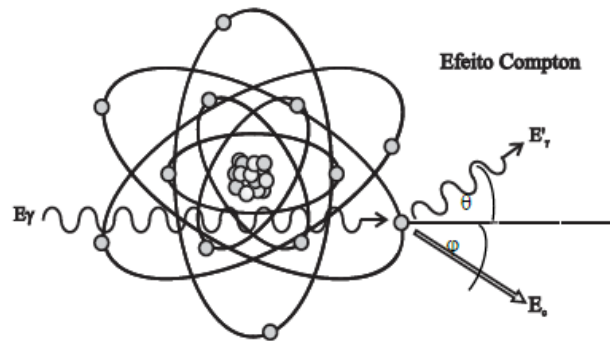
Onde,

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} \quad (\text{Equação 3})$$

A energia do fóton espalhado é máxima para $\theta = 0^\circ$ e mínima para $\theta = 180^\circ$. O ângulo entre o fóton espalhado e o elétron pode ser vista na Figura 2. A energia cinética do elétron ejetado é máxima para este caso, e igual a (Equação 4):

$$T = T_{max} = E_\gamma \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha} \quad (\text{Equação 4})$$

Figura 2 – Esquema do efeito Compton.



Fonte: Tauhata et al. (2014).

2.4 CAMADA SEMIRREDUTORA (CSR)

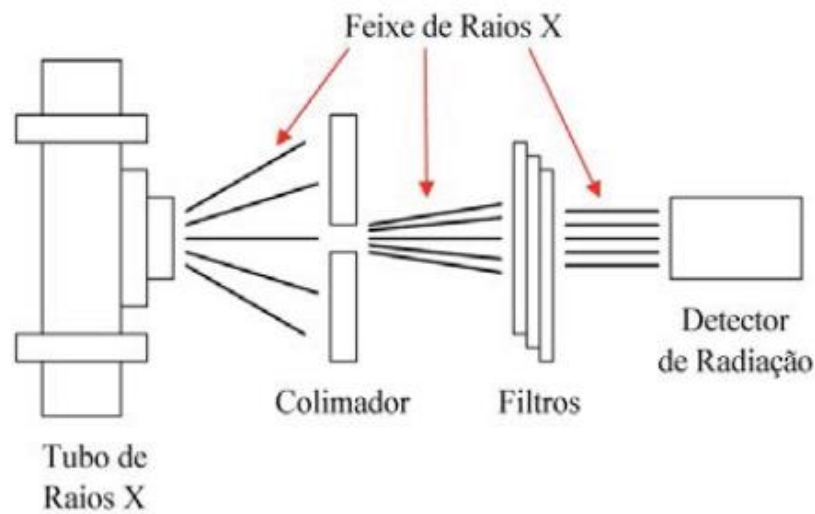
A camada semirredutora (CSR) é definida como sendo a espessura necessária de um material absorvedor para atenuar a intensidade de um feixe à metade de seu valor inicial. Nesta definição, a contribuição da radiação espalhada é considerada levando em conta o fator de *build up*, devendo-se utilizar feixes estreitos (colimados, ou seja, considerado de boa geometria) para a medida da camada semirredutora (ROS, 2000).

Em medidas de CSR de feixes de radiação, faz-se necessário o uso de um sistema de colimação, com finalidade de reduzir o tamanho de campo, para minimizar a influência da radiação espalhada proveniente do absorvedor sobre a câmara de ionização, que poderia acarretar um aumento desta CSR (NCRP, 1981). Por outro lado, o campo de radiação deve ser suficientemente grande para envolver todo o volume sensível do detector (condição de boa geometria – Figura 3).

Em geral, para se determinar o valor correto da CSR, deve-se utilizar:

- Tamanho de campo limitado (feixe estreito);
- Grande distância entre o absorvedor e o dispositivo de medição;
- Câmara de ionização de baixa dependência energética sobre a faixa de interesse;
- Câmara monitora de transmissão para corrigir variações no rendimento do tubo de raios X;
- Espessura do colimador suficiente para absorver o feixe primário;
- Método radiográfico para checar o alinhamento.

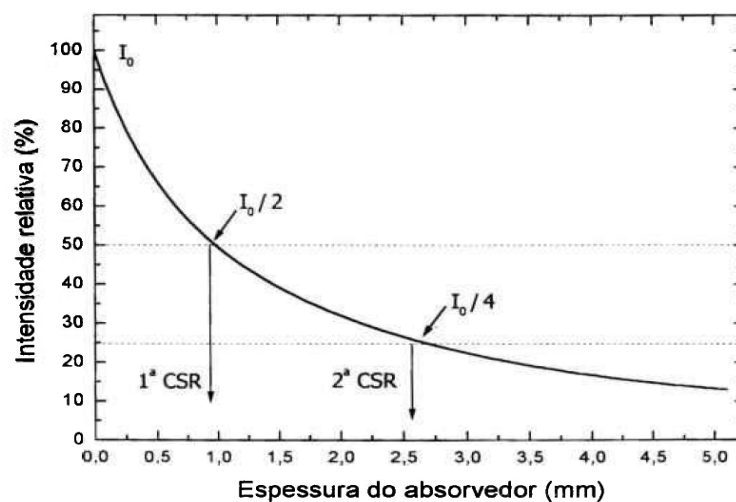
Figura 3 – Esquema de feixes de raios X em condição de boa geometria.



Fonte: Santos et al. (2014).

O Gráfico 2 mostra uma curva de atenuação típica de um feixe de raios X para a determinação da primeira e da segunda CSR, quando o feixe tem seu valor inicial de intensidade (I_0) reduzido para 50 e 25%, respectivamente. A segunda CSR é então definida como a espessura do material absorvedor necessária para reduzir à metade a intensidade da radiação emergente da primeira CSR. Assim como CSR, outro termo muito utilizado no cálculo de espessura de blindagem é a camada decirredutora (CDR), definido como sendo a espessura de material que atenua de um fator de 10 a intensidade do feixe de fótons.

Gráfico 2 – Curva de atenuação de um feixe de raios X em um material absorvedor para determinação das CSR.



Fonte: Ros (2000).

Lopes et al. (2013), publicaram o resultado de irradiações em placas de barita, de modo a determinar as CSR e CDR em várias qualidades de feixes de raios X, a nível de radioproteção

wide (feixe largo), W60, W80 e W150, e *narrow* (feixe estreito), N80 e N120, seguindo norma ISO 4037 (Tabela 3).

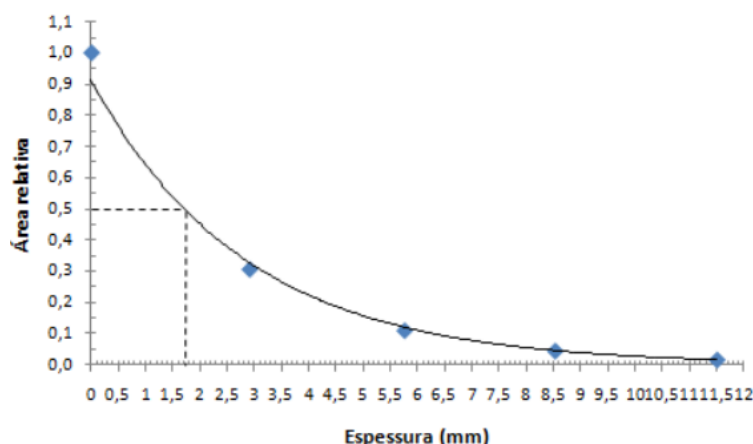
Tabela 3 – Qualidade dos feixes de raios X, nível de radioproteção.

Qualidades dos feixes de raios X para radioproteção	Potencial aplicado ao tubo (kV)	Filtração adicional
W60	60	0,3 mm Cu + 3,1 mm Al
W80	80	0,5 mm Cu + 3,1 mm Al
W150	150	1mm Sn + 3,1 mm Al
N80	80	2 mm Cu + 3,1 mm Al
N120	120	5,008 mm Cu + 1,002 mm Sn + 3,1 mm Al

Fonte: Lopes et al. (2013).

Lopes et al. (2013), explicam que foram obtidos os espectros sem as placas (espectros iniciais de cada qualidade de raios X) e os transmitidos, com a presença de cada placa e suas combinações. As áreas dos espectros adquiridas, em função da espessura total das placas, foram utilizadas para determinação das curvas de atenuação (o Gráfico 3 mostra, por exemplo, a curva de atenuação obtida para a qualidade W60). A partir dessas curvas foram determinados os valores das CSR e CDR (Tabela 4).

Gráfico 3 – Curva de atenuação obtida para a qualidade W60 em função da espessura da barita.



Fonte: Lopes et al. (2013).

Tabela 4 – CSR e CDR das placas de barita nas qualidades da ISO 4037.

Qualidades dos feixes de raios X para radioproteção	CSR (mm)	CDR (mm)
W60	1,72	5,72
W80	2,00	6,65
W150	7,15	23,97
N80	2,88	9,59
N120	7,03	23,48

Fonte: Lopes et al. (2013).

2.5 COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO

2.5.1 Coeficiente de atenuação linear (μ)

Quando um feixe de radiação gama ou X incide sobre um material de espessura x , parte do feixe é espalhada, parte é absorvida e uma fração atravessa o material sem interagir. Nesse processo de interação, o fator de atenuação ($e^{-\mu x}$) expressa a fração dos fótons do feixe que interage na espessura (x) do material (Equação 6). O coeficiente de atenuação linear (μ) é o parâmetro que expressa o comportamento da atenuação das radiações ionizantes com a referida matéria e que depende da constituição deste meio e da energia dos fótons.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

I_0 = Intensidade da radiação incidente;

x = Espessura do material absorvedor em centímetros (cm);

I = Intensidade da radiação transmitida através de um absorvente de espessura x ;

e = Base do logaritmo natural do sistema;

μ = Coeficiente de atenuação linear em centímetros⁻¹ (cm⁻¹).

A probabilidade de que uma interação ocorra é descrita como seção de choque. A probabilidade total é representada pela seção de choque atômica total, ou seja, a soma das seções de choque das interações individuais com a matéria (ALVES, 2015). Considerando apenas as energias relevantes na faixa de radiodiagnóstico (até 150 keV) e negligenciando o

efeito Rayleigh, as reações fotonucleares e produção de pares, a seção de choque total (σ_{TOT}) é descrita como:

$$\sigma_{TOT} = \tau + \sigma_{Comp} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

τ = Seção de choque para efeito fotoelétrico em centímetro²/grama (cm²/g);

σ_{Comp} = Seção de choque para efeito Compton em cm²/g.

O μ se relaciona com a seção de choque conforme Equação 8, na qual n_v indica o número de átomos por volume (ALVES, 2015):

$$\mu = n_v \cdot \sigma_{TOT} \quad (\text{Equação 8})$$

No modelo exponencial, μ está relacionado com a CSR do material absorvedor, pela Equação 9:

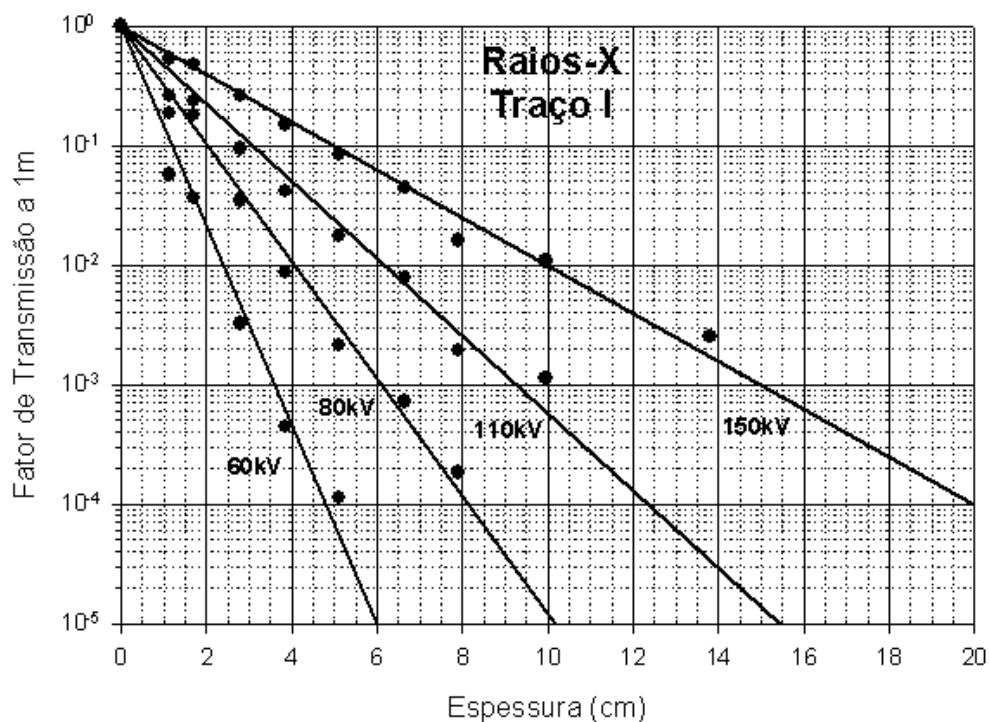
$$\mu = \frac{\ln 2}{CSR} \quad (\text{Equação 9})$$

2.6 CURVAS DE TRANSMISSÃO PARA FINS DE BLINDAGEM EM RADIOPROTEÇÃO

Como bem explica ALMEIDA JR. (2014), estudos relevantes acerca de cálculos de barreiras protetoras em instalações que utilizam raios X foram empregados para consolidar a metodologia de cálculo de barreiras primárias e secundárias proposta pelo *National Council on Radiation Protection* (NCRP), em 2004, expresso no NCRP de número 147 (NCRP, 2004).

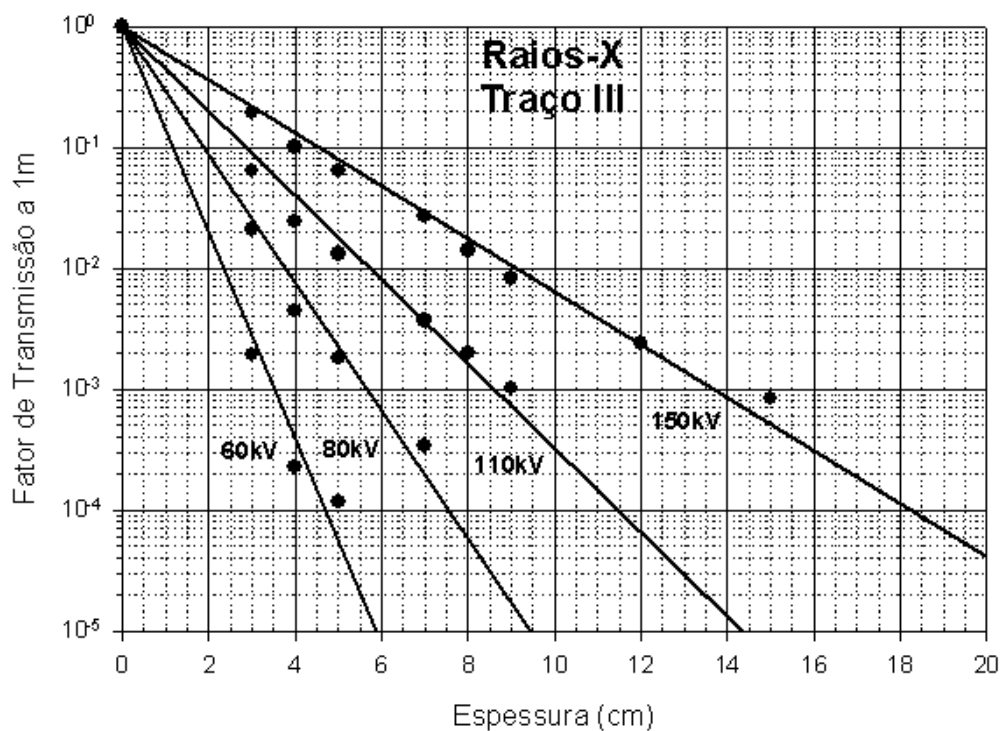
Nos Gráficos 4 e 5 são apresentadas curvas de transmissão em função da espessura para o material de argamassa de barita ($\rho = 1,91\text{g/cm}^3$) e o concreto de barita ($\rho = 2,26\text{g/cm}^3$) para diferentes energias de raios X estudadas (ALMEIDA JR., 2005).

Gráfico 4 – Curvas de transmissão em função da espessura da argamassa de barita.



Fonte: Almeida JR. (2005).

Gráfico 5 – Curvas de transmissão em função da espessura do concreto de barita.



Fonte: Almeida JR. (2005).

Com essas curvas pode-se determinar, de maneira fácil e simples, as camadas semi e decirredutoras. Observando o Gráfico 4, por exemplo, é possível ver que para a argamassa de barita e energia equivalente de 80 kV, a CSR é de 6,1 mm, enquanto que no Gráfico 5 para o concreto de barita a CSR é de 0,57 mm .

2.7 O GESSO

Os termos “gipsita” e “gesso” são usados frequentemente como sinônimos. A denominação gipsita, no entanto, parece mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto gesso indicaria o produto calcinado (LEITÃO, 2005).

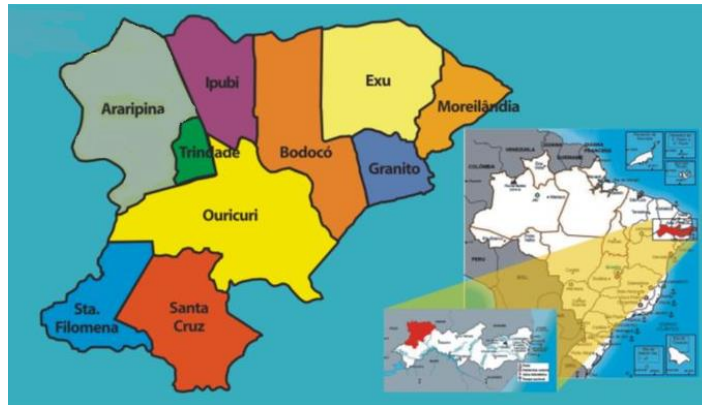
O mineral gipsita é um sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que ocorre em diversas regiões do mundo e que apresenta um amplo e diversificado campo de utilização. O grande interesse pela gipsita é atribuído a uma característica peculiar que consiste na facilidade de desidratação e rehidratação. A gipsita perde 3/4 da água de cristalização durante o processo de calcinação, convertendo-se a um sulfato hemidratado de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) que, quando misturado com água, pode ser moldado e trabalhado antes de endurecer e adquirir a consistência mecânica da forma estável reidratada (BALTAR et al., 2005).

Atualmente, os maiores produtores mundiais de gipsita são: Estados Unidos da América (17%), Irã (10%), Canadá (8%), México (7%) e a Espanha (6,8%). O Brasil possui a maior reserva mundial, mas só representa 1,4% da produção mundial (LYRA SOBRINHO et al., 2001).

O Estado de Pernambuco, que possui reservas abundantes de gipsita na região do Sertão do Araripe, envolvendo os Municípios de Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade, é responsável por 95% da produção brasileira (Figura 4). As jazidas do Araripe são consideradas as de minério de melhor qualidade no mundo e apresentam excelentes condições de mineração (relação estéril/minério e geomorfologia da jazida) (BALTAR et al., 2005).

O gesso produzido na bacia do Araripe obedece às especificações fixadas na norma ABNT/NBR 13207 (Associação Brasileira de Normas Técnicas/Norma Brasileira 13207, 1994), como visto na Tabela 5.

Figura 4 – Regiões do Polo Industrial Gesseiro de Araripina em Pernambuco.



Fonte: SINDUGESSO (2009).

Tabela 5 – Exigências químicas do gesso para construção civil segundo ABNT/NBR – 13207.

Determinações químicas	Limites (%)
Água livre	Máx. 1,3
Água de cristalização	4,2 a 6,2
Oxido de cálcio (CaO)	Mín. 38
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	Mín. 53

Fonte: ABNT/NBR – 13207 (1994) (Adaptado).

Como explica LEITÃO (2005), a partir da gipsita são produzidos o gesso alfa e o gesso beta, com processos de fabricação e aplicações bem diferentes. Pode fazer a classificação da Gipsita, segundo sua destinação, em:

- 1) **Tipo A** → para fabricação do gesso alfa (α), odontológico, ortopédico ou cerâmico.
- 2) **Tipo B** → para fabricação do gesso beta (β), para revestimento ou fundição.
- 3) **Tipo C** → para refugo, ou para uso como corretivo de solo, na forma de gipsita, com partículas de 0 a 5 mm.

Para o **gesso beta**, as aplicações estão no campo da construção civil:

- Fundição – fabricação de elementos pré-moldados: placas para forro, elementos decorativos como sancas e pedestais, blocos divisórios e placas acartonadas.
- Gesso para revestimento manual, com um tempo de pega maior.
- Gesso para revestimento projetado, com pega rápida.
- Argamassas para assentamento.
- Cola de gesso, tanto para alvenaria de blocos, como para fixação de elementos decorativos e acartonados, quando usados em revestimento.

