



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

TESE DE DOUTORADO

**Desenvolvimento de bloco de vedação com barita na
composição de partida para blindagem de radiação X**

Priscylla Cinthya Alves Gondim

Orientador:
Prof. Dr. Uílame Umbelino Gomes

Tese n.º 75 /PPGCEM

Novembro de 2009
Natal – RN

Priscylla Cinthya Alves Gondim

**DESENVOLVIMENTO DE BLOCO DE VEDAÇÃO COM BARITA NA
COMPOSIÇÃO DE PARTIDA PARA BLINDAGEM DE RADIAÇÃO X**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Centro de Ciências Exatas e da Terra, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processamento de materiais a partir do pó.

Orientador: Prof. Dr. Uilame Umbelino Gomes

Natal
2009

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Gondim, Priscylla Cinthya Alves.

Desenvolvimento de bloco de vedação com barita na composição de partida para blindagem de radiação / Priscylla Cinthya Alves Gondim. – Natal, RN, 2009.

144 f.

Orientador: Uilame Umbelino Gomes.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

1. Barita – Tese. 2. Bloco cerâmico – Tese. 3. Radiação X – Tese. 4. Blindagem – Tese. I. Gomes, Uilame Umbelino. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 549.761.34(043.2)




UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS-PPGCEM

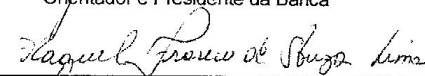
DECLARAÇÃO

Declaramos, para todos os fins, que Priscylla Cinthya Alves Gondim defendeu sua tese de Doutorado intitulada "Desenvolvimento de bloco de vedação com barita na composição de partida para blindagem de radiação X", no dia 21 de agosto de 2009, no Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo sido APROVADA, com conceito A, pela banca examinadora, composta dos membros relacionados abaixo.


Natal/RN, 21 de agosto de 2009.



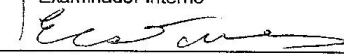
Prof. Dr. Uilágne Umbelino Gomes
Orientador e Presidente da Banca



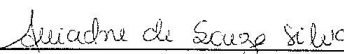
Prof. Dr. Raquel Franco de Souza Lima
Examinador Interno



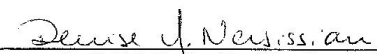
Prof. Dr. Wilson Acchar
Examinador Interno



Prof. Dr. Elcio Correia de Souza Tavares
Examinador Externo




Prof. Dr. Ariadne Souza Silva
Examinador Externo



Prof. Dr. Denise Yanikian Nersissian
Examinadora Externa

VISTO



Prof. Dr. Wilson Acchar
Coordenador do PPGCEM

A minha mãe Salete Gondim, pela lição de vida, apoio constante em todos os momentos e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, pela formação e oportunidade de elaboração desta tese.

Ao meu orientador, Prof. Uilame Umbelino, pela oportunidade, estímulo, ensinamentos, contribuições para a realização deste trabalho.

A Prof^a. Raquel Franco de Souza Lima, pelo acompanhamento, atenção e apoio.

Ao Prof. Wilson Acchar, pela confiança ao permitir a realização de análises no laboratório LaPFiMC.

Ao Prof. Paulo Costa, pelo apoio, contribuições, ensinamentos, orientações, valiosos conhecimentos e incentivo compartilhados mesmo a distância, e valioso auxílio fundamental de medição.

A Prof^a. Denise Yanikian Nersissian, pela presença e contribuições valorosas nesta tese.

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia, pela parceria e colaboração.

A Prof^a. Jaquelígia Brito, pela amizade e auxílio em etapas fundamentais deste trabalho.

A Prof^a. Ariadne Souza, pela amizade, apoio prestado e encorajamento nos momentos difíceis.

Ao Prof. Élcio Correia, pelo incentivo, presença e sugestões neste trabalho.

Ao Prof. Flamarion, pela ajuda dos resultados da matéria-prima argila.

Ao companheiro Bruno Falcão, pelo amor, paciência, incentivo nos momentos difíceis ao longo destes anos.

