BR0746363

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DESENVOLVIMENTO DE UM MATERIAL CERÂMICO PARA UTILIZAÇÃO EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA DIAGNÓSTICA

AUDREW FRIMAIO

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

Orientadora:
Dra. Letícia Lucente Campos Rodrigues

São Paulo
2006

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
"AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO"

DESENVOLVIMENTO DE UM MATERIAL CERÂMICO PARA UTILIZAÇÃO EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA DIAGNÓSTICA

Audrew Frimaio

IPEN
LIVRO
Nº 23 268
BIBLIOTECA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.

Orientadora: Dra.Letícia Lucente Campos Rodrigues

São Paulo
2006

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

"Quando as coisas vão erradas,
não pense que todos os seus esforços têm sido em vão.
Talvez tudo tenha sido para melhor.
Por isso sorria!
E experimente outra vez!"
(autor desconhecido)

Aos meus dois filhos do coração,

Andrew e Sean,

por existirem na minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Dr[a]. Letícia Lucente Campos Rodrigues por tornar possível a realização deste trabalho, pela orientação firme e apoio nos momentos de decisão.

Ao Dr. Paulo Roberto Costa pela amizade, oportunidade, paciência, atenção e disposição na co-orientação deste trabalho.

À Prof[a].Flávia Vila Fiori Vanderlinde pelas aulas, compreensão e dicas importantes desde o início deste trabalho e, principalmente, na produção das placas cerâmicas.

À Dr[a].Denise Yanikian Nersissian pelas importantíssimas orientações, dicas, aulas, conversas, conselhos e principalmente pela sua interminável paciência nas horas em que o conhecimento me faltava.

Ao coordenador Carlos Augusto Xavier pelas facilidades e recursos fornecidos na escola Senai "Mário Amato" - Núcleo Cerâmica, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Ao meu marido Ricardo pelo amor, paciência, compreensão e cooperação constantemente demonstradas durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À amiga Patrícia Carvalho Neves pela força e encorajamento nas horas difíceis.

À Fernanda Salvador pela amizade e apoio prestado.

Aos meus pais e irmãos, em especial ao Junior, por ter suprido com sua energia minha ausência tantas vezes necessárias.

A todos os amigos do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE/USP), em especial à Dr[a].Tania A. C. Furquim, ao Dr.Marco Aurélio G. Pereira, à Rosana Storel e ao Márcio Bottaro, pela amizade e atenção.

Aos colaboradores da Seal Technology, em especial a Natália Mota Inglez que com sua calma, profissionalismo e empenho contornou e resolveu vários problemas de minha responsabilidade.

À escola Senai "Mario Amato" – Núcleo Cerâmica e seus colaboradores que de forma direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em especial o Sr. Superintendente, Dr. Cláudio Rodrigues, pela oportunidade para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para a elaboração deste trabalho, o meu muito obrigada!

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

DESENVOLVIMENTO DE UM MATERIAL CERÂMICO PARA UTILIZAÇÃO EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA DIAGNÓSTICA

Audrew Frimaio

RESUMO

Este estudo tem por objetivo formular um composto cerâmico para revestimento de paredes visando contribuir para a otimização da blindagem de salas de diagnóstico. O trabalho foi baseado em medidas experimentais de atenuação da radiação X (80 e 100 kV) empregando materiais cerâmicos de revestimento contendo diferentes suportes cerâmicos (vermelho, branco, grês, porcelanatos, etc). Dentre os suportes cerâmicos avaliados, o grês branco apresentou melhores propriedades atenuadoras, e foi considerado o mais adequado para a proposta deste trabalho. Diferentes formulações de grês branco foram estudadas e alteradas a fim de obter melhores propriedades atenuadoras. Foram efetuadas simulações de composições cerâmicas de revestimento grês dentro das porcentagens de matérias-primas necessárias na composição que são 12-20% argila; 6-18% caulim; 12-25% filito; 8-14% quartzo; 10-18% feldspato; 32-40% pegmatito; 6-8% talco. As composições químicas quantitativas e qualitativas destes materiais foram também avaliadas, e os elementos constituintes mais comuns são SiO_2, Fe_2O3, Al_2O_3, CaO e Ti_2O_3. Considerando que o CaO pode ser substituído pelo PbO ou BaO, foram estudadas formulações com maiores teores de óxidos de Pb e Ba. O comportamento destes materiais como atenuadores para a radiação X foi investigado por meio de simulações computacionais que levaram em consideração os espectros de raios X incidentes e transmitidos através das diferentes composições estudadas e comparado com os materiais de referência Pb, Ba e $BaSO_4$ (barita). Os resultados obtidos nas simulações indicaram as formulações do composto de suporte cerâmico grês que demonstram melhores propriedades de atenuação levando-se em conta as energias usadas em raios X diagnóstico (80, 100 e 150 kV). Placas cerâmicas baseadas na composição formulada que apresentou menor diferença percentual em relação ao Pb foram produzidas em laboratório e testadas fisicamente como revestimento de parede e barreira protetora. Propriedades como módulo de resistência à flexão, densidade, carga de ruptura, absorção de água e atenuação da radiação X foram avaliadas para todas as placas produzidas.

DEVELOPMENT OF A CERAMIC MATERIAL TO COVER WALLS TO BE APPLIED IN DIAGNOSTIC RADIOLOGICAL PROTECTION

Audrew Frimaio

ABSTRACT

This study aims to formulate a ceramic composition for wall coating seeking to contribute to the optimization of diagnosis rooms' shielding. The work was based on experimental measures of X-radiation attenuation (80 and 100 kV) using ceramic coating materials containing different ceramic bases (red, white, grês, stoneware porcelain tiles, etc). Among the appraised ceramic bases, the white grês presented better attenuation properties and it was considered the most suitable material for the targets of this work. Different formulations of white grês were studied and altered in order to obtain better attenuation properties. Simulations of ceramic compositions using grês coating were made maintaining the percentages of 12-20% clay; 6-18% kaolin; 12-25% phyllite; 8-14% quartz; 10-18% feldspar; 32-40% pegmatite and 6-8% talc in the composition of the necessary raw-material. The quantitative and qualitative chemical compositions of these materials were also evaluated and the most common representative elements are SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO and Ti_2O_3. Formulations containing Pb and Ba oxides were studied, considering that CaO can be replaced by PbO or BaO. The attenuation properties for X-radiation were investigated by computer simulations considering the incident and transmitted X-ray spectra for the different studied compositions and they were compared to the properties of the reference materials Pb, Ba and $BaSO_4$ (barite). The results obtained with the simulations indicated the formulated composition of grês ceramic base that presented better attenuation properties considering the X-ray energies used in diagnosis (80, 100 and 150 kV). Ceramic plates based on the formulated compositions that presented lower percentage differences related to Pb were experimentally produced and physically tested as wall coating and protecting barrier. Properties as flexion resistance module, density, load rupture, water absorption and X-radiation attenuation were evaluated for all produced plates.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

SUMÁRIO

Página

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Otimização de proteção radiológica 1
2 OBJETIVOS 5
2.1 Objetivos Gerais 5
2.2 Objetivos específicos 5
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS 7
3.1 Proteção radiológica 7
3.2 Produção de raios X 7
3.3 Interação dos raios X com a matéria 8
3.3.1 Efeito fotoelétrico 10
3.3.2 Espalhamento Compton 12
3.3.3 Produção de pares 12
3.4 Modelos matemáticos 13
3.4.1 Modelo para cálculo de blindagem (NCRP 147) 13
3.4.2 Modelo para geração de espectros de raios X 15
3.4.3 Modelo de Archer 17
3.4.4 Determinação dos coeficientes de atenuação 18
3.5 Materiais cerâmicos 19
3.5.1 Revestimento cerâmico 20
3.5.2 Matérias-primas 22
3.5.3 Compostos minerais 23
3.5.3.1 Preparação da mistura 25
3.5.4 Processo de manufatura 25
3.5.5 Tratamento térmico 26
3.5.6 Esmaltação 27
3.6 Massas cerâmicas de grês 27
3.7 Fórmula de Seger 28
3.8 Testes de aceitação 29
3.8.1 Avaliação da atenuação da radiação X 30
3.8.2 Determinação da densidade 30
3.8.3 Absorção de água 31
3.8.4 Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão (MRF) 31
3.9 Cálculo das incertezas de medição 32
3.9.1 Incerteza padrão 32
3.9.2 Avaliação das Incertezas Tipo A 32
3.9.3 Avaliação das Incertezas Tipo B 33
3.9.4 Incerteza padrão combinada 33
3.9.5 Incerteza expandida 34
3.9.6 Fator de abrangência 34
3.9.7 Metodologia do Guia 34
4 MATERIAIS E MÉTODOS 36
4.1 Estudo preliminar 37
4.2 Determinação das formulações teóricas de massa cerâmica grês 38

4.3 Cálculo para a escolha da composição formulada a ser produzida 40
4.4 Composto formulado 42
4.5 Produção das placas cerâmicas de grês 42
4.6 Esmalte 44
4.7 Avaliação da atenuação da radiação X 45
4.7.1 Método experimental 45
4.7.2 Metodologia para avaliação da atenuação da radiação X 45
4.7.3 Avaliação das placas cerâmicas em relação ao chumbo 47
4.8 Testes físicos 49
4.8.1 Determinação da densidade 49
4.8.2 Ensaios de absorção de água, carga de ruptura e módulo de resistência à flexão49
4.9 Avaliação das incertezas 49
4.9.1 Determinação das incertezas associadas à densidade 49
4.9.2 Determinação da incerteza associada à determinação da espessura equivalente da placa cerâmica de grês em relação ao chumbo ($x_{eq.}$) 50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 51
5.1 Determinação dos fatores de atenuação de revestimentos cerâmicos comerciais 51
5.2 Determinação das formulações teóricas de massa cerâmica grês 52
5.3 Aplicação dos modelos matemáticos – Simulações 54
5.4 Confecção das placas cerâmicas 55
5.5 Testes físicos das placas cerâmicas produzidas 58
5.6 Análise dos resultados simulados e experimentais 60
5.7 Cálculo das incertezas 62
5.7.1 Densidade 62
5.7.2 Espessura equivalente da placa cerâmica em relação ao chumbo ($x_{eq.}$) 64
5.8 Avaliação do custo/benefício 65
6 CONCLUSÕES 67
Apêndice 1 - GLOSSÁRIO 69
Apêndice 2 – GRÁFICOS de DETERMINAÇÃO da ESPESSURA em CHUMBO REQUERIDA para BARREIRAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS EXTRAÍDOS do NCRP 147 73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 3.1 – Fatores de ocupação definidos pelo NCRP 147 para áreas adjacentes[6].....14

Tabela 3.2 – Comparação dos níveis de restrição de doses efetivas fornecidas pelo NCRP 147[6] e de equivalente de dose ambiente fornecidas pela Portaria 453[1] para áreas controladas e áreas livres.....14

Tabela 3.3 - Classificação Tipológica dos Revestimentos Cerâmicos[30].....21

Tabela 3.4 – Classificação dos óxidos segundo Seger[42].....28

Tabela 4.1 – Componentes utilizados e seus correspondentes de mercado.....38

Tabela 4.2 – Composições formuladas de massa cerâmica grês e as porcentagens dos componentes consideradas.....39

Tabela 4.3 – Óxidos presentes nos componentes utilizados nas composições formuladas de grês[37, 53].....39

Tabela 4.4 – Óxidos presentes nos componentes utilizados nas composições formuladas de grês[37, 53].....40

Tabela 4.5 - Óxidos presentes na constituição básica das argilas plásticas (1) e (2) utilizadas nas composições formuladas de grês[37].....40

Tabela 4.6 – Composição química dos componentes utilizados, fornecida pela empresa Minasolo.....42

Tabela 4.7 – Composição química dos componentes utilizados no esmalte, fornecida pela Minasolo.....44

Tabela 5.1 – Espessuras equivalentes das amostras de revestimentos cerâmicos comerciais.....51

Tabela 5.2 – Conjunto de composições formuladas e porcentagens de óxidos estudadas utilizando como fundente o BaO e o PbO em substituição ao CaO.....53

Tabela 5.3 – Densidades calculadas e diferença percentual (%) entre o coeficiente de atenuação em massa das composições formuladas relativa ao chumbo, bário e barita usando coeficientes de atenuação, gerados pelo XCom, e o modelo TBC.....55

Tabela 5.4 – Porcentagem dos óxidos utilizados na produção das placas.....56

Tabela 5.5 – Fatores de atenuação (I/Io), de abrangência (k) e espessura equivalente (Xeq.) em chumbo para radiação X de 80, 100 e 150 kV das placas cerâmicas de grês produzidas.....59

Tabela 5.6 – Grupos de absorção para os revestimentos prensados[44].....59

Tabela 5.7 – Resultados dos testes físicos para avaliação da densidade (g/cm^3), da absorção de água (%), da carga de ruptura (N) e do módulo de resistência á flexão (N/mm^2) realizados nas placas cerâmicas de grês produzidas 60

Tabela 5.8 – Determinação das incertezas no cálculo da densidade das placas cerâmicas.....63

Tabela 5.9 – Determinação das incertezas na espessura equivalente para a placa 1 na tensão de 80kV em função do fator de atenuação.....64

Tabela 5.10 – Valores considerados de nível de restrição (P), fator de uso (U), fator de ocupação (T) e distâncias para as cinco paredes.....65

Tabela 5.11 – Valores calculados de kerma no ar para barreira de radiação X primária e secundária, fator de atenuação, espessura em chumbo e espessura de placa cerâmica de grês.....66

Tabela 5.12 – Valores orçados considerando 1mmPb, 1cm de barita e 11mm de placas cerâmicas de grês para blindagem.....66

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 3.1 - Energia do fóton incidente em função do material absorvedor [24] 11

Figura 3.2 - Planta de uma sala de radiologia convencional[6] 15

Figura 3.3 – Páginas de dados de entrada do programa Xcom 18

Figura 3.4 – Cabeçalho da página com os dados de saída do programa Xcom 19

Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia desenvolvida no trabalho 36

Figura 4.2– Arranjo experimental utilizado para as medições dos fatores de atenuação das amostras. A distância d_1 refere-se à distância do ponto focal à placa cerâmica e d_2 à distância entre a placa cerâmica e a câmara de ionização (detector) 37

Figura 4.3- Fluxograma da utilização do Programa XCom para as composições formuladas 41

Figura 4.4 – Fluxograma do processo de fabricação das placas cerâmicas de grês 43

Figura 4.5 – Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação das placas cerâmicas de grês 45

Figura 4.6 – Fluxograma dos programas e modelos matemáticos usados para a avaliação da atenuação das placas cerâmicas de grês com relação ao chumbo 46

Figura 5.1 – Curva de atenuação da composição 6 usando como fundente BaO e PbO em relação ao Pb, ao Ba e à barita 54

Figura 5.3 – Placas cerâmicas de grês produzidas 58

Figura 5.4 – Curvas de atenuação simuladas para a composição ajustada conforme TAB.5.4 considerando a densidade média experimental de $1,98 \pm 0,15 g/cm^3$ e fatores de atenuação experimentais das placas produzidas para a tensão de 80kV 62

Figura 5.5 – Curvas de atenuação simuladas para a composição ajustada conforme TAB.5.4 considerando a densidade média experimental de $1,98 \pm 0,15 g/cm^3$ e fatores de atenuação experimentais das placas produzidas para a tensão de 100kV 62

Figura 5.6 – Curvas de atenuação simuladas para a composição ajustada conforme TAB.5.4 considerando a densidade média experimental de $1,98 \pm 0,15 g/cm^3$ e fatores de atenuação experimentais das placas produzidas para a tensão de 150kV 62

COMISSÃO ... /SP-IPEN

1 INTRODUÇÃO

1.1 Otimização de proteção radiológica

A radiologia diagnóstica é uma área da Medicina que está em contínuo desenvolvimento. Desta forma, faz-se necessário o estudo de materiais a serem aplicados em barreiras de proteção para minimizar os efeitos das radiações quando profissionais e público em geral são expostos à radiação ionizante, com a finalidade de garantir a adequação aos requisitos de proteção radiológica no funcionamento das instalações que operam com raios X diagnóstico.

Para obter uma proteção adequada contra os efeitos nocivos das radiações ionizantes é necessário que as regulamentações sejam obedecidas rigorosamente. No caso da proteção de ambientes onde existem fontes de raios X de uso diagnóstico, devem ser seguidas publicações atuais e reconhecidas, como por exemplo, os procedimentos publicados recentemente pelo NCRP (*National Council on Radiation Protection and Measurements*) para cálculos de blindagem contra radiações, além das determinações impostas pela portaria nº 453[1] do Ministério da Saúde.

Para o dimensionamento das barreiras de proteção devem ser observados os dados técnicos e operacionais das instalações radiológicas, estudados por Simpkin[2] e Costa[3], que podem ser representados pela grandeza **carga de trabalho.** Esta grandeza fornece a extensão do uso de uma instalação radiológica (em mA x minuto por semana). Devem também ser considerados o **fator de uso**, que representa a direção do feixe de radiação sobre a camada de proteção a ser calculada e o **fator de ocupação**, relacionado com o tempo de permanência de pessoas nas diferentes áreas a serem protegidas[4]. Deve ser levado em conta a proteção dos trabalhadores e do público em geral. Para este propósito, são utilizadas barreiras protetoras, segundo o princípio de que os níveis de radiação devem ser tão baixos quanto razoavelmente exeqüíveis – *as low as reasonably achievable*[5].

O processo de atenuação da radiação está relacionado com a sua interação com a matéria. Existem três métodos básicos para garantir que os requisitos de proteção radiológica sejam respeitados. Estes métodos são:

a- a proteção pela distância, que envolve a lei do inverso do quadrado da distância;

b- a redução do tempo de permanência em um local onde exista radiação;

c- a proteção pela interposição de uma barreira protetora entre a fonte e o ambiente que se deseja proteger.

O NCRP 147[6] trata dos requisitos práticos e da metodologia para o cálculo de barreiras protetoras para salas onde ocorre a emissão de radiação para fins diagnósticos.

A portaria nº 453[1] estabelece os princípios básicos para o sistema de proteção radiológica que são:

- **Justificação da prática e das exposições médicas individuais:** nenhuma prática ou fonte utilizada deve ser autorizada, a menos que produza suficiente benefício para o indivíduo exposto ou para a sociedade que compense o detrimento causado.

- **Otimização da proteção radiológica:** as instalações e as práticas devem ser planejadas, implantadas e executadas, de modo que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições acidentais sejam tão baixas quanto razoavelmente exeqüíveis. A otimização deve ser aplicada tanto nos projetos, desenvolvimento e instalação de equipamentos, como nos procedimentos de trabalho.

- **Limitação de doses individuais:** são valores de dose efetiva ou de dose equivalente estabelecidos para exposição ocupacional e exposição do público, decorrentes de práticas controladas cujas magnitudes não devem ser excedidas. As exposições ocupacionais normais de cada indivíduo, resultante da combinação de todas as práticas relevantes, devem ser controladas de forma que os valores dos limites estabelecidos na Norma CNEN-NN-3.01[7] não sejam excedidos.

A dose absorvida é uma grandeza que descreve a quantidade de energia absorvida por um determinado material ou por um indivíduo[8]. O homem está exposto a diversas fontes de radiação ionizante, naturais e artificiais, que contribuem para o aumento da dose de radiação acumulada em seu organismo[4].

Segundo a portaria nº 453[1] as exposições de indivíduos são classificadas em três tipos:

- ***Exposição Ocupacional*** - é a exposição ocorrida principalmente como resultado do trabalho.

- ***Exposição Médica*** - é a exposição de pessoas como parte de seu diagnóstico ou terapia.

- ***Exposição Pública*** - compreende todas as outras exposições.

Archer[9], em 1995, fez uma revisão histórica onde descreveu cinco períodos em que foram fundamentados os conceitos de proteção utilizados atualmente em radiologia diagnóstica. Num primeiro período, de 1895 a 1913, foram estudados os danos causados pela radiação X. Nos anos de 1913 a 1922 foram efetuadas as tentativas de produção dos primeiros guias de referência para proteção radiológica, com recomendações de proteção para o operador e para os tubos de raios X, com encapsulamento em um revestimento protetor de chumbo. Neste mesmo período apareceram nos Estados Unidos os primeiros estudos sobre equivalência em chumbo de alguns materiais (vidros e borrachas plumbíferas) para proteção radiológica[9].

Nos anos entre 1922 e 1928 houve a publicação das primeiras recomendações oficiais de proteção radiológica para trabalhadores da área radiológica e a fundação do ICRP (*Internacional Commission on Radiation Protection*), que passou a definir os limites e as principais diretrizes de proteção radiológica[9].

Passados alguns anos, o NCRP iniciou a publicação de relatórios nos quais foram descritas algumas recomendações específicas para a proteção de salas de radiologia diagnótica. O último período, descrito por Archer como "Era moderna", iniciou-se pela crescente sofisticação nas técnicas de proteção radiológica para a radiologia diagnóstica[9].

Nas últimas décadas o NCRP 49[10], substituído recentemente pelo NCRP 147[6], juntamente com as determinações da portaria 453[1] têm sido utilizados para o cálculo das espessuras de materiais atenuantes para a radiação X, com o objetivo de proteger o ser humano dos efeitos nocivos da radiação ionizante e usufruir dos benefícios desta radiação com segurança.

Atualmente, a barita (argamassa baritada que é uma composição com alto teor de sulfato de bário ($BaSO_4$), areia, ligas de agregação e outros elementos minerais)[11] vem

sendo utilizada como material para revestimento em salas de radiologia diagnóstica. Este material apresenta alta densidade (4,0 à 5,0 g/cm³), 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.

Com o objetivo de contribuir no cumprimento dos requisitos de proteção radiológica, uma das propostas do presente trabalho é o desenvolvimento de um material cerâmico para revestimento de paredes de salas de radiologia diagnóstica seguindo as metodologias desenvolvidas por Archer[12,13] e Costa[3] que se baseiam nas propriedades de atenuação da radiação X.

As características do material cerâmico proposto foram avaliadas em relação a um material de referência padrão, o chumbo, seguindo o procedimento descrito de acordo com NBR/IEC 61331-1[14].

A composição do material cerâmico foi estabelecida para atender os requisitos de proteção radiológica e de forma a minimizar a relação custo/benefício de blindagens em salas típicas de radiologia diagnóstica.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

- Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de placas cerâmicas de revestimento para serem utilizadas como barreira de proteção em ambientes sujeitos à radiação ionizante. Pretende-se viabilizar um procedimento mais econômico, que demande menor tempo e com maior praticidade para aplicação em paredes nas quais se faz necessário o uso de barreira protetora.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar revestimentos cerâmicos disponíveis no mercado, analisando o seu suporte cerâmico para definir aquele que apresenta melhor desempenho em termos de atenuação da radiação X diagnóstica;

- Esboçar várias formulações do suporte cerâmico definido utilizando as devidas proporções de cada matéria prima e suas composições químicas;

- Simular o comportamento das composições formuladas empregando programas computacionais e comparar com um material de referência, para verificar que tipo de formulação apresenta melhores propriedades atenuadoras;

- Produzir em laboratório, na forma de placas cerâmicas, a formulação que apresentou melhores resultados nas simulações;

- Determinar as propriedades de atenuação da radiação X, absorção de água, carga de ruptura, módulo de resistência à flexão e, determinar a densidade das placas confeccionadas.