John e Cincotto (2007), citados por Silva (2013), afirmam que a aplicação nacional do gesso está voltada para revestimentos de alvenaria, componentes como blocos, painéis para forros e divisórias. A utilização de alvenaria em blocos de gesso em substituição às tradicionais alvenarias em blocos cerâmicos ou de concreto se constitui em uma alternativa viável na vedação vertical de edifícios. Do ponto de vista do comportamento estrutural, as vedações em alvenaria em blocos de gesso mostram resistência e rigidez superior que as construídas com blocos cerâmicos argamassados (SOBRINHO et al., 2010).

O sistema construtivo de divisórias internas em alvenaria são constituídos de blocos pré-moldados, sendo estes: blocos de gesso ou gesso acartonado, também conhecido como sistema *Drywall*. As espessuras encontradas comercialmente para esses tipos de gesso no país são de 7cm (sendo eles: vazados ou compactos) e 10cm (sendo eles: compactos) unidos com fina camada de cola de gesso. (SOBRINHO et al., 2010).

2.8 A BARITA

O nome mineralógico barita advém do grego *barys* que significa pesado. Possui elevada densidade, com peso específico entre 4,3 e 4,6 g/cm³, dureza baixa, possui brilho vítreo, resinoso ou nacarado e sua cor mais comum é branca a cinza clara, quando isenta de impurezas, podendo entretanto variar ao cinza escuro ou rosa, conforme a presença de matéria carbonosa e óxidos de ferro. O mineral barita é um sal de bário de fórmula química simplificada BaSO₄, cuja composição média teórica contém 65,7% de monóxido de bário, sendo que o bário elementar participa em média, com 58,8% e o trióxido de enxofre, com 34,3% (VÉRAS, 2001).

Como indica ALMEIDA JR (2014), a extração da barita é feita a céu aberto utilizando retroescavadeiras ou equipamentos semelhantes. Normalmente, a mineração se encontra próxima à indústria, constituindo um dos principais indicadores para a sua localização, já que a dificuldade da entrada de caminhões de grande porte nas jazidas inviabiliza o transporte a grandes distâncias.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em sua 36ª Edição do Sumário Mineral – 2016 (ano-base 2015), as principais reservas mundiais estão localizadas na China, Índia e Marrocos, estes responsáveis por 66% da produção mundial em 2015. A produção mundial em toneladas em 2015 foi de 7,313 megatoneladas (Mt ou 10³t), a qual teve um decréscimo em relação ao ano anterior. O Brasil em 2015 representou 2,37% da produção mundial, como indica a Tabela 6.

Tabela 6 – Reserva e produção mundial da Barita no ano de 2014 e 2015.

PAÍSES	RESERVAS (10³t) 2015^(p)	PRODUÇÃO (10³t) 2014^(r)	PRODUÇÃO (10³t) 2015^(p)	PORCENTAGEM (%)
Brasil	94.076	4	173	2,37
China	100.00	3.000	3.000	41,02
Índia	32.000	1.140	900	12,31
Estados Unidos da América	15.000	663	700	9,57
Irã	24.000	300	300	4,10
Cazaquistão	85.000	300	300	4,10
México	7.000	420	220	3,01
Marrocos	10.000	1.200	900	12,31
Paquistão	1.000	132	120	1,64
Turquia	35.000	270	200	2,73
Outros Países	66.000	483	500	6,84
Total	469.000	9.264	7.313	100

(r) revisado; (p) dado preliminar, exceto Brasil.

Fonte: DNPM; USGS: *Mineral Commodity Summaries-2016* (BRASIL, 2016) (Adaptada).

Em 2015, a produção de barita bruta (minério contido – BaSO₄) no país foi de 173 mil toneladas, sendo que a produção beneficiada foi de 20.894,95 t que resultaram em 17.760 t de contido de barita (BaSO₄). Já para consumo interno: a barita é insumo principalmente nas indústrias petrolífera, automobilística, têxtil e química com aplicações em fluido de perfuração de petróleo e gás; sais químicos de bário; preparação de tintas, pigmentos, vernizes, vidros, papel, plásticos, entre outros (BRASIL, 2016).

2.9 O USO DE MATERIAIS COMO BLINDAGEM NA ÁREA DE RADIODIAGNÓSTICO

Alguns materiais de construção podem ser substituídos por gesso, especialmente a cal, o cimento, o aço, a alvenaria e a madeira.

Ambientes de instalações radiodiagnósticos sejam eles dos mais antigos aos mais atuais, podem utilizar o chumbo como barreira atenuadora em paredes, pois ele é um material cuja densidade é alta, proporcionando uma boa atenuação para fótons. A NCRP nº 147 relaciona os materiais de construção mais utilizados e suas médias de densidade (Tabela 7).

Tabela 7 – Média das densidades de materiais utilizados na construção de salas de radiodiagnóstico.

MATERIAL	DENSIDADE (g/cm³)
Argamassa de barita	3,06
Tijolo macio	1,65
Tijolo duro	2,05
Terra batida	1,05
Granito	2,65
Chumbo	11,40
Vidro Plumbífero	6,22
Cimento	1,54
Concreto	2,35
Aço	7,08
Telha	1,09

Fonte: NCRP 147 (2004) adaptado por (SILVA, 2016).

Conforme as densidades dos materiais da Tabela 7, o Chumbo possui 11,4 g/cm³, logo ele se torna o primeiro material a ser opção no mercado de blindagem radiológica (Figura 5), em seguida o aço com 7,08 g/cm³.

Figura 5 – Montagem física de sala de radiodiagnóstico com folhas de Chumbo.



Fonte: GRXSP, 2012 (Internet).

No entanto, no Brasil, por falta de mão de obra que domine as técnicas para montagem e manutenção de um revestimento de chumbo e o custo elevado, e ainda por não se enquadrar num *design* de interior visualmente delicado e bonito, é substituído pela argamassa de barita (Figura 6). A argamassa baritada (uma composição com alto teor de sulfato de bário (BaSO₄),

areia, ligas de agregação e outros elementos minerais) vem sendo utilizada como material para revestimento em salas de radiologia diagnóstica. Este material apresenta alta densidade, adequada para utilização como barreira, mas de difícil aplicação nas paredes que se deseja blindar. A aplicação é manual e não se pode garantir a homogeneidade da argamassa e nem que a mesma espessura seja aplicada em toda a parede, desse modo, a quantidade de argamassa baritada aplicada nas paredes é quase sempre superestimada (GONDIM et al., 2016).

Figura 6 – Construção de sala de raios X com argamassa de barita.



Fonte: SILVA (2016).

Para materiais de menor densidade como a argamassa de barita, ou outros materiais de construção, o tamanho das espessuras irá suprir a necessidade quando comparadas a substituir o metal chumbo, a depender das energias da fonte. Assim foi possível determinar valores de CSR para vários tipos de materiais, conforme Tabela 8 da Norma DIN 6812, (NCRP, 1976) – também conhecida como NCRP nº49, citado por SILVA (2016).

Tabela 8 – Espessuras (mm) de materiais equivalentes ao chumbo aproximada para vários materiais, em condições de feixes largos.

Material	Densidade (g/cm ³)	50 kV		100 kV				150 kV			
Espessura do Chumbo (mm)		0,5	1,0	0,5	1,0	2,0	3,0	0,5	1,0	2,0	3,0
Tijolo	1,8	100	200	70	120	195	260	85	150	260	340
Tijolo oco	1,4	135	280	100	165	270	360	115	200	350	490
Concreto	2,2	62	130	44	80	140	190	60	105	180	250
Concreto de barita	3,2	15	31	4	9	17	24	7	15	33	51
Aço	7,9	3	6,5	3,2	6,4	13	---	6,6	14	28	---
Concreto com entrada de ar	0,6	230	480	145	270	470	---	190	340	600	---
Gesso	0,8	140	290	110	200	---	---	140	---	---	---
Tijolo de estoque amarelo	1,6	85	150	65	110	195	280	70	124	230	330
Argamassa de Barita	2,0	16	---	5	9	16	24	7	15	30	45
Tijolo concreto	1,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Bronze	8,3	3,1	5,4	2,1	3,7	6	---	75	140	240	350

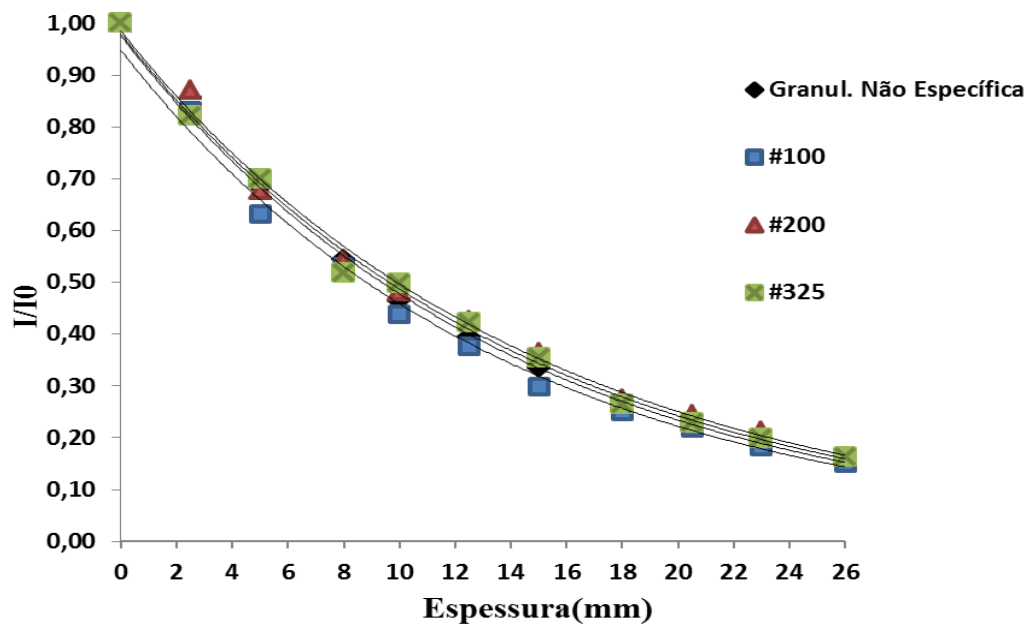
Fonte: DIN 6812 (1976) adaptado por (SILVA, 2016).

Pensando em corte de gastos excessivos com materiais relativamente caros (como o chumbo, por exemplo) para atenuar ambientes de radiodiagnóstico que possuem fontes de baixas energias, pode-se substituí-los por materiais como tijolo, gesso ou ainda mistura de materiais menos densos com outros mais densos com a barita. Contanto que o projeto de radioproteção sempre seja seguido à risca.

Para corroborar ainda mais com a ideia do uso do material gesso como blindagem, a NCRP em seu relatório de nº 147 (2004), afirma que apesar de placas de gesso fornecer relativamente pouca atenuação em feixes de raios X com energias mais elevadas, a mesma consegue proporcionar significativa atenuação de raios X de baixas energias, quando levado em conta a utilização desse material na área de radiodiagnóstico, como na mamografia, ou na radiologia odontológica, por exemplo.

Silva (2016) utilizou placas de gesso com diferentes granulometrias (granulometrias: do fabricante, 100 mesh, 200 mesh e 325 mesh) para feixes de raios X na qualidade de radioproteção N60 (potencial aplicado ao tubo de 60 kV). O Gráfico 6 mostra a comparação entre as curvas de atenuação para cada tipo de placa do material gesso em função da espessura.

Gráfico 6 – Comparação entre as curvas de atenuação para cada tipo de placa do material gesso em função da espessura na qualidade N60.



Fonte: Silva (2016).

Em relação a misturas de materiais, Gondim et al. (2016), explica que foram construídos blocos cerâmicos de vedação, para serem utilizados como barreira de proteção e blindagem de instalações médicas e odontológicas, quando submetidas aos raios X diagnósticos. Sendo, a composição desse bloco cerâmico (80% argila – 20% barita), de forma a viabilizar um procedimento mais econômico, demandando menor tempo e custo, porém com maior praticidade para construção de paredes nas quais se faz necessário o uso de barreira protetora. O trabalho teve por finalidade determinar as propriedades de atenuação de parede feita com blocos cerâmicos de vedação constituídos de barita e argila, para serem usados como elementos de atenuação no cálculo de barreiras de proteção e blindagens em ambientes hospitalares, conforme Figura 7.

Gondim et al. (2016) realizaram cinco medições nas exposições utilizando 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 e 150 kV, com corrente de 22,5 mA, durante 30 segundos, usando foco grosso com filtração de 4mm de alumínio, primeiramente com a parede de bloco cerâmico (I - intensidade do feixe de radiação X atenuada por uma espessura de material protetor) e conseguinte sem a parede (I_0 - intensidade do feixe de radiação X não atenuada), com isso obtida a razão de transmissão para cada tensão. Em seguida, com esses dados obtidos, realizou-se esse mesmo ensaio utilizando os mesmos parâmetros e equipamentos com folhas de chumbo MT 1404, para verificar uma equivalência com relação à parede de alvenaria (Figura 8).

Figura 7 – Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.



Fonte: Gondim et al. (2016).

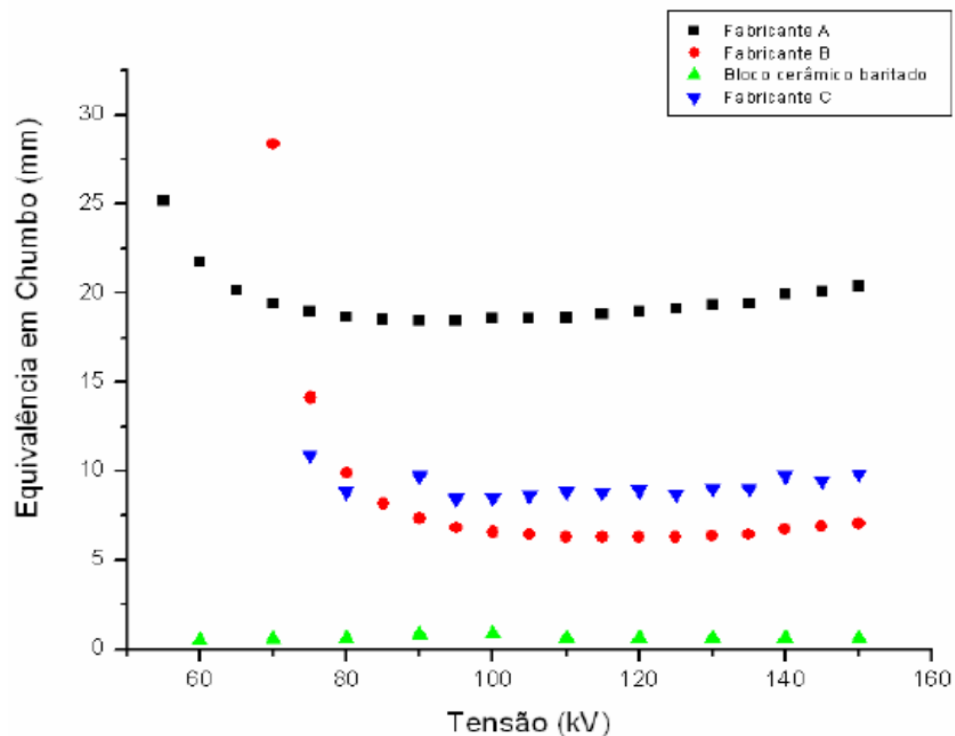
Figura 8– Arranjo experimental da equivalência em chumbo, utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.



Fonte: Gondim et al. (2016).

E ao final foi construído um gráfico (Gráfico 7), ao qual se compara o resultado de três argamassas do mercado com os resultados da parede de alvenaria com bloco cerâmico baritado em função da tensão e equivalência em folhas de chumbo.

Gráfico 7 – Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.



Fonte: Gondim et al. (2016).

Nos resultados do estudo de Gondim et al (2016), foi comparado os resultados do bloco cerâmico baritado com diferentes argamassas baritadas (Fabricante A, B e C), o material cerâmico, segundo os autores, obteve uma excelente performance, pois conseguiu uma equivalência em chumbo menor para todas as tensões utilizadas. Gondim et al. (2016), chegou à conclusão de que as paredes confeccionadas com blocos cerâmicos podem ser aplicadas em salas radiológicas.

2.10 QUALIDADES DE FEIXES DE RAIOS X DIAGNÓSTICOS

Para estabelecer características ou propriedades dos equipamentos de medição utilizados em radiodiagnóstico, tais como câmaras de ionização e detectores semicondutores, laboratórios de calibração oferecem uma série de condições de irradiação bem definidas, comumente chamadas de qualidades de raios X, que podem ser utilizadas em estudos de fenômenos físicos e aplicações médicas (SANTOS, 2009).

A metrologia em radiologia diagnóstica depende de muitos parâmetros físicos, visto que a resposta dos instrumentos de medida, geralmente, possui forte dependência com a energia, em especial na faixa de poucos kVp a 150 kVp. Assim, a implantação de feixes padronizados

para radiologia diagnóstica visa oferecer uma possibilidade consistente de calibração de cada tipo de instrumento com um espectro de radiação, o mais próximo possível do feixe utilizado na prática clínica (PEIXOTO, 2002 apud SANTOS, 2009).

Conjuntos de qualidades de feixes de raios X, na área de radiologia diagnóstica, têm sido caracterizados por laboratórios de metrologia. Como exemplo, tem-se o laboratório primário alemão PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), que inclui no seu programa de calibração variadas qualidades de radiação.

Por mais que as normas estabeleçam um conjunto de qualidades de radiação precisamente determinadas que podem ser utilizadas na área de radiodiagnóstico, a mesma não engloba a área da radiologia odontológica quando se fala em uso comercial. Sendo assim, Santos (2009), implantou qualidades de raios X odontológico no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE).

Santos (2009) explica que os equipamentos de raios X odontológicos comerciais operam com potencial de aceleração e corrente de tubo fixos. Então foi desenvolvido um equipamento de raios X odontológico monofásico com retificação de meia-onda que possui, como principal característica, a possibilidade de variar a tensão e a corrente aplicadas ao tubo. Este sistema foi utilizado para a definição inicial das qualidades dos feixes gerados por equipamentos de raios X odontológico (Tabela 9).

Tabela 9 – Qualidades de raios X odontológico implantadas no Laboratório de Raios X Odontológico do CRCN-NE.

Qualidade raios X	Potencial do tubo (kV)	Filtração Total (mmAl)	1ª CSR (mmAl)	2ª CSR (mmAl)	Energia média (keV)
DRQ1	46,0	2,74	1,37	1,72	31,07
DRQ2	56,0	2,74	1,63	2,08	35,29
DRQ3	65,0	2,74	1,92	2,63	38,90

Fonte: Santos (2009).

As qualidades de raios X descritas na Tabela 9 serviram de base para transferência de suas características para o equipamento de potencial constante do laboratório de raios X 320 kV do CRCN-NE, onde foi implantada (Tabela 10).

Tabela 10 – Qualidades de raios X odontológico implantadas no Laboratório de raios X 320 kV do CRCN-NE.

Qualidade raios X	Potencial do tubo (kV)	Filtração Total (mmAl)	1ª CSR (mmAl)	2ª CSR (mmAl)	Energia média (keV)
DRQ1	46,0	2,96	1,68	2,24	30,93
DRQ2	56,0	2,96	2,08	2,72	35,18
DRQ3	65,0	2,96	2,41	3,28	38,85

Fonte: Santos (2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em diferentes etapas e laboratórios. O primeiro passo foi fazer a confecção de dois tipos de placas, sendo feitas com material gesso e mistura de gesso com barita, após prontas foram realizadas as suas caracterizações físicas e químicas e por último foram efetuadas as irradiações em laboratórios de metrologia.