- Comparar os resultados experimentais e os simulados.

- Analisar, segundo o NCRP 147, a equivalência em chumbo das placas cerâmicas de grês produzidas.

- Avaliar a viabilidade de produção e o custo, em comparação com a barita.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Proteção radiológica

A proteção radiológica em radiologia diagnóstica visa fundamentalmente fornecer condições de trabalho seguro aos radiologistas e técnicos de raios X, conscientizar os radiologistas e técnicos da necessidade de utilizar técnicas radiográficas que permitam uma redução de dose de radiação nos pacientes e indivíduos do público e impedir, através de materiais atenuadores, a incidência de radiação nas vizinhanças do setor de radiologia em níveis superiores aos estabelecidos por normas técnicas.

Os aparelhos de raios X de um serviço radiológico devem ser, sempre que possível, instalados em uma mesma área. As salas devem ter dimensões compatíveis com uso dos equipamentos e com a movimentação da equipe e dos pacientes. O painel de controle do aparelho de raios X deve estar situado em uma posição onde seja possível ver e falar com o paciente. As portas das salas de raios X devem ser sinalizadas de modo a evitar a entrada inadvertida de pessoas, com conseqüente exposição desnecessária[15].

3.2 Produção de raios X

A produção de raios X tem origem na interação entre uma partícula carregada com alta velocidade e um núcleo atômico. Os elétrons são as partículas usadas para produzir raios X para diagnóstico médico. Dentro de um tubo de raios X os elétrons são acelerados em direção a um alvo eletricamente carregado, o anodo, quando os elétrons atingem o alvo eles são desacelerados abruptamente. Parte da energia dos elétrons é emitida na forma de raios X mas a maioria, aproximadamente 99%, é convertida em calor. A energia dos raios X depende do grau de interação com o átomo alvo. Desta forma, há um espectro contínuo de energia de raios X para uma dada energia dos elétrons incidentes[16]. Quando a tensão aplicada no tubo de raios X é aumentada acima de certo valor crítico, característico do metal alvo, aparece uma intensidade máxima de valor bem definido para certos comprimentos de onda superposta ao espectro contínuo. Uma vez que elas são muito estreitas e seu comprimento de onda é característico do metal alvo usado, elas são chamadas linhas características. Estas linhas referem-se às camadas eletrônicas

denominadas K, L M, N, em ordem crescente de comprimento de onda, e todas as linhas juntas formam o espectro característico do metal usado como alvo[17].

O NCRP 147[6] indica a metodologia para o cálculo de barreiras de proteção radiológica, são definidas a **fonte de radiação primária,** como a radiação proveniente diretamente do feixe primário do tubo de raios X, a **radiação secundária**, que engloba a radiação de fuga do conjunto emissor de radiação e a **radiação espalhada** pelo paciente.

A literatura destaca alguns modelos para a determinação dos espectros referentes à radiação da fonte primária de raios X. No intervalo de energias utilizado no diagnóstico médico, amplamente discutido na esfera da comunidade científica mundial, existem diversos modelos matemáticos ou computacionais propostos, além de medidas experimentais realizadas[18-21]. O modelo proposto por Tucker e col.[22], por exemplo, apresenta um modelo computacional que permite simular o espectro da radiação X emitida por um tubo de raios X diagnóstico levando em conta diversos parâmetros construtivos do mesmo, tais como o ângulo e o material do anodo, e a tensão de operação.

3.3 Interação dos raios X com a matéria

Quando um feixe de raios X atravessa um material seus fótons podem interagir com os átomos de diferentes maneiras. Os fatores que afetam as interações da radiação com a matéria são: a densidade, a espessura, o número atômico do material e a energia do fóton incidente.

Radiações ionizantes, no contexto biológico, são aquelas capazes de ejetar os elétrons orbitais do átomo de H. A quantidade de energia depositada por uma radiação ionizante ao atravessar um material depende da natureza química do material e de sua massa específica. É importante ressaltar que a absorção de radiações ionizantes pela matéria é um fenômeno atômico e não molecular.

A dosimetria das radiações baseia-se no estudo da interação dos mais variados tipos de radiação com a matéria, em particular, com os tecidos biológicos.

Os tipos de interação de fótons com a matéria mais freqüentes são a fotoelétrica, o espalhamento Compton, o espalhamento coerente e a produção de pares. As interações onde o fóton perde energia (efeito fotoelétrico e espalhamento Compton) são as únicas que

ocorrem na área de radiologia diagnóstica, uma vez que a produção de pares só ocorre quando a energia do fóton for maior do que 1,02 MeV[23].

Todos os processos removem fótons do feixe e, por isso, é dito que eles atenuam o feixe de raios X. A probabilidade de ocorrência depende da energia do fóton e da composição do material, estando relacionada com os coeficientes de atenuação. Pode-se dizer que o coeficiente de atenuação é uma medida indireta da probabilidade de certo tipo de átomo interagir, através de um determinado processo, com um fóton de dada energia. Quando se fala apenas em coeficiente de atenuação, sem especificar o processo de interação, considera-se o coeficiente de atenuação resultante, que é o somatório dos coeficientes de atenuação de cada processo.

A atenuação dos raios X pela matéria se dá pelos efeitos de espalhamento e absorção de energia. Em um exame diagnóstico são utilizados feixes de raios X com tensões inferiores a 150kV[3], e, nestas condições, a radiação é espalhada devido aos efeitos coerente e Compton, enquanto que a absorção da radiação ocorre devido ao efeito fotoelétrico.

A atenuação que um feixe monocromático de raios X sofre ao atravessar uma lâmina de espessura x é calculada através da equação dada por:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \tag{3.1}$$

onde:

I_x é a intensidade do feixe emergente da espessura x;

I_0 é a intensidade do feixe incidente no material; e

μ é o coeficiente de atenuação do material para a energia do feixe monocromático[24,25].

Quando a espessura apresentar dimensão de comprimento (L), o coeficiente será de atenuação linear e apresentará dimensão L^{-1}, geralmente dada em cm^{-1}. O coeficiente de atenuação linear representa a probabilidade de ocorrer uma interação por unidade de comprimento. O produto μx é chamado de absorvância e representa a probabilidade de ocorrer interação no material de espessura x. A grandeza chamada de transmitância é igual à razão entre as intensidades I_x e I_0, representando a probabilidade de o feixe não sofrer interação ao atravessar o material de espessura x.

Quando a espessura for dada em termos de densidade superficial de massa, dimensão ML^{-2}, o coeficiente será de atenuação de massa e apresentará dimensão de L^2M^{-1}, geralmente dada em cm^2/g.

A equação (3.1) estendida para um espectro de raios X é representada como:

$$Ix = \int_0^{E_{max}} N(E) \cdot e^{-\mu(E)x} dE \tag{3.2}$$

onde:

N(E) representa o espectro de raios X incidente;

x é a espessura do material; e

$\mu(E)$ é o coeficiente de atenuação linear do material.

3.3.1 Efeito fotoelétrico

No efeito fotoelétrico o fóton incidente transfere toda sua energia ao elétron ligado e "desaparece". Como os fótons são totalmente absorvidos no processo fotoelétrico, isto requer que os elétrons estejam ligados a átomos ou sólidos, pois um elétron livre não pode absorver um fóton e conservar simultaneamente a energia e o momento relativísticos totais. Isso acontece quando um fóton incide em um átomo, transferindo sua energia a um único elétron orbital, fazendo com que ele seja ejetado.

A energia transferida é parcialmente usada pelo elétron para romper a sua ligação, e a excedente é transformada em energia cinética do elétron ejetado, de tal maneira que:

$$E_c = h\nu - E_L \tag{3.3}$$

onde:

E_C é a energia cinética do elétron ejetado;

$h\nu$ é a energia do fóton incidente; e

E_L é a energia de ligação do elétron.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

Os elétrons ejetados são chamados de fotoelétrons e, quando um destes deixa o átomo é criada uma lacuna na camada correspondente. A lacuna é imediatamente preenchida por um elétron que provem de uma órbita mais externa e que tem, conseqüentemente, menor energia de ligação. O preenchimento das camadas K e L pode ser acompanhado pela emissão de uma ou mais radiações características.

A probabilidade de ocorrer o efeito fotoelétrico por unidade de comprimento varia de forma aproximada ao inverso do cubo da energia do fóton ($1/E^3$) e depende do número atômico do material atenuador. Por isso, ele é o efeito mais importante na absorção de energia pelo tecido biológico até 50 keV.

A energia E_e do elétron ejetado é a diferença entre a energia hv do fóton incidente e a energia $E_{Máx}$ de ligação do elétron orbital.

Para o caso em que o elétron não gasta nenhuma energia adicional sua energia cinética pode ser dada pela expressão:

$$E_e = h\nu - E_{Máx} \tag{3.4}$$

O efeito fotoelétrico é predominante para energias baixas e para elementos de número atômico Z elevado, sendo proporcional a Z^3, como mostra a FIG. 3.1.

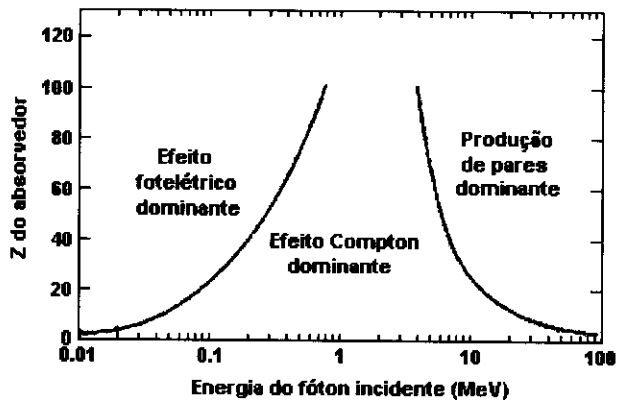

FIGURA 3.1 - Energia do fóton incidente em função do material absorvedor [24].

Devido à alta probabilidade de interação fotoelétrica com elementos de número atômico elevado, são utilizados elementos como o chumbo para blindagem de raios X e radiação gama de energia baixa[26,27].

3.3.2 Espalhamento Compton

No espalhamento Compton o fóton remove do átomo um elétron orbital (elétron de recuo) e é espalhado com uma energia menor. Sendo a energia de ligação do elétron orbital desprezível em relação à energia do fóton incidente, pode-se dizer que no espalhamento Compton os fótons interagem com elétrons livres, e a energia cinética do elétron de recuo, E_C, será dada por:

$$E_C = h\nu - h\nu' \tag{3.5}$$

onde:

$h\nu$ é a energia do fóton incidente; e

$h\nu'$ é a energia do fóton espalhado.

Como no espalhamento Compton o fóton interage com elétrons que são considerados livres, esse processo é independente do numero atômico, e todos os materiais, através do espalhamento Compton, irão absorver a mesma quantidade de energia por elétron. Como todos os materiais apresentam praticamente o mesmo número de elétrons por unidade de massa, todos eles apresentarão o mesmo coeficiente de atenuação de massa para o espalhamento Compton[25,28].

3.3.3 Produção de pares

A produção de pares ocorre quando fótons com energia maior ou igual a 1,02 MeV passam próximos a núcleos de número atômico elevado. A radiação incidente interage com o núcleo transformando-se em duas partículas, o par elétron – pósitron:

$$\gamma \Rightarrow e^- + e^+ \text{ (+ energia cinética)} \tag{3.6}$$

Essa interação ocorre no campo colombiano do núcleo, onde um fóton desaparece e é substituído por um par elétron–pósitron. Todo o excesso de energia carregado pelo fóton acima de 1,02 MeV, necessário para produção do par, se transforma em energia cinética[24].

O pósitron, após ser criado, perde sua energia no meio e, finalmente, interagindo com algum elétron ocorre a aniquilação de ambos, originando radiação gama.

A criação de pares ocorre para altas energias e para elementos de número atômico alto, sendo proporcional a Z^2.

3.4 Modelos matemáticos

Desde o século passado, com o grande desenvolvimento dos computadores e da informática de uma forma geral, foram propostos modelos computacionais, cuja finalidade é auxiliar em simulações e projetos experimentais. Alguns modelos deste tipo foram utilizados e tiveram importante contribuição em etapas deste trabalho.

3.4.1 Modelo para cálculo de blindagem (NCRP 147)

Com o avanço da tecnologia equipamentos radiológicos com características técnicas mais eficientes têm sido desenvolvidos no sentido de reduzir a exposição desnecessária à radiação, com, por exemplo, a inclusão de diferentes filtros e disparadores automáticos.

Para determinar a necessidade da blindagem de uma sala onde será operado um equipamento de radiação X é preciso conhecer a taxa de exposição em diferentes distâncias da fonte, que pode ser dada pelo fabricante do aparelho de raios X. Porém, é recomendável usar dados experimentais, medidos diretamente com instrumentos devidamente calibrados. Deve, também, ser levado em consideração o tipo de área fora da parede a ser blindada, havendo diferentes considerações a serem observadas, de acordo com a utilização do local pelos trabalhadores e indivíduos do público (corredor, almoxarifado, área de trabalho, etc).

Para a determinação do tipo e espessura da blindagem adequada devem ser consideradas a radiação primária e a radiação secundária (radiação de fuga e espalhada).

Os procedimentos de cálculo de barreira são apresentados no NCRP 147[6], conforme FIG.3.2. Para o cálculo da barreira são definidos alguns fatores que são: o número **N** de pacientes esperados para exame por semana **(N=125)**[6], o fator de ocupação **T** para uma determinada área TAB.3.1, que é definido como a fração do tempo que um indivíduo está maximamente exposto, o valor do nível de restrição de dose semanal **P** (mGy/semana),

TAB.3.2, a distância entre fonte de radiação e o indivíduo a ser protegido **d** (m), e o fator de uso **U**.

TABELA 3.1 – Fatores de ocupação definidos pelo NCRP 147 para áreas adjacentes[6].

Local	Fator de ocupação (T)
Escritórios; laboratórios, farmácias e outras áreas de trabalho ocupadas inteiramente por pessoas: áreas de recepção, salas de espera ou atendimento, áreas recreação infantil, quartos adjacentes às salas de raios X, áreas de leitura de filmes, salas de enfermagem e sala de controle dos equipamentos de raios X.	1
Quartos usados para exame e tratamento de pacientes.	1/2
Corredores, quartos dos pacientes, local dos empregados e sala de descanso da equipe.	1/5
Portas de corredores.	1/8
Toaletes públicos, áreas de venda por auto-atendimento, salas de estoque, áreas ao ar livre com assento, salas de observação de pacientes.	1/20
Áreas ao ar livre com somente o trânsito de pedestres ou tráfego veicular, estacionamento sem manobrista, sótão, escadas, elevadores sem ascensorista, vestiário do zelador.	1/40

Os valores dos níveis de restrição de doses efetivas fornecidas pelo NCRP 147[6] e de equivalente de dose ambiente fornecido pela portaria 453[1] são apresentados na TAB.3.2.

TABELA 3.2 – Comparação dos níveis de restrição de doses efetivas fornecidas pelo NCRP 147[6] e de equivalente de dose ambiente fornecidas pela Portaria 453[1] para áreas controladas e áreas livres.

	NCRP 147	Portaria 453
Áreas controladas	0,1 mGy/semana	0,1 mSv/semana
Áreas livres	0,02 mGy/semana	0,01 mSv/semana

As espessuras de chumbo necessárias para as diferentes barreiras de uma sala de radiografia podem ser calculadas em função de NT/Pd^2, como mostrado nos gráficos das figuras 4.5.a, 4.5.b e 4.5.c do NCRP 147[6], que visam otimizar a quantidade de blindagem necessária para proteger áreas controladas ou não controladas, de forma a minimizar o custo da blindagem.

A FIG. 3.2 mostra a planta de uma sala de radiologia convencional apresentada no NCRP 147[6].

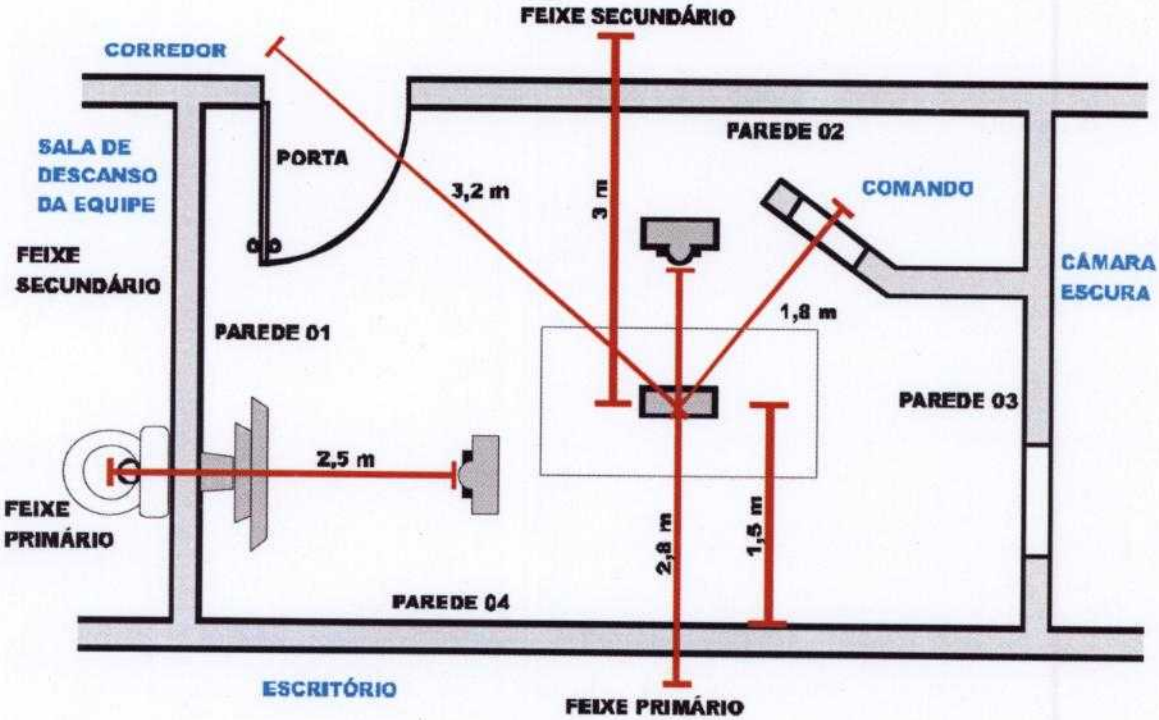

FIGURA 3.2 - Planta de uma sala de radiologia convencional[6].

3.4.2 Modelo para geração de espectros de raios X

O modelo proposto por Tucker e col.[22], conhecido por modelo de TBC, propõe duas formulações para a previsão do espectro por um tubo de raios X: uma considerando o **espectro contínuo** (*Bremsstrahlung*) e outra levando em conta as **linhas características**.

O modelo de TBC permite simular o espectro da radiação X emitido por um tubo de raios X diagnóstico levando em conta diversos parâmetros construtivos, tais como o ângulo do anodo, a tensão de operação, a energia e as características de emissão de um tubo de raios X. Faz, também, considerações sobre o material do alvo e a composição dos materiais que atenuam o feixe antes deste emergir pela janela da cúpula protetora do tubo.

Sendo $N^B(E)$ o espectro de *Bremsstrahlung*, a equação proposta pelos autores deste modelo para esta radiação é:

$$N^B(E)dE = \frac{\sigma_0 Z^2}{A}\frac{dE}{E}\int_E^{To}\frac{\beta(E,T)}{T}F(E,T)\left(\frac{1}{\rho}\frac{dT}{dx}\right)^{-1}dT \qquad (3.7)$$

onde:

$\sigma_0 = \alpha \cdot r_e^2$, sendo α a constante de estrutura fina;

r_e o raio clássico de elétron;

Z é o número atômico efetivo do material do alvo;

A é a massa dos átomos do alvo;

T_o é a energia cinética dos elétrons ao atingirem o alvo;

T é a energia cinética dos elétrons dentro do alvo;

E é a energia dos fótons produzidos na interação;

(1/ρ)(dT/dx) é o poder de freamento por unidade de massa (*mass stopping power*) para o material do alvo;

β(E,T) é uma função proporcional ao número de fótons produzidos por elétron incidente; e

$$F(E,T) = e^{-[\mu_w(E)d_w + \mu_m(E)d_m]} = e^{-\left[\mu_w(E)\frac{x}{sen\theta} + \mu_m(E)d_m\right]} = e^{-\left[\mu_w(E)\frac{T_0^2 - T^2}{\rho C(T) sen\theta} + \mu_m(E)d_m\right]} \qquad (3.8)$$

onde:

$\mu_w(E)$ é o coeficiente de atenuação linear do material do alvo para os fótons de energia E;

d_w é a espessura do alvo atravessada pelos fótons de raios X produzidos;

μ_m é o coeficiente de atenuação linear de um material de referência, m, utilizado para caracterizar os materiais que atenuam o feixe (por exemplo, alumínio);

d_m é a espessura equivalente tomando por referência o material m dos componentes da arquitetura para o conjunto emissor que atenuam o feixe de raios X (por exemplo, janela do tubo, óleo isolante, janela da cúpula, filtro adicional,etc.);

θ ângulo de inclinação do alvo;

e $C(T)=(To^2-T^2)/\rho x$ é a constante de Thomson-Whiddington[3].

3.4.3 Modelo de Archer

Em um artigo publicado em 1983[12] Archer, Thornby e Bushong introduziram um modelo matemático que traz grande simplificação à formulação apresentada no NCRP 49[10] para o cálculo de barreiras protetoras. O programa ARCHFIT.EXE, denominado ***Modelo de Archer***, permite ajustar uma função paramétrica aos gráficos de atenuação apresentados no NCRP 49[10] a partir de informações típicas utilizadas em cálculos de barreiras. Este ajuste é feito na equação que representa a curva de atenuação utilizando um método de mínimos quadrados não-linear. A equação proposta no modelo é:

$$B = \frac{I}{I_0} = \left[\left(1+\frac{\beta}{\alpha}\right)e^{\alpha\cdot\gamma\cdot x} - \frac{\beta}{\alpha}\right]^{-\frac{1}{\gamma}} \tag{3.9}$$

onde:

I é a intensidade do feixe de radiação por unidade de mA.min por semana a 1m da fonte, após o feixe atravessar uma espessura x de um dado material, obtida aplicando-se um potencial V ao tubo;

I_0 é o valor de I sem que nenhum material atenuador intercepte o feixe;

x é a espessura do material protetor em milímetros; e

α, β e γ são parâmetros determinados utilizando-se um método de mínimos quadrados não-linear.