3.1 CONFECÇÃO DAS PLACAS

3.1.1 Placas de gesso

A preparação das placas de gesso utilizadas como corpos de prova nos ensaios para blindagem dos raios X, foi realizada no Laboratório de Química e Ensaios do Gesso, localizado no Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP. Os principais constituintes das referidas placas são:

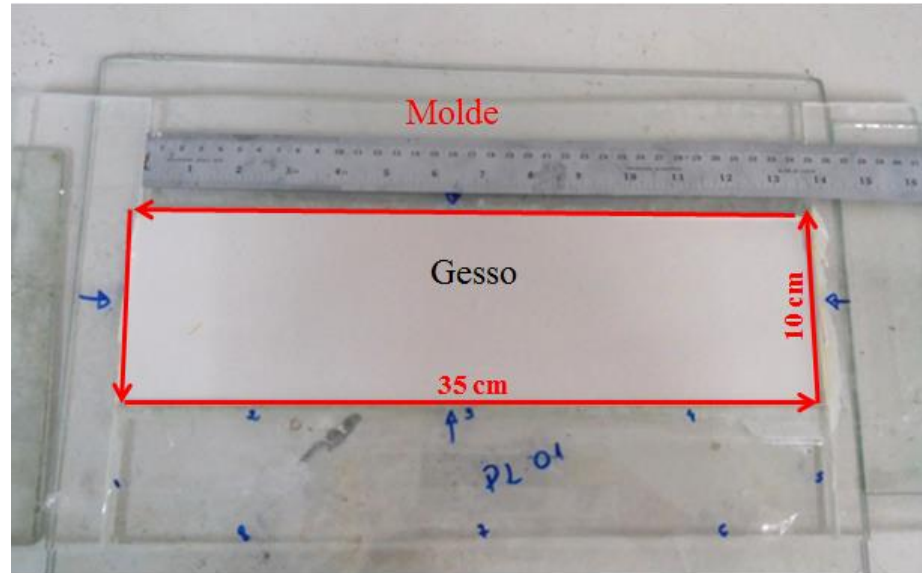
- Gesso em pó tipo Beta de origem regional do polo gesseiro de Araripina sem aditivos químicos;
- Moldes de acrílico vazados de dimensão interna de 10x35 cm² para modelagem dos corpos de prova do gesso, possuindo 3 espessuras diferentes (em milímetros), aproximadamente: 2,5 mm, 5 mm e 8 mm;
- Peneiras granulométricas;
- Recipientes herméticos;
- Béquer para mistura da massa de gesso,
- Paquímetro digital,
- Balança de precisão digital;
- Aparelho de Vicat utilizando agulha e modificado com cone.

Para a confecção das placas, dois testes foram realizados com o intuito de obter a fluidez adequada para produção da pasta de gesso. O primeiro teste foi realizado para verificação da relação água/gesso e o segundo para o tempo de secagem.

Antes da elaboração dos corpos de prova foram feitos moldes de acrílico no qual o preparo consistiu em cortar chapas pré-fabricadas de acrílico em quatro partes retangulares para

formar um molde retangular de dimensão interna de 10 x 35 cm², conforme Figura 9, produzindo desta forma placas de gesso nesta dimensão primária.

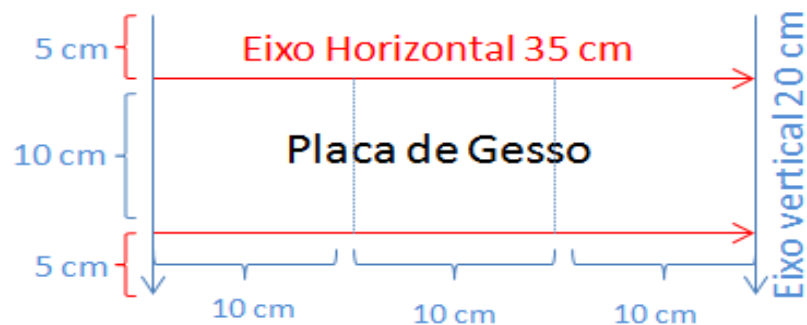
Figura 9 – Molde de acrílico vazado para obtenção da placa de gesso.



Fonte: Silva (2016).

As placas de gesso obtidas na dimensão primária 10 x 35 cm² foram cortadas em 3 partes, que após lixamento para acabamento das bordas ficaram com área de 10 x 10 cm² (Figura 10).

Figura 10 – Esquema de corte para obtenção de 3 placas de gesso 10x10 cm².



Fonte: Silva (2016).

Durante o procedimento da fabricação das placas de gesso foi verificado que o pó original possuía várias granulometrias devido ao processo de fabricação. Desta forma, foram utilizadas peneiras granulométricas (Figura 11) para selecionar porções de grãos de tamanhos de 200 e 325 mesh, que é a unidade de abertura da peneira, podendo ser dada em unidade de

polegadas (in) ou milímetros (mm), 200 e 325 mesh equivale respectivamente a 0,074 mm e 0,044 mm. Quanto maior o mesh, maior o número de aberturas e mais fino deverá ser o grão para passar por ela.

Figura 11 – Peneira para separação granulométrica.



Fonte: O autor.

Foram obtidos três tipos de amostras de gesso com granulometrias diferenciadas para preparo das placas utilizando o pó original do fabricante e duas granulometrias (200 e de 325 mesh), obtidas por meio das peneiras. Os grãos selecionados foram armazenados em diferentes recipientes herméticos até a fabricação das placas.

Foram realizados testes de consistência normal da massa de gesso, como também dos tempos de início de pega e de fim de pega, ambos realizados com o aparelho de Vicat (que serve justamente para esse propósito, determinando a consistência da massa e os tempos de pega).

O teste de consistência normal verifica a relação água/gesso para obter fluidez adequada da pasta quando é manipulada. Nesse experimento, é necessário adicionar o nitrato de sódio, pois este é um retardador, que se faz necessário acrescentar para que a massa não endureça rápido. Assim durante seu preparo foi descoberto quanto de relação foi necessário para que a massa esteja com boa consistência.

Após algumas tentativas, foram adicionados valores de 280 gramas de gesso para 150 gramas de água, obtendo-se assim uma massa de consistência padrão. Nessa consistência, foi observado que ao ser mergulhado o cone de Vicat na massa, o aparelho apresentou uma marca de 30 mm com variação de 2 mm, indicando que a massa possuía consistência ideal.

A partir de então, preparou-se a massa, sem utilizar o retardador, e verificou-se o tempo de pega.

O teste do tempo de pega é dividido em duas etapas: o início do tempo de pega, que é considerado quando a agulha estaciona a 1 mm do fundo, e o fim do tempo de pega, que é considerado o instante em que a agulha não mais deixa sua impressão na superfície. Para este teste foi utilizado o aparelho de Vicat (Figura 12) com uma agulha removível, de 0,02 mm diâmetro e 50 mm de comprimento, fixada em sua extremidade. Houve apenas uma tentativa para que o tempo de pega tornasse ideal, sendo o inicial de 17 minutos e o final de 31 minutos.

Figura 12 – Aparelho de Vicat modificado com agulha para medição do tempo de pega.



Fonte: Silva (2016).

Após a realização dos dois testes (de consistência e de pega), a proporção de gesso e água foi utilizada para fabricação dos 3 tipos de massa. Essa proporção foi utilizada para confecção das placas de gesso de espessuras 2,5 mm e 5 mm. No caso da confecção das placas de gesso de espessura de 8 mm, a quantidade de massa teve que ser aumentada, sendo utilizada 420 gramas de gesso para 225 gramas de água, mantendo a proporção.

Para cada um dos três tipos de amostras (granulometria do fabricante e com grãos de 200 e 325 mesh), foram feitas três placas com espessuras de 2,5 mm, 5 mm e 8 mm (a partir do molde de acrílico) com a medida de 10 x 35 cm². Cada placa foi cortada em três pedaços e lixada em suas bordas para serem obtidas vinte e sete placas de gesso (ou corpos de prova) de 10 x 10 cm². Para o cálculo da densidade das placas foi utilizado a fórmula de densidade igual a massa por volume. Cada placa foi pesada numa balança de precisão digital obtendo sua massa, e para obter o volume utilizou-se o paquímetro digital para medição de suas dimensões. Como

as espessuras das placas de gesso influenciam diretamente a atenuação dos feixes de raios X, foram realizadas medidas das espessuras em cinco pontos de cada placa e consideradas as médias dessas medidas.

3.1.2 Placas de mistura gesso e barita

A confecção das placas de gesso e barita foram realizadas no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste – CRCN-NE. Os principais constituintes das referidas placas são:

- Gesso em pó tipo Beta;
- Barita em pó;
- Moldes de acrílico com aproximadamente 2 e 5 mm de espessura;
- Paquímetro digital;
- Balança de precisão digital.

A preparação das placas de gesso e barita misturadas foi executada obedecendo um traço com proporção de 10:10 dos materiais constituintes para que a placa conseguisse homogeneizar e não ficasse quebradiça, sendo 94,7 gramas para a barita e 45 gramas para o gesso e estes sendo misturados com 50 ml de água. Cada mistura dessa equivaleu a preparação de duas placas gesso e barita, possuindo cada uma aproximadamente 2 mm e 5 mm de espessura, que eram as espessuras dos moldes de acrílicos usados para montagem deste tipo de placa em específico. O processo de secagem da placa gesso e barita pode ser observado na Figura 13. Cada placa levou em média 24 horas para a sua total secagem.

Figura 13 – Secagem da placa de mistura gesso e barita.



Fonte: O autor.

Assim como para as placas de gesso, para saber a densidade das placas misturadas foi utilizado a fórmula da densidade igual a massa por volume. Cada placa foi pesada numa balança de precisão digital obtendo sua massa, e para obter o volume utilizou-se o paquímetro digital para medição de suas dimensões, sendo realizadas medidas das espessuras em cinco pontos de cada placa e consideradas as médias dessas medidas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

A caracterização foi realizada no Departamento de Instrumentação e Análises Ambientais do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste – DIAMB/CRCN-NE. Esta etapa objetiva determinar os elementos químicos constituintes das amostras das placas, bem como suas respectivas concentrações. Para isto, foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

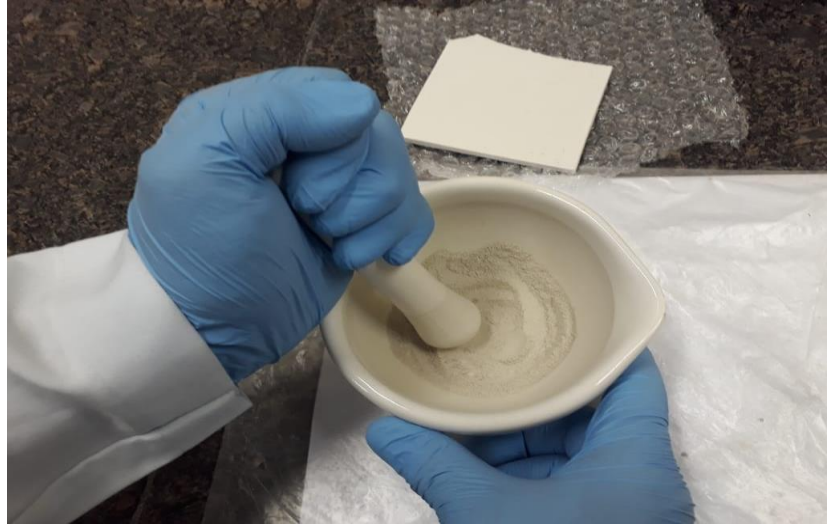
- Placa de gesso;
- Placa de gesso e barita;
- Pó de gesso;
- Pó de barita;
- Almofariz;
- Pistilo;
- Peneira;
- Secador elétrico;
- Papel seda;
- Balança de precisão;
- Filme de polipropileno;
- Desumificador;
- Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por dispersão de energia (EDXRF);
- Material de referência do EDXRF;
- Recipientes de polietileno para leitura das amostras no EDXRF.

3.2.1 Moagem

Na caracterização química foram feitas as leituras para as placas de gesso e da mistura gesso e barita, como também dos pós de gesso e barita que constituíram as placas em

si. As placas precisaram ser fragmentadas manualmente e após isso, os fragmentos foram condiminuidos no almofariz por um pistilo, conforme Figura 14.

Figura 14 – Moagem de placa.



Fonte: O autor.

Após as placas passarem pelo processo de moagem manual, o pó resultante delas passou por um sistema artesanal de peneira (Figura 15) até atingir a dimensão apropriada para leitura no EDXRF, que deve ser menor que 80 micrômetros. O processo de peneiramento também foi feito para os pós de gesso e barita.

Figura 15 – Peneira.



Fonte: O autor.

3.2.2 Pesagem e preparação das amostras

Uma vez pulverizadas, as amostras foram pesadas em balança de precisão analítica sob papel seda, a fim de se evitar perda do material amostral. Logo após pesadas, estas amostras foram transferidas para recipientes de polietileno (próprios para correta leitura no EDXRF) em quantidades suficientes para cobrir a superfície de leitura dos referidos recipientes. Estes recipientes são lacrados com filme de polipropileno e anel de polietileno de acordo com as Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Amostras em recipientes lacrados.



Fonte: O autor.

Figura 17 – Pesagem da amostra.



Fonte: O autor.

3.2.3 Leitura no EDXRF

Esta técnica analítica consiste em estimular a eletrosfera dos átomos dos materiais constituintes da amostra, de modo a provocar uma excitação nos elétrons das camadas K e L dos respectivos átomos, emitindo consequentemente raios X com energias bem definidas equivalentes às diferenças das energias de ligação dos elétrons nas camadas envolvidas no salto quântico realizado (raios X Característicos).

Dessa forma, após lacrados os receptáculos contendo as amostras, os mesmos são postos num desumidificador até a análise.

Para a análise em questão, foram escolhidos materiais de referência apropriados ao tipo de material analisado para serem lidos juntos no equipamento de marca/modelo: Shimadzu Europe/EDX-720 (Figura 18). Após análise foi gerado um relatório quali-quantitativo ao qual caracterizou quimicamente as amostras.

Figura 18 – Leitura das amostras no EDXRF.



Fonte: O autor.

3.3 IRRADIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PLACAS

Para a qualidade de radiologia odontológica, implantada por Santos (2009), as irradiações foram feitas no Laboratório de Metrologia do CRCN-NE com o intuito de determinar as curvas de atenuação e assim obter os valores das CSR e CDR para as diferentes

granulometrias das placas de gesso, de modo a observar e escolher a placa de gesso que obtesse a melhor atenuação, para depois poder comparar com as placas de mistura gesso e barita. Para as irradiações das placas de gesso e gesso e barita, foi utilizada a qualidade de referência WMV (mamografia), seguindo os padrões do Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), implantado no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes do Departamento de Energia Nuclear pertencente a Universidade Federal de Pernambuco – DEN/UFPE.

3.3.1 Irradiação experimental das placas de gesso no CRCN-NE

O experimento para irradiação das placas de gesso e obtenção das curvas de atenuação e transmissão foi realizado no Laboratório de Metrologia das Radiações do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste – CRCN-NE. Os materiais utilizados no experimento estão listados a seguir:

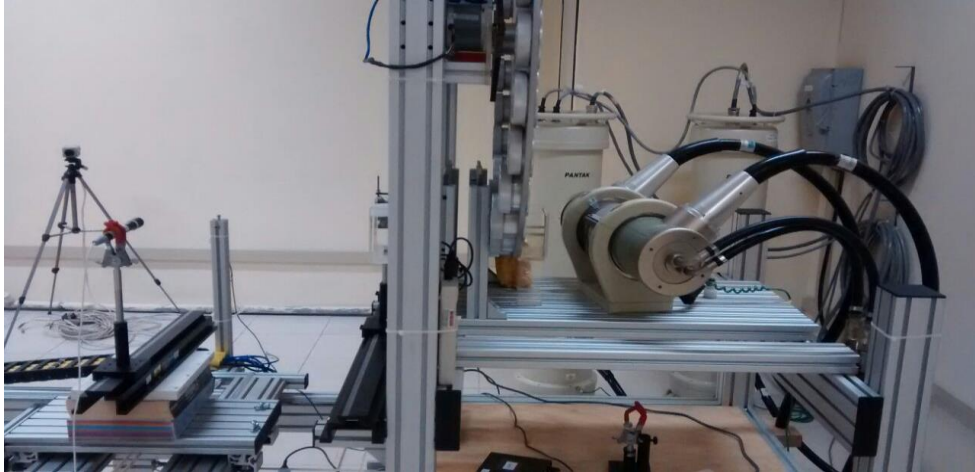
- Equipamento de raios X industrial, fabricante Pantak, modelo HF 320, constituído por um gerador Pantak, modelo HF320, série 9710-2779-CG, acoplado a um tubo de raios X, marca Comet, modelo MXR-320/24, série 48-4903;
- Filtração adicional da qualidade;
- Colimador;
- Placas de gesso;
- Câmara de ionização: Radcal Corporation – RC6;
- Eletrômetro fabricado pela Nuclear Enterprise, modelo Farmer 2670, série 149, calibrado pela National Radiological Protection Board (NRPB);
- Barômetro digital fabricado pela Druck, modelo DPI 740;
- Termômetro digital fabricado pela Hart Scientific, modelo 1529 Chub-E4, série A45647.

As irradiações das placas de gesso ocorreram na sala de raios X de 320 kVp do Laboratório de Metrologia do CRCN-NE.

O aparelho de raios X HF320 é fixado em uma estrutura de aço e sua base é constituída de trilhos fixados ao chão. Em frente ao aparelho, existe outra estrutura de aço menor que serve de apoio para detectores e materiais de ensaio e que desliza sobre os trilhos para uma melhor posição da distância fonte-detector (Figura 19).

A 25 centímetros da saída da janela do tubo de raios X, um suporte de acrílico foi colocado para que amparasse a filtração adicional para as devidas qualidades escolhidas para o experimento.

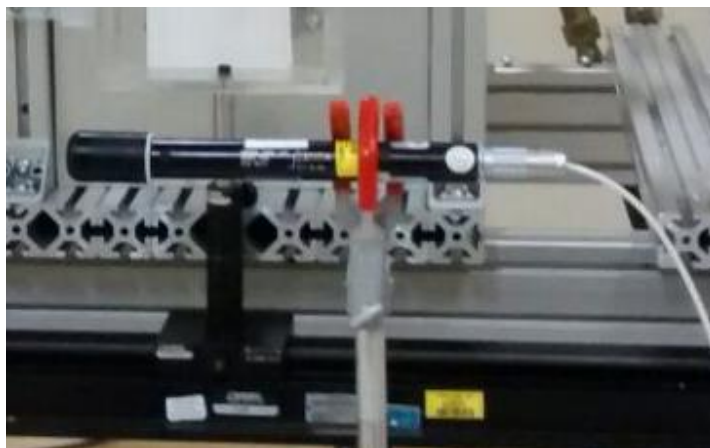
Figura 19 – Arranjo experimental para irradiação das placas de gesso.



Fonte: O autor.

As placas de gesso foram colocadas em outro suporte de acrílico, com distância de 50 cm do ponto focal. A câmara de ionização (Figura 20), foi colocada em um suporte de aço e posicionada a uma distância de 50 cm das placas de gesso, totalizando uma distância fonte-detector de 100 cm. O esquema para o arranjo experimental é apresentado na Figura 21.

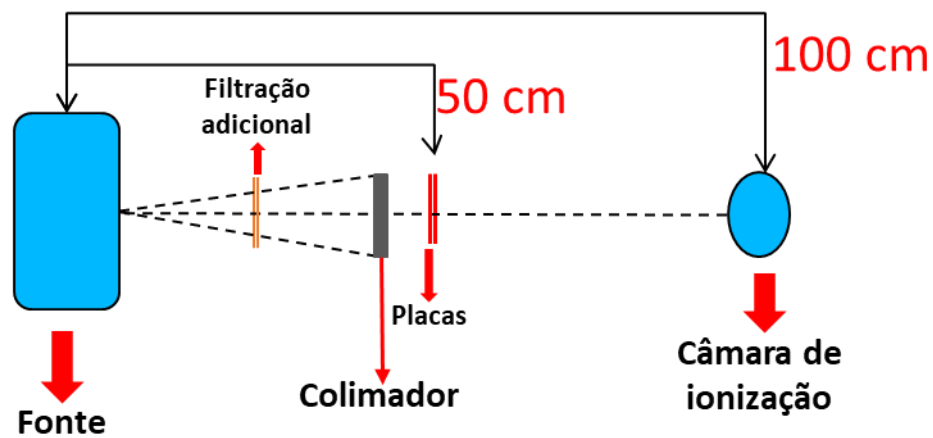
Figura 20 – Posicionamento da Câmara de ionização.



Fonte: O autor.

A câmara de ionização utilizada: Radcal Corporation – RC6, têm baixa dependência energética, inferior a 2% na faixa de energia utilizada (RADCAL , 2016).

Figura 21 – Esquema do arranjo experimental em condições de boa geometria no CRCN-NE.



Fonte: O autor.

As qualidades dos feixes de raios X utilizadas nesta etapa foi a de radiologia odontológica determinadas por Santos (2009) e já descritas na Tabela 5.

Após montagem do arranjo experimental, para cada espessura das placas de gessos e suas combinações, foi obtida a média de 10 medições de corrente (por 5 segundos cada medição), em ampère, com a câmara de ionização, representativas da transmissão do feixe de raios X. Para compor a curva de transmissão de cada granulometria, foram utilizados 10 pontos correspondentes às espessuras aproximadas de 2,5 mm, 5 mm e 8 mm (placas de gesso confeccionadas) e suas combinações, sendo assim para cada tipo de placa de gesso com as granulometrias diferenciadas (granulometria do fabricante, granulometria de 200 mesh e granulometria de 325 mesh). Lembrando que antes de qualquer irradiação, sempre eram feitas as medidas sem blindagem alguma entre a fonte e o detector, de modo a saber-se a intensidade inicial (I_0). Então, ao total, foram feitas 11 irradiações para cada tipo de placa de gesso. Os valores das espessuras utilizadas, incluindo as combinações das placas, estão descritas nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 – Espessuras das placas de gesso com granulometria do fabricante utilizadas no ensaio e suas combinações.