Um estudo atualizado sobre as hipóteses do NCRP 49 com referência às cargas de trabalho foi publicado por Simpkin[2]. A metodologia aplicada pelo NCRP 49[10] não leva em conta a variação da forma espectral quando o feixe de radiação atravessa o material protetor, Costa[3] propôs um modelo que considera a influência dos espectros dos feixes de raios X utilizados em radiologia diagnóstica na estimativa de curvas de atenuação consistentes com as distribuições de cargas de trabalho encontradas.

Neste trabalho, o modelo de Archer foi utilizado para obter os parâmetros α, β e γ da equação (3.9), para as composições formuladas, a formulação final ajustada e para o material de referência, o chumbo, nas tensões de 80, 100 e 150 kV.

3.4.4 Determinação dos coeficientes de atenuação

O programa XCom[29] foi desenvolvido pelo laboratório de física do NIST (*National Institute of Standards Technology*) e calcula, em função dos dados de entrada (energia, elemento, composto ou mistura) conforme FIG.3.3, os coeficientes de atenuação e sua representação na forma de curvas de atenuação.

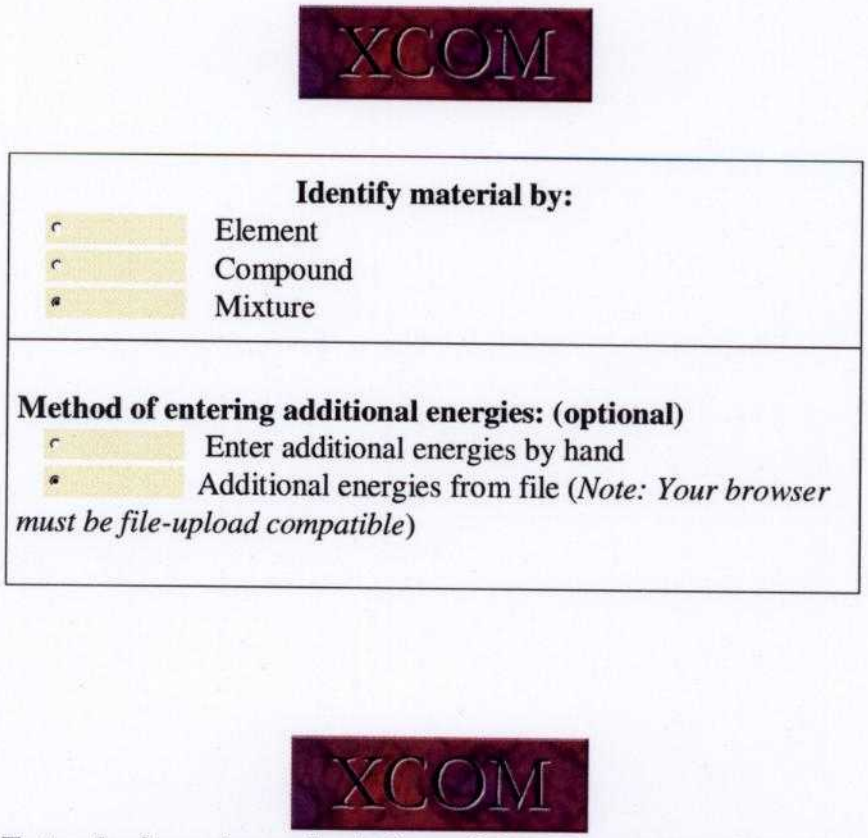

FIGURA 3.3 – Páginas de dados de entrada do programa Xcom.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

As tabelas de resultados são geradas na forma de colunas e linhas para um elemento, um composto ou uma mistura em função da energia. Para misturas o usuário deve fornecer as frações em peso dos vários componentes.

Nas colunas das tabelas geradas são fornecidos os valores dos coeficientes de atenuação total com e sem espalhamento coerente, absorção fotoelétrica, produção de pares no campo do núcleo e no campo do elétron, apresentado na FIG.3.4. Nas linhas são indicadas as energias, que pode ser a padrão (1keV à 100GeV) ou um intervalo inserido como dado de entrada na forma de um arquivo.

Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g

FIGURA 3.4 – Cabeçalho da página com os dados de saída do programa Xcom.

Este programa foi utilizado para obter os coeficientes de atenuação das diferentes composições formuladas e, posteriormente, também, da formulação escolhida e ajustada para confecção das placas.

3.5 Materiais cerâmicos

Material cerâmico pode ser descrito como "qualquer produto possuidor de uma forma, composto por matérias primas inorgânicas (sejam essas minerais ou sintéticas), que de um estado de pó, granulado e/ou líquido é transformado por meio de queima em um objeto sólido, possuindo estrutura parcialmente cristalina e vítrea" [30]. Praticamente todas as transformações e/ou misturas antes da queima podem ser reajustáveis nas condições em pó e/ou granulados, quando líquidas dependem do estágio em que se encontram.

Com o termo materiais cerâmicos entendem-se aqueles produtos que, obtidos a partir de substâncias minerais não metálicas, são primeiramente moldados e, em seguida, através de um tratamento térmico em temperaturas elevadas tornam-se mecanicamente resistentes[31].

A obtenção de corpos cerâmicos com microestruturas densas e constituídas de grãos uniformes e finos tem sido a meta de muitos estudos de processamento cerâmico[32].

Neste sentido, melhorias significativas foram obtidas utilizando estudos de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que fornecem as escolhas de matérias primas, e outros ensaios avançados, como a análise térmica diferencial (ATD), que identifica os elementos químicos, e a análise dilatométrica (AD) que identifica os pontos de fusão (comunicação pessoal[33]).

No entanto, o que se verifica no meio industrial é a definição de formulação da massa em função da experiência prática de produção (empirismo) e da facilidade de dosagem da mistura[34]. Desta forma, verifica-se também a dependência destas misturas com a densidade do corpo cerâmico.

Tem sido estudada a produção de materiais cerâmicos densos com porosidade controlada utilizando matérias primas brasileiras [35].

3.5.1 Revestimento cerâmico

O revestimento cerâmico é tradicional e amplamente utilizado desde a época colonial até os dias atuais, com tecnologias mais avançadas, substituindo revestimentos que necessitam de manutenção posterior tais como texturas, argamassas, gesso, tintas, etc.

No que diz respeito a revestimentos cerâmicos, existe uma vasta diversificação de produtos que diferem não apenas em termos de formatos e cores, mas também em relação às suas características de resistência às solicitações mecânicas, físicas e químicas. É, portanto, muito importante escolher o piso ou azulejo adequado às exigências específicas de cada caso[31].

A indústria cerâmica brasileira tem grande importância para o país, tendo participação no PIB – Produto Interno Bruto – da ordem de 1,0%.

No Brasil convencionou-se definir o Setor Cerâmico em segmentos que se diferenciam pelos produtos obtidos e, mais precisamente, pelos Mercados que estão inseridos. Os principais seguimentos do Setor Cerâmico são: cerâmica estrutural, revestimentos, refratários, sanitários, louça de mesa, cerâmica elétrica, abrasivos, etc[36]. A cerâmica de revestimento apresenta crescente desempenho tecnológico, e o Brasil é o quarto produtor mundial, após a China, Itália e Espanha.

A mineração constitui a etapa inicial da cadeia produtiva de revestimentos cerâmicos, mas não têm a tradição de utilizar tecnologias avançadas como as do processo produtivo da cerâmica para revestimentos. Dependendo do tipo de matéria prima utilizada e da tecnologia de produção existem diversos tipos de materiais com características distintas e cor do suporte diferenciada.

Os materiais cerâmicos podem ser classificados dependendo de sua superfície em esmaltados ou não esmaltados; de acordo com o processo de moldagem utilizado, em extrudados, prensados ou colados; em função do tratamento térmico, em biqueima ou monoqueima, ou classificados de acordo com suas características de absorção de água como mostra a TAB.3.3.

Esmalte cerâmico, cujo termo técnico correto é vidrado cerâmico, pode ser definido como uma fina camada de componentes vítreos que recobre o suporte cerâmico. Componentes vítreos são matérias primas minerais ou sintéticas com densa opacidade que, depois de queimadas, dão um aspecto de cobertura à peça como uma película de acabamento (vítreo) brilhante, mate ou fosco[37].

TABELA 3.3 - Classificação Tipológica dos Revestimentos Cerâmicos[30].

Classificação Tipológica dos Revestimentos Cerâmicos		
SUPERFÍCIE	**TIPO**	**Absorção de Água (%)**
ESMALTADA	Maiolica – Biqueima	15-25
	Cottoforte – Biqueima	5-15
	Monoqueima Branca	0-6
	Monoqueima Vermelha	0-12
	Faiança Branca – Biqueima	6-25
	Clinker – Biqueima	0-7
	Refratários – Monoqueima	8-12
	Porcelanato – Monoqueima	0-0,5
NÃO ESMALTADA	Cotto / Grês – Monoqueima	3-15
	Grês Vermelho – Monoqueima	0-4
	Grês Porcelanato - Monoqueima	0-1
	Clinker / Lajotas - Monoqueima	0-7

As placas de cerâmica para revestimento apresentam grande diversidade de matérias primas e, em conseqüência, uma série de possibilidades de combinações, destacando-se a escolha da massa. A massa cerâmica (ou suporte cerâmico) é uma

combinação balanceada de várias matérias-primas que apresenta comportamento adequado em cada uma das etapas do processo de fabricação de forma que o produto final possua as propriedades desejadas.

Basicamente, a composição do suporte cerâmico é a seguinte: 20 a 30% de argilas plásticas; 0 a 10% de caulim; 10 a 20% de argilas fundentes; 0 a 30% de fundentes; 6% de talco e de 0 a 3% de carbonatos.

As características mais favoráveis à cerâmica para revestimento em relação aos seus concorrentes são: a limpeza, a higiene, a incombustibilidade, a durabilidade, a indeformabilidade e a impermeabilidade[38].

A monoqueima branca, por exemplo, é um produto relativamente recente e sua denominação deriva do processo de produção no qual são queimadas simultaneamente as massas argilosas que constituem o suporte cerâmico (ou corpo cerâmico) e o esmalte, à temperaturas muito mais elevadas do que as utilizadas no processo de biqueima. A monoqueima determina uma maior ligação do esmalte com o suporte, conferindo-lhe uma ótima resistência à abrasão, além de resistência mecânica, química e baixa absorção, quando comparada à biqueima.

Toda massa cerâmica apresenta após a queima uma porcentagem de perda ao fogo. A perda ao fogo é devida aos materiais voláteis que participam da composição da massa cerâmica que se perdem após a queima, principalmente matérias primas orgânicas derivadas de matérias primas naturais.

A tecnologia da monoqueima apresenta vantagem econômica em relação à biqueima, e, embora não permita a variedade de efeitos e decorações características da biqueima, são atualmente produzidos materiais de elevado conteúdo estético, com excelentes características de resistência. Estes materiais são indicados para utilização como revestimento de pisos de interiores e exteriores, locais de tráfego interno, hospitais, etc[31].

3.5.2 Matérias-primas

As matérias-primas naturais utilizadas na produção dos revestimentos cerâmicos constituem-se por dois tipos principais: os materiais argilosos e os não argilosos.

As matérias-primas argilosas apresentam grande variedade de tipos e composições. Dependendo do tipo de produto a ser obtido utilizam-se rochas argilosas puras, quando as

mesmas apresentam as propriedades necessárias, ou misturas de diversos tipos, de características distintas, que resultem na composição desejada.

As matérias-primas não argilosas são utilizadas em mistura com as argilas quando estas não as contêm naturalmente. Servem para formar o esqueleto do corpo cerâmico "cru" ou para promover a fusão da massa. Determinam o ponto de fusão, dependendo de sua natureza e quantidade de elementos fundentes tais como: chumbo, bórax, magnésio, bário, zinco, cálcio e sódio.

Todas as matérias-primas argilosas e não argilosas se classificam em plásticas e não plásticas. Uma matéria-prima é **plástica**, se for uma matéria-prima moldável e, é **não plástica**, se for uma matéria-prima não moldável, independente de ser argilosa ou não.

Embora ambas as matérias-primas exerçam funções ao longo de todo o processo produtivo, as plásticas são essenciais na fase de conformação (são moldáveis), enquanto as não-plásticas (não moldáveis) atuam mais na fase do processamento térmico[39]. Os componentes mineralógicos principais das argilas são: a caulinita, a ilita, a clorita e a montmorilonita.

As principais matérias-primas argilosas utilizadas no preparo das massas de revestimentos são argilas plásticas, caulim e argilas fundentes. Dentre as matérias-primas não-argilosas destacam-se os filitos, fundentes feldspáticos, talco e carbonatos, sendo que o filito e o talco apresentam também características plásticas. O quartzo (material não-plástico) geralmente já está incorporado a outras substâncias minerais (argilas, filitos e fundentes feldspáticos).

3.5.3 Compostos minerais

Os compostos minerais normalmente utilizados são quartzo, feldspato e calcário, que são extraídos de minas naturais[39].

No processo produtivo da massa de base (também chamado de suporte cerâmico ou biscoito) dos revestimentos cerâmicos utiliza-se uma grande variedade de matérias-primas (que apresentam significativo grau de impurezas e de variabilidade física, química e mineralógica) constituídas por:

- materiais argilosos que dão suficiente plasticidade para obter uma forma definida contendo alumínio (Al), silício (Si) e traços de cálcio (Ca), ferro (Fe) e titânio (Ti);

- materiais fundentes, como feldspato, nefelina etc, que produzem por queima fases vítreas que agem como aglutinante entre as partículas e promovem as reações sólido-sólido; são constituídas de sódio (Na), potássio (K), alumínio (Al), silício (Si);

- outros materiais (inertes) como talco, sílica, pirofilito, carbonato de cálcio ($CaCO_3$) etc, que servem para produzir qualidades particulares, possuem principalmente cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si).

Todos os elementos mencionados acima são utilizados na forma de óxidos. A função de cada óxido na massa para a produção de revestimentos é a seguinte:

-Al_2O_3 (óxido de alumínio): para plasticidade e refratariedade, ajusta a fusibilidade evitando deformações.

-SiO_2(óxido de silício): para obtenção de uma estrutura vítrea, um esqueleto resistente.

-Fe_2O_3 (óxido de ferro) e TiO_2 (óxido de titânio): para dar cor e, por vezes, propriedades fundentes, ajustando pontos de fusão.

-CaO (óxido de cálcio) e MgO (óxido de magnésio): para controle da retração, tensão superficial e dilatação térmica, através da formação de silicatos de cálcio e magnésio.

-K_2O (óxido de potássio) e Na_2O (óxido de sódio): como fundentes, formam fases vítreas entrelaçadas à estrutura do silício que ajustam os demais componentes a fim de obter um produto de características técnicas desejadas.

A maioria revestimentos cerâmicos é fabricada por compactação, e o material desenvolvido neste trabalho não será diferente, obtendo-se peças com a forma pretendida, que serão posteriormente aquecidas a uma temperatura suficientemente elevada para ligar as partículas entre si. As etapas fundamentais da manufatura dos cerâmicos através da aglomeração das partículas são descritas a seguir.

3.5.3.1 Preparação da mistura

Pesagem

Para a pesagem da matéria-prima necessária para a produção das placas cerâmicas deverá ser usada, preferencialmente, uma balança com precisão de mais ou menos dois gramas (2g).

Mistura

As partículas e outros ingredientes podem ser misturados úmidos ou secos, alguns outros produtos cerâmicos são moídos a seco com ligantes e outros aditivos, por vezes combinando-se métodos de processamento das matérias-primas por via úmida e por via seca. Esta mistura pode ser feita com maquinário específico, no caso as batedeiras industriais, ou no método de granulação em peneiras quando não se tem uma quantidade expressiva[40].

Moagem

A moagem é o processo normalmente utilizado para a produção de revestimentos cerâmicos, consiste em moer finamente os diversos componentes da massa empregando moinhos de bolas. As diversas matérias-primas são moídas juntamente com água e aditivadas com defloculantes, como o silicato de sódio, para seu escoamento pós-moagem. No final da moagem obtém-se uma suspensão de argilas em água chamada "barbotina" (massa líquida), que posteriormente é seca e pulverizada (por spray) formando pequenos grânulos esféricos que aumentam a interação física e química entre os elementos, a qual é depositada em tanques com agitadores. Dos tanques segue para um secador chamado Atomizador ou Spray-drier, no qual a barbotina é pulverizada em contra corrente a um fluxo de ar quente, obtendo-se assim grãos altamente elaborados.

3.5.4 Processo de manufatura

Os dois processos mais comumente utilizados para manufatura dos revestimentos cerâmicos são o de extrusão e o de prensagem.

Extrusão

O processo de extrusão consiste (como o próprio termo sugere) em forçar a passagem da massa argilosa plástica através de uma boquilha de metal com a forma desejada.

Prensagem

As matérias-primas cerâmicas sob forma de massa granulada com tamanhos de partículas ajustadas podem ser prensadas no estado seco, plástico ou úmido empregando uma matriz que confere a forma aos produtos.

A compactação é executada mediante o enchimento das cavidades dos estampos, que reproduzem o formato e tamanho das peças desejadas. A massa granulada composta de argilas é prensada com aproximadamente 200Kgf/cm^2 no caso de massas brancas. A prensagem é efetuada em prensas hidráulicas de pressão variável (dependendo do formato e produção).

3.5.5 Tratamento térmico

O processo de produção de um composto cerâmico envolve dois tipos de tratamentos térmicos, o de secagem e o de sinterização.

Secagem

Após o processo de prensagem deve ser retirada toda a umidade contida na peça para conferir maior resistência mecânica e torná-la apta às fases seguintes do processo. Isto se efetua em secadores verticais ou horizontais constituídos por um túnel onde circula ar quente.

O objetivo da secagem é remover a água do suporte cerâmico "cru" antes de ser queimado a temperaturas elevadas. Geralmente, a secagem para a remoção de água realiza-se a uma temperatura maior ou igual a 100°C e pode demorar até 24h para um componente cerâmico de grandes dimensões, dependendo do processo utilizado.

Sinterização

Define-se sinterização no estado sólido como o processo através do qual as pequenas partículas de um material se ligam entre si por difusão no estado sólido a altas

temperaturas. Na fabricação de cerâmicas este tratamento térmico resulta na transformação de um compacto poroso num produto resistente e denso.

Este processo distingue a biqueima da monoqueima. A biqueima é efetuada em fornos tipo túnel em temperaturas da ordem de 960 a 1020^{0}C, onde os materiais argilosos sofrem reações físico-químicas que conferem ao material consistência definitiva, formando o que é comumente chamado, na cerâmica, de suporte cerâmico ou "biscoito"[31].

A monoqueima é realizada em temperaturas entre 1150 e 1230^{0}C em ciclos rápidos de 50 à 90 min, em fornos contínuos com rolos refratários.

A produção de revestimentos exige uniformidade na forma das peças dentro das tolerâncias, reprodução de formulação e propriedades em escala industrial, homogeneidade de textura e ausência de defeitos visíveis e ou ocultos[30].

3.5.6 Esmaltação

Para a produção dos esmaltes (utilizados para o acabamento do revestimento, aplicado sobre a peça já conformada, porém ainda crua) utilizam-se também outros compostos minerais, que constituem seus três componentes básicos: **elementos fundentes** (chumbo, magnésio, cálcio e sódio), **elementos opacificadores e refratários**, que determinam as propriedades finais do vidro (estanho, zinco, zircônio e alumínio), e **elementos vítreos**, que formam o corpo do esmalte (quartzo e feldspato).

3.6 Massas cerâmicas de grês

As massas cerâmicas de grês são fisicamente similares às porcelanas e são queimadas por processo de monoqueima. Utilizam maior teor de argila plástica refratária, apresentando assim maior dureza, alta densidade e baixa absorção de água. A composição básica é constituída por **matérias primas plásticas**: 12-20% argila; 6-18% caulim; 12-25% filito e **matérias primas não plásticas**: 8-14% quartzo; 10-18% feldspato; 32-40% pegmatito; 6-8% talco.

O grês branco é o nome do produto cerâmico gerado pelo processo de monoqueima branca (greisificada) e pode ser apresentado na forma de pastilhas e pisos para

revestimento, com absorção de água menor que 1% e com resistência mecânica muito elevada[41].

As matérias primas são constituídas de óxidos tais como: SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, Na_2O, K_2O, PbO, BaO e TiO_2.

3.7 Fórmula de Seger

No final do século passado o químico alemão Herman Seger classificou os óxidos em três grupos: óxidos fundentes (básicos ou alcalinos), óxidos neutros e óxidos ácidos conforme TAB.3.4[42].

TABELA 3.4 – Classificação dos óxidos segundo Seger[42].

Grupo Básico	Grupo Neutro	Grupo Ácido
Na_2O	Al_2O_3	SiO_2
K_2O	B_2O_3	TiO_2
CaO		ZrO_2
Li_2O		SnO_2
MgO		
BaO		
ZnO		
SrO		
PbO		

Os metais dos óxidos do grupo básico são monovalentes ou bivalentes, e a fórmula é representada por RO/R_2O (sendo o metal representado pela letra R). No grupo neutro, a fórmula é composta por óxidos trivalentes representada por R_2O_3, e no grupo ácido, metais tetravalentes, representada por RO_2[42].

Seger estabelece que, segundo esta classificação, os óxidos não se expressam por peso, mas por número de mols ou frações de mol, onde mol é a soma das massas atômicas relativas dos elementos que constituem uma substância (por exemplo: 1mol PbO tem massa 223g)[43].Quando a soma das frações molares que acompanham os óxidos da coluna RO somam 1, diz-se que a fórmula é unitária.

É necessário ter em conta o seguinte:

a- Os óxidos básicos ou alcalinos (fundentes), do tipo RO/R_2O, são escritos no lado esquerdo da fórmula, expressos em frações moleculares, e é condição essencial que a sua soma seja igual a 1 (um).

b- Os óxidos neutros ocupam a zona central, onde o óxido de alumínio surge quase sempre sozinho. A proporção deste óxido pode variar entre 0,1 e 1,5 moléculas. Idealmente, deverá ser a décima parte da quantidade de moléculas da sílica.

c- A coluna dos óxidos ácidos, à direita na fórmula, pode variar de 1,5 a 15 moléculas de sílica.

Note-se que os agentes fundentes se encontram no grupo RO, os elementos refratários no R_2O_3 e os vitrificadores no RO_2[42].

3.8 Testes de aceitação

Uma vez acabadas, as placas cerâmicas são submetidas a testes normatizados para sua utilização como revestimento (normas ABNT[44-48]). Contudo, para que as recomendações destas normas sejam cumpridas é necessária a aplicação de testes que comprovem sua qualidade.