Espessuras (mm)	Combinações (mm)
2,578	1 Placa (2,578)
2,740	1 Placa (2,740)
5,242	1 Placa (5,242)
5,482	1 Placa (5,482)
7,820	2 Placas (2,578 + 5,242)
8,222	2 Placas (2,740 + 5,482)
8,534	1 Placa (8,534)
11,112	2 Placas (2,578 + 8,534)
13,776	2 Placas (5,242 + 8,534)
16,354	3 Placas (2,578 + 5,242 + 8,534)

Fonte: O autor.

Tabela 12 – Espessuras das placas de gesso com granulometria de 200 mesh utilizadas no ensaio e suas combinações.

Espessuras (mm)	Combinações (mm)
1,946	1 placa (1,946)
2,232	1 placa (2,232)
3,942	2 Placas (1,946 + 2,232)
5,352	1 placa (5,352)
7,298	2 Placas (1,946 + 5,352)
8,466	1 placa (8,466)
10,412	2 Placas (1,946 + 8,466)
11,508	3 Placas (1,946 + 5,122 + 4,440)
12,906	2 Placas (4,440 + 8,466)
16,860	3 Placas (1,946 + 4,440 + 5,122 + 5,352)

Fonte: O autor.

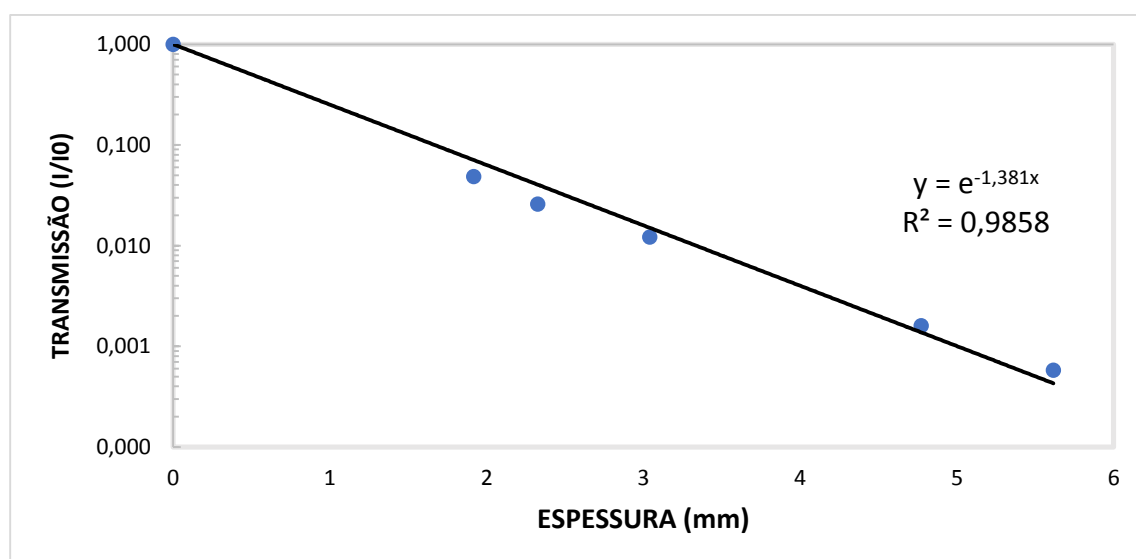
Tabela 13 – Espessuras das placas de gesso com granulometria de 325 mesh utilizadas no ensaio e suas combinações.

Espessuras (mm)	Combinações (mm)
2,052	1 placa (2,052)
2,480	1 placa (2,480)
4,926	1 placa (4,926)
5,296	1 placa (5,296)
6,978	2 Placas (2,052 + 5,296)
8,634	1 placa (8,634)
10,320	2 Placas (5,024 + 5,296)
13,378	2 Placas (4,926 + 8,452)
15,246	3 Placas (4,926 + 5,024+ 5,296)
17,684	2 Placas (8,634 + 9,050)

Fonte: O autor.

Os valores das correntes obtidas, durante as irradiações, para cada espessura do material e granulometrias (do fabricante, de 200 e 325 mesh), foram organizados em uma planilha Excel[®]. A partir da relação entre as correntes medidas para cada espessura e a corrente medida sem filtração (I/I_0), foi obtido a curva de transmissão desses materiais (Gráfico 8), assim como a CSR e CDR para cada tipo de placa de gesso e para as diferentes energias da qualidade de raios X odontológico.

Gráfico 8 – Exemplo da construção de uma curva de transmissão.



Fonte: O autor.

3.3.2 Irradiação e espectrometria das placas de gesso e mistura gesso e barita no DEN

A obtenção das curvas de transmissão, tanto quanto dos espectros das placas de gesso e da mistura gesso e barita foram realizadas no LMRI do DEN/UFPE. Foi usada a qualidade de referência WMV (feixe de mamografia), seguindo os padrões internacionais do PTB. Os materiais utilizados no experimento foram:

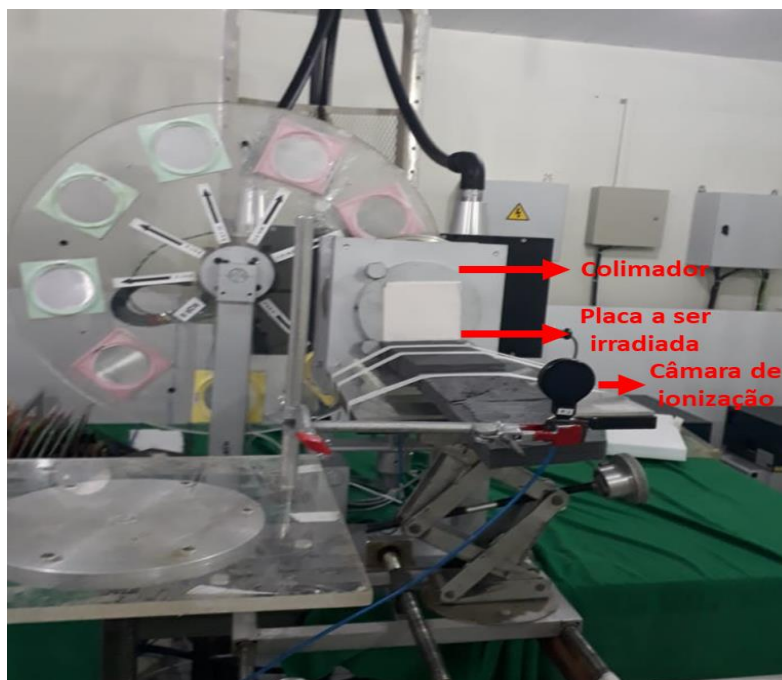
- Equipamento de raios X industrial, fabricante Pantak, modelo HF 320, constituído por um gerador Pantak, modelo HF320, série 9710-2779-CG, acoplado a um tubo de raios X, marca Comet, modelo MXR-321;
- Obturador;
- Colimadores;
- Placas a serem irradiadas;
- Filtração adicional da qualidade;
- Câmara de ionização para mamografia: PTW Freiburg, modelo TN34069;
- Câmara de ionização monitora: PTW Freiburg, modelo TN34014;
- Eletrômetro: Keithley, modelo 6517A;
- Eletrômetro: PTW, modelo T10010 UNIDOS E;
- Laser para posicionamento dos detectores;
- Detector CdTe: Amptek, XR-100T-CdTe.

3.3.2.1 Irradiação das placas de gesso e mistura gesso e barita

As irradiações das placas de gesso e as placas de mistura gesso e barita foram realizadas primeiramente para a avaliação das diferenças no poder de blindagem de cada uma.

O tubo de raios X está fixado em uma estrutura de aço e em frente a ele existe uma estrutura de aço menor que serve para apoiar todos os materiais necessários para o ensaio. No chão existem trilhos fixados que servem tanto de apoio quanto para deslizar os detectores de radiação, podendo dessa forma escolher a posição e distância fonte-detector (Figura 22).

Figura 22 – Arranjo experimental para irradiação das placas de gesso e gesso e barita.



Fonte: O autor.

Após o tubo de raios X, têm-se o obturador, também conhecido como *shutter*, que serve para liberar a saída dos raios X quando o mesmo é acionado para serem feitas as irradiações. Também foram usados dois colimadores para estreitar o feixe da radiação, sendo um antes dos filtros que caracterizam a qualidade WMV (Tabela 14), e o outro logo após a câmara de ionização monitora, que serve para fazer o controle da qualidade enquanto estiver acontecendo a irradiação. As placas de gesso e as placas de mistura gesso e barita foram colocadas em um suporte emborrachado de modo a manter a sustentação e integridade das mesmas, com distância de 50 cm da fonte (tubo de raios X). A câmara de ionização como pode ser visto, foi presa por uma garra e posicionada a uma distância de 50 cm das placas, totalizando uma distância fonte-detector de 100 cm. O esquema para o todo arranjo experimental citado pode ser visto na Figura 23.

Tabela 14 – Qualidades dos feixes de mamografia (WMV) implantados no LMRI-DEN/UFPE.

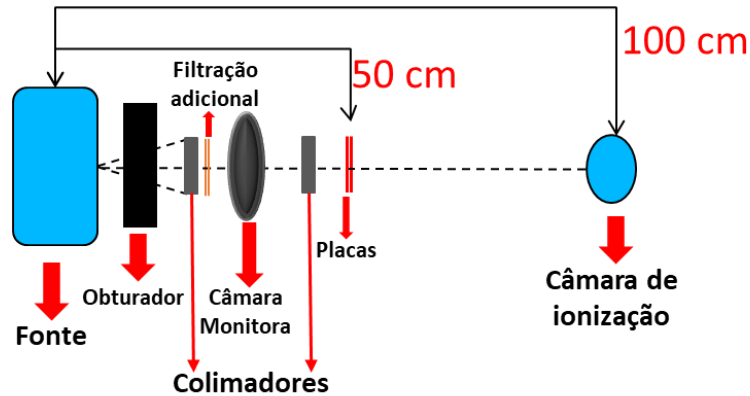
Qualidade da Radiação	Tensão no tubo (kV)	Corrente no tubo (mA)	Filtração adicional (mmMo) ¹
WMV28	28	10	0,06
WMV35	35	10	0,06

¹Filtração adicional da qualidade em milímetros de Molibdênio.

Fonte: O autor.

A câmara de ionização específica para mamografia utilizada foi a de marca PTW Freiburg, modelo TN34069. A mesma tem baixa dependência energética, inferior a 2% na faixa de energia utilizada (PTW, 2016).

Figura 23 – Esquema do arranjo experimental em condições de boa geometria no DEN/UFPE.



Fonte: O autor.

Após a montagem do arranjo experimental, para cada espessura das placas de gesso e placas de gesso e barita e suas combinações, foi obtida a média de 3 medições da corrente (sendo 60 segundos cada medição), em ampère.

Para compor a curva de transmissão para as placas de gesso e barita, foram utilizados 11 pontos correspondentes às espessuras que variavam de 1,918 mm até 16,238 mm. Já para as placas de gesso, foram feitas 11 medições de diferentes espessuras variando entre 2,578 mm e 16,354 mm. Lembrando que antes de qualquer irradiação, sempre eram feitas as medidas sem blindagem alguma entre a fonte e o detector, de modo a saber-se a intensidade inicial (I_0). As Tabela 15 e 16 mostram as espessuras de cada tipo de placa, bem como as combinações usadas durante as irradiações experimentais.

Tabela 15 – Espessuras das placas de mistura gesso e barita utilizados no ensaio e suas combinações.

Espessuras (mm)	Combinações (mm)
0,918	1 Placa (0,918)
2,326	1 Placa (2,326)
3,041	1 Placa (3,041)
4,772	1 Placa (4,772)
5,615	1 Placa (5,615)
7,533	2 Placas (1,918 + 5,615)
9,675	3 Placas (1,918 + 2,142 + 5,062)
11,217	2 Placas (5,162 + 5,602)
13,135	3 Placas (1,918 + 5,162 + 5,602)
16,238	3 Placas (5,020 + 5,162 + 5,602)

Fonte: O autor.

Tabela 16 – Espessuras das placas de gesso com granulometria do fabricante utilizadas no ensaio e suas combinações.

Espessuras (mm)	Combinações (mm)
2,578	1 Placa (2,578)
2,740	1 Placa (2,740)
5,242	1 Placa (5,242)
5,482	1 Placa (5,482)
7,820	2 Placas (2,578 + 5,242)
8,222	2 Placas (2,740 + 5,482)
8,534	1 Placa (8,534)
11,112	2 Placas (2,578+8,534)
13,776	2 Placas (5,242+8,534)
16,354	3 Placas (2,578+5,242+8,534)

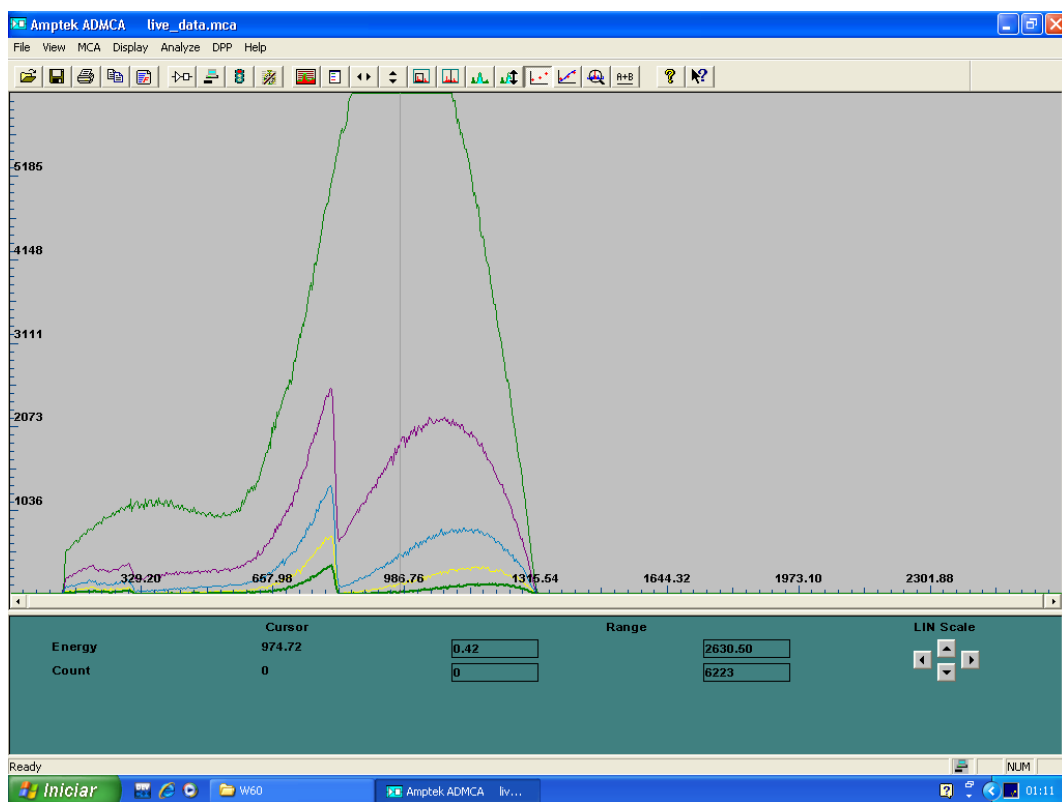
Fonte: O autor.

Os valores das correntes obtidas, durante as irradiações, foram organizados em uma planilha Excel[®], sendo separadas a depender do tipo de placa irradiada e suas diferentes espessuras. A partir da relação entre as correntes medidas para cada espessura e a corrente medida sem filtração, ou seja, a intensidade final sobre a intensidade inicial (I/I_0) foi obtida a curva de transmissão desses materiais, assim como a CSR para cada tipo de placa.

3.3.2.2 Espectrometria das placas de gesso e mistura gesso e barita

Os espectros de raios X foram medidos através de um semiconductor de CdTe. O detector de CdTe é acoplado ao pré-amplificador, amplificador, analisador multicanal e fonte de alta tensão, além de ser resfriado termoeleticamente por meio de células de Peltier. Os dados provenientes do MCA foram controlados por meio do software ADMCA da Amptek Inc. A Figura 24 mostra um exemplo de como os espectros aparecem no programa.

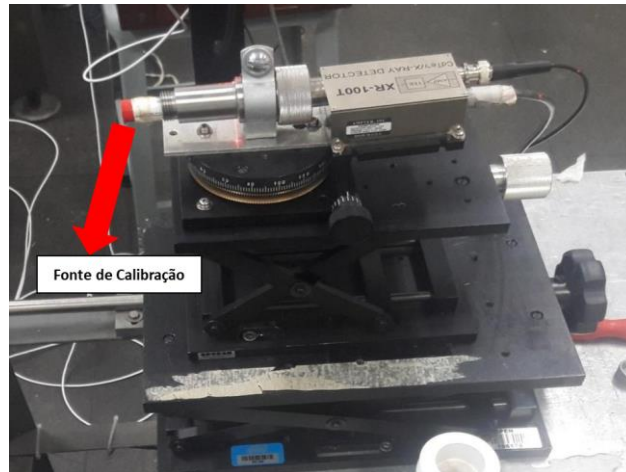
Figura 24 – Exemplo de espectros no software usado.



Fonte: Lopes et al., 2013.

As alturas de pulsos registrados em cada canal do MCA foram utilizadas para correção do espectro de raios X e a curva de calibração do detector, em termos de conversão de canal em energia, foi determinada utilizando as fontes radioativas padrões de Cádmiom-109, Bário-133 e Amerício-241 (^{109}Cd , ^{133}Ba e ^{241}Am). A Figura 25 mostra o esquema de calibração de um detector CdTe sendo feita.

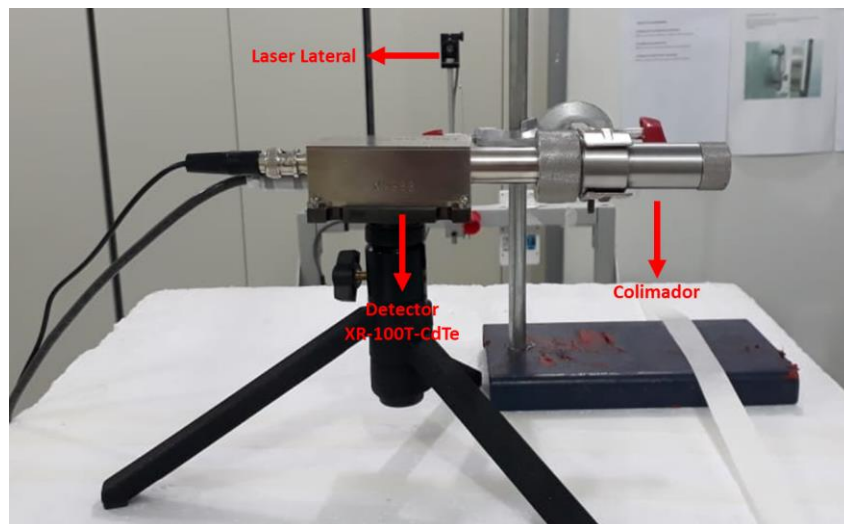
Figura 25 – Esquema de calibração de um detector CdTe.



Fonte: Adaptado de Santos (2017).

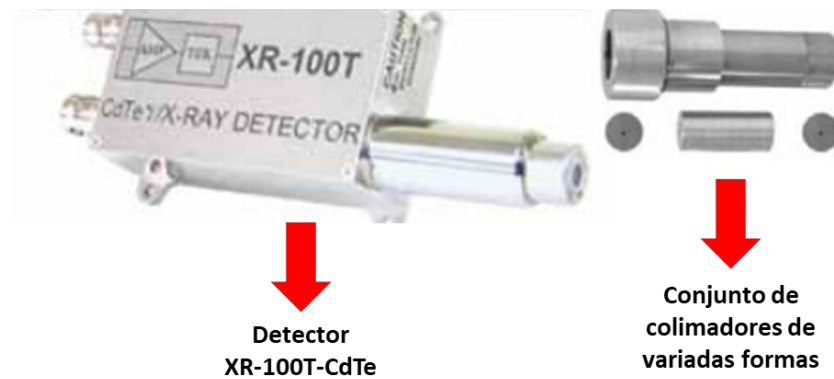
Após a calibração do detector, o mesmo foi utilizado para obtenção dos espectros de raios X nas qualidades WMV28 e WMV35, implantados no LMRI do DEN/UFPE. Para a montagem do arranjo foi necessário o auxílio de dois *lasers*, sendo um lateralmente e o outro por trás, para o correto posicionamento do detector CdTe (Figura 26), visto que a entrada deste detector tem o diâmetro de abertura muito fino para que o mesmo não tenha saturação com a chegada dos fótons de raios X, além disto, foi usado um conjunto de colimadores para diminuir ainda mais a intensidade da radiação (Figura 27).