Para uma sistemática completa de avaliação de uma placa são necessários testes relativos à:

- Ensaios funcionais - módulo de elasticidade, limite de resistência, coeficiente de dilatação térmica, condutividade térmica, tenacidade, difusidade térmica, etc;

- Verificação da incerteza nos valores das variáveis;

Para este estudo foi analisado o desempenho das placas cerâmicas expostas à radiação ionizante e, a avaliação da equivalência de atenuação das placas em relação a um material de referência.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

3.8.1 Avaliação da atenuação da radiação X

A determinação das propriedades de atenuação da radiação dos materiais é obtida de acordo com a geometria da norma ABNT NBR/IEC 61331-1[14], aplicada aos materiais em forma de lâminas que são utilizados na fabricação de dispositivos de proteção contra a radiação X.

As propriedades de atenuação são dadas em termos de índice de atenuação, que é calculado pela equação 3.10, em termos de espessura equivalente de atenuação ou espessura equivalente (de atenuação) em chumbo.

$$F = \frac{I_0}{I} \tag{3.10}$$

onde:

I_0 é a intensidade do feixe da radiação X não atenuada; e

I é a intensidade do feixe da radiação atenuada.

A espessura equivalente (de atenuação) em chumbo é determinada através de medições da taxa de kerma no ar no feixe estreito atenuado para o material submetido a ensaio e comparada com a espessura de uma camada do material de referência, chumbo, que resulte no mesmo valor de taxa de kerma no ar no feixe estreito atenuado[14].

Neste trabalho foi empregado o fator B, conforme descrito na equação de Archer (3.9), que é o inverso do fator F, isto é, I/Io.

3.8.2 Determinação da densidade

A densidade D (g/cm^3) é calculada empregando a equação 3.11:

$$D = \frac{m}{V} \tag{3.11}$$

onde:

m é a massa (g) do corpo-de-prova; e

V é o volume (cm^3) obtido pelo produto do comprimento (cm), da largura (cm) e da espessura (cm).

3.8.3 Absorção de água

Cada placa constitui um corpo-de-prova, sendo necessárias dez placas para o ensaio. Se a área da superfície de cada placa for maior que $0{,}04m^2$ somente cinco placas devem ser utilizadas no ensaio.

Os corpos-de-prova são secos em estufa que opera à temperatura de 110^0C ($\pm$ 5^0C), até atingirem massa constante, posteriormente, são resfriados no dessecador com sílica-gel ou outro dessecante apropriado até atingir a temperatura ambiente e, com uma balança de precisão, é determinada a massa (m_1) de cada corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova são imersos verticalmente em um recipiente com água destilada, sem entrarem em contato entre si, de maneira que o nível da água esteja 5cm acima das placas. A água é aquecida até fervura e mantida em ebulição durante 2h; o nível de água deve ser mantido constante durante todo o ensaio.

Após 2h em ebulição os corpos-de-prova são colocados sob circulação de água na temperatura ambiente para que entrem em equilíbrio, são suavemente enxutos com uma flanela ligeiramente úmida, e, imediatamente após esse processo são pesados, sendo obtida a massa úmida (m_2) do material[49].

A absorção de água é obtida percentualmente pela equação 3.12:

$$\%Abs = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \qquad (3.12)$$

onde:

m_1 é a massa do corpo-de-prova seco; e

m_2 é a massa do corpo-de-prova úmido.

3.8.4 Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão (MRF)

Em primeiro lugar devem ser removidas com uma escova dura quaisquer partículas soltas aderidas no corpo-de-prova. As amostras devem ser secas em estufa à temperatura de 110^0C ($\pm$ 5^0C) até atingirem massa constante, deixando esfriar dentro da própria estufa ou no dessecador até temperatura ambiente.

As placas devem ser ensaiadas até 26h depois do início do aquecimento, desde que estejam com a massa constante.

Desta maneira os corpos-de-prova estão devidamente preparados para o teste a ser executado empregando um deflectômetro, onde são determinadas, seguindo a norma da ABNT, NBR13818/97-Anexo C[50], duas das quatro características necessárias para a classificação do revestimento, a fragilidade e a plasticidade.

3.9 Cálculo das incertezas de medição

Quando se relata o resultado da medição de uma grandeza física é obrigatório fornecer alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de tal forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou norma. É, portanto, necessário que haja um procedimento prontamente implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza.

Neste trabalho foi empregada a metodologia apresentada no Guia para Expressão das Incertezas de Medição (Guia)[51]. Serão apresentadas algumas definições e termos específicos deste Guia que serão utilizados nos cálculos das incertezas na determinação da densidade e na razão de atenuação das placas cerâmicas.

3.9.1 Incerteza padrão

Incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio padrão da média, representado por u.

3.9.2 Avaliação das Incertezas Tipo A

Método de avaliação do resultado pela análise estatística de séries de observações. As incertezas padrão associadas ao tipo A estão representadas por u_A.

3.9.3 Avaliação das Incertezas Tipo B

Método de avaliação do resultado por outros meios, que não a análise estatística de séries de observações. As incertezas padrão associadas ao tipo B estão representadas por u_B. Na prática estas incertezas são obtidas dos manuais e certificados de calibração dos instrumentos.

3.9.4 Incerteza padrão combinada

Incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos que constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas. A incerteza padrão combinada para grandezas não correlacionadas está representada por u_C e a relação que se descreve (3.13):

$$u_C^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \tag{3.13}$$

onde:

$u(x_i)$ é a incerteza padrão; e

$\left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]$ é o coeficiente de sensibilidade.

Quando as grandezas apresentam dependência entre si diz-se que há correlação entre elas; a correlação pode aumentar ou diminuir o valor da incerteza associada a esta grandeza. No caso de um mesmo instrumento utilizado para medição de dois ou mais parâmetros a correlação é gerada devido ao efeito sistemático intrínseco a este instrumento de medição. Assim, a incerteza padrão combinada para grandezas correlacionadas é descrita por (3.14):

$$u_C^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i-1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \tag{3.14}$$

onde:

$u(x_i)$, $u(x_j)$ são as incertezas padrão das grandezas x_i e x_j;

$\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]$ e $\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]$ são os coeficientes de sensibilidade; e

$r(x_i, x_j)$ são coeficientes de correlação $\Rightarrow -1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$.

3.9.5 Incerteza expandida

Grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. As incertezas expandidas são representadas por U_{95}. A incerteza U é obtida por (3.15):

$$U = ku_C(y) \tag{3.15}$$

onde:

k é o fator de abrangência; e

$u_C(y)$ é a incerteza padrão combinada.

3.9.6 Fator de abrangência

Fator numérico utilizado com um multiplicador da incerteza padrão combinada de modo a obter uma incerteza expandida. O fator de abrangência é representado por k[52].

3.9.7 Metodologia do Guia

A metodologia proposta pelo Guia[51] consiste primeiramente em equacionar as fontes de incertezas modelando a medição. Em seguida, devem ser obtidas as incertezas dos certificados de calibração e manuais dos equipamentos utilizados durante a medição.

Uma maneira simples de manipular todas as fontes de incerteza é trabalhar com elas numa planilha de cálculo. As incertezas tipo A e B são dispostas juntas de forma que possam ser avaliados os coeficientes de sensibilidade e a incerteza padrão, e a incerteza combinada seja calculada.

A partir destes resultados calculam-se os graus de liberdade efetivos (v_{eff}) definido por Welch-Satterthwaite[51]:

$$v_{eff} = \frac{u_C^4}{\sum_i^n \frac{u_i^4}{v_i}} \tag{3.16}$$

onde:

u_c é a incerteza padrão combinada;

u_i é a incerteza padrão; e

v_i são os graus de liberdade.

Com v_{eff} calculado aplica-se coeficiente de Student "t" correspondente a um nível de confiança de 95,45%, que será adotado como fator de abrangência (k). Finalmente, a incerteza expandida (U_c) é dada por:

$$U_c = k \cdot u_c \tag{3.17}$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Um resumo da metodologia desenvolvida no trabalho é apresentado no fluxograma da FIG. 4.1.

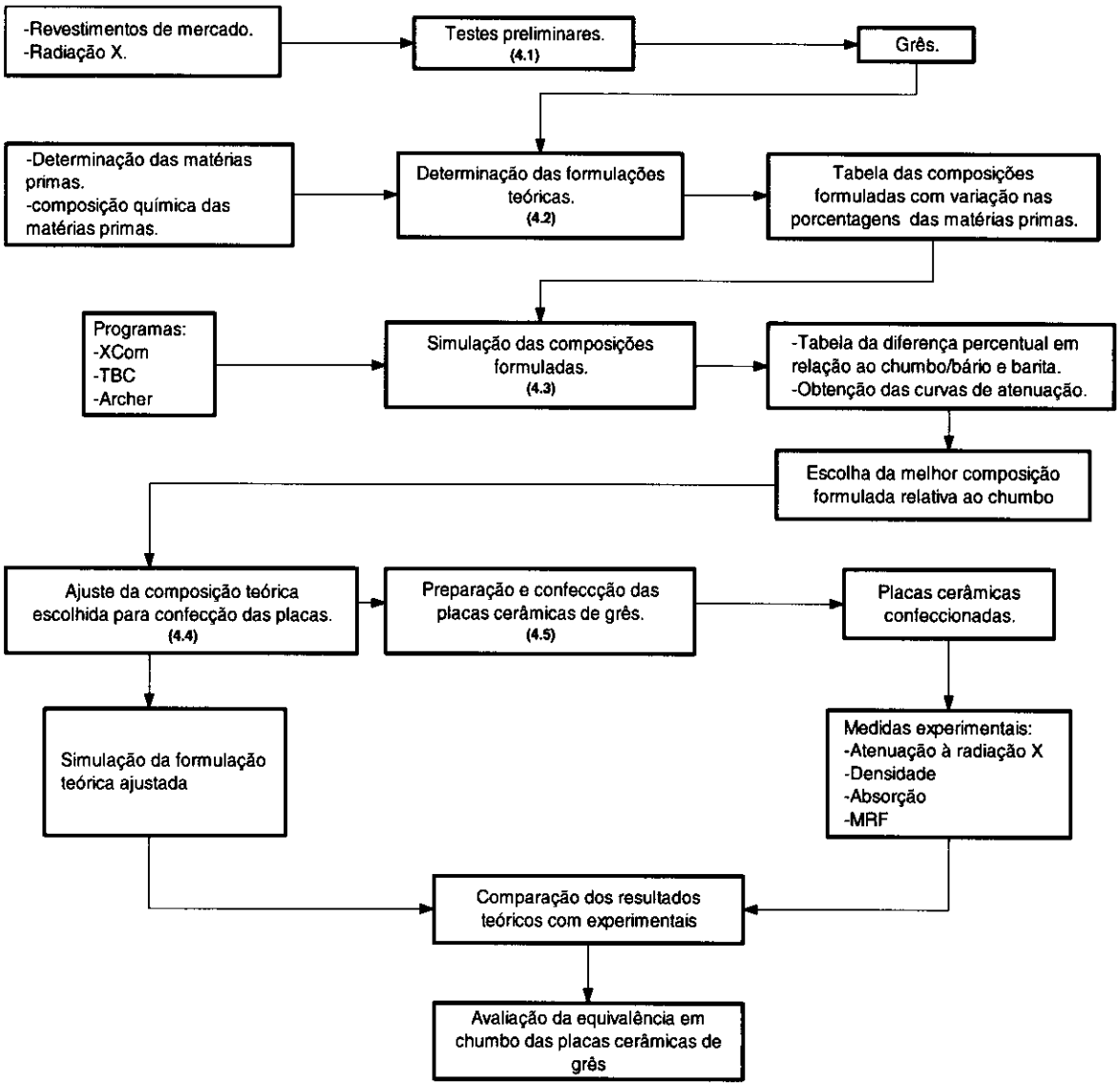

FIGURA 4.1 - Fluxograma da metodologia desenvolvida no trabalho.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

4.1 Estudo preliminar

Um estudo preliminar utilizando treze placas de revestimento comercial de fabricantes nacionais, produzidas com diferentes suportes, cedidas pelo Senai Mario Amato – "Núcleo Cerâmica", foi realizado com o objetivo de ensaiar e identificar quais dos diferentes suportes cerâmicos avaliados apresentam melhores propriedades atenuadoras para radiação X em energias da faixa utilizada em radiologia diagnóstica.

Os ensaios para avaliação da equivalência em chumbo dos suportes cerâmicos foram realizados nos laboratórios do Instituto de Eletrotécnica da Universidade de São Paulo, IEE-USP, tomando como referência o intervalo de tensão para radiologia diagnóstica entre 70 e 150 kVp. Foi utilizado um equipamento radiológico trifásico com tubo de raios X Röerix, modelo 124/30/50 no foco grosso, nas tensões de 80 kVp e 100 kVp, com correntes de 180 e 158 mA respectivamente, tempo de exposição de 0,2 segundos. As medidas foram realizadas com uma câmara de ionização de 6cc, modelo 10X5-6 com eletrômetro 9015, ambos da Radcal Corporation, calibrada em 16/06/2003, pelo laboratório de calibração de instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, com certificado número 0749/0703.

Os fatores de atenuação (equação 3.10) dos materiais selecionados foram determinados experimentalmente através de um arranjo conforme FIG. 4.2.

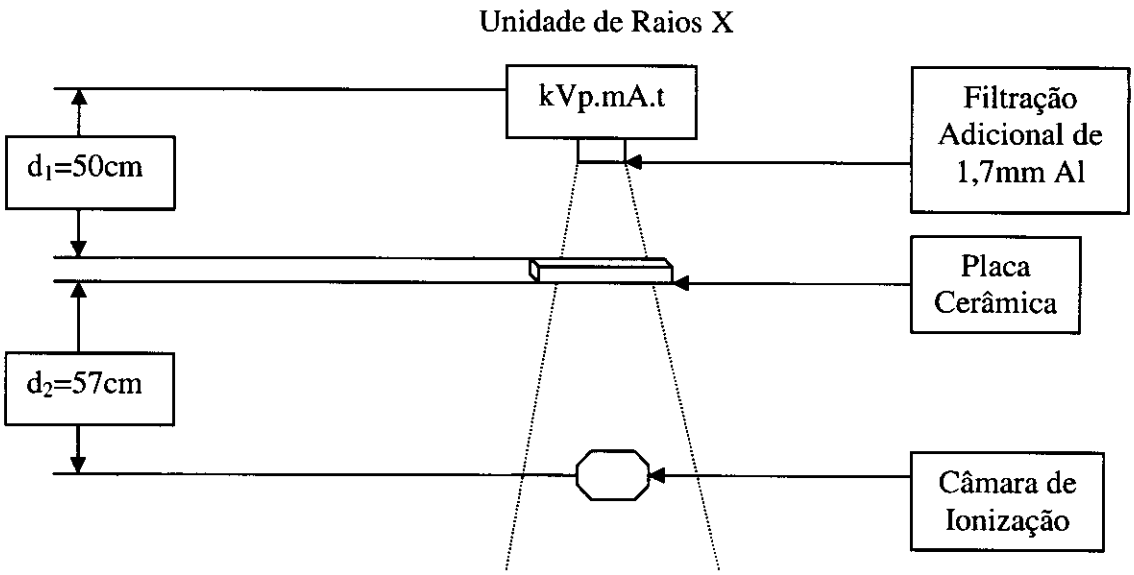

FIGURA 4.2– Arranjo experimental utilizado para as medições dos fatores de atenuação das amostras. A distância d_1 refere-se à distância do ponto focal à placa cerâmica e d_2 à distância entre a placa cerâmica e a câmara de ionização (detector).

4.2 Determinação das formulações teóricas de massa cerâmica grês

Possíveis variações da formulação base da massa cerâmica grês foram estudadas obedecendo aos percentuais permitidos e considerando aproximadamente 2% de perda ao fogo (comunicação pessoal[33]). Os correspondentes de mercado destes componentes utilizados se encontram na TAB. 4.1.

TABELA 4.1 – Componentes utilizados e seus correspondentes de mercado.

Componentes	Argilas Fundentes	Argilas Plásticas	Fundentes	Refratários
Correspondentes	Caulinítica Semi-Plástica	Todas as argilas	Calcita Feldspato Quartzo Pegmatito Filito Areia Feldspática Dolomíticos	Chamota Caulim Talco

Cada componente, quando analisado quimicamente, apresenta variações nas porcentagens dos óxidos constituintes. Esta variação origina-se em função da jazida de extração. Os óxidos comumente encontrados nos componentes são SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, Na_2O, K_2O, CaO, PbO, BaO e TiO_2.

Foram geradas oito composições com todos os componentes característicos para uma massa cerâmica grês; as composições químicas qualitativas e quantitativas foram extraídas da literatura[37,53]. Com estas análises foi obtida a quantidade de cada óxido dentro de cada um dos componentes. Em todas as formulações foram utilizados os óxidos de bário e chumbo em substituição ao óxido cálcio, vide TAB.4.2.

TABELA 4.2 – Composições formuladas de massa cerâmica grês e as porcentagens dos componentes consideradas.

Composições %	Talco	Areia Feldspática	Argila Semi-Plástica	Argila Caulinitica	Argila Plástica	Calcita	Dolomita	Chamota	CaO
1	5[A]	20[A]	20[A]	7[A]	20[A]	10[A]	8[A]	10[A]	-
2	5[B]	20[B]	20[B]	7[B]	20[B]	18[B]	10[B]	-	-
3	5[B]	20[B]	20[B]	7[B]	20[C]	18[B]	10[B]	-	-
4	5[B]	20[B]	20[B]	-	27[C]	18[B]	10[B]	-	-
5	5[B]	20[B]	20[B]	7[B]	20[C]	20[B]	8[B]	-	-
6	-	20[A]	20[B]	7[B]	20[C]	23[B]	10[B]	-	-
7	5[B]	20[B]	20[B]	-	10[C]	10[B]	3,5[B]	-	31,5
8	5[A]	20[A]		-	47[D]	20[A]	8[A]	-	-

[A]vide TAB..4.3 [B]vide TAB.4.4 [C]vide TAB.4.5-argila plástica (1) [D]vide TAB.4.5-argila plástica (2)

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as porcentagens de óxidos presentes nas matérias-primas utilizadas nas composições formuladas. Foram selecionadas as composições químicas que apresentavam maior teor de CaO, o qual foi posteriormente substituído pelo PbO ou BaO.

O que difere a composição química do talco da TAB.4.3 para o talco da TAB 4.4, por exemplo, é a sua região de extração, embora a porcentagem em que cada óxido participa dentro do que determina um talco é bem definida, por exemplo: SiO_2 entre 50 e 65%, MgO entre 30 e 35%, etc[37].

A maioria dos componentes utilizados em uma formulação cerâmica é extraída de jazidas naturais. Como conseqüência a composição química de cada um dos componentes apresenta variação que pode ser corrigida aplicando o conceito da formula de Seger[42].

TABELA 4.3 – Óxidos presentes nos componentes utilizados nas composições formuladas de grês[37, 53].

Óxidos %	Talco	Areia Feldspática	Argila Semi-Plástica	Argila Caulinitica	Argila Plástica	Calcita	Dolomita	Chamota
SiO_2	51,23	82,26	63,32	53,99	58,46	2,32	2,70	59,29
Al_2O_3	6,64	9,54	23,49	30,79	28,38	-	-	14,37
Fe_2O_3	1,48	0,43	1,06	0,43	0,94	0,20	31,00	4,78
TiO_2	0,45	-	1,46	0,40	1,05	-	-	0,57
CaO	0,91	0,49	0,33	0,25	0,21	49,63	36,60	13,34
MgO	31,78	0,10	0,32	0,19	0,18	0,20	22,80	3,13
K_2O	-	2,60	0,33	1,23	1,24	-	-	-
Na_2O	-	1,85	0,08	0,73	0,79	0,10	-	1,18

...AL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

TABELA 4.4 – Óxidos presentes nos componentes utilizados nas composições formuladas de grês[37, 53].

Óxidos %	Talco	Areia Feldspática	Argila Semi-Plástica	Argila Caulinítica	Argila Plástica	Calcita	Dolomíticos
SiO_2	61,80	82,26	68,21	59,09	66,45	4,20	5,00
Al_2O_3	8,90	9,54	29,63	35,20	33,50	-	-
Fe_2O_3	7,00	0,43	1,24	0,48	1,20	1,60	1,70
TiO_2	0,05	-	1,80	0,60	1,69	-	-
CaO	4,00	0,49	0,45	0,41	0,50	54,20	36,60
MgO	32,50	0,10	0,40	0,30	0,40	1,10	22,90
K_2O	-	2,60	0,40	1,77	2,03	-	-
Na_2O	-	1,85	0,13	0,83	1,64	0,10	-

A TAB. 4.5 apresenta a constituição básica de duas argilas plásticas diferentes (1) e (2) utilizadas nas composições formuladas.

TABELA 4.5 - Óxidos presentes na constituição básica das argilas plásticas (1) e (2) utilizadas nas composições formuladas de grês[37].

Óxidos %	Argila Plástica (1)	Argila Plástica (2)
SiO_2	58,59	68,37
Al_2O_3	27,55	0,81
Fe_2O_3	0,81	1,70
TiO_2	0,97	1,69
CaO	0,26	0,50
MgO	0,23	0,29
K_2O	0,93	1,34
Na_2O	0,53	1,64

4.3 Cálculo para a escolha da composição formulada a ser produzida

Para as simulações do cálculo dos coeficientes de atenuação das composições formuladas empregando o Programa XCom foi utilizada a rotina apresentada na FIG.4.3.

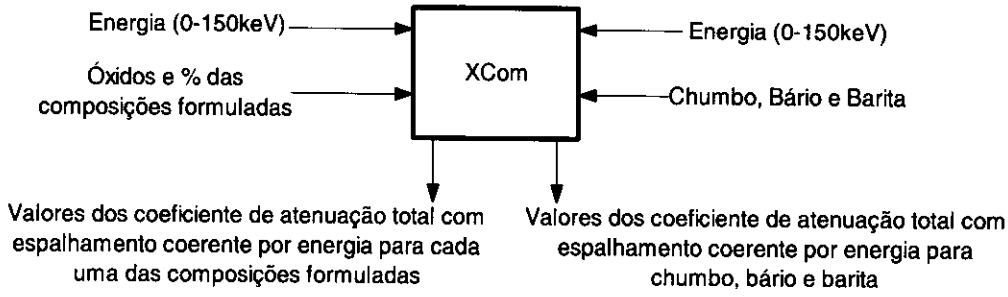

FIGURA 4.3- Fluxograma da utilização do Programa XCom para as composições formuladas.

No intervalo de energia utilizado os valores de coeficientes de atenuação foram estimados a cada 0,01 keV.

Com os valores de coeficiente de atenuação das composições formuladas, do chumbo, do bário e da barita foram construídas as curvas de atenuação que auxiliaram no processo de escolha da composição formulada.