Figura 26 – Posicionamento do detector CdTe a partir do laser lateral.



Fonte: O autor.

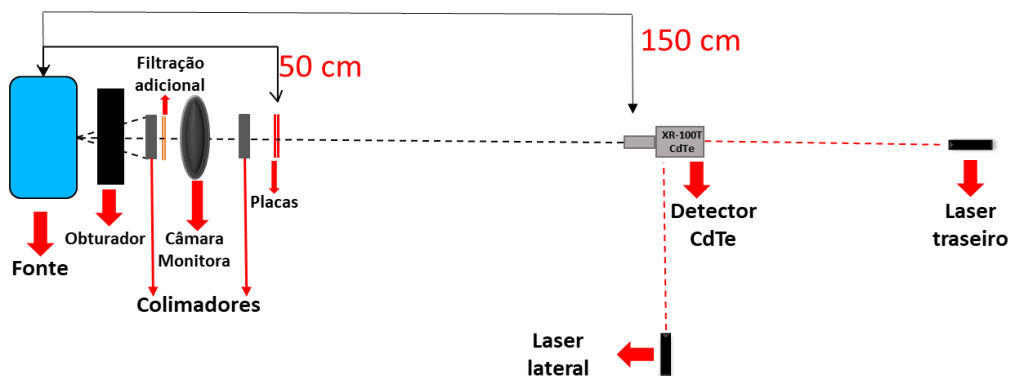
Figura 27 – Detector CdTe e o seu conjunto de colimadores.



Fonte: Manual do detector XR-100T-CdTe da Amptek Inc.

Ainda levando em conta a possível saturação do detector, o próprio foi colocado a uma distância de 150 cm em relação ao tubo de raios X, porém as placas continuaram sendo utilizadas a uma distância de 50 cm da fonte de radiação. Assim como todos os outros materiais continuaram no mesmo lugar, como já explicado no item 3.3.2.1, contudo a Figura 28 explicita bem todo o novo arranjo montado para a medição dos espectros de raios X com o detector CdTe.

Figura 28 – Arranjo para obtenção dos espectros de raios X.



Fonte: O autor.

As primeiras medições dos espectros foram feitas sem os filtros adicionais de molibdênio para as qualidades WMV28 e WMV35. Logo após isso foram colocados os filtros adicionais, porém sem qualquer espessura e por último as espessuras foram sendo adicionadas para que se pudesse estudar o poder de atenuação dos dois diferentes tipos de placas, a de gesso puro e a mistura de gesso com barita.

O próprio software do detector CdTe usado não permite salvar os espectros de forma a serem utilizados diretamente como gráfico ou imagem. Então para que se pudesse construir o

gráfico, posteriormente o programa dá a opção de salvar os dados em um arquivo de texto de extensão .mca. (Figura 29).

Figura 29 – Exemplo do arquivo .mca.

```
<<PMCA SPECTRUM>>
TAG - live_data
DESCRIPTION -
GAIN - 2
THRESHOLD - 50
LIVE_MODE - 0
PRESET TIME - 0
LIVE TIME - 390.800000
REAL TIME - 414.813333
START TIME - 07/23/2004 22:57:58
SERIAL NUMBER - 3287
<<CALIBRATION>>
LABEL - Energy
258 30.08
502 59.5
681 81
744 88.03
<<DATA>>
2
2
1
12
31
39
53
48
32
20
7
5
1
```

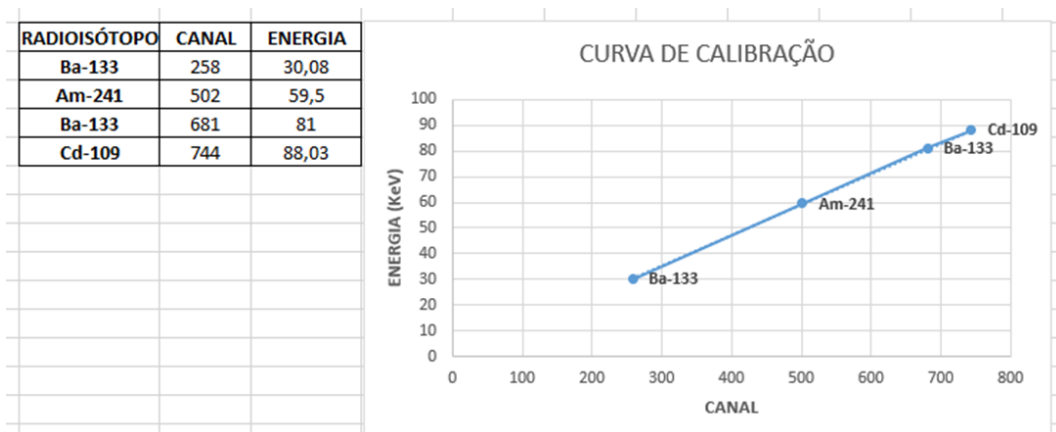
Cabeçalho

Coluna dos canais

Fonte: O autor.

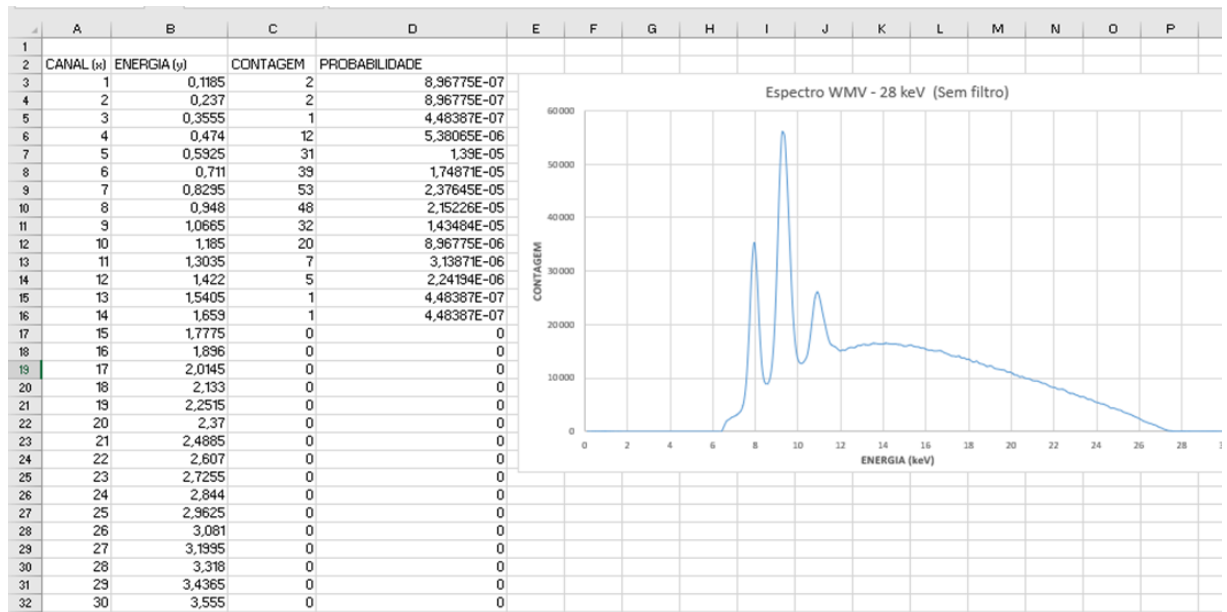
Neste arquivo é encontrado um cabeçalho simples contendo informações básicas sobre o detector e posterior a ele encontra-se uma coluna com 1024 linhas, cada linha representando do canal 1 ao 1024 do detector. Em cada linha é possível ver números com diferentes valores, que correspondem ao número total de fótons que chegaram em determinado canal. Para que se possa construir o espectro, é necessário saber o valor que cada canal tem em energia, através da curva de calibração (Figura 30). Após descobrir a equivalência canal/energia, os gráficos dos espectros puderam ser montados em planilhas (Figura 31).

Figura 30 – Curva de calibração canal/energia.



Fonte: O autor.

Figura 31 – Exemplo de gráfico retratando um espectro medido.



Fonte: O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

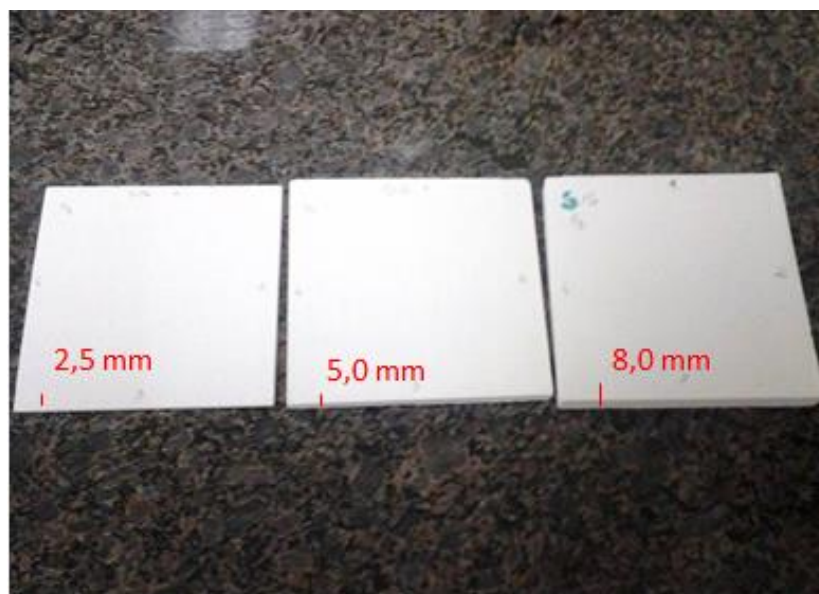
Os resultados alcançados neste trabalho estão descritos e separados por tópicos de acordo com as etapas realizadas e metodologias aplicadas, que são: Caracterização física e química das placas de gesso e as placas de mistura gesso e barita, as curvas de transmissão, CSR, CDR e espectros obtidos a partir das placas já citadas, de acordo com as qualidades odontológica e WMV.

4.1 CONFECÇÃO DAS PLACAS

4.1.1 Placas de gesso

Apesar de todo cuidado e controle na hora da construção das placas de gesso, as mesmas foram feitas de modo artesanal. Por mais que tenham sido utilizados moldes de acrílico com espessuras distintas de 2,5 mm, 5,0 mm e 8,00 mm, as placas ainda sim saíram com pequenas variações de tamanho e espessura entre elas (Figura 32). Portanto as densidades e espessuras de cada placa de gesso variam entre si.

Figura 32 – Placas de gesso com suas espessuras aproximadas: 2,5 mm, 5 mm e 8 mm.



Fonte: O autor.

As Tabelas 17, 18, e 19 mostram mais detalhadamente tudo sobre as características físicas de cada tipo de placa de gesso com diferentes granulometrias.

Tabela 17 – Caracterização física das placas de gesso com granulometria do fabricante.

Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (cm³)	Densidade (g/cm³)
2,578	28,85	25,04	1,15
2,740	29,64	26,17	1,13
5,242	63,08	52,14	1,21
5,482	65,14	56,10	1,16
8,188	98,12	81,75	1,20
8,336	100,91	83,50	1,21
8,533	103,61	86,02	1,20

Fonte: O autor.

Para cada tipo de placa de gesso foram feitos um total de nove placas, porém como pode ser visto na Tabela 17, há apenas sete placas para a granulometria do fabricante, isso ocorreu porque no decorrer do trabalho duas placas acabaram quebrando e as mesmas ficaram de fora do experimento como um todo.

Tabela 18 – Caracterização física das placas de gesso com granulometria 200 mesh.

Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (cm³)	Densidade (g/cm³)
1,946	22,74	18,61	1,22
1,996	22,97	20,26	1,13
2,232	25,22	21,91	1,15
4,440	54,38	44,14	1,23
5,122	61,41	51,50	1,19
5,352	64,42	54,01	1,19
8,466	113,55	95,63	1,19
8,586	111,64	93,18	1,20
8,784	114,21	94,52	1,21

Fonte: O autor.

Tabela 19 – Caracterização física das placas de gesso com granulometria de 325 mesh.

Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (cm³)	Densidade (g/cm³)
2,052	22,93	20,06	1,14
2,480	26,83	24,50	1,10
2,472	25,47	24,99	1,02
4,926	58,10	48,80	1,19
5,024	58,03	48,26	1,20
5,296	58,31	50,64	1,15
8,452	97,81	79,85	1,23
8,634	100,90	84,94	1,20
9,050	106,90	87,24	1,23

Fonte: O autor.

Em adição, é importante dizer que nem todas as placas construídas foram utilizadas no processo de irradiação. Também é notável que, embora as placas de gesso sejam diferentes entre elas, a densidade das mesmas não teve grande variação aparente, ficando entre 1,019 e 1,232 g/cm³, porém a variação entre elas ficou em 17,29%.

4.1.2 Placas de mistura gesso e barita

A Tabela 20 mostra os detalhes da caracterização das placas de mistura gesso e barita. Foram feitas 12 placas de mistura de gesso e barita, mas nem todas foram usadas também durante o experimento de irradiação. Para o material misturado é nítido o aumento da densidade se comparado com as placas de gesso puro, isso se dá devido ao incremento de um material mais denso que o gesso, no caso a barita. A variação entre as densidades ficou em 7,40%, sendo o menor e o maior valor, respectivamente, 1,64 e 1,77 g/cm³.

Tabela 20 – Caracterização física das placas de mistura gesso e barita.

Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (cm³)	Densidade (g/cm³)
1,918	31,44	18,21	1,727
2,142	34,07	20,77	1,640
2,219	36,44	21,41	1,702
2,327	37,74	22,71	1,662
2,483	40,93	24,72	1,656
3,041	41,99	29,26	1,708
4,773	81,35	45,99	1,769
5,021	83,42	48,04	1,736
5,143	84,49	48,63	1,737
5,162	86,74	48,98	1,771
5,393	89,76	50,85	1,765
5,603	92,52	54,65	1,693

Fonte: O autor.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

Visando uma caracterização mais detalhada dos materiais usados no experimento, foi feita uma leitura quali-quantitativa no equipamento EDXRF, de modo a saber quais elementos podem ser encontrados em cada amostra, assim como suas porcentagens.

4.2.1 Resultados da caracterização quali-quantitativa dos materiais

Foi utilizado o seguinte material de referência para a matriz analisada, SRM – *Standard Reference Material*. Este material padrão destina-se a determinação de elementos constituintes em feldspato ou material de matriz semelhante. O SRM99a é um feldspato de soda em pó (geralmente é um mineral branco limpo que contém sódio, alumina e sílica, juntamente com potássio e cálcio) que foi peneirado até 200 mesh e misturado para garantir a homogeneidade. Os elementos constituintes são certificados (SRM99a), baseiam-se em medições do NIST – *National Institute of Standards and Technology* (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, localizado nos Estados Unidos da América) e em vários laboratórios industriais. Na Tabela 21 se pode ver a comparação entre o resultado do Certificado de Análise e o resultado obtido da leitura do SRM99a na máquina.

Tabela 21 – Comparação entre o Certificado de Análise e a leitura obtida para o SRM99a no EDXRF.

Constituintes (Certificado de Análise)	Valor Certificado – Percentual por peso	Análise do Material de Referência – SRM99a	Resultado do Material de Referência – SRM99a (%)
SiO ₂	65,2	SiO ₂	61,577
Al ₂ O ₃	20,5	Al ₂ O ₃	23,141
Na ₂ O	6,2	Na ₂ O	5,711
K ₂ O	5,2	K ₂ O	6,510
CaO	2,14	CaO	2,536
BaO	0,26	BaO	0,357
Fe ₂ O ₃	0,065	Fe ₂ O ₃	0,075
MgO	0,02	SrO	0,065
P ₂ O ₅	0,02	Rb ₂ O	0,014
TiO ₅	0,007	PbO	0,006
-	-	Ir ₂ O ₃	0,005
-	-	ZrO ₂	0,002

Fonte: Arquivo do Certificado de Análise e do EDXRF (Adaptado).

O resultado da análise do SRM99a ficou dentro do esperado, sendo os componentes mais importantes na leitura desta matriz, o óxido de bário e de cálcio, já que respectivamente aparecerão nas análises do material barita e do gesso, assim como da mistura desses dois materiais.

A seguir é possível observar nas Tabelas 24 a 27 as análises químicas e comentários dos materiais usados para as construções das placas de gesso e mistura gesso e barita, bem como a análise química das placas depois de prontas. Começando pela análise do pó de gesso logo na Tabela 22.

A análise para o pó de gesso ao qual foi utilizado para se fazer as placas, contém uma concentração com cerca de 99% de Sulfato de Cálcio (CaSO₄) da composição total. Enquanto menos de 1% encontrado é de impurezas como: Óxido de Potássio (K₂O), Óxido de Estrôncio (SrO), Óxido de Fósforo (P₂O₅), Óxido de Ferro (Fe₂O₃), Dióxido de Zircônio (ZrO₂).

Tabela 22 – Análise do pó de gesso.

Análise	Resultados (%)
SO ₃	68,792
CaO	30,787
K ₂ O	0,224
SrO	0,106
P ₂ O ₅	0,057
Fe ₂ O ₃	0,031
ZrO ₂	0,003

Fonte: Arquivo da análise no EDXRF (Adaptado).

Para o gesso as impurezas contidas na matéria prima podem afetar o tempo de pega, acelerando-a por atuarem como núcleos de cristalização. Desta forma, torna-se fundamental determinar a sua pureza. No entanto, diante das frações mássicas atribuídas as impurezas presentes, pode-se observar a elevada pureza do material, assim como explica (Barbosa; Ferraz; Santos, 2014).

Como mostra a Tabela 23, as placas de gesso após prontas continuaram com um alto grau de pureza (com quase 99%) assim como o pó de gesso, o seu material de origem.

Tabela 23 – Análise da placa de gesso.

Análise	Resultados (%)
SO ₃	67,291
CaO	31,701
SrO	0,276
K ₂ O	0,235
SiO ₂	0,226
Fe ₂ O ₃	0,105
La ₂ O ₃	0,100
P ₂ O ₅	0,058
CuO	0,007

Fonte: Arquivo da análise no EDXRF (Adaptado).

As contaminações existentes continuam as mesmas: Óxido de Estrôncio (SrO), Óxido de Potássio (K₂O), Dióxido de Silício (SiO₂), Óxido de Fósforo (P₂O₅). Fora estas foram encontradas em baixo teor: Óxido de Ferro e Óxido de Cobre (Fe₂O₃ e CuO, respectivamente), as

quais podem ter sido contaminadas no momento do corte das placas de gesso com serra manual, sendo assim, já era esperado esse tipo de contaminante. Para o Dióxido de Silício e Óxido de Lantânio (La_2O_3), provavelmente por ter sido feito de forma manual e colocado para secar em local aberto, partículas de areia podem ter contaminado as placas de gesso, ainda que pouco.

A análise do pó de barita ao qual faz parte da mistura da placa de gesso e barita, pode ser visto na Tabela 24.

Tabela 24 – Análise do pó de barita.

Análise	Resultados (%)
BaO	33,745
SO_3	30,640
SiO_2	29,581
CeO_2	2,034
Al_2O_3	1,087
CaO	0,783
Fe_2O_3	0,628
SrO	0,585
K_2O	0,170
ZrO_2	0,026

Fonte: O autor.

O Sulfato de bário (BaSO_4) tem uma concentração com cerca de 64% da amostra total, logo após com um pouco mais que 29% é listado o Dióxido de silício (SiO_2), que é areia. Um adendo sobre a areia, a mesma já veio misturada com a argamassa baritada, ou seja, faz parte da composição do material usado, por isso já era esperado esse total de concentração, não sendo considerado contaminação, mas sim um aditivo. Também era esperado encontrar o Dióxido de Cério (CeO_2), pois o mesmo é encontrado em areias monazíticas. Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Óxido de Ferro (Fe_2O_3), Óxido de Cálcio (CaO), e Dióxido de Zircônio (ZrO_2) eram esperados que aparecessem na leitura, principalmente os dois primeiros, pois estão associados ao Cério. O Óxido de Potássio (K_2O) e Óxido de Estrôncio (SrO) podem ser considerados impurezas.

A análise da placa de mistura gesso e barita pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25 – Análise da placa de mistura gesso e barita.

Análise	Resultados (%)
SO ₃	53,271
CaO	15,794
BaO	15,137
SiO ₂	12,118
P ₂ O ₅	1,135
CeO ₂	1,037
Al ₂ O ₃	0,696
SrO	0,383
Fe ₂ O ₃	0,290
K ₂ O	0,091
ZrO ₂	0,049

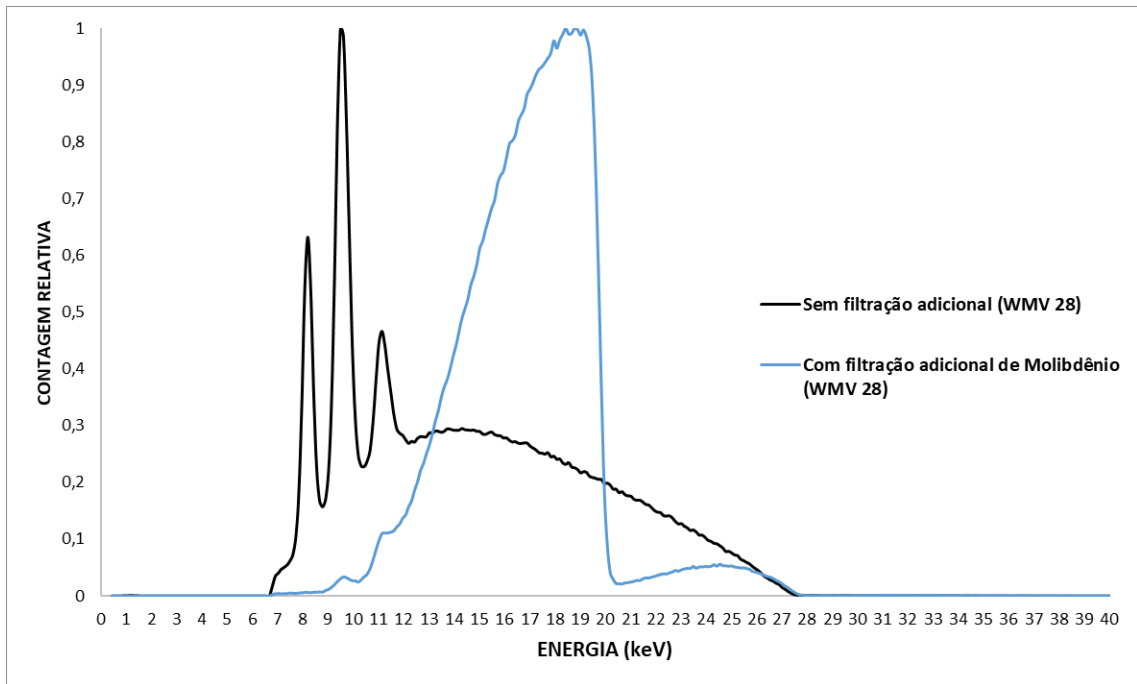
Fonte: O autor.

As maiores leituras são justamente os de Sulfato de Cálcio e Sulfato de Bário, seguido do Óxido de Silício. Os menores percentuais são os que apareceram tanto nas análises do material gesso e do material da argamassa de barita como já foi evidenciado nas tabelas anteriores.

4.3 ESPECTROMETRIA DAS PLACAS DE GESSO E DA MISTURA GESSO E BARITA IRRADIADAS NO DEN

Antes de serem feitas as medidas dos espectros de raios X com as placas de gesso e mistura gesso e barita, primeiramente foram feitas as medições com os espectros “puros”, ou seja, sem a colocação de filtro adicional na frente do feixe, levando em conta apenas o alvo de tungstênio (W). Logo após, foi colocado o filtro adicional de molibdênio (Mo). Como pode ser visto nos Gráficos 9 e 10, existem dois espectros comparando o antes e o depois (sem filtro e com filtro) para as energias de 28 e 35 keV, que são nas qualidades de WMV28 e WMV35, respectivamente.

Gráfico 9 – Comparação de espectros até 28 keV com e sem filtração adicional.



Fonte: O autor.

O Gráfico 9 mostra a comparação dos espectros até 28 keV. É possível notar no espectro de linha preta que quando o feixe não é barrado por nenhum filtro adicional, aparecem entre 8,21 e 11,15 keV três picos discretos no espectro, sendo essa a característica (formação de raios X característico) do alvo de W do tubo de raios X usado, que está bem próximo ao que é encontrado de acordo com o National Institute of Standards and Technology (NIST), conforme Tabela 26. Após os picos, a contagem de raios X (número de fótons) vai caindo de forma contínua até o valor máximo de energia ($E_{\text{máx}}$) aplicado ao tubo, no caso 28 keV.

Tabela 26 – Comparação entre os picos do espectro medido WMV28 e NIST.

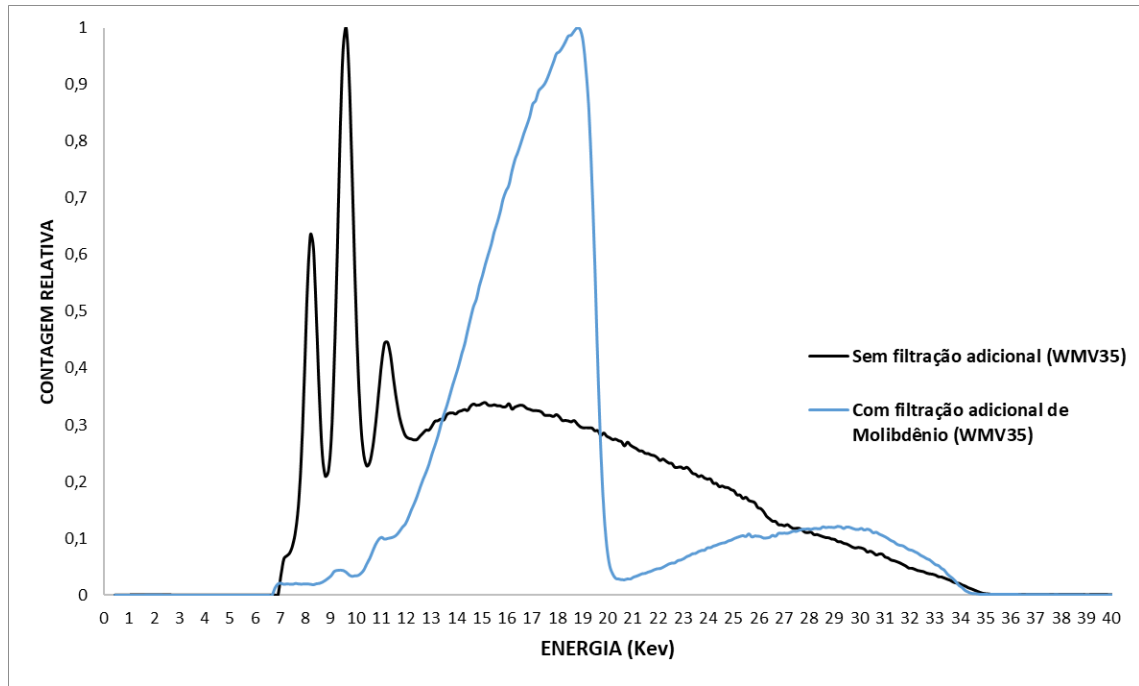
Picos	WMV 28 (keV)	NIST (keV)	Erro (%)
1º Pico	8,21	8,39	2,19
2º Pico	9,51	9,67	1,68
3º Pico	11,15	11,28	1,17

Fonte: Adaptado do site do NIST (Internet).

Ainda no Gráfico 9, mas para o espectro em azul, observa-se que quando o filtro adicional de Mo é colocado na frente do feixe de raios X, os mesmos barram as radiações de mais baixas energias, fazendo com que os espectros discretos quase sumam na contagem. Os raios X “moles” (de baixa energia) foram quase todos atenuados pela filtragem, dando lugar no

espectro a uma maior intensidade (contagem) de raios X “duros” (de mais alta energia), depois é visto que a contagem cai bruscamente entre 20 e 21 keV.

Gráfico 10 – Comparação de espectros até 35 keV com e sem filtração adicional.



Fonte: O autor.

Os espectros da Gráfico 10 mostram a comparação entre feixes de raios X sem filtração adicional e com filtro adicional de Mo para energia até 35 keV. A linha na cor preta é muito parecida com a da Gráfico 16, tendo três picos discretos entre 8,21 keV e 11,27 keV (Tabela 27) e depois com o espectro contínuo chegando até a $E_{\text{máx}}$ de quase 35 keV. Para o espectro em azul, é visto que os raios X “moles” estão sendo barrados depois da colocação do filtro de Mo e há uma maior a passagem dos raios X “duros”, também vale salientar uma maior quantidade de fótons de raios X na sua contagem total, se comparado com o Gráfico 18, isso se dá por causa do aumento da tensão no tubo de 28 kV para 35 kV. Quando se aumenta a tensão no tubo a quantidade de raios X também aumenta.

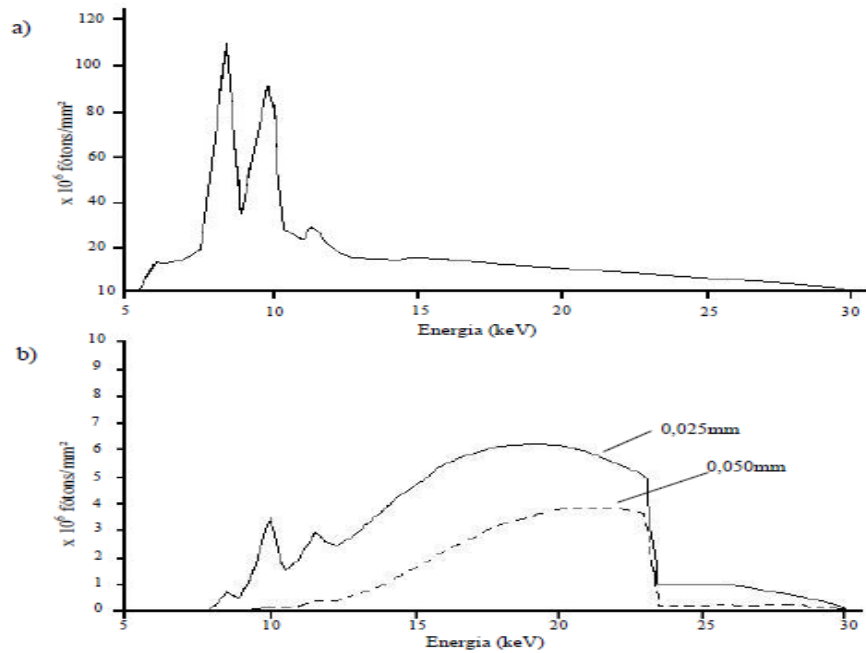
Tabela 27 – Comparação entre os picos do espectro medido WMV35 e NIST.

Picos	WMV 35 (keV)	NIST (keV)	Erro (%)
1º Pico	8,21	8,39	2,19
2º Pico	9,62	9,67	0,50
3º Pico	11,27	11,28	0,10

Fonte: Adaptado do site do NIST (Internet).

Em questão de comparação, no Gráfico 11 pode se ver a diferença entre um espectro gerado em um alvo de W para baixas energias, sendo o (a) sem filtração adicional e o (b) com filtros adicionais de Rh com diferentes espessuras.

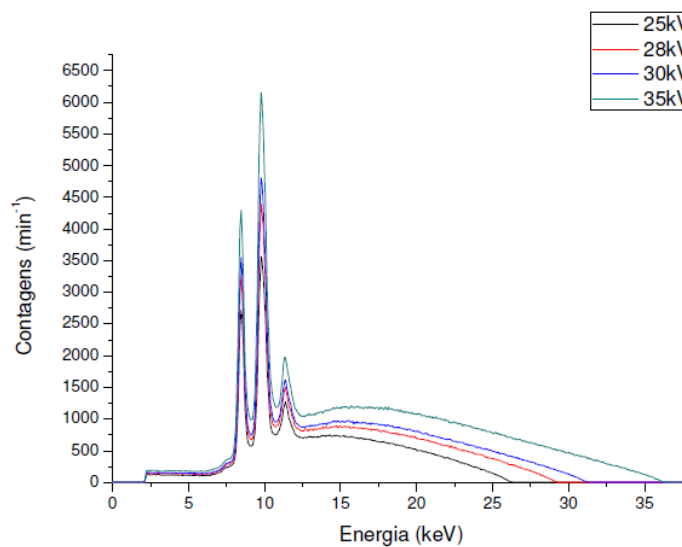
Gráfico 11 – Espectro gerado em alvo de Tungstênio com e sem filtro adicional de Rh.



Fonte: Bushberg et al. (2001), citado por Batista (2006).

Corrêa et al. (2009), também demonstraram em seu trabalho a diferença dos espectros com e sem filtração adicional e a diferença e características entre eles (Gráficos 12 e 13).

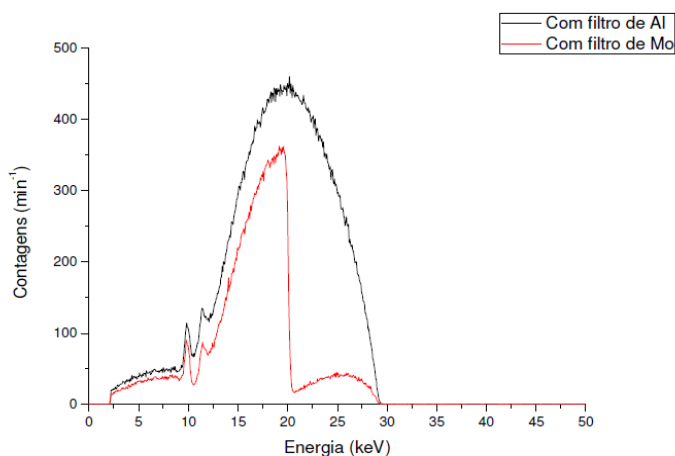
Gráfico 12 – Espectros de feixes diretos (sem filtração adicional).



Fonte: Corrêa et al. (2009).

No Gráfico 12 é possível ver espectros dos feixes diretos de radiação X, quando são aplicadas tensões de 25, 28, 30 e 35kV em um tubo com alvo de tungstênio. Já para o Gráfico 13 é mostrado um exemplo onde são apresentados espectros na qualidade RQR-M2 (tensão de 28kV), sendo as filtrações utilizadas de $(0,460 \pm 0,005)$ mmAl e $(0,006 \pm 0,005)$ mmMo.

Gráfico 13 – Espectros na qualidade RQR-M2.

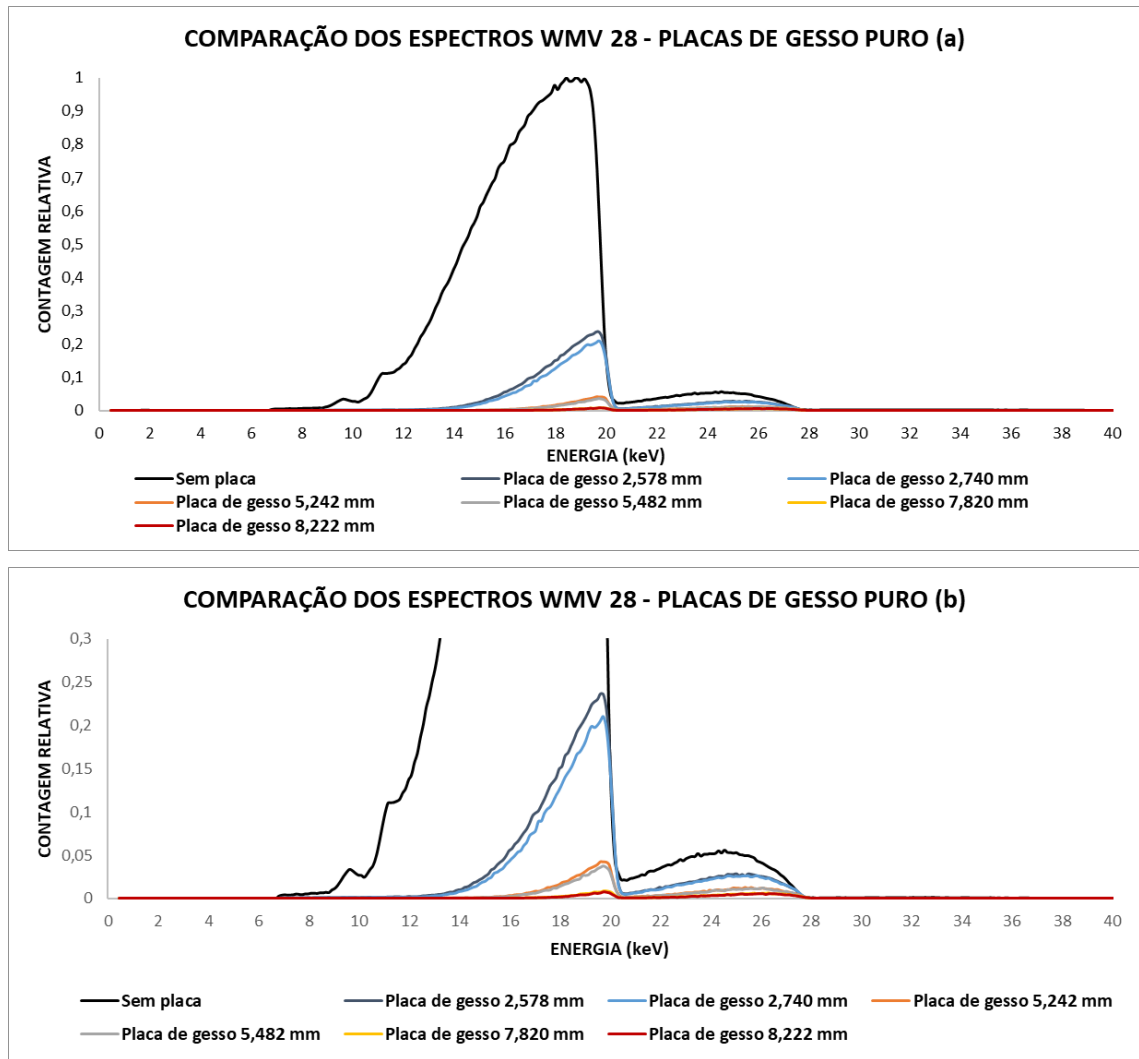


Fonte: Corrêa et al. (2009).

Os espectros medidos por Corrêa et al. (2009), têm uma forma e comportamento muito parecidos com os espectros medidos neste trabalho, o que dá base para que se possa afirmar que a espectrometria teve um resultado correto e esperado para o tipo de filtração utilizada (Molibdênio).

Do Gráfico 14 ao 17, é mostrado o comportamento na forma dos espectros desde a atenuação dos feixes de raios X apenas com a filtração adicional de Mo (sem placa) e com a colocação das placas de gesso e mistura gesso e barita.

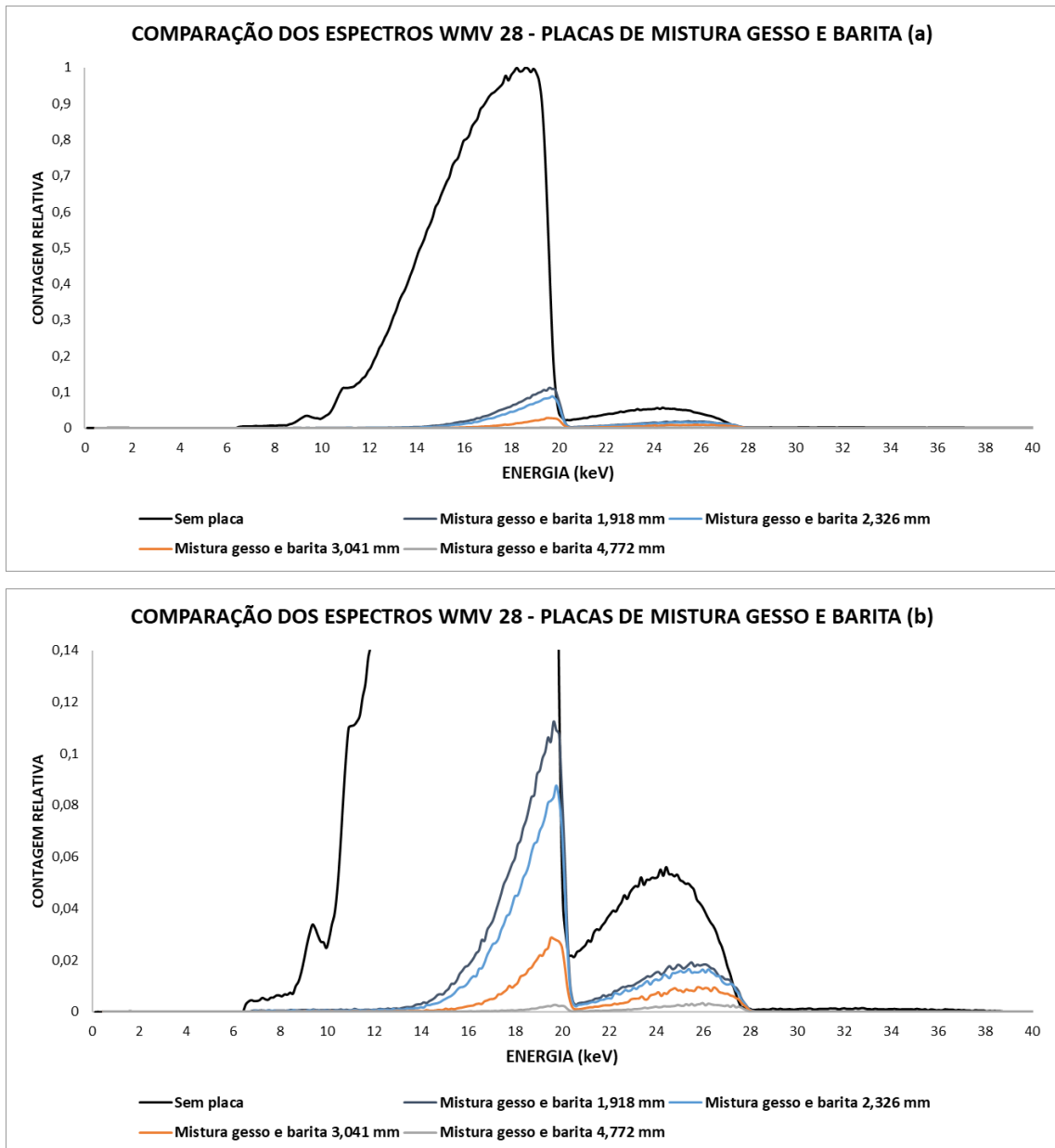
Gráfico 14 – Comparação de espectros na qualidade WMV 28 – Placas de gesso.