O cálculo da diferença percentual apresentado na equação (4.1) foi efetuado empregando os coeficientes de atenuação em massa do material de referência chumbo, do bário e da barita, e para todas as composições formuladas de massa cerâmica grês com suas respectivas densidades teóricas calculadas e os resultados estão apresentados no item 5.3. Esse procedimento permitiu a escolha da composição formulada que apresentou maior semelhança com o comportamento das curvas de atenuação do chumbo e menor diferença percentual deste comportamento.

$$Dif\% = 100 - \left[\int_0^{E_{max}} \frac{\left[\frac{\mu(E)}{\rho}\right]_{referência} - \left[\frac{\mu(E)}{\rho}\right]_{composição}}{\left[\frac{\mu(E)}{\rho}\right]_{referência}} \right] \qquad (4.1)$$

Uma vez escolhida a composição formulada para ser confeccionada, esta foi ajustada pela fórmula de Seger, conforme item 3.7, voltando assim à formulação mineralógica e composição das matérias primas necessárias para a manufatura da massa cerâmica grês.

4.4 Composto formulado

A formulação mineralógica utilizada na manufatura da placa cerâmica de grês proposta foi a seguinte: 41,05% de filito, 2,16% de quartzo, 4,32% de dolomita, 6,05% de talco, 12,96% de pegmatito, 19,88% de argila São Simão e 13,58% de carbonato de bário ($BaCO_3$ P.A. da marca Reidel) empregado para a obtenção do BaO por calcinação. Todos os componentes, com exceção do carbonato de bário, foram fornecidos pela escola Senai "Mario Amato" - Núcleo Cerâmica, cujo fornecedor é a empresa Minasolo Comércio e Representações Ltda.

As composições químicas dos componentes utilizados, fornecida pela Minasolo, para a fabricação das placas cerâmicas são mostradas na TAB. 4.6.

TABELA 4.6 – Composição química dos componentes utilizados, fornecida pela empresa Minasolo.

Óxidos %	Filito	Quartzo	Dolomita	Talco	Pegmatito	Argila São Simão
SiO_2	65,50	99,16	6,45	-	73,14	49,50
Al_2O_3	18,60	0,01	0,20	68,99	16,40	28,50
Fe_2O_3	0,80	0,01	0,04	0,72	0,31	1,08
TiO_2	1,70	-	-	0,09	0,04	0,80
CaO	0,02	0,45	40,20	0,10	0,53	-
MgO	1,50	0,06	12,06	24,70	0,01	0,16
K_2O	4,00	-	-	-	5,14	0,46
$MgCO_3$	-	-	19,95	-	-	-
Na_2O	0,60	-	-	0,06	4,01	0,10

4.5 Produção das placas cerâmicas de grês

A produção das placas cerâmicas de grês seguindo a composição formulada escolhida e posteriormente ajustada foi realizada no Núcleo Cerâmica do Senai em escala de laboratório, com um processo de manufatura que obedeceu a seqüência apresentada no fluxograma da FIG. 4.4.

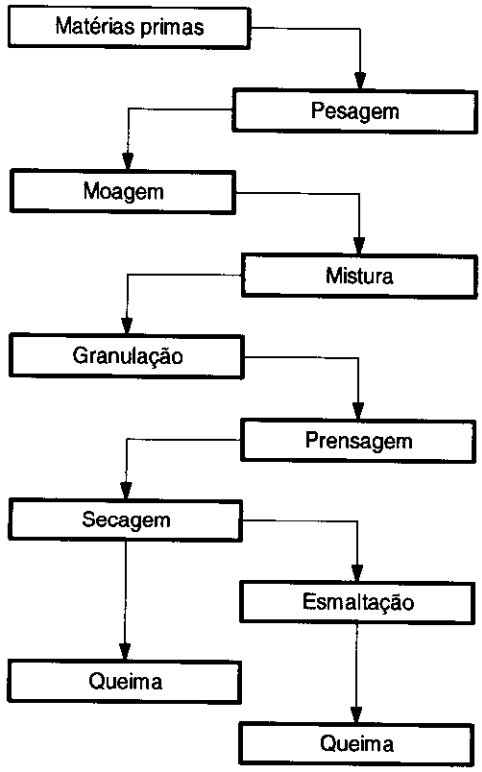

FIGURA 4.4 – Fluxograma do processo de fabricação das placas cerâmicas de grês.

Após recalcular e ajustar os óxidos da composição formulada escolhida para a formulação mineralógica pela fórmula de Seger, as matérias primas foram pesadas em uma balança Marte modelo A1600 e misturadas em um misturador tipo 20, série LA de marca Irmãos Amadio Ltda., com o objetivo de se obter uma mistura de pós bem homogênea. A mistura obtida foi levada às peneiras, de malha 14 e 28 da Granutest, para obtenção de dois tamanhos de grãos diferentes e mais o pó fino. Na preparação da mistura foi utilizada a mesma proporção de cada granulometria e do pó fino, facilitando assim a prensagem e a interação química entre moléculas na hora da queima.

A mistura foi então ajustada a 7% de umidade, acrescentando água, para que não apresente problemas de esfarelamento ou de fragilidade no momento da retirada do molde.

O método utilizado para a produção das placas cerâmicas de grês com dimensão de 100x100mm foi o processo de prensagem do Núcleo Cerâmica do Senai. A granulometria ajustada da argila permite o preenchimento adequado do molde e o destacamento correto das placas. Para a compactação da argila moída com 7% de umidade foi efetuado o preenchimento das cavidades do estampo (molde de aço inox quadrado de 100x100mm, confeccionado pela ferramentaria do Senai Mario Amato). A mistura foi prensada com

13,7 ton (240Kgf/cm^2) utilizando uma prensa hidráulica da marca Ciola modelo LACIO40T.

As placas obtidas seguiram para um secador denominado Estufa Tipo Câmara, modelo OS 11793 de SEA S/A, para um tratamento de secagem de 110^{0}C/40min e, em seguida, para os fornos de passagem, da Ferro Enamel do Brasil, para queimar à 1.160^{0}C/90min.

Duas das vinte e duas placas obtidas foram esmaltadas, e seguiram para o forno ICOMEVI muflado modelo EV20 para um tratamento de 1.180^{0}C/90min (placas 10 e 19).

Mediante a queima os componentes argilosos sofrem reações físico-químicas que conferem ao material produzido a consistência definitiva.

4.6 Esmalte

A composição mineralógica do esmalte utilizado nas placas 10 e 19 é a seguinte: 15,07% de feldspato sódico, 15,07% de feldspato potássico, 7,5% de caulim, 10,05% de dolomita, 5,02% de talco, 3,01% de calcita, 3,51% de quartzo, 10,05% de zinco, 5,02% de titânio, 0,5% de manganês e 25,2% de carbonato de bário ($BaCO_3$).

A composição de óxidos das matérias primas utilizadas na fabricação do esmalte, fornecida pela empresa Minasolo, aplicado nas placas 10 e 19 é mostrada na TAB. 4.7.

TABELA 4.7 – Composição química dos componentes utilizados no esmalte, fornecida pela Minasolo.

Óxidos %	Feldspato Sódico	Feldspato Potássico	Caulim	Dolomita	Talco	Calcita	Quartzo
SiO_2	68,70	64,80	48,18	6,45	-	4,20	99,16
Al_2O_3	19,50	18,30	36,62	0,20	68,99	-	0,01
Fe_2O_3	-	-	0,56	0,04	0,72	1,60	0,01
TiO_2	-	-	0,23	-	0,09	-	-
CaO	-	-	0,59	40,20	0,10	54,20	0,45
MgO	-	-	0,21	12,06	24,70	1,10	0,06
K_2O	-	16,90	0,69	-	-	-	-
$MgCO_3$	-	-	-	19,95	-	0,10	-
Na_2O	11,80	-	0,34	-	0,06		-

4.7 Avaliação da atenuação da radiação X

4.7.1 Método experimental

As medidas experimentais para a determinação das propriedades de atenuação da radiação X das 22 placas cerâmicas produzidas foram realizadas conforme descrito no item 3.8.1, utilizando o arranjo experimental apresentado na FIG.4.5.

Os ensaios foram realizados no laboratório do IEE-USP, credenciado pelo INMETRO, de acordo com a norma ABNT NBR/IEC 61331-1, empregando um equipamento de raios X Philips MCN 323 que opera entre 15 kV e 320 kV, foco grosso, corrente de 20mA nas tensões de 80, 100 e 150 kV, com filtração adicional de 0,15, 0,25 e 0,7mmCu respectivamente, utilizando câmaras de ionização Radcal Corporation de 6cm^3 e monitor de radiação, modelo 1515.

FIGURA 4.5 – Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação das placas cerâmicas de grês.

4.7.2 Metodologia para avaliação da atenuação da radiação X

O fluxograma da utilização dos programas e modelos matemáticos empregados para a avaliação da atenuação da radiação X pelas placas cerâmicas de grês em relação ao chumbo é apresentado na FIG. 4.6.

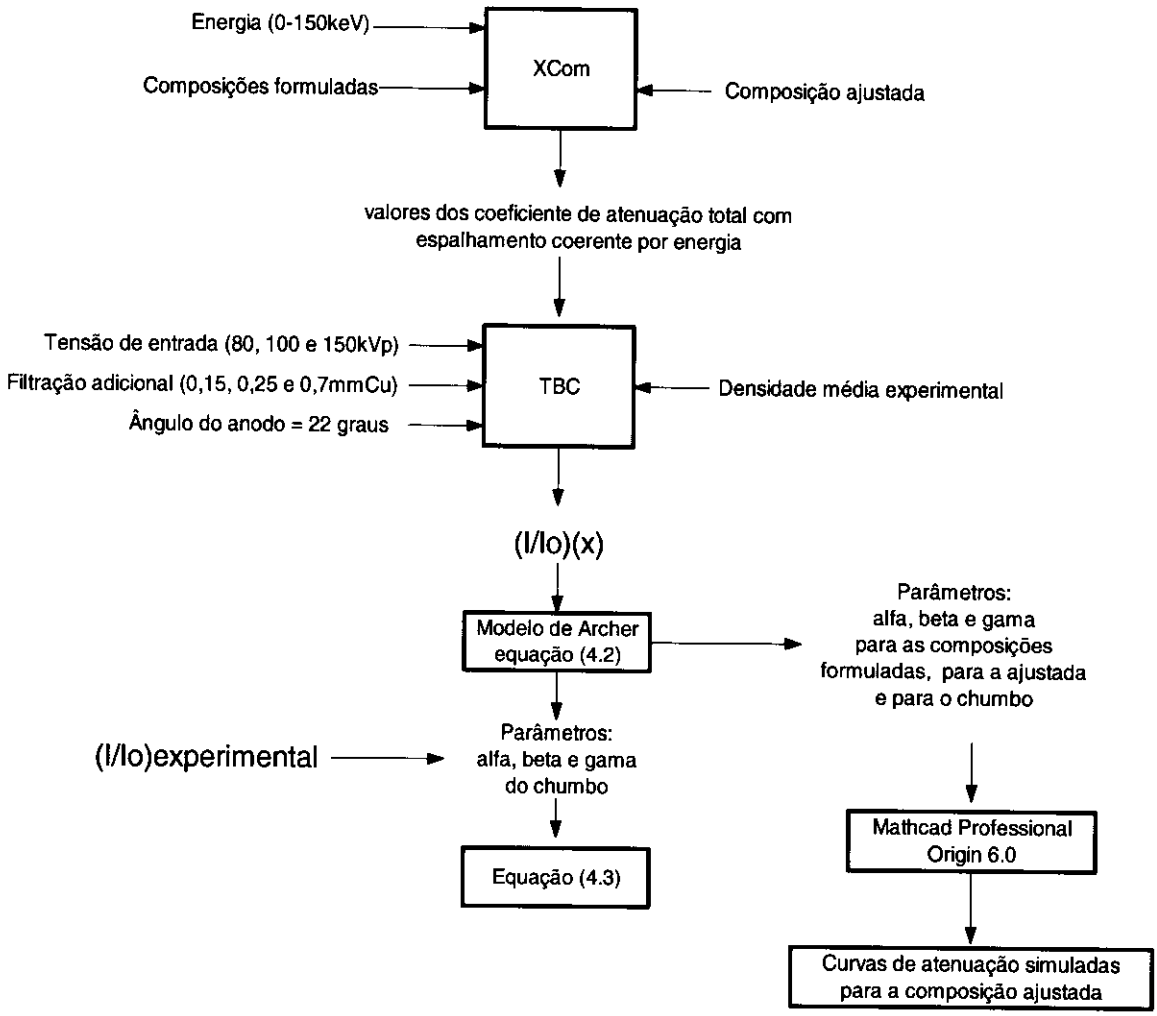

FIGURA 4.6 – Fluxograma dos programas e modelos matemáticos usados para a avaliação da atenuação das placas cerâmicas de grês com relação ao chumbo.

Nos testes realizados para a determinação das propriedades de atenuação das placas cerâmicas de grês, conforme descrito em 4.7, foram obtidos os valores de I (intensidade do feixe de radiação X atenuada por uma espessura x de material protetor) e I_0 (intensidade do feixe de radiação X não atenuada).

A equação de Archer que aparece no fluxograma, é dada por:

$$\frac{I}{I_0} = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\right)e^{\alpha \cdot \gamma \cdot x} - \frac{\beta}{\alpha}\right]^{-\frac{1}{\gamma}} \qquad (4.2)$$

onde:

α, β e γ são parâmetros determinados utilizando-se um método não-linear de mínimos quadrados; e

x é a espessura do material protetor em milímetros.

Utilizando-se os valores dos parâmetros de ajuste para o chumbo (α_{Pb}, β_{Pb} e γ_{Pb}) na equação 4.2 e isolando-se a variável x teremos a equação (4.3) onde os valores de I/I_0 serão os valores medidos, seguindo item 4.7.

$$x_{eq} = \frac{1}{\alpha_{Pb} \cdot \gamma_{Pb}} \ln\left[\frac{\left(\frac{I}{I_0}\right)_{medido_placas}^{-\gamma_{Pb}} + \frac{\beta_{Pb}}{\alpha_{Pb}}}{\left(1+\frac{\beta_{Pb}}{\alpha_{Pb}}\right)}\right] \tag{4.3}$$

A equação 4.3 fornece uma metodologia para o cálculo da equivalência em chumbo das placas a partir do Modelo de Archer.

Substituindo os parâmetros de ajuste para as placas cerâmicas(α_{placas}, β_{placas} e γ_{placas}) na equação 4.2, e conhecendo-se suas respectivas espessuras obteve-se com o auxilio do software Mathcad Professional 2000 e do Origin 6.0 as curvas de atenuação para as placas em função dos parâmetros de Archer.

4.7.3 Avaliação das placas cerâmicas em relação ao chumbo

A metodologia para a avaliação das placas cerâmicas produzidas a serem utilizadas como blindagem em salas de radiologia diagnóstica seguiu os parâmetros e tabelas do NCRP 147[6], conforme indicado no item 3.4.1.

Os valores para o fator de uso foram extraídos da tabela 4.4 do NCRP 147 e para o cálculo dos valores de kerma no ar para radiação X primária sem blindagem (K_p em mGy/semana) foi utilizada a equação 4.5.

$$K_P = \frac{K_P^1 \cdot U \cdot N}{d_P^2} \tag{4.5}$$

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

onde:

K_P^1 é o valor de kerma no ar não atenuado por paciente e é dado por mGy/paciente a 1m, de acordo com a tabela 4.5 do NCRP 147[6];

U é o fator de uso conforme tabela 4.4 do NCRP147[6];

N é o número de pacientes por semana; e

d é a distância entre fonte e barreira em metros.

O kerma no ar para radiação X secundária (K_{sec} em mGy/semana) foi calculado conforme equação 4.6.

$$K_{sec} = \frac{K_{sec}^1 \cdot N}{d_{sec}^2} \tag{4.6}$$

onde:

K_{sec}^1 é o valor de kerma no ar não atenuado por paciente e é dada por mGy/paciente a 1m, de acordo com a tabela 4.7 do NCRP 147[6];

U é o fator de uso conforme tabela 4.4 do NCRP147[6];

N é o número de pacientes por semana; e

d é a distância entre fonte e barreira em metros.

A espessura equivalente em chunbo, foi obtida utilizando o fator de atenuação B para radiação X primária, equação 4.5, radiação secundária, equação 4.6, e os gráficos B.2 e C.2 do NCRP 147[6] conforme equação 4.7.

$$B = \left(\frac{P}{T}\right)\frac{1}{K} \tag{4.7}$$

onde:

T é o fator de ocupação da TAB.3.1;

P é o nível de restrição da TAB.3.2 em mGy/semana; e

K é o valor obtido das equações 4.5 ou 4.6. em mGy/semana.

A determinação algébrica da espessura da barreira foi determinada pela equação 4.3 utilizando o fator B obtido da equação 4.7.

4.8 Testes físicos

4.8.1 Determinação da densidade

Para a determinação do volume das placas produzidas foi utilizado um paquímetro marca Mitutoyo (medidas de comprimento e largura) e um micrometro marca Tesa n°.51 (100-125mm) com padrão Mitutoyo de 100mm (medida das espessuras). Com uma balança Marte, modelo AS2000, obteve-se a massa em gramas de cada uma das placas cerâmicas. A densidade de todas as placas cerâmicas foi calculada conforme equação 3.9 do item 3.8.2.

4.8.2 Ensaios de absorção de água, carga de ruptura e módulo de resistência à flexão

Os ensaios de absorção de água, de carga de ruptura e módulo de resistência à flexão (MRF) foram realizados no laboratório do Senai "Mário Amato" credenciado pelo INMETRO.

Nos testes de absorção de água, conforme descrito no item 3.8.3, foi utilizado uma balança marca Mettler, modelo PZ7001. Na determinação do MRF foi utilizado um deflectômetro marca Gabriele modelo CRAB 424. Para a realização de ambos os testes foi utilizada uma estufa cirúrgica retilínea da marca Fanen, no intervalo de utilização entre 100 e 110°C.

4.9 Avaliação das incertezas

4.9.1 Determinação das incertezas associadas à densidade

O cálculo das incertezas relacionadas à determinação da densidade foi efetuado empregando os dados obtidos dos certificados de calibração da balança, do paquímetro e do micrômetro.

Com relação à balança, adotou-se a informação de incerteza fornecida pelo fabricante de ±0,01g com um nível de confiança de aproximadamente 95% com k=2; essa incerteza é considerada do tipo B

Para o paquímetro, a incerteza fornecida pelo certificado de calibração é de ±0,02mm, resolução de 0,01mm e o nível de confiança de aproximadamente 95% com k=2,17 e incerteza considerada do tipo B.

Para a espessura foram efetuadas 10 medidas na área central de cada placa cerâmica, cuja incerteza considerada é do tipo A. O micrômetro tem incerteza fornecida pelo fabricante de ±0,001mm e o nível de confiança de aproximadamente 95% com k=2,02, a incerteza considerada é do tipo B para resolução e calibração do aparelho.

4.9.2 Determinação da incerteza associada à determinação da espessura equivalente da placa cerâmica de grês em relação ao chumbo (x_{eq}.)

Para a avaliação da incerteza associada à determinação da espessura das placas cerâmicas equivalente em chumbo (Xeq.) utilizando a equação 4.3 e considerando X_1=Xeq foi necessário avaliar as fontes de incertezas na determinação do B e razão de I/I_0 apresentada na equação 3.9. Não foram estimadas as incertezas dos parâmetros α, β e γ uma vez que o software utilizado não fornece estes dados suficientes, conforme item 3.4.3, as incertezas associadas foram estimadas com relação a I e I_0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Determinação dos fatores de atenuação de revestimentos cerâmicos comerciais

A análise do comportamento das curvas de atenuação de revestimentos cerâmicos comerciais possibilitou a escolha de uma massa cerâmica para os compostos a serem desenvolvidos, de acordo com as propriedades de atenuação que mais se aproximaram do comportamento de atenuação do material escolhido como referência o chumbo. Na TAB 5.1, são apresentadas as espessuras equivalentes das treze amostras avaliadas em laboratório para as tensões de 80 e 100kV.

TABELA 5.1 – Espessuras equivalentes das amostras de revestimentos cerâmicos comerciais.

Placas Cerâmicas	Tensões	
	80kV	100kV
	Espessura equivalente (mmPb)	
1	0,111	0,085
2	0,141	0,097
3	0,089	0,073
4	0,085	0,072
5	0,074	0,059
6	0,092	0,071
7	0,091	0,069
8	0,075	0,062
9	0,089	0,071
10	0,094	0,074
11	0,108	0,087
12	0,101	0,082
13	0,099	0,081

Analisando a TAB.5.1, verifica-se que as amostras 1, 2, 11, 12 e 13 que apresentam melhor capacidade atenuadora têm como suporte (ou massa cerâmica) a pasta branca grês.

As amostras 3 e 4 possuem como suporte a massa cerâmica vermelha, as amostras 5 e 8 a argila pura, as amostras 6 e 7 são refratários e as amostras 9 e 10 são porcelanatos.

Considerando a pequena diferença entre os valores obtidos, qualquer suporte cerâmico poderia ser selecionado. Neste trabalho o suporte cerâmico grês foi o escolhido para dar continuidade ao desenvolvimento de uma massa cerâmica de revestimento para fins de aplicação em proteção radiológica.

5.2 Determinação das formulações teóricas de massa cerâmica grês

Diferentes composições de grês foram formuladas, sendo selecionadas oito que apresentavam maiores concentrações de CaO, utilizado como fundente numa composição cerâmica. Foram separados dois conjuntos de composições: um conjunto utilizando como fundente o **BaO** e outro utilizando o **PbO** em substituição ao **CaO** , como mostra a TAB.5.2 .

TABELA 5.2 – Conjunto de composições formuladas e porcentagens de óxidos estudadas utilizando como fundente o BaO e o PbO em substituição ao CaO.

Composição 1				Composição 5			
Óxidos	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**
BaO	**9,49**	**PbO**	**9,49**	**BaO**	**11,44**	**PbO**	**11,44**
SiO_2	53,53	SiO_2	53,53	SiO_2	55,94	SiO_2	55,94
Al_2O_3	16,21	Al_2O_3	16,21	Al_2O_3	11,10	Al_2O_3	11,10
Fe_2O_3	3,57	Fe_2O_3	3,57	Fe_2O_3	1,33	Fe_2O_3	1,33
TiO_2	0,61	TiO_2	0,61	TiO_2	0,84	TiO_2	0,84
MgO	3,88	MgO	3,88	MgO	2,00	MgO	2,00
K_2O	0,92	K_2O	0,92	K_2O	0,55	K_2O	0,55
Na_2O	0,72	Na_2O	0,72	Na_2O	0,90	Na_2O	0,90
Composição 2				**Composição 6**			
Óxidos	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**
BaO	**13,20**	**PbO**	**13,20**	**BaO**	**15,71**	**PbO**	**15,71**
SiO_2	51,77	SiO_2	51,77	SiO_2	49,27	SiO_2	49,27
Al_2O_3	17,44	Al_2O_3	17,44	Al_2O_3	10,46	Al_2O_3	10,46
Fe_2O_3	1,38	Fe_2O_3	1,38	Fe_2O_3	1,21	Fe_2O_3	1,21
TiO_2	0,74	TiO_2	0,74	TiO_2	0,74	TiO_2	0,74
MgO	3,86	MgO	3,86	MgO	2,26	MgO	2,26
K_2O	0,61	K_2O	0,61	K_2O	0,47	K_2O	0,47
Na_2O	0,80	Na_2O	0,80	Na_2O	0,81	Na_2O	0,81
Composição 3				**Composição 7**			
Óxidos	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**
BaO	**13,25**	**PbO**	**13,25**	**BaO**	**31,50**	**PbO**	**31,50**
SiO_2	52,15	SiO_2	52,15	SiO_2	52,70	SiO_2	52,70
Al_2O_3	11,05	Al_2O_3	11,05	Al_2O_3	8,60	Al_2O_3	8,60
Fe_2O_3	1,33	Fe_2O_3	1,33	Fe_2O_3	1,40	Fe_2O_3	1,40
TiO_2	0,74	TiO_2	0,74	TiO_2	0,80	TiO_2	0,80
MgO	3,79	MgO	3,79	MgO	3,80	MgO	3,80
K_2O	0,47	K_2O	0,47	K_2O	0,40	K_2O	0,40
Na_2O	0,80	Na_2O	0,80	Na_2O	0,80	Na_2O	0,80
Composição 4				**Composição 8**			
Óxidos	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**	**Óxidos**	**%**
BaO	**13,26**	**PbO**	**13,26**	**BaO**	**13,12**	**PbO**	**13,12**
SiO_2	52,80	SiO2	52,80	SiO_2	47,23	SiO_2	47,23
Al_2O_3	8,64	Al_2O_3	8,64	Al_2O_3	15,19	Al_2O_3	15,19
Fe_2O_3	1,42	Fe_2O_3	1,42	Fe_2O_3	3,06	Fe_2O_3	3,06
TiO_2	0,82	TiO_2	0,82	TiO_2	0,48	TiO_2	0,48
MgO	3,79	MgO	3,79	MgO	3,58	MgO	3,58
K_2O	0,44	K_2O	0,44	K_2O	0,96	K_2O	0,96
Na_2O	0,86	Na_2O	0,86	Na_2O	0,64	Na_2O	0,64

5.3 Aplicação dos modelos matemáticos – Simulações

Com o auxílio do software Mathcad Professional 2000 foram inseridos os coeficientes de atenuação obtidos empregando o programa XCom, como descrito em 3.4.4, para o chumbo, bário, barita ($BaSO_4$) e para as composições formuladas. A tensão e filtração aplicadas são as indicadas na norma NBR 61331-1[14] e as densidades foram as teóricas para todas as composições, gerou-se dados para a construção de gráficos como os da FIG. 5.1, com a ajuda do software Origin 6.0, que mostram para a composição 6, por exemplo, as curvas de atenuação relativa ao chumbo, bário e barita usando como fundente o PbO e o BaO.

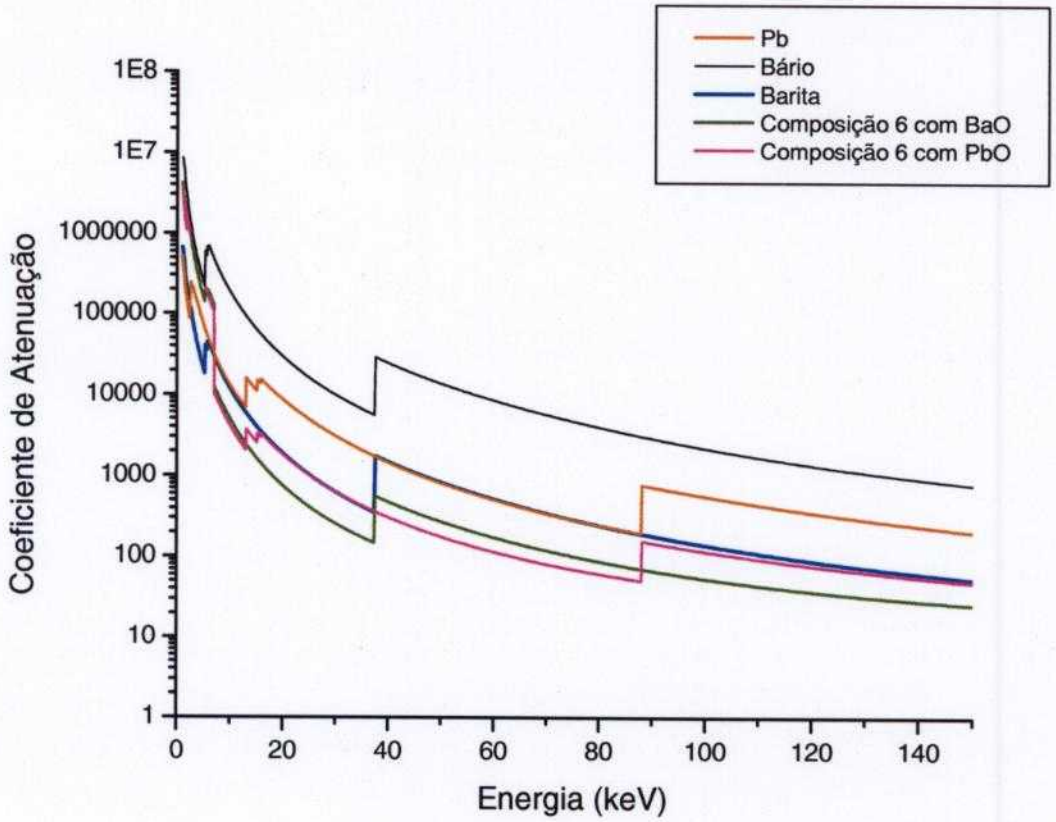

FIGURA 5.1 – Curva de atenuação da composição 6 usando como fundente BaO e PbO em relação ao Pb, ao Ba e à barita.

Na TAB.5.3 são apresentadas as diferenças percentuais entre o coeficiente de atenuação em massa das composições formuladas relativas ao chumbo, bário e barita extraídos das curvas de atenuação geradas pelo XCom e utilizando o software Mathcad Professional 2000 para as composições formuladas conforme equação (4.1) e suas respectivas densidades calculadas.

TABELA 5.3 – Densidades calculadas e diferença percentual (%) entre o coeficiente de atenuação em massa das composições formuladas relativa ao chumbo, bário e barita usando coeficientes de atenuação, gerados pelo XCom, e o modelo TBC.

Composições Formuladas	Materiais de referência	Desnidade (g/cm^3)	Diferença Percentual %		
			Chumbo	Bário	Barita
	Chumbo	11,34			
	Bário	3,5			
	Barita	4,00 à 5,00			
1 com BaO		2,53	85,4	81,5	71,1
1 com PbO		2,87	83,9	73,0	57,9
2 com BaO		2,75	82,4	78,3	66,0
2 com PbO		3,24	80,6	66,6	47,8
3 com BaO		2,51	81,6	77,4	64,5
3 com PbO		3,00	79,6	64,7	44,8
4 com BaO		2,43	81,3	77,1	64,0
4 com PbO		2,92	79,6	64,7	44,8
5 com BaO		2,43	83,2	79,2	67,4
5 com PbO		2,85	81,5	68,3	50,5
6 com BaO*		**2,51**	**78,9**	**74,5**	**59,9**
6 com PbO*		**3,09**	**76,5**	**59,0**	**35,8**
7 com BaO		3,46	70,0	64,8	44,3
7 com PbO		4,64	66,0	39,6	5,20
8 com BaO		2,53	81,5	77,3	64,3
8 com PbO		3,02	79,6	64,8	45,0

* exemplo FIG.5.1

A formulação 7 apresenta menores diferenças percentuais mas, não é factível devido à alta concentração de fundentes (BaO ou PbO), ultrapassando o limite máximo de 25% que uma massa cerâmica de grês admite. Desse modo foi escolhida a formulação 6 empregando o BaO. A escolha do BaO foi econômica, uma vez que o PbO apresenta um custo maior.

5.4 Confecção das placas cerâmicas

Uma vez definida a formulação teórica, representada como composição 6 empregando o BaO, a etapa seguinte foi a de confecção da placa cerâmica de grês, onde

foram realizados ajustes na formulação teórica como, por exemplo, na umidade, na granulometria, na porcentagem de fundente, entre outros. Estes ajustes foram necessários para diminuir problemas na prensagem e na queima das placas e, de acordo com as matérias primas disponíveis no Núcleo de Cerâmica do Senai. Segundo item 3.7, a fórmula ajustada está representada na TAB.5.4, e as placas cerâmicas produzidas são apresentadas na FIG.5.3(A, B, C, D).

TABELA 5.4 – Porcentagem dos óxidos utilizados na produção das placas.

Composição 6 - Ajustada	
Óxidos	**%**
SiO_2	48,63
Al_2O_3	19,61
Fe_2O_3	0,63
TiO_2	0,87
CaO	**1,83**
MgO	2,63
K_2O	2,40
Na_2O	0,83
MgO	0,82
BaO	**13,58**

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

B
9
10
11
12
13
14
15
16

C
13
14
15
16
17
18
19
20

FIGURA 5.3(A, B, C, D) – Placas cerâmicas de grês produzidas.

5.5 Testes físicos das placas cerâmicas produzidas

As medidas experimentais de atenuação da radiação X foram realizadas de acordo com a norma NBR 61331-1 nas tensões de 80, 100 e 150 kV, tendo sido obtidos os fatores de atenuação e os valores de espessura equivalente (de atenuação) em chumbo (Xeq.) apresentados na TAB.5.5.

TABELA 5.5 – Fatores de atenuação (I/Io), de abrangência (k) e espessura equivalente (Xeq.) em chumbo para radiação X de 80, 100 e 150 kV das placas cerâmicas de grês produzidas.

Placas	Espessura mm	k	80kV		100kV		150kV	
			I/Io	Xeq, mmPb	I/Io	Xeq, mmPb	I/Io	Xeq, mmPb
1	5,83 ± 0,03	2,25	0,189	0,150	0,276	0,180	0,479	0,147
2	5,57± 0,04	2,28	0,223	0,127	0,322	0,151	0,518	0,131
3	5,47± 0,03	2,25	0,206	0,138	0,296	0,166	0,508	0,135
4	5,64± 0,03	2,25	0,217	0,131	0,313	0,156	0,508	0,135
5	5,37± 0,04	2,28	0,243	0,117	0,332	0,146	0,545	0,120
6	5,78± 0,02	2,19	0,201	0,142	0,288	0,171	0,488	0,144
7	5,61± 0,03	2,28	0,225	0,127	0,317	0,154	0,505	0,136
8	5,73± 0,02	2,11	0,173	0,163	0,263	0,189	0,449	0,162
9	5,30± 0,03	2,28	0,195	0,145	0,288	0,172	0,491	0,142
10	6,04± 0,02	2,19	0,106	0,249	0,186	0,449	0,377	0,201
11	5,36± 0,03	2,25	0,182	0,155	0,276	0,179	0,475	0,149
12	5,41± 0,04	2,28	0,199	0,143	0,294	0,168	0,488	0,144
13	5,41± 0,02	2,19	0,201	0,142	0,300	0,164	0,492	0,142
14	4,84± 0,02	2,19	0,230	0,124	0,321	0,152	0,508	0,135
15	5,40± 0,02	2,11	0,197	0,144	0,294	0,168	0,489	0,143
16	5,93± 0,02	2,19	0,178	0,159	0,280	0,177	0,459	0,157
17	6,01± 0,03	2,25	0,165	0,171	0,252	0,197	0,448	0,162
18	7,99± 0,03	2,25	0,102	0,258	0,167	0,287	0,356	0,215
19	9,04± 0,02	2,19	0,066	0,364	0,124	0,365	0,282	0,271
20	8,89± 0,02	2,11	0,112	0,239	0,180	0,270	0,360	0,212
21	9,07± 0,03	2,25	0,107	0,241	0,181	0,269	0,354	0,216
22	10,88± 0,02	2,19	0,068	0,498	0,125	0,364	0,289	0,264

A TAB 5.6, extraída da tabela de classificação de revestimentos contida na norma NBR 13818/97[44], mostra como são classificados os revestimentos cerâmicos prensados.

TABELA 5.6 – Grupos de absorção para os revestimentos prensados[44].

Grupo de Absorção (Prensado)	
BIII	BIIb
abs > 10%	6% < abs < 10%
MRF < 12	MRF mínimo ≥ 16
e < 7.5mm	e < 7.5mm
carga ruptura ≥ 200	carga ruptura ≥ 500

Os resultados dos testes físicos (destrutivos) realizados nas placas cerâmicas produzidas apresentados na TAB.5.7 mostram que as mesmas são classificadas como

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

revestimento e estão no grupo de absorção BIII e BIIb (prensado) não esmaltado TAB.5.6.

TABELA 5.7 – Resultados dos testes físicos para avaliação da densidade (g/cm^3), da absorção de água (%), da carga de ruptura (N) e do módulo de resistência á flexão (N/mm^2) realizados nas placas cerâmicas de grês produzidas.

Placas	Densidade g/cm^3	Absorção de água %	Carga Ruptura N	MRF N/mm^2
1	1,89± 0,02	11,44	310,69	14,34
2	1,95± 0,02	15,82	148,47	7,64
3	2,00± 0,02	13,12	267,85	13,78
4	2,01± 0,02	16,93	139,34	6,91
5	1,60± 0,02	17,85	-	-
6	1,82± 0,02	15,45	213,50	9,86
7	1,84± 0,02	17,22	93,63	4,64
8	2,17± 0,02	7,13	323,86	16,06
9	2,00± 0,02	12,22	-	-
10	2,28± 0,02	12,42	209,18	9,33
11	2,09± 0,02	7,52	375,53	20,83
12	2,15± 0,02	7,26	358,44	19,14
13	2,03± 0,02	9,79	327,89	17,51
14	1,96± 0,02	6,45	276,68	18,01
15	2,02± 0,02	7,18	330,58	17,65
16	1,84± 0,02	14,08	233,59	10,42
17	2,06± 0,02	8,75	408,28	18,85
18	1,97± 0,01	8,05	868,62	20,88
19	1,98± 0,01	11,02	651,04	12,61
20	1,90± 0,01	9,58	589,91	14,54
21	1,98± 0,01	14,51	653,20	12,37
22	1,99± 0,01	12,57	265,51	14,73

5.6 Análise dos resultados simulados e experimentais

A análise dos valores de I/Io como função da espessura das placas obtidas nas simulações através do modelo TBC e de Archer com a fórmula escolhida e ajustada foi realizada para a densidade média das placas (1,98g/cm^3) e também para as densidades considerando os limites do desvio padrão (1,98±0,15g/cm^3) e comparada com os valores experimentais obtidos das placas produzidas.

Cada ponto experimental apresentado na FIG.5.4 representa a média de 10 medidas das placas cerâmicas produzidas. O desvio padrão da média obtido foi $\leq$ 4,52% para a tensão de 80kV, $\leq$ 2,23% para 100kV e $\leq$ 0,78 % para 150kV .

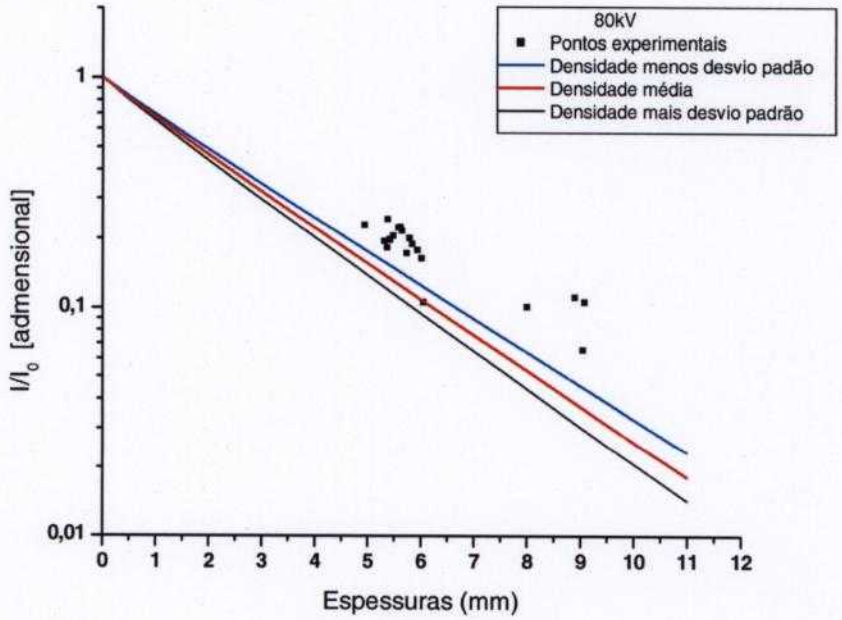

FIGURA 5.4 – Curvas de atenuação simuladas para a composição ajustada conforme TAB.5.4 considerando a densidade média experimental de 1,98±0,15g/cm^3 e fatores de atenuação experimentais das placas produzidas para a tensão de 80kV.

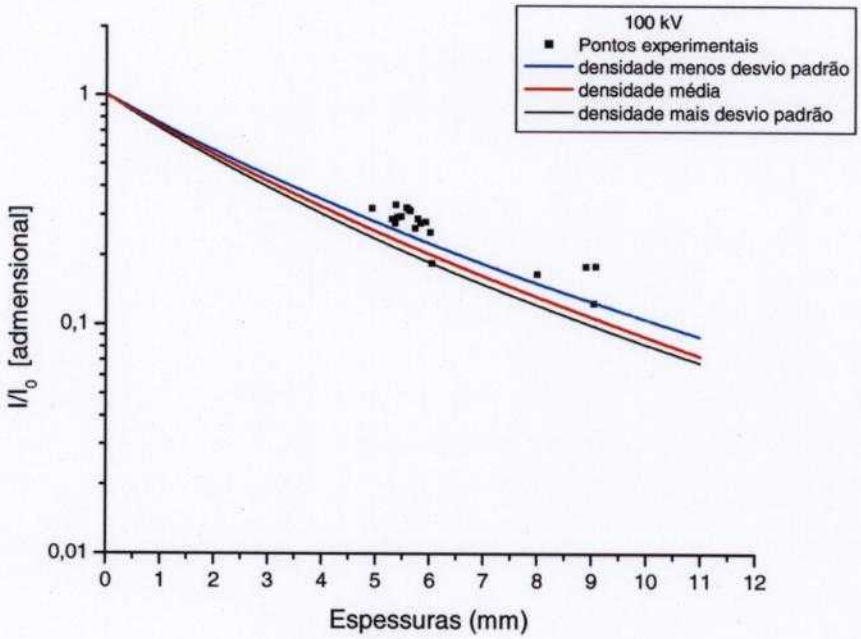

FIGURA 5.5 – Curvas de atenuação simuladas para a composição ajustada conforme TAB.5.4 considerando a densidade média experimental de 1,98±0,15g/cm^3 e fatores de atenuação experimentais das placas produzidas para a tensão de 100kV.

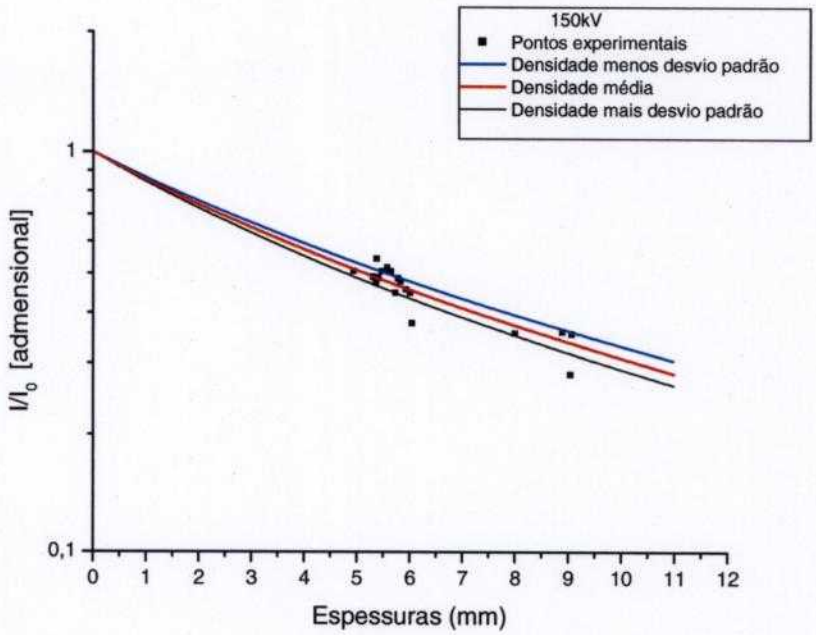

FIGURA 5.6– Curvas de atenuação simuladas para a composição ajustada conforme TAB.5.4 considerando a densidade média experimental de 1,98 ± 0,15g/cm^3 e fatores de atenuação experimentais das placas produzidas para a tensão de 150kV.

Os melhores resultados foram obtidos para a tensão de 150kV com filtração de 0,7mmCu, o que sugere que os modelos utilizados são os que melhor representam os dados experimentais para o material desenvolvido, neste intervalo de energia.

5.7 Cálculo das incertezas

5.7.1 Densidade

O cálculo das incertezas relativas à determinação da densidade das placas é apresentado na TAB.5.8 para a placa 1, por exemplo. As incertezas na determinação da espessura de todas as placas são apresentadas na TAB.5.5 com um nível de confiança de 95%.

TABELA 5.8 – Determinação das incertezas no cálculo da densidade das placas cerâmicas.

IDENTIFICAÇÃO DO CÁLCULO: Incerteza da balança

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade (C_i)		Incerteza padrão u_i [g]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
UResol	Resolução da balança (R/2)	0.005	g	B	retangular	1.732	1	—	0.003	infinitos	36.6%
UDepTax	calibração da balança	0.01	g	B	normal	2	1	—	0.005	infinitos	63.4%
u_c	Incerteza combinada								0.006	veff =	infinitos
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								0.012		
										k=	2.000

IDENTIFICAÇÃO DO CÁLCULO: Incerteza do paquímetro

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade (C_i)		Incerteza padrão u_i [mm]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
UResol	Resolução do paquímetro (R/2)	0.01	mm	B	retangular	1.732	1	—	0.006	infinitos	55.6%
UDepTax	calibração do paquímetro	0.01	mm	B	normal	2.17	1	—	0.005	infinitos	44.4%
u_c	Incerteza combinada								0.007	veff =	infinitos
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								0.01		
										k=	2.000

Placa1

IDENTIFICAÇÃO DO CÁLCULO: Incerteza do micrometro para a placa 1

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade (C_i)		Incerteza padrão u_i [mm]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
uA	Desvio padrão (σ/raiz(10))	0.013	mm	A	normal	1	1	—	0.013	9	70.7%
UResol	Resolução do micrometro (R/2)	0.0005	mm	B	retangular	1.732050808	1	—	0.0003	infinitos	1.6%
UDepTax	calibração do micrometro	0.01	mm	B	normal	2.02	1	—	0.005	infinitos	27.7%
u_c	Incerteza combinada								0.01	veff =	11.98
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								0.03		
										k=	2.255

Volume

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade (C_i)		Incerteza padrão u_i [cm^3]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
ul	largura	0.015	cm	-	-	1.000	5.72506	cm^2	0.08	infinitos	2.7%
ua	altura	0.015	cm	-	-	1.000	5.72506	cm^2	0.09	infinitos	2.7%
ue	espessura	0.031	cm	-	-	1.000	96.4324	cm^2	2.99	infinitos	94.6%
u_c	Incerteza combinada								2.99	veff =	infinitos
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								5.98		
										k=	2.000

Densidade

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade (C_i)		Incerteza padrão u_i [g/cm^3]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
um	massa	0.012	g	-	-	1.000	0.0178	cm^{-3}	0.0	infinitos	0.2%
uv	volume	5.98	cm^3	B	normal	2.000	0.0334	g/cm^6	0.1	infinitos	99.8%
u_c	Incerteza combinada								0.1	veff =	infinitos
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								0.2		
Observações: Coeficientes de sensibilidade	$C_1 = \frac{\partial D}{\partial m} = \frac{1}{V}$				$C_2 = \frac{\partial D}{\partial V} = -\frac{m}{V^2}$					k=	2.000

As incertezas expandidas obtidas para a densidade de todas as placas cerâmicas estão apresentadas na TAB.5.7 com um nível de confiança de 95% e fator de abrangência k=2,0.