Fonte: O autor.

O Gráfico 14 mostra o espectro na qualidade WMV 28 com a utilização da placa de gesso com diferentes espessuras para atenuação do feixe de raios X até 28 keV. É possível ver no Gráfico 15 o uso das placas de mistura gesso e barita para a qualidade WMV 28.

Gráfico 15 – Comparação de espectros na qualidade WMV 28 – Placas de mistura gesso e barita.



Fonte: O autor.

É fácil notar a diferença quando comparados os espectros das placas de gesso e mistura gesso barita, ainda que se mantendo os mesmos parâmetros de irradiação para ambas. Ainda que as placas de gesso atenuem muito bem os fótons de raios X com até 28 keV, as placas de mistura gesso e barita fazem esse trabalho ainda melhor e isso se deve a diferença entre as suas densidades.

Para uma melhor análise e entendimento dos resultados, na Tabela 28 é visto o número total de contagens de fótons de raios X levando em conta todo o espectro para cada tipo de placa e suas diferentes espessuras na qualidade WMV 28.

Tabela 28 – Número total de fótons de raios X em diferentes placas – WMV 28.

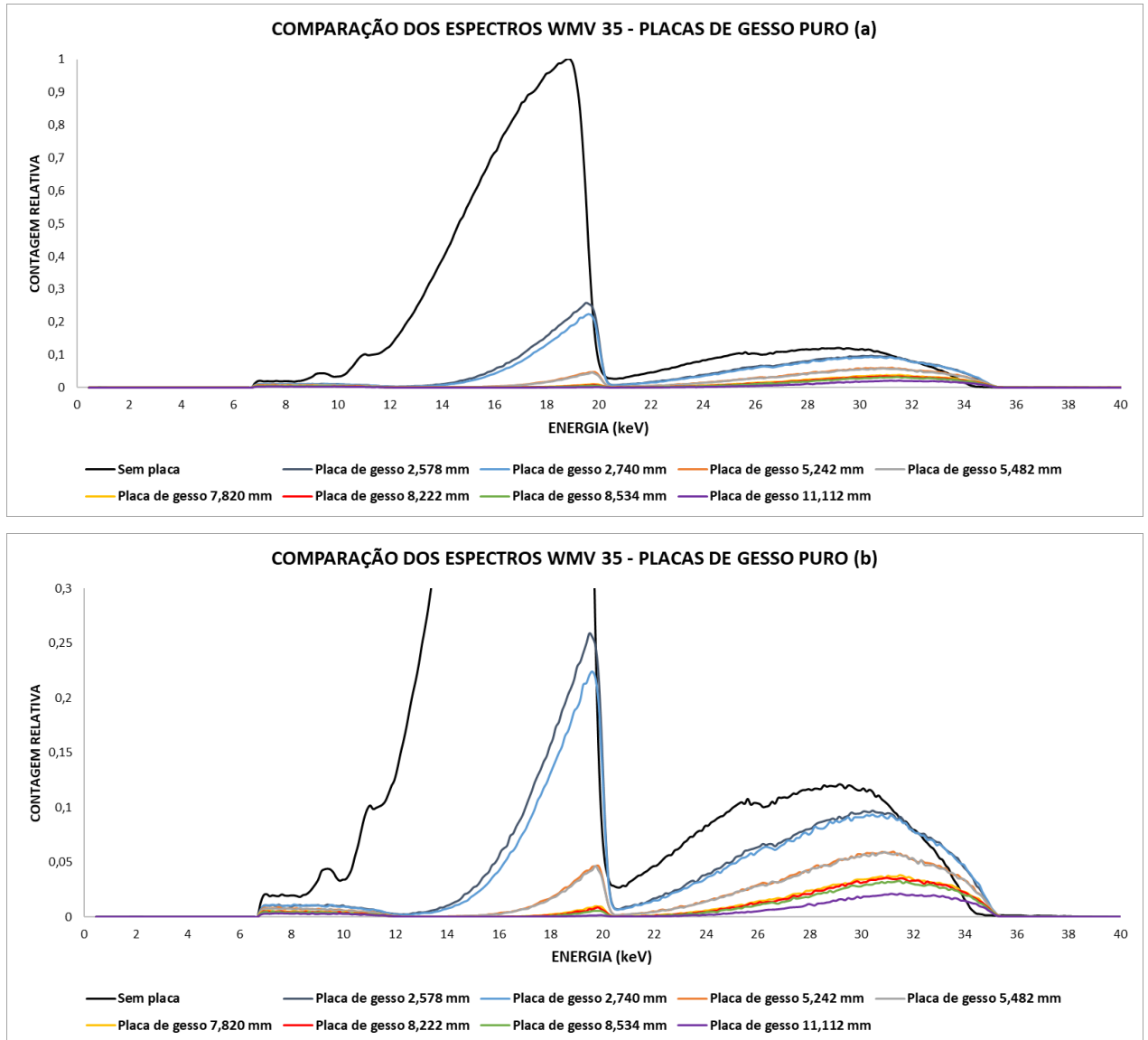
Tipo de placa	Espessura (mm)	Nº total de fótons de raios X
Sem placa (apenas filtro de Mo)	0	2.299.562
Gesso puro	2,578	328.991
Gesso puro	2,740	283.696
Gesso puro	5,242	55.310
Gesso puro	5,482	48.372
Gesso puro	7,820	14.878
Gesso puro	8,222	13.013
Mistura gesso e barita	1,918	150.453
Mistura gesso e barita	2,326	144.055
Mistura gesso e barita	3,041	39.747
Mistura gesso e barita	4,772	5.932

Fonte: O autor.

A Tabela 28 apresenta a redução dos fótons em relação a espessura das placas. Nas placas de gesso, a redução vista é bastante considerável, porém a eficácia e capacidade de atenuação das placas de mistura gesso e barita é visivelmente maior.

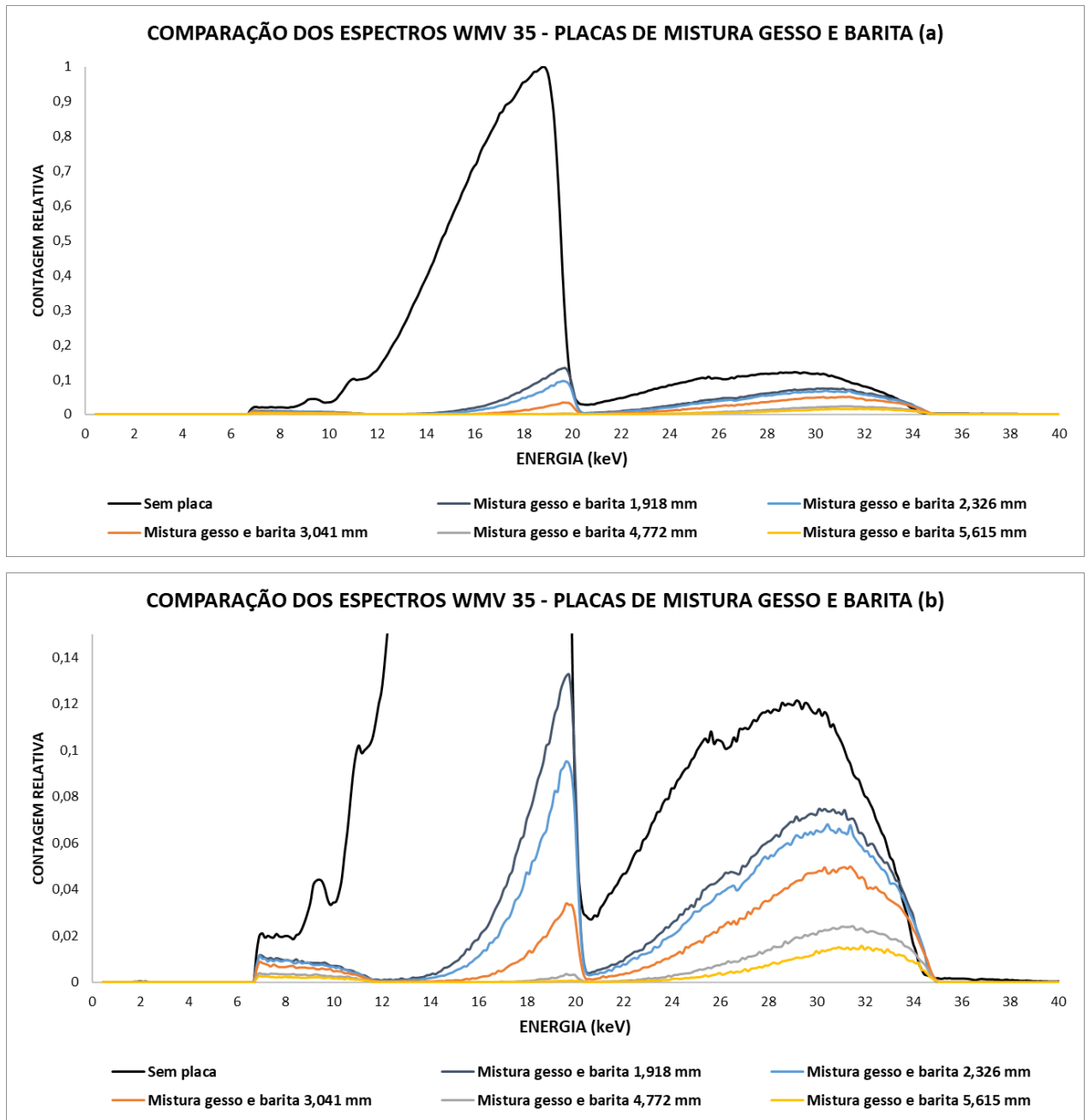
Os Gráficos 16 e 17 mostram a comparação dos espectros na qualidade WMV 35 para os dois tipos de placa acima mencionados.

Gráfico 16 – Comparação de espectros na qualidade WMV 35 – Placas de gesso.



Fonte: O autor.

Gráfico 17 – Comparação de espectros na qualidade WMV 35 – Placas de mistura gesso e barita.



Fonte: O autor.

Assim como na Tabela 28, na Tabela 29 é visto o número total de contagens de fótons de raios X levando em conta todo o espectro para cada tipo de placa e suas diferentes espessuras na qualidade WMV 35.

Tabela 29 – Número total de fótons de raios X em diferentes placas – WMV 35.

Tipo de placa	Espessura (mm)	Nº total de fótons de raios X
Sem placa (apenas filtro de Mo)	0	3.645.353
Gesso puro	2,578	930.170
Gesso puro	2,740	841.888
Gesso puro	5,242	345.947
Gesso puro	5,482	334.991
Gesso puro	7,820	181.782
Gesso puro	8,222	167.968
Gesso puro	8,534	150.715
Gesso puro	11,112	90.873
Mistura gesso e barita	1,918	563.525
Mistura gesso e barita	2,326	457.686
Mistura gesso e barita	3,041	269.311
Mistura gesso e barita	4,772	106.184
Mistura gesso e barita	5,615	61.741

Fonte: O autor.

Tanto a Tabela 28, quanto a Tabela 29, assim como os Gráficos 14 até o 17, mostram claramente que as placas de mistura gesso e barita tem uma eficiência de blindagem maior e melhor quando comparadas as placas de gesso puro, seja para a qualidade WMV 28 ou WMV 35.

4.4 CURVAS DE TRANSMISSÃO PARA AS PLACAS DE GESSO E DA MISTURA GESSO E BARITA

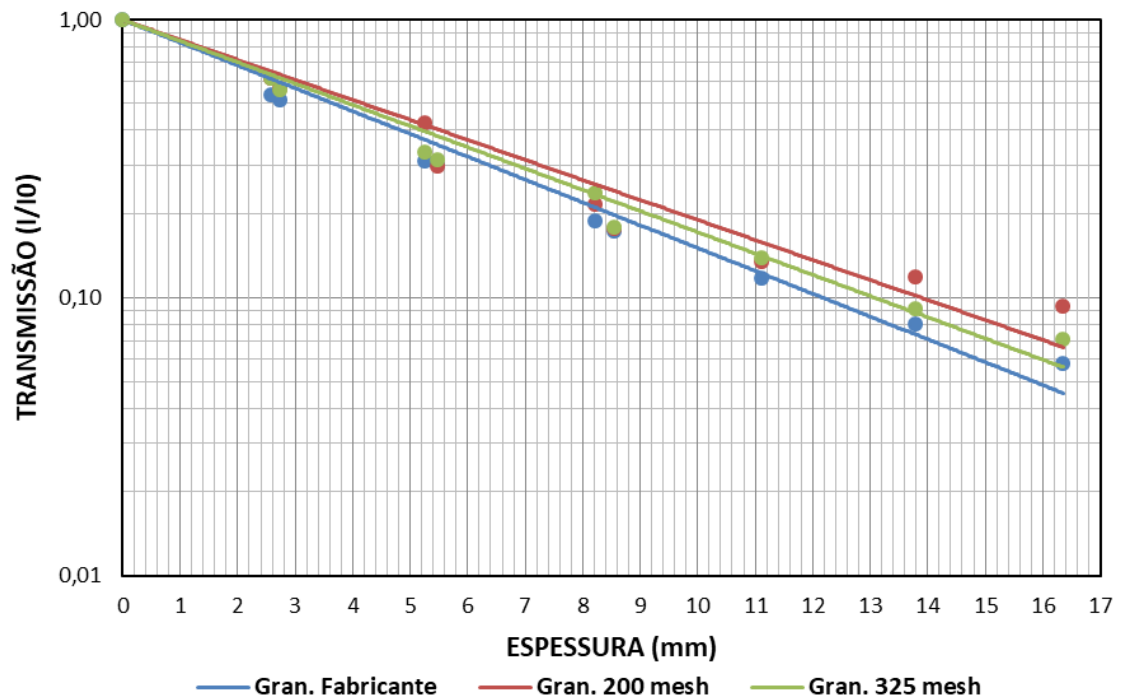
4.4.1 Curvas de transmissão para as placas de gesso irradiadas no CRCN-NE

As curvas de transmissão foram feitas a partir da relação dos valores da corrente sem nenhuma blindagem e dos valores das correntes obtidas durante a irradiação das placas que serviam como barreira contra a radiação e diminuía a sua intensidade (I/I_0). As qualidades

usadas foram as DRQ1, DRQ2 e DRQ3 (qualidade de odontologia), para cada tipo de placa de gesso com suas diferentes granulometrias: fabricante, 200 mesh e 325 mesh.

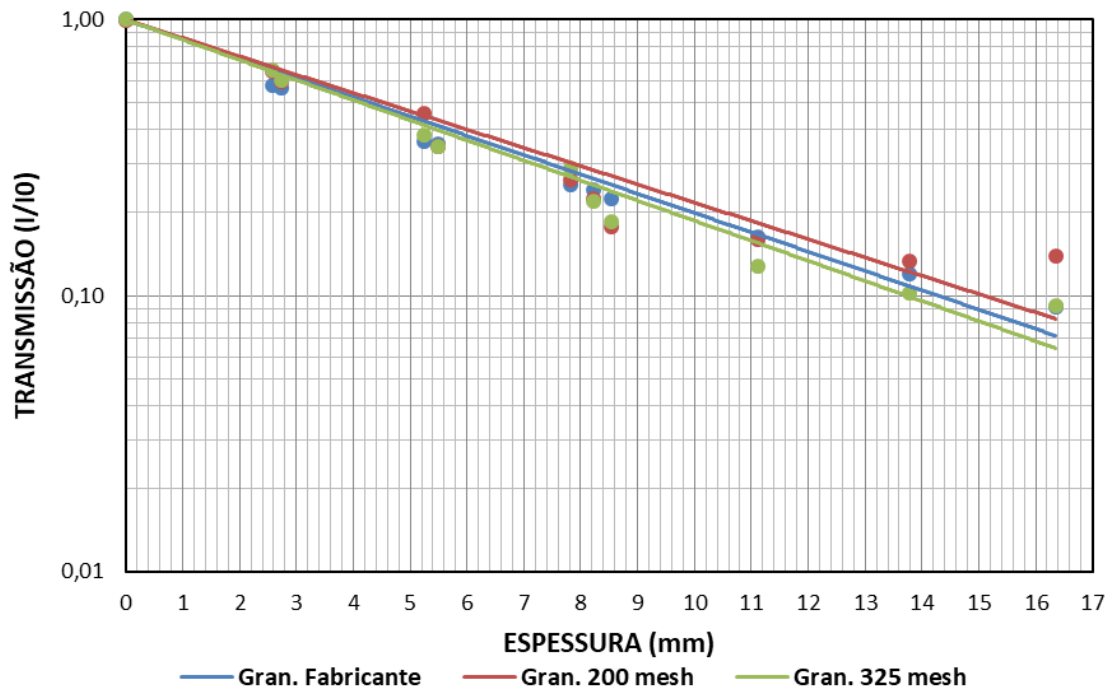
Nos Gráficos 18 a 20, é possível ver a comparação entre as curvas de transmissão para cada tipo de placa granulométrica nas diferentes qualidades de odontologia.

Gráfico 18 – Comparação das curvas de transmissão para DRQ1.



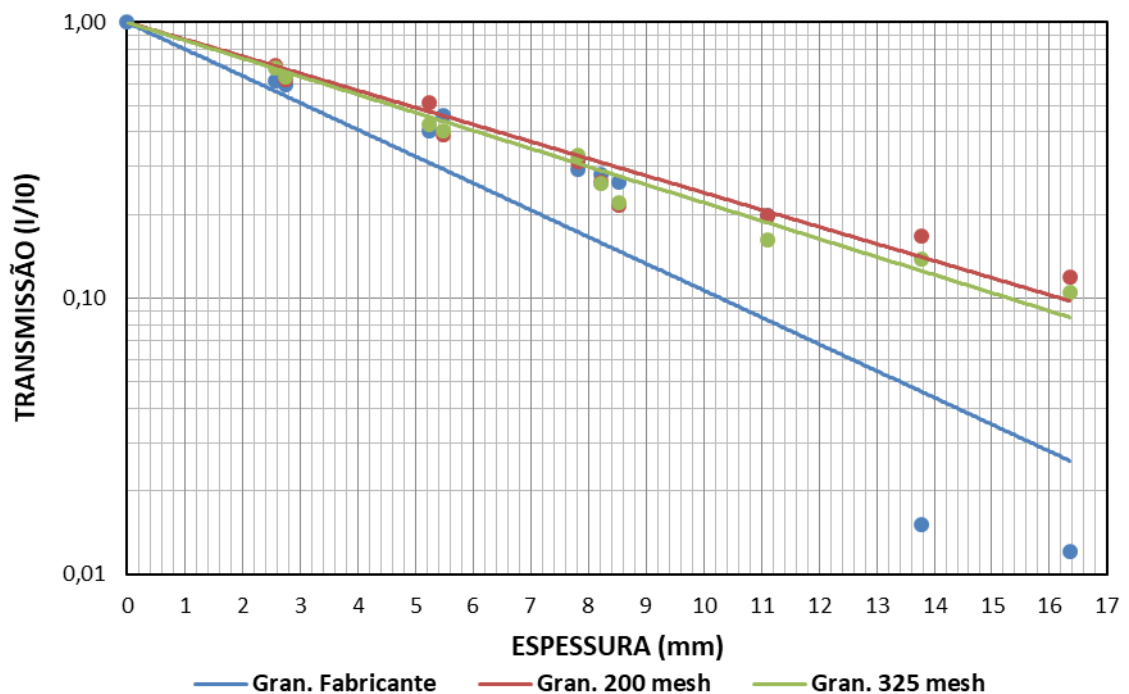
Fonte: O autor.

Gráfico 19 – Comparação das curvas de transmissão para DRQ2.



Fonte: O autor.

Gráfico 20 – Comparação das curvas de transmissão para DRQ3.



Fonte: O autor.