5.7.2 Espessura equivalente da placa cerâmica em relação ao chumbo ($x_{eq.}$)

As incertezas na determinação da espessura equivalente, obtidas em função do fator de atenuação conforme descrito em 4.9.2, foram calculadas para todas as placas cerâmicas nas tensões de 80, 100 e 150 kV. Essas incertezas são apresentadas na TAB.5.9, por exemplo, para a placa 1 na tensão de 80kV.

TABELA 5.9 – Determinação das incertezas na espessura equivalente para a placa 1 na tensão de 80kV em função do fator de atenuação.

IDENTIFICAÇÃO DO CÁLCULO: Incerteza Io

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade(C_i)		Incerteza padrão u_i [mR/min]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
uA	Desvio padrão (σ/raiz(10))	0.25	mR/min	A	normal	1	1	—	0.25	9	4.7%
UResol	Resolução da câmara ionização (R/2)	0.05	mR/mim	B	retangular	1.732	1	—	0.03	infinitos	0.5%
UDepTax	Dependência da Taxa Exposição (5%)	8.82	mR/mim	B	retangular	1.732	1	—	5.09	infinitos	94.8%
u_c	Incerteza combinada								5.1	veff =	1484853
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								10.2		
Observações:										k =	2.000

IDENTIFICAÇÃO DO CÁLCULO: Incerteza I

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade(C_i)		Incerteza padrão u_i [mR/min]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
uA	Desvio padrão (σ/raiz(10))	0.16	mR/mim	A	normal	1	1	—	0.16	9	13.7%
UResol	Resolução da câmara ionização (R/2)	0.05	mR/mim	B	retangular	1.732	1	—	0.03	infinitos	2.5%
UDepTax	Dependência da Taxa Exposição (5%)	1.67	mR/mim	B	retangular	1.732	1	—	0.96	infinitos	83.8%
u_c	Incerteza combinada								1.0	veff =	13146
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								2.0		
Observações:										k =	2.000

IDENTIFICAÇÃO DO CÁLCULO: Incerteza B = (I / Io)

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade(C_i)		Incerteza padrão u_i [-]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
UIo	Incerteza expandida Io	10.2	mR/min	B	normal	2.000	0.0011	min/mR	0.005	infinitos	49.7%
UI	Incerteza expandida I	2.0	mR/mim	B	normal	2.000	0.0057	min/mR	0.006	infinitos	50.3%
u_c	Incerteza combinada								0.008	veff =	infinitos
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								0.02		
Observações: Coeficientes de sensibilidade	$C_1 = \frac{\partial B}{\partial I} = \frac{1}{I_0}$				$C_2 = \frac{\partial B}{\partial I_0} = -\frac{I}{I_0^2}$					k =	2.000

Símbolo	Componentes de Incerteza			Tipo	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade(C_i)		Incerteza padrão u_i [mmPb]	Graus de liberdade ν_i	Percentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (+/-)	Unidade				Valor	Unidade			
Uxeq.	Incerteza expandida Xeq.	0.02		B	normal	2.000	0.7534	mmPb	0.006	infinitos	
u_c	Incerteza combinada								0.006	veff =	infinitos
U_{95}	Incerteza expandida (aprox. 95%)								0.012		
Observações: Coeficientes de sensibilidade	$C_1 = \frac{\partial Xeq}{\partial B} = \frac{B^{-(\gamma+1)}}{\alpha\left(B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}\right)}$									k =	2.000

As incertezas expandidas na determinação do $x_{eq.}$ calculadas para todas as placas cerâmicas apresentaram um valor de 0,01, para as tensões estudadas com um nível de confiança de 95% e com nível de abrangência de k=2,0.

5.8 Avaliação do custo/benefício

Conforme o item 3.4.1 foi realizado uma comparação entre a espessura de chumbo necessária para blindar as 4 paredes da sala conforme a FIG.3.2, e a espessura necessária de uma placa cerâmica de grês conforme desenvolvida neste trabalho para as mesmas condições.

A TAB.5.10 mostra os valores utilizados para o nível de restrição (P), fator de uso (U), fator de ocupação(T) e para distâncias (d) para as cinco paredes da FIG.3.2.

TABELA 5.10 – Valores considerados de nível de restrição (P) em fator de uso (U), fator de ocupação (T) e distâncias para as cinco paredes.

Paredes	P mGy/sem	U	T	D_p m	D_{sec} m
1	0,01	1	1/5	2,5	4,5
2	0,01	-	1/5	-	3,0
3	0,025	-	1	-	2,0
4	0,01	0,09	1	2,8	1,5
comando	0,1	-	1	-	1,8

Com os valores apresentados na TAB5.10 foram obtidos os valores de kerma no ar para as barreiras primárias (K_p) e secundárias(K_{sec}), assim como o fator B conforme já descritos em 4.7.3, e apresentados na TAB 5.11. Estes valores contribuirão para obter os valores de espessura equivalente em chumbo (X_{Pb}) e para a espessura da placa cerâmica de grês ($x_{grês}$) utilizando as figuras B.2 e C.2 do NCRP 147[6].

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

TABELA 5.11 – Valores calculados de kerma no ar para barreira de radiação X primária e secundária, fator de atenuação, espessura em chumbo e espessura de placa cerâmica de grês.

Paredes	K_P mGy/paciente	K_{SEC} mGy/paciente	B	X_{Pb} mm	$X_{grês}$ mm
1	2,3	$2,3x10^{-2}$	$B_P=1,087x10^{-3}$	$X_p=1,6$	-
			$B_{sec}=0,352$	$X_{sec}=0,1$	2,5
2	-	$2,3x10^{-2}$	$B_{sec}=0,106$	$X_{sec}=0,1$	10,5
3	-	$3,4x10^{-2}$	$B_{sec}=2,35x10^{-2}$	$X_{sec}=0,5$ 5	-
4	5,2	$2,3x10^{-2}$	$B_P=1,34x10^{-3}$	$X_p=1,45$	-
			$B_{sec}=7,87x10^{-3}$	$X_{sec}=0,7$	-
Comando	-	$3,4x10^{-2}$	$B_{sec}=7,62x10^{-2}$	$X_{sec}=0,2$ 5	-

Conforme os valores apresentados na TAB.5.11 foi considerado para análise do custo, um revestimento de 1mmPB para as paredes 1 e 2 da sala de radiologia convencional representada na FIG.3.2, recebendo radiação secundária.

O levantamento do custo de blindagem em chumbo e em barita, foi orçado por duas empresas indicadas na TAB.5.12, e para as placas cerâmicas de grês foi orçado considerando as placas com 11 mm de espessura com a escola Senai " Mário Amato" – Núcleo de Cerâmica.

TABELA 5.12 – Valores orçados considerando 1mmPb, 1cm de barita e 11mm de placas cerâmicas de grês para blindagem.

Material	Empresa 1	Empresa 2	Senai
Chumbo	R$ 360,64/m^2	R$ 289,10/m^2	-
Barita	R$ 17,15/m^2	R$ 30,09/m^2	-
Placas cerâmicas	-	-	R$ 22,00/m^2

Pode ser observado que o custo das placas cerâmicas desenvolvidas, são competitivos quando comparados com os demais elementos atualmente utilizados como blindagem, o que reforça a sua aplicabilidade como revestimento para salas de radiologia diagnóstica.

6 CONCLUSÕES

As conclusões que podem ser apresentadas em função do trabalho desenvolvido são:

- ✓ Os revestimentos cerâmicos comerciais que apresentaram os maiores índices de atenuação da radiação X nível diagnóstico (80 a 150 kV) quando comparados com o Pb, possuem como suporte cerâmico a pasta branca *grês*.

- ✓ Outros suportes cerâmicos como a massa cerâmica vermelha, a argila pura, os refratários e os porcelanatos, considerando a pequena diferença entre os valores de espessura equivalente ao Pb obtidos, também apresentam características que permitem o desenvolvimento de uma massa cerâmica de revestimento para fins de aplicação em proteção radiológica.

- ✓ As concentrações dos óxidos constituintes das matérias primas utilizadas na produção do grês sofrem variações em função da sua procedência.

- ✓ Alterando o fundente CaO para BaO ou PbO, as composições formuladas com o 31,50% desses óxidos apresentaram as menores diferenças percentuais em relação ao Pb, Ba e barita, mas não foi factível a produção de placas cerâmicas devido à grande concentração de material fundente na composição.

- ✓ A composição formulada com concentração de 15,71% do óxido BaO permitiu a obtenção de amostras com as propriedades de grês.

- ✓ A escolha do BaO para a produção das placas cerâmicas foi econômica, pois o custo do PbO é muito mais elevado que o $BaCO_3$ empregado na obtenção do BaO.

- ✓ Mesmo trabalhando em escala de laboratório, as placas obtidas a partir da formulação proposta contendo 15,71% de BaO alcançaram os níveis de aceitação

para serem classificadas como revestimento, se mostraram resistentes e foram aprovadas nos testes realizados conforme a norma de revestimentos NBR 13818/97.

- ✓ Os melhores ajustes entre as curvas de atenuação geradas empregando os modelos de TBC e de Archer e os resultados experimentais da medida de I/Io foram obtidos para a tensão de 150kV com filtração de 0,7mmCu, o que sugere que para esta tensão os modelos utilizados fornecem uma indicação do comportamento dos dados experimentais para o material desenvolvido.

- ✓ A análise custo-benefício mostrou a viabilidade econômica do emprego dos elementos cerâmicos para revestimento de salas de raios X diagnóstico, quando comparado com a aplicação de lâminas de chumbo ou argamassa baritada.

Apêndice 1 - GLOSSÁRIO

Argila: é um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, que adquire certa plasticidade quando umedecido com água; é basicamente um silicato de alumínio hidratado, a forma mais pura da argila é a caulinita. **Aplicações:** as argilas apresentam uma enorme gama de aplicações, tanto na área de cerâmica como em outras áreas tecnológicas. Em quase todos os segmentos de cerâmica tradicional a argila constitui total ou parcialmente a composição das massas. As argilas para materiais refratários são essencialmente cauliníticas, devendo apresentar baixos teores de compostos alcalinos, alcalinos-terrosos e de ferro; podendo conter ainda em alguns tipos a gibbsita ($Al_2O_3.3H_2O$). As argilas para cerâmica branca são semelhantes às empregadas na indústria de refratários, sendo que para algumas aplicações a maior restrição é a presença de ferro e, para outras, dependendo do tipo de massa, além do ferro a gibbsita. No caso de materiais de revestimento são empregadas argilas semelhantes àquelas utilizadas para a produção de cerâmica vermelha ou as empregadas para cerâmica branca e materiais refratários.

Calcita aparece nas rochas sedimentares e é encontrada na forma muito pura de $CaCO_3$. **Aplicações:** em massas calcárias em teores de até 30%. Apesar de proporcionar corpos de elevada porosidade e, portanto, baixa resistência mecânica, tem a vantagem de apresentar corpos de baixa contração linear na queima, o que é conveniente para muitas aplicações: em pequenas quantidades (até 3%) como fundente auxiliar e para minimizar o problema de trincas; em massas para produção de corpos vítreos e semivítreos; na composição de fritas e esmaltes (vidrados); na fabricação de cimento aluminoso.

Caulinita: é praticamente a argila, apresenta fórmula química $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ cuja composição percentual é 46,54% de SiO_2, 39,50% de Al_2O_3 e 13,96% de H_2O.

Caulim é um produto resultante da ação do intemperismo sobre rochas feldspáticas, são constituídos quase que exclusivamente de caulinita.

Clorita é um argilomineral encontrado na natureza intimamente misturado com outros argilominerais, de modo que espécimes puros para estudo são difíceis de obter. Apresenta sua fórmula química da seguinte maneira $(Fé, Al)_6(OH)_{12}$.

Dolomita apresenta-se na forma de massas rochosas de origem sedimentar e metamórfica, é um carbonato duplo de cálcio e magnésio cuja composição percentual é 30,4% de CaO, 21,70% de MgO e 47,90% de CO_2. Aplicação: em massas calcárias em teores de até 30%, tendo comportamento semelhante ao da calcita; na fabricação de materiais refratários, isolada ou em mistura com a magnésia; na composição de fritas e esmaltes (vidrados).

Feldspato: é um alumino silicato de potássio, sódio e cálcio. Mineral ígneo dos mais comuns nas rochas primárias e aparece geralmente misturado com quartzo e micas. O ortoclássico ($K_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6SiO_2$) é o feldspato de potássio, a Albina ($Na_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6SiO_2$) é o feldspato de sódio e a anortita ($CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$) é o feldspato de cálcio. **Aplicações:** fabricação de vidro, fritas, esmaltes(vidrados), placas cerâmicas, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa e louça sanitária.

Filito: é constituído de caulinita, quartzo e mica muscovita finamente dividida, que é a sericita. **Aplicações:** em massa de grês sanitário como substitutos parciais da fração argilosa e do feldspato, além de ser empregado em várias proporções para aumentar a velocidade de sinterização de massas cerâmicas de faiança para louça de mesa, placas cerâmicas e alguns tipos de refratários.

Ilita apresenta fórmula química $(K,H_3O)Al_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$.

Mica biotita apresenta fórmula química $(K,H_3O)Mg(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$.

Mica Muscovita: apresenta fórmula química $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$, cuja composição percentual é 45,23% de SiO_2, 38,38% de Al_2O_3, 11,82% de K_2O e 4,29% de H_2O.

Montmorilonita apresenta fórmula química $Al_4Si_{87}O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$.

Óxidos são compostos formados pela combinação binária entre o oxigênio e outro elemento qualquer da tabela periódica.

Pegmatito é uma rocha ígnea composta por grandes cristais de feldspato, quartzo e mica biotita.

Pirofilito é um silicato de alumínio hidratado e apresenta fórmula química $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$ cuja composição percentual contendo é 66,7% de SiO_2, 28,30% de Al_2O_3 e 5% de H_2O. Pode ser considerado como sendo o mineral de alumínio análogo ao talco, em que o alumínio está no lugar do magnésio, é mais raro que o talco. **Aplicações:** em massas de azulejos e em algumas massas de louça de mesa, mas devido a sua baixa plasticidade não pode entrar em quantidades maiores que 40% em massas plásticas. Entra também na composição de massas de isoladores elétricos e de alguns tipos de refratários.

Quartzo: apresenta fórmula química SiO_2, cuja composição percentual é 46,74% de Si e 53,26% de O. **Aplicações:** em massas de cerâmica branca e de materiais de revestimento, sendo um dos componentes fundamentais para controle da dilatação e para ajuste da viscosidade da fase líquida formada durante a queima, além de facilitar a secagem e a liberação dos gases durante a queima; na fabricação de isolantes térmicos; em composições de vidro e esmaltes (vidrados); na fabricação de materiais refratários.

Sericita: é um mineral do grupo das micas, é uma variedade microcristalina da muscovita, ligeiramente mais hidratada.

Sílica é o óxido de silício (SiO_2) na sua forma pura.

Talco é um silicato hidratado de magnésio e apresenta fórmula química $3MgO{\cdot}4SiO_2{\cdot}H_2O$, cuja composição percentual é 63,5% de SiO_2, 31,70% de MgO e 4,80% de H_2O. **Aplicações:** como constituinte principal (60% a 90%) em massas para a fabricação de isoladores elétricos de alta freqüência, este tipo de corpo é conhecido como esteatita; na composição de massas cordieríticas, que tem como característica principal o baixo coeficiente de dilatação térmica; em quantidades de até 15% em massas de corpos porosos para melhorar a resistência mecânica e reduzir as trincas devido a absorção de umidade; como fundente substituindo parcialmente o feldspato em massas para a fabricação de corpos semivítreos e vítreos; na composição de esmaltes (vidrados).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

Apêndice 2 – GRÁFICOS de DETERMINAÇÃO da ESPESSURA em CHUMBO REQUERIDA para BARREIRAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS EXTRAÍDOS do NCRP 147

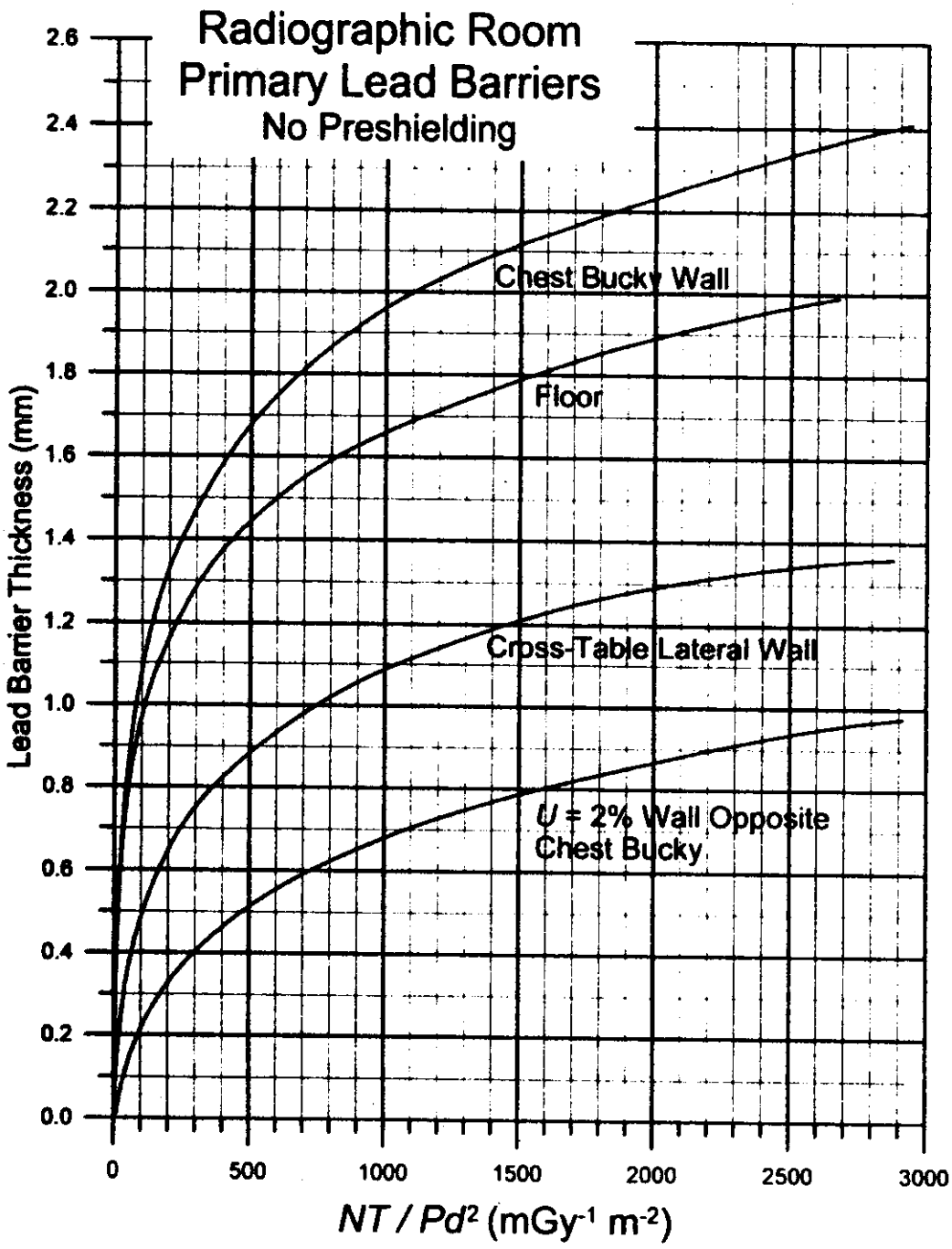

Fig.4.5a. The lead thickness requirements for primary barriers assuming no preshielding (x_{pre}) in the representative radiographic room as a function of NT/Pd^2.

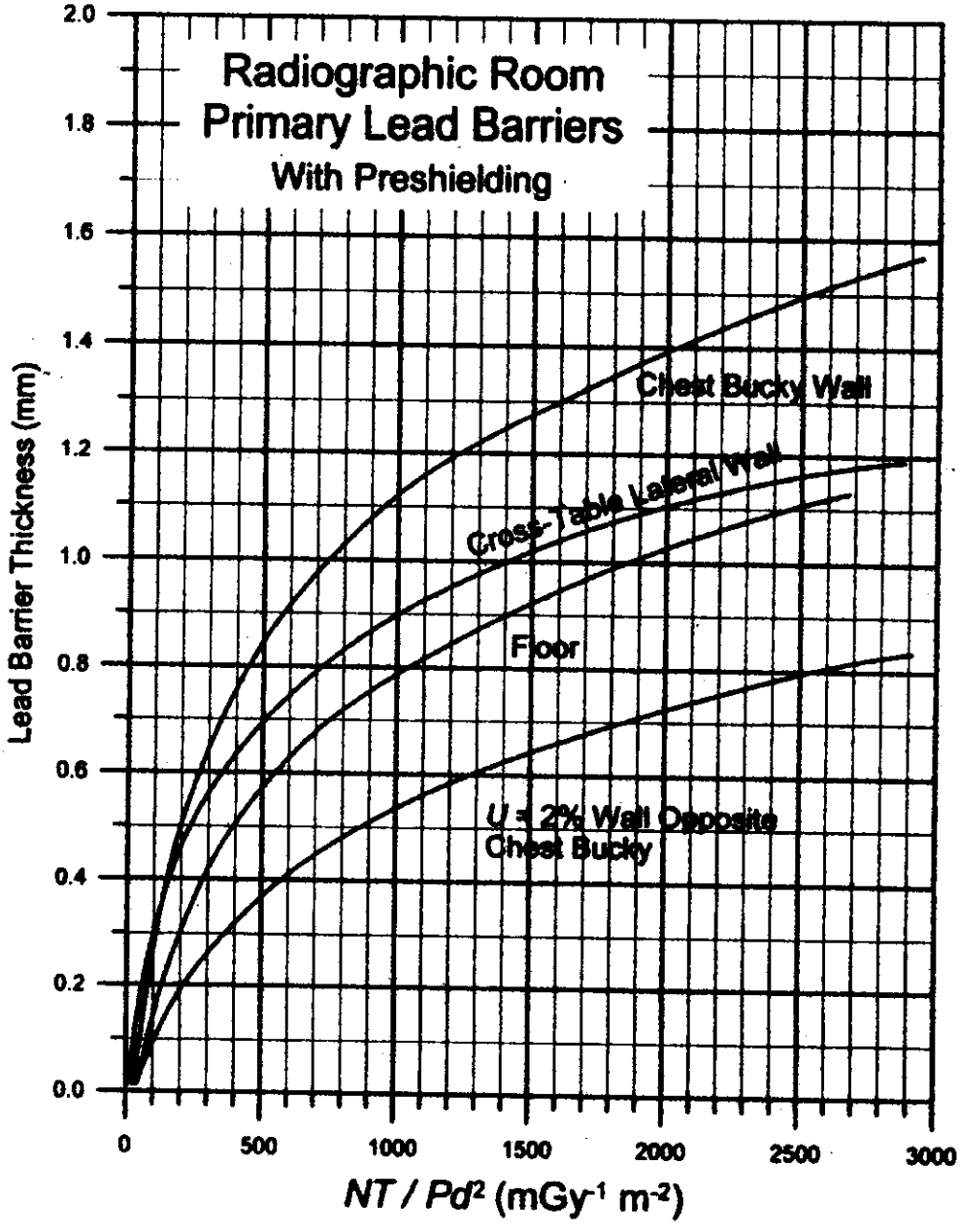

Fig.4.5b. The lead thickness requirements for primary barriers assuming preshielding (x_{pre}) in the representative radiographic room as a function of NT/Pd^2.

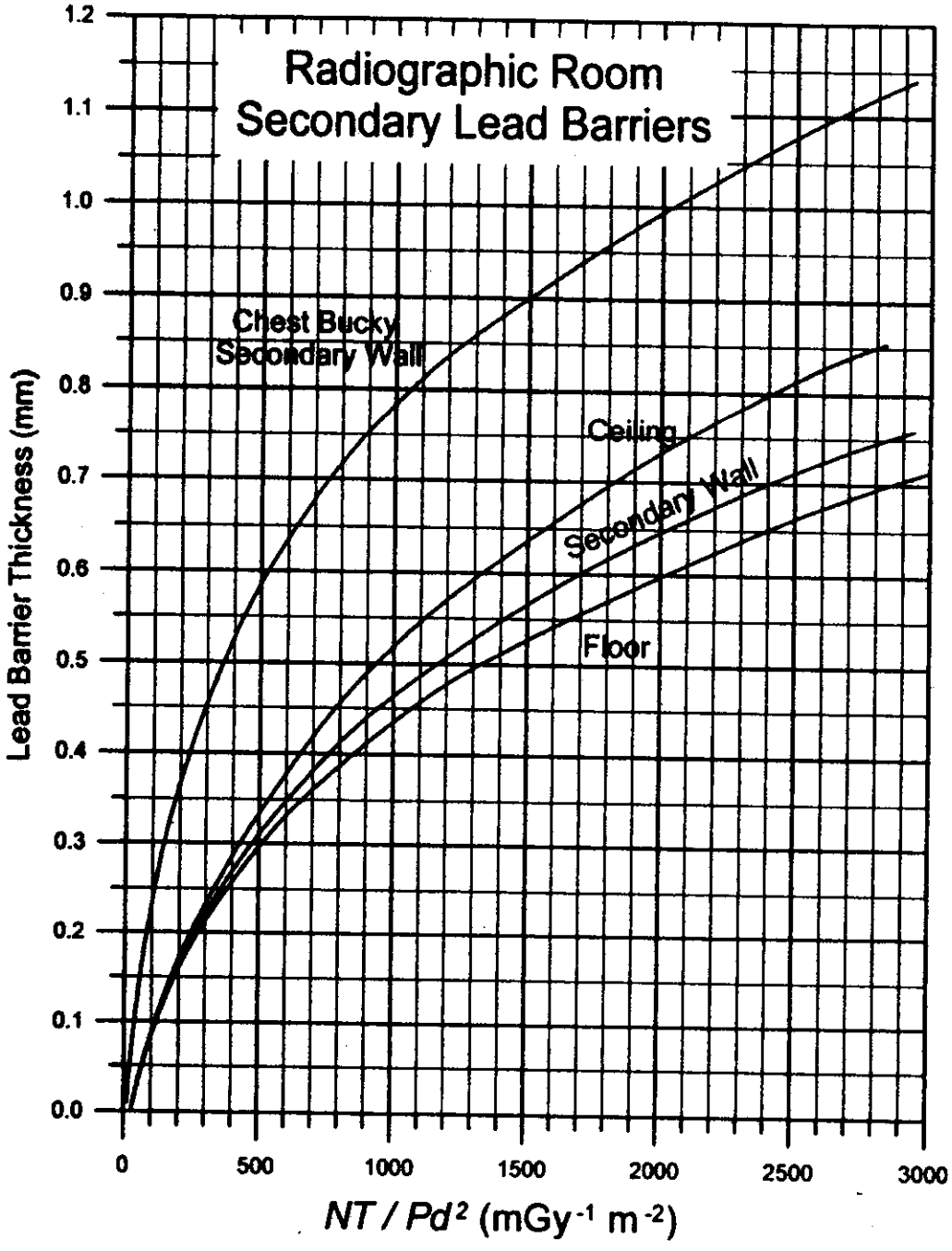

Fig.4.5c. The lead thickness requirements for secondary barriers in the representative radiographic room as a function of NT/Pd^2.

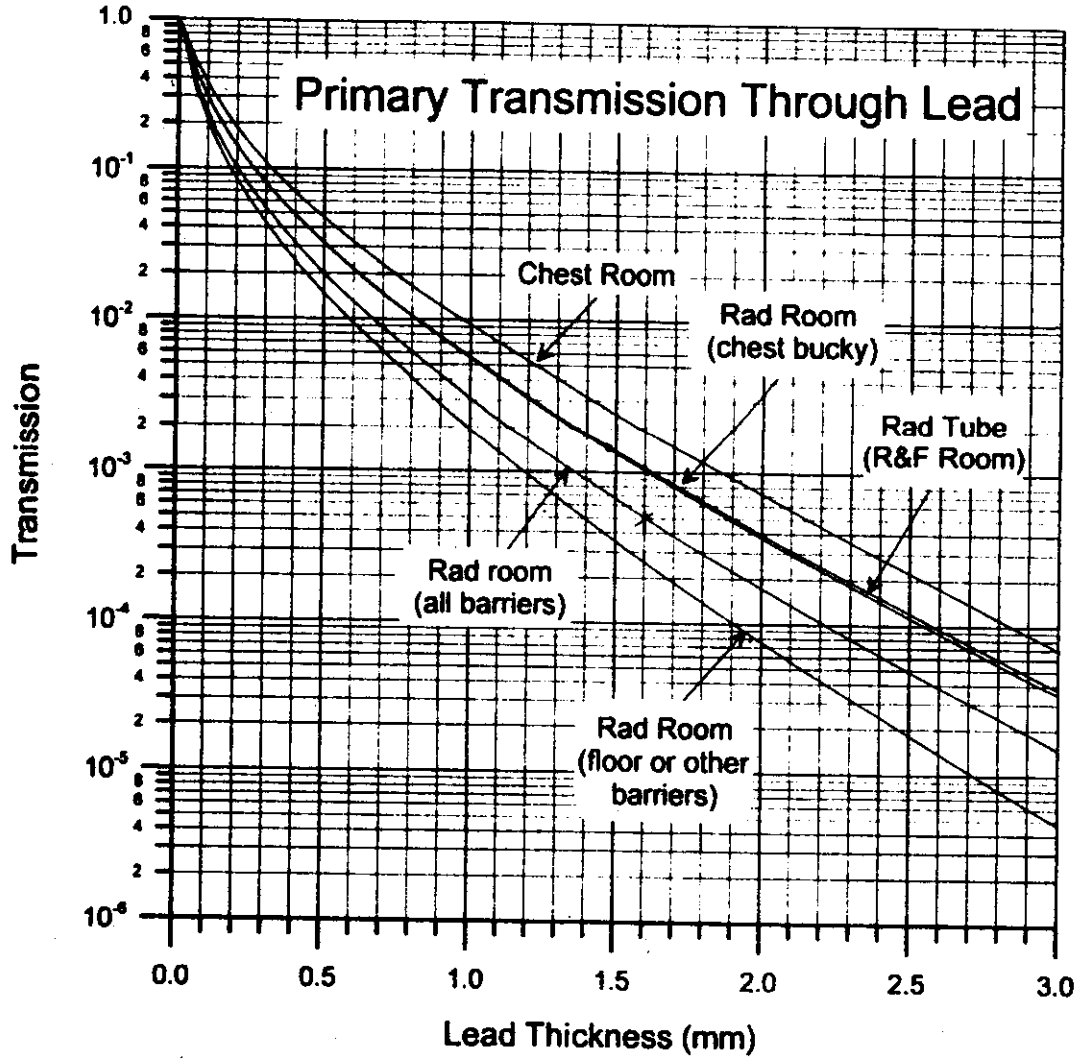

Fig. B.2. Primary broad-beam transmission through lead calculated for the clinical workload distributions.

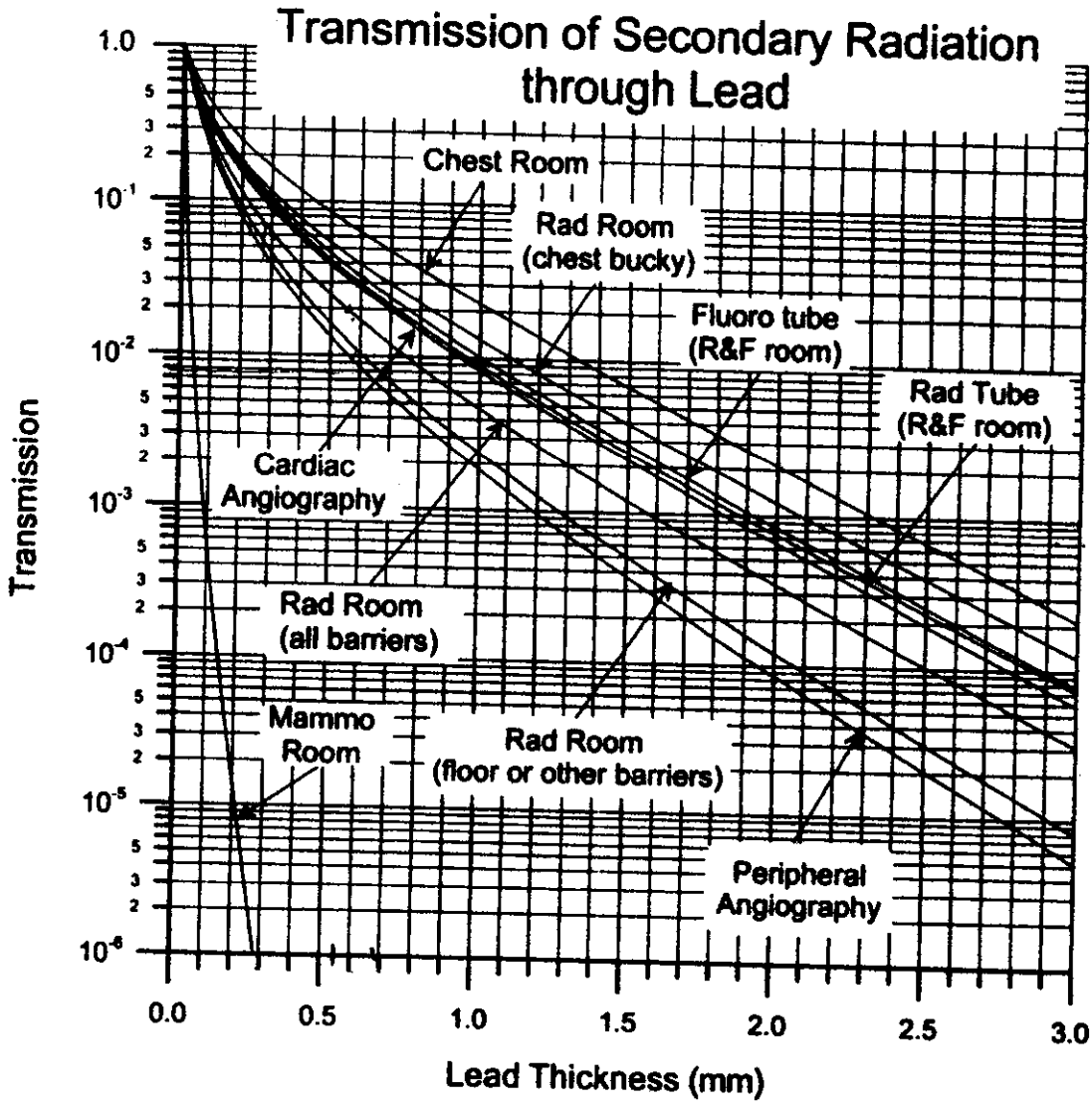

Fig. C.2. Transmission of secondary radiation through lead for the clinical workload distributions.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-I

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PORTARIA n° 453. **Diretrizes de Proteção Radiológica em radiodiagnóstico Médico e Odontológico.** Ministério da Saúde. Diário Oficial da União. Brasília: 01 de junho de 1998.

[2] SIMPKIN, D.J. Evaluation of NCRP Report No. 49 Assumptions on Workloads and Use Factors in Diagnostic Radiology Facilities. ***Medical Physics***, v.23, n.4, p.577-584, 1996.

[3] COSTA, P.R. **Modelo para determinação de espessuras de barreiras protetoras em salas para radiologia diagnóstica.** São Paulo, 1999. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares, Universidade de São Paulo.

[4] BARROS, F.S.**Determinação das propriedades de atenuação de tijolos cerâmicos maciços e argamassas baritadas para a sua utilização como barreira de proteção em salas de radiodiagnóstico.** Curitiba, 2001. Dissertação(Mestre em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná).

[5] NCRP 107. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Implementation of the principle of as Low as reasonably Achievable (ALARA) for medical and dental personal.** Bathesda: NCRP Publications, 1990 (NCRP Report 107).

[6] NCRP 147. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities.** NCRP Publications, Bathesda, MD, 2004 (NCRP Report 147).

[7] CNEN-NN-3.01 – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de radioproteção.** São Paulo, 2005.

[8] IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety Series No.120. Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources.** Viena, 1996.

[9] ARCHER, B.R. History of the Shielding of Diagnostic X-ray Facilities. ***Health Physics***, v.69, n.5, p.750-758, 1995.

[10] NCRP 49. 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.** Bathesda: NCRP Publications, 1976. (NCRP Report 49).

[11] VASCONCELOS, E.Eduardo. Vasconcelos Representações Ltda. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.vermiculita.hpg.ig.com.br/barita.htm>. Acesso em: 9 set.2005.

[12] ARCHER, B.R..; THORNBY, J.I.; BUSHONG, S.C. Diagnostic X-ray Shielding Design Based on an Empirical Model of Phonton Attenuation. ***Health Physics***, v.44, n.5, p.507-517, 1983.

[13] ARCHER, B.R..; FEWELL, T.R.; CONWAY,B.J.; QUINN, P.W. Attenuation Properties of Diagnostic X-ray Shielding Materials. ***Medical Physics***, v.21, n.9, p.1499-1507, 1994.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Dispositivos de proteção contra radiação-X para fins de diagnóstico médico - Parte 1: Determinação das propriedades de atenuação de materiais**; NBR/IEC 61331-1, 2004.

[15] MASHI-TÉCNICAS AMBIENTAIS. São Bernardo do Campo, São Paulo. Disponível em:

<http://www.mashi.com.br/boletins_005.htm>. Acesso em: 6 set.2005.

[16] WOOTON, R. **Radiation protection of patients**. USA: Cambridge; Published in association with the Royal Postgraduate Medical School University of London by Cambridge University Press, 1993. New York, NY.

[17] CULLITY, D.B. **Elements of X-ray difraction**. 3.ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1967.

[18] ARCHER, B.R.; WAGNER, L.K. Determination of Diagnostic X-ray Spectra with Characteristic Radiation using Attenuation Analysis. ***Medical Physics***, v.15, p.637-641, 1988.

[19] BIRCH, R.; MARSHALL, M.; Computation of bremsstrahlung x-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge(Li) detector. ***Physics in Medicine and Biology***, v.24, p.505-517, 1979.

[20] BAIRD, L.C. X-ray Spectra vs Attenuation data: a theoretical analysis. ***Medical Physics***, v.8, p.319-323, 1981.

[21] BOONE, J.M., SEIBERT, J.A. An Accurate Method for Computer-generating Tungsten Anode X-ray Spectra from 30 to 140 kV. ***Medical Physics***, v.24, p.1661-1670, 1997.

[22] TUCKER, D.M.; BARNES, G.T.; CHAKRABORTYM D.P. Semiempirical Model for generating Tungsten Target X-ray Spectra. ***Medical Physics***, v.18, n.2, p.211-218, 1991.

[23] EVANS, R.D. **The atomic Nucleus**. USA: Robert E. Kringer Publishing Company, Inc; 1982.

[24] ATTIX, F.H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. London: John Willey & Sons, Inc., 1986.

[25] JONHS, H.E.; CUNNINGHAN, J.R. **The physics of radiology**. 3.ed. Illinois, Charles C. Thomas, 1974.

[26] KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement**. New York, N.Y.:Willey,1989.

[27] CESAREO, R. et al. Interacion of keV photons with matter and new applications. **Physics reports**, v.213, n.3, p.117-178, 1992.

[28] KLEVENHAGEN, S.C. **Physics and dosimetry of therapy electron beams**. Madison : Med.Phys., 1993.

[29] National Institute of Standard Technology (NIST) XCom. Disponível em:

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. Acesso em 12 dez.2005.

[30] GONÇALVES, P.S.; VANDERLINDE, F. V. F.; **Tecnologia cerâmica.** Apostila Senai Mário Amato- Núcleo Cerâmica, 2003.

[31] GRANDI, A., RENÓ, R. **Revestimento em Cerâmica.** XXXIII Congresso Brasileiro de Cerâmica, maio 1989, Serra Negra.

[32] RABÊLO, A.A.; SFERRA, Jr. H.L.;TOMASI, R. UFSCar. **Efeito de processamento antes da queima de pós sub-micrométricos na microestrutura final de cerâmicas de alumina e alumina-SiC.**<tomasi@power.ufscar.br>.Disponível em: <http://athena.nit.ufscar.br/cbecimat/resumos/>. Acesso em: 19 set.2002.

[33] VANDERLINDE, F. V. F. Professora da escola Senai Mário Amato- Núcleo Cerâmica, 2005.

[34] SILVA, A.G.; ROVERO,C.D.; MELCHIADES, F.G.;BOSCHI,A.O. **Formulação de massa para revestimentos cerâmicos conformados por via-seca utilizando-se a Lei da Aditividade.** Disponível em: <http://athena.nit.ufscar.br/cbecimat/resumos/>. Acesso em: 19 set.2002.

[35]NONO,M.C.A.;KURANAGA,C.;FREITAS,D.;MINEIRO,S.L.;RIBEIRO,S. **Desenvolvimento de cerâmicas policristalinas cúbica e tetragonal dopadas com misturas de óxidos de ítrio e de terras raras no INPE e na FAENQUIL.** Disponível em: <http://athena.nit.ufscar.br/cbecimat/resumos/>. Acesso em: 19 set.2002.

[36] GONÇALVES, P.S.; VANDERLINDE, F.V.F.; GAVA, M.; NUNES, J.J. **Produtos Cerâmicos:seu mercado e suas aplicações.** Apostila Senai Mário Amato- Núcleo Cerâmica. Julho 2002.

[37] TECNICOS DEL CENTRO EXPERIMENTAL DE SACMI IMOLA. **Tecnologia de la fabricacion de azulejos.** Associacion Técnicos Ceramicos, 1990.

[38] GORINI, A. P. F.; CORREA, A.R. **Cerâmica para revestimentos.** BNDES Setorial.n.10, p.201-252, set.1999. Rio de Janeiro.

[39]MONTEDO, O. R. K.; OLIVEIRA, A. P. N.; PEREIRA, F. R.; HOTZA, D.; CASAGRANDE, M.; BERTAN, F. M.; LABRINCHA, J. A.; SEGADÃES, A. M. **Reaproveitamento de resíduo de processo industrial de revestimentos cerâmicos na massa de pavimentos cerâmicos.** SENAI/CTCmat - Centro de Tecnologia em Materiais, 2002.

[40] SMITH, W. F.**Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 3ª ed.,1998.

[41]BIFFI, G.; SAVORANI, G. **A Monoqueima: Aspectos Técnicos, Industriais e Econômicos.** XXXI Congresso Brasileiro de Cerâmica, maio 1987, Brasília.

[42] CHAVARRIA, J. **A Cerâmica.**1ª.ed., 1997.

[43] VOGEL, A.I. **Química Analítica Qualitativa.** 1ª.ed. São Paulo:Editora Mestre Jou, 1981.

[44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas cerâmicas para revestimento . Classificação.**– ABNT, 1997. (NBR 13817).

[45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas cerâmicas para revestimento. Especificação e Métodos de Ensaios.** – ABNT, 1997(NBR 13818).

[46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas cerâmicas para revestimento. Terminologia.** ABNT,1997. (NBR 13816).

[47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento.** ABNT, 1996.(NBR-13754).

[48] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Revestimentos .** ABNT, 1982. (NBR 5719).

[49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas cerâmicas para revestimento . Especificação e métodos de ensaios – Determinação de Absorção de Água - (Anexo B).** ABNT, 1997. (NBR 13818).

[50] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas cerâmicas para revestimento. Especificação e métodos de ensaios – Determinação da Carga de Ruptura e Módulo de Resistência à Flexão - (Anexo C).** ABNT, 1997. (NBR 13818).

[51] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), ***Guia para a Expressão das Incertezas de Medição***, 3ª edição, 2003.

[52] SPIEGEL, M.R. ***Estatística***, 3ª edição, Makron Books do Brasil Editora Ltda., ao Paulo, Brasil, 1993.

[53] VANDERLINDE, F. V. F.; MIRANDA, M.; GONÇALVES, R.; BARBOSA, R. **Comportamento das massas cerâmicas de grês.** Apostila Senai Mário Amato- Núcleo Cerâmica. Setembro 2002.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

M23268

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Diretoria de Ensino & Informação Científica e Tecnológica
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3816 - 9148
SÃO PAULO - São Paulo - Brasil
http: //www.ipen.br

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico e Turismo do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, orgão do Ministério da Ciência e Tecnologia, e associada à Universidade de São Paulo.