É possível observar nas curvas de transmissão dos Gráficos 18 e 20 que a placa de gesso com granulometria do fabricante têm uma melhor atenuação se comparada as

granulometrias de 200 e 325 mesh. Para o Gráfico 19 é visto que ainda que as curvas estejam próximas, a placa com granulometria de 325 mesh atenua mais. Na Tabela 30 é mostrada as CSR e CDR para todos os tipos de placa de gesso nos três tipos de qualidade odontológica.

Tabela 30 – CSR e CDR das placas de gesso nas qualidades DRQ1.

Qualidade	Tipo de placa de gesso granulométrica	CSR (mm)	CDR (mm)
DRQ1	Gran. Fabricante	3,667	12,183
DRQ1	Gran. 200 mesh	3,746	12,446
DRQ1	Gran. 325 mesh	3,808	12,651
DRQ2	Gran. Fabricante	4,305	14,302
DRQ2	Gran. 200 mesh	4,590	15,249
DRQ2	Gran. 325 mesh	4,500	14,952
DRQ3	Gran. Fabricante	3,094	10,280
DRQ3	Gran. 200 mesh	4,915	16,330
DRQ3	Gran. 325 mesh	5,022	16,685

Fonte: O autor.

A variação de CSR e CDR entre as placas para a qualidade DRQ1 não varia de 1% e para a DRQ2 chega a 6%. A única mudança mais notável é entre as CDR na qualidade DRQ3, onde a variação entre a granulometria do fabricante e as outras duas ficou em mais de 60%, mas na CSR fica aproximadamente em torno de 3%.

A maior espessura de CDR encontrada foi para a placa Granulométrica de 325 mesh na qualidade DRQ3 (energia máxima de 65 keV), sendo este valor de aproximadamente 16,7 mm. Para as placas de gesso vendidas comercialmente, a espessura encontrada é de 70 mm, podendo chegar até mesmo 100 mm a depender do tipo de alvenaria de gesso. Isto demonstra que na prática o gesso puro pode ser usado como barreira para barrar energias até 65 keV, caso a sua densidade esteja entre 1,0 e 1,2 g/cm³, conforme visto os resultados da Tabela 20. As densidades dos gessos comerciais variam entre 0,8 e 2,3 g/cm³.

Levando em conta a baixa diferença entre o poder de atenuação para estes tipos de placas (visto na comparação entre as CSR e CDR), e já que na prática, a construção das blindagens de salas de radiodiagnóstico normalmente são superestimadas e não seguem à risca o cálculo de blindagem, foi considerado para este trabalho como sendo os três tipos de placas de gesso iguais, ainda que existam pequenas diferenças. Contudo, como placas de gesso na prática da construção civil não passam por processo de separação granulométrica, desse modo,

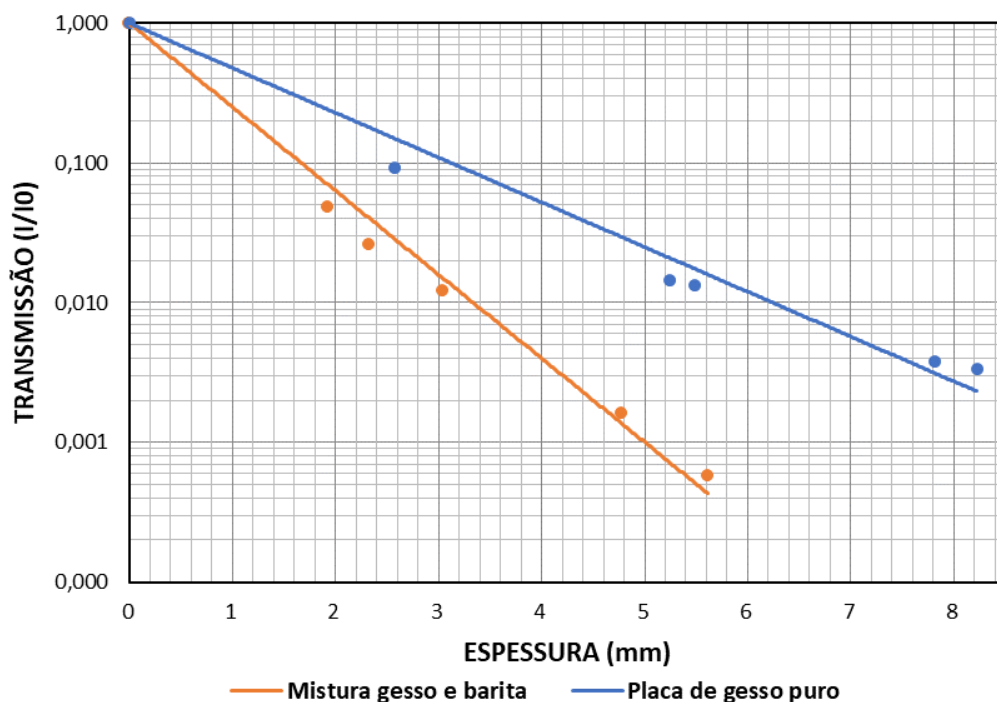
foi escolhida para a irradiação experimental e obtenção dos espectros nas qualidades WMV28 e WMV35, a placa de gesso com granulometria do fabricante.

4.4.2 Curvas de transmissão para as placas de gesso e da mistura gesso e barita irradiadas no DEN

As qualidades usadas foram as WMV28 e WMV35, tanto para as placas de gesso puro (granulometria do fabricante), quanto para as placas de mistura gesso e barita. As curvas de transmissão foram feitas a partir da relação dos valores da corrente sem nenhuma blindagem e dos valores das correntes obtidas durante a irradiação das placas que serviam como barreira contra a radiação e diminuía a sua intensidade (I/I_0).

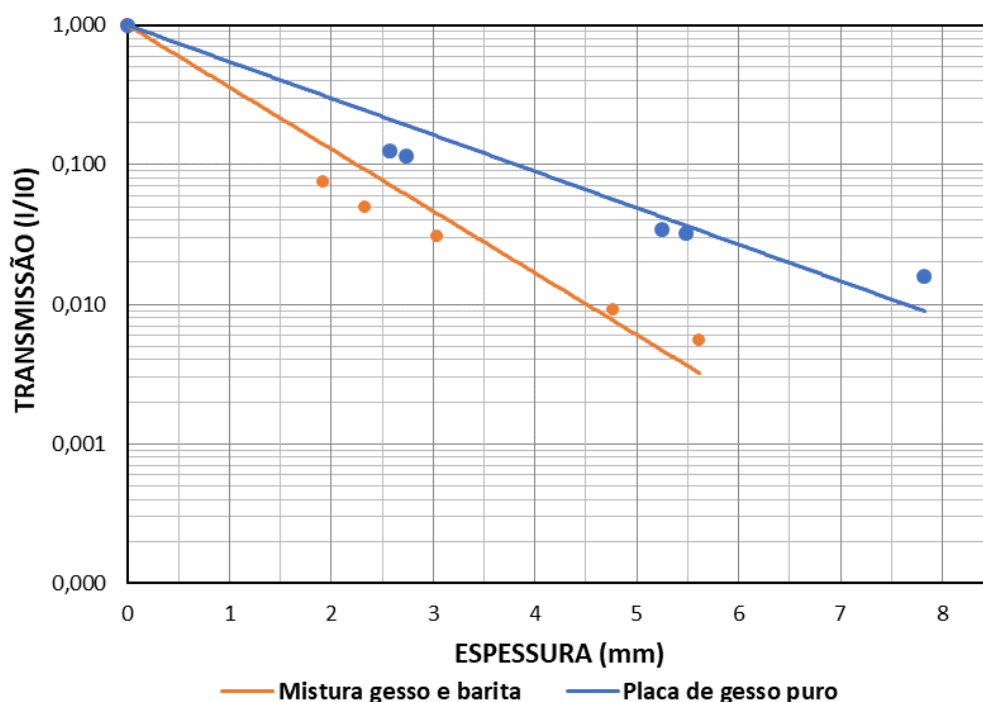
Nos Gráficos 21 e 22, têm-se as comparações entre as curvas de transmissão para as qualidades WMV28 e WMV35 de acordo com o tipo de placa utilizado.

Gráfico 21 – Comparação das curvas de transmissão para WMV28.



Fonte: O autor.

Gráfico 22 – Comparação das curvas de transmissão para WMV35.



Fonte: O autor.

Nas duas comparações das curvas de transmissão, é possível notar que as placas de mistura gesso e barita possuem um maior poder de atenuação dos fótons de raios X se comparado com as placas de gesso puro com granulometria do fabricante. Este tipo de resposta já era esperado, visto que as placas de mistura têm barita em sua composição e esta é mais densa que o gesso em si. Na Tabela 31 pode ser visualizado as CSR e CDR para os dois tipos de placa em relação as qualidades utilizadas.

Tabela 31 – CSR e CDR das placas de gesso e mistura gesso barita nas qualidades WMV.

Qualidade	Tipo de placa	CSR (mm)	CDR (mm)
WMV28	Gran. Fabricante	0,848	2,818
WMV28	Mistura gesso e barita	0,501	1,667
WMV35	Gran. Fabricante	1,149	3,818
WMV35	Mistura gesso e barita	0,678	2,253

Fonte: O autor.

As CSR e CDR mostram a superioridade da blindagem das placas de mistura gesso e barita em relação as placas de gesso puro, sendo tanto para as qualidades WMV28 quanto para WMV35. Este tipo de resposta comprova o que já era previsto, a eficácia do gesso quando

misturado com a barita é maior do que a do material gesso puro, pois a sua densidade é superior, tornando-o assim um melhor atenuador.

5 CONCLUSÕES

A fabricação e caracterização dos dois tipos de materiais foram alcançados com o sucesso esperado, mostrando os passos necessários para criação desses materiais e o modo como foram irradiados. Como visto no decorrer do trabalho, os dois tipos de placas, tanto o de gesso puro, quanto a misturada, apresentaram ótimas características de blindagem para baixas energias a nível de mamografia, sendo assim definidas e comparadas:

- As curvas de transmissão para o material gesso e mistura gesso e barita;
- As camadas semirredutora e decirredutora para cada tipo de material;
- Os espectros para cada tipo de material e qualidade usada;
- O melhor comportamento em relação a blindagem dos dois materiais usados.

De um modo geral, é certo dizer que a mistura do material gesso e barita é uma blindagem mais eficaz quando comparado as placas de gesso puro, devido a sua maior densidade. Esse tipo de mistura dá uma nova luz àqueles que querem unir em uma só blindagem: bom material atenuador para baixas energias, baixo custo financeiro, facilidade na confecção destes tipos de placas misturadas e possível estética do ambiente. Entretanto, apesar da mistura gesso e barita possuir uma maior eficiência, as placas de gesso puro não devem ser descartadas como blindagens para baixas energias, já que a mesma possui todas as mesmas características já descritas acima para as placas de gesso e barita misturadas. Além do mais, a espessura de sua CDR ($\cong 16,7$ mm) é aproximadamente quatro vezes menor do que a espessura de um bloco de gesso vendido comercialmente (70 mm), denotando uma melhor relação custo/benefício em processos de otimização da proteção radiológica.

As placas utilizadas neste trabalho, não devem ser usadas para todo tipo de radiação e energia, já que só foram testadas para raios X de baixas energias, sendo assim, seriam necessários novos estudos para energias mais altas, como as usadas no radiodiagnóstico convencional.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Gesso para construção civil**. ABNT NBR 13207. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.

ALMEIDA JR, A. T. **Caracterização da barita e do vidro cristal como atenuadores na blindagem das radiações X e gama**. Recife. Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear. Dissertação de Mestrado, 2005.

_____. **Caracterização de argamassas de barita como blindagens contra a radiação X e determinação experimental dos coeficientes de atenuação desses materiais**. Tese de Doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia de materiais da REDEMAT, 2014.

ALVES, A. V. **Desenvolvimento de simuladores de mama para controle de qualidade e treinamento**. Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Física. Dissertação de Mestrado, 2015.

ANDRADE, M. M. F. P., **Efeito do tamanho do campo de radiação na determinação da CSR na argamassa de magnetita irradiada com fótons Monoenergéticos entre 65 e 1250 keV**. Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear. Dissertação de Mestrado, 2011.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. de F e LUZ, A. B. **Gipsita**. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2005. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1079/2/21.GIPSITA%20ok.pdf>>. Data de acesso: 19 de novembro de 2017.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A.. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso obtido do pólo do Araripe. **Revista Cerâmica**, São Paulo , v. 60, n. 356, p. 501-508, dez. 2014 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036669132014000400007&lng=pt&nrm=iso>. Data de acesso: 15 de dezembro de 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132014000400007>.

BATISTA, E. V. **Sistema dosimétrico microcontrolado, baseado em detectores semicondutores, para análise de desempenho de equipamentos mamográficos**. Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear. Tese de Doutorado, 2006.

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.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral, **Sumário Mineral.** Brasília, DNPM, 2016.

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.

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.

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.

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.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 1748, de 31 de agosto de 2011. **NR-32: Segurança e saúde no trabalho em serviços de saúde,** Brasília, DF, 2011.

CEMBER, H.; JOHNSON, T. E. **Introduction to Health Physics.** Fourth edition, USA: McGraw-Hill Education/Medical, 2009. p. 888.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de proteção radiológica. **CNEN NN 3.01.** Diário Oficial da União, Brasília, 2014.

CORRÊA, E. L.; LUCENA, R. F.; POTIENS, M. P. A.; VIVOLO, V. Comparação de espectros de raios X gerados por um alvo de W e filtração adicional de Mo e Al para aplicações em metrologia na mamografia. **XIV Congresso Brasileiro de Física Médica,** 2009.

DANCE, D. R.; CHRISTOFIDES, S.; MAIDMENT, A. D. A.; MCLEAN, I. D.; NG, K. H. **Diagnostic radiology physics: a handbook for teachers and students.** — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014.

GONDIM, P. C. A. **Desenvolvimento de bloco de vedação com barita da composição de partida para blindagem.** Tese (Doutorado) – Universidade do Rio Grande do Norte. Centro

de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal, RN, 2009.

GONDIM, P. C. A.; SANTOS, V. S.; GOMES, U.U.; ACCHAR, W.; SILVEIRA, B.D.A. BRI desenvolvimento de bloco de vedação com barita na composição de partida para blindagem de radiação X. **60º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 15 a 18 de maio de 2016, Águas de Lindóia, SP. p 545 – 556.

GRXSP - JOCKEY CLUB DE SÃO PAULO. **Barita para Proteção Radiológica**. 2012. Disponível em: <www.grxsp.com.br/projetos-realizados-em-instituicoes-diversas/projeto-realizado-no-jockey-club-de-sao-paulo.html> Data de acesso: 19 de novembro de 2017.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Publicação 103, 2007.

LEITÃO, M. A. S., **Gesso: Conhecimento e Uso na Engenharia**, XXXIII – Congresso Brasileiro de Ensino da Engenharia, Campina Grande-PB, 2005

LEYTON, F.; CANEVARO, L.; DOURADO, A.; CASTELLO, H.; BACELAR, A.; NAVARRO, M. T.; VAÑÓ, E.; NOGUEIRA, M. S.; BATISTA, W. O.; FURQUIM, T. A. C.; LYKAWKA, R.; MELO, C. S.; BORGES, F.; R. BARBARA. Riscos da Radiação X e a Importância da Proteção Radiológica na Cardiologia Intervencionista: Uma Revisão Sistemática. **Revista Brasileira de Cardiologia Invasiva**, 2014, pp. 22(1):87-98. DOI: 10.1590/0104-1843000000015.

Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbci/v22n1/0104-1843-rbci-22-01-0087.pdf>>.

Acesso em: 17 nov. 2017.

LOPES, G. A., ALMEIRA JR, A. T., SANTOS, M. A. P., ARAÚJO, F. G. S., NOGUEIRA, M. S., ARAGÃO FILHO, G. L. Determinação de camadas semi-redutoras e deci-redutoras para barita como blindagem contra radiação x em proteção radiológica. **International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013**. Recife, PE, Brazil, November 24-29, 2013. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR – ABEN. ISBN: 978-85-99141-05-2

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R, DANTAS; J. O. C., DANTAS, J. R. A. **Balanço Mineral Brasileiro – Gipsita**. Brasil, 2001.

MALM, H. L. Mercuric Iodide Gamma-ray Spectrometer. **IEEE Trans. Nuc. Sci.** NS- 19(3), pp. 263-265, 1972.

MATSUMOTO, M.; YAMAMOTO, A.; HONDA, I.; TANIGUCHI, A.; KANMORI, H. Direct Measurement of Mammographic X-ray Spectra Using a CdZnTe Detector. **Med. Phys.** 27(7), pp. 1490-1502, 2000.

McGREGOR, D. S.; HERMON, H. Room-Temperature Compound Semiconductor Radiation Detectors. **Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.**, A395(1), pp. 101-124, 1997.

MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL. MS, Portaria nº 453. **Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico.** Publicada no Diário Oficial da União em 02 de junho de 1998.

NAVARRO, M.V.T. **Sistemas de proteção radiológica. In: Risco, radiodiagnóstico e vigilância sanitária.** Salvador: EDUFBA, 2009, pp. 77-84. ISBN 978-85-232-0924-7. Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/q5/pdf/navarro-9788523209247-06.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2017.

NCRP - National Council on Radiation Protection and Measurements Structural shielding design and evaluation for medical use of X-rays and gamma rays of energies up to 10 MeV. **NCRP report N° 49.** DIN-6812, 1976.

_____. Dosimetry of X-Ray and Gamma-Ray Beams for radiation Therapy in the Energy Range 10 keV to 50 MeV. **NCRP Report N° 69**, Washington DC, 1981.

_____. Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities. **NCRP Report N° 147.** Bethesda, 2004.

PEIXOTO, J. G. P. **Rastreabilidade e Controle de Qualidade em Mamografia: Medidas e Modelos.** Tese de Doutorado, UERJ, Rio de Janeiro, 2002.

PTW-Freiburg. **All Detectors: Including Codes of Practice.** 2015. Disponível em: <http://www.japan.com/ptw/img/PDF/PTW_all_detectors.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2019.

RADCAL CORPORATION. **Specification Sheet.** 2016. Disponível em: <<http://www.radcal.com/rdclwp/wp-content/uploads/2016/11/radcal-RC-6-chamber-spec-sheet.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2019.

ROS, R. A. **Metodologia de controle de qualidade de equipamentos de raios x (nível diagnóstico) utilizados em calibração de instrumentos.** Universidade São Paulo/USP, Departamento de Ciências Nucleares. Dissertação de Mestrado, 2000.

SANTOS, A. M. **Desenvolvimento de um Modelo Computacional para Cálculos de Dose Absorvida em Órgãos e Tecidos do Corpo Humano nas Situações de Exposições Acidentais.** Tese de Doutorado, DEN-UFPE, Recife, PE, Brasil, 2006.

SANTOS, L. A. P.; MONTE, D. S.; SANTOS, J. A. P.; BARROS, F. R.; SANTOS, M. A. P. Técnica de medição eletrônica da camada semiredutora utilizando transistor bipolar de junção. **International Joint Conference RADIO 2014**, Gramado-Brasil, 2014.

SANTOS, L. R. **Desenvolvimento de um Protocolo de Calibração utilizando Espectrometria e Simulação Matemática, em Feixes Padrões de Raios X.** Tese de Doutorado, IPEN, São Paulo, SP, 2017.

SANTOS, M. A. P. **Padronização de qualidades de feixes de raios X para uso em radiologia odontológica.** Tese de Doutorado, DEN/UFPE, Recife, 2009.

SILVA, M. F. **Emprego de gesso na construção civil:** A sistematização da gestão de resíduos da pasta de gesso, gesso acartonado e placas de gesso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Diplomação, 2013.

SILVA, I. R. M. **Determinação experimental de curvas de atenuação e camadas semi-redutoras do material gesso como blindagem aos raios X. Recife.** Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear. Dissertação de Mestrado, 2016.

SINDUGESSO. **Palestra no VI seminário nacional de APL de base mineral.** 2009.

SOBRINHO, C. W. A. P.; BEZERRA, N. M., COSTA, T. C. T.; SILVA, C. B. A. Divisórias internas de edifícios em alvenaria de blocos de gesso – vantagens técnicas, econômicas e ambientais. **Congresso Internacional de Tecnologia Aplicada para a Arquitetura & Engenharia Sustentáveis, CITAES.** Recife, 2010.

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, M. A. R. R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos** - 10ª revisão abril/2014 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 344p. ISBN: 978-85-67870-02-1

VIEIRA, J. W. **Construção de um Modelo Computacional de Exposição para Cálculos Dosimétricos Utilizando o Código Monte Carlo EGS4 e Fantomas de Voxels,** Tese de Doutorado, UFPE-DEN, Recife, PE, 2004.

VÉRAS, A. M. Barita. **Sumário Mineral Brasileiro,** 2001.

PEREIRA, W. S.; KELECOM, A.; PEREIRA, J. R. S. Comparação entre a norma brasileira de radioproteção e a recomendação da International Commission on Radiological Protection publicadas em 2007. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2015.

YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 57-67, 2009.