Aos colegas do LMCME e LaPFiMC, pela presença marcante em várias etapas deste trabalho.

Ao Prof. Laécio Cunha de Souza, pela ajuda na realização da descrição mineralógica.

Ao Sr. Vicente Filho e seus funcionários, pelo fornecimento de material e pela fabricação dos blocos cerâmicos em sua indústria cerâmica.

Ao professor Maurílio e Dorian da UnP, pelo apoio e empréstimo de materiais e equipamentos para realização de ensaios.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de estudos.

Ao Chico garimpeiro, pelas horas de dedicação de procura da matéria-prima essencial deste trabalho.

Aos funcionários da UFRN, com os quais tive a grata satisfação de conviver, especialmente, a Lindalva e Francisco (Chico).

A minha família, em especial aos meus pais e irmãos, por estarem sempre presentes me apoiando e incentivando em todas as minhas realizações.

Em especial a Deus, pela vida, saúde, perseverança e dedicação para a realização deste trabalho.

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

Tire o chapéu para o passado, e
arregace as mangas para o futuro!

Tire de cada dificuldade que a vida lhe
trouzer a lição de que nada tem valor a
não ser o que é conquistado.

(Autor desconhecido)

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade principal estudar a utilização de blocos cerâmicos baritados em salas de radiação X, visando contribuir para a otimização da blindagem de salas de diagnóstico. O trabalho foi baseado em medidas experimentais de atenuação da radiação X (40 a 150 kV), empregando material cerâmico de vedação contendo a incorporação de sulfato de bário (BaSO_4). Diferentes formulações foram estudadas em três temperaturas de queima diferentes e avaliadas as incorporações na massa cerâmica. A composição de 20% de barita processada a temperatura de 950°C , apresentou melhores propriedades físicas e mecânicas, sendo considerada a mais adequada para a proposta deste trabalho. Foram produzidos blocos cerâmicos de vedação baseados na composição formulada que apresentou melhores características tecnológicas. Estes blocos foram testados fisicamente como material construtivo de parede e barreira protetora. Propriedades como características visuais, desvio com relação ao esquadro, planeza das faces, absorção de água e resistência à compressão foram avaliadas para todos os blocos produzidos. O comportamento deste material como atenuador para a radiação X foi investigado por meio de resultados experimentais que levaram em consideração fabricantes de argamassas baritadas através das diferentes tensões e comparado com o material de referência (Pb). Os resultados obtidos nas simulações indicaram que o bloco cerâmico baritado demonstra ótimas propriedades de atenuação em equivalência ao chumbo levando-se em conta as energias usadas em raios X diagnóstico.

Palavras-chave: Barita. Bloco cerâmico. Radiação X. Blindagem.

ABSTRACT

This work main objective is to study the use of bricks in barium X-rays rooms in order to contribute to the optimization of shielding rooms diagnosis. The work was based on experimental measurements of X-ray attenuation (40 to 150 kV), using ceramic seal bearing the incorporation of barium sulfate (BaSO_4). Different formulations were studied in three different firing temperatures and evaluated for incorporation in the ceramic body. The composition of 20% of barite processed at a temperature of 950°C showed better physical and mechanical properties, is considered the most suitable for the purpose of this work. Were produced bricks sealing composition formulated based on that presented the best technological features. These blocks were tested physically as a building material and wall protective barrier. Properties such as visual, deviation from the square, face flatness, water absorption and compressive strength were evaluated for all the blocks produced. The behavior of this material as attenuator for X-rays was investigated by experimental results which take into account mortar manufacturers barium through the different strains and compared with the reference material (Pb). The simulation results indicated that the ceramic block barium shows excellent properties of attenuation equivalence lead taking into account the energy used in diagnostic X-ray.

Keywords: Barite. Ceramic block. X Ray. Shield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de fabricação de cerâmica vermelha	29
Figura 2.2 - Tipos de blocos cerâmicos para vedação	31
Figura 2.3 - Estrutura dos principais argilominerais.....	36
Figura 3.1 - Representação esquemática da interação da radiação com o meio	42
Figura 3.2 - Representação esquemática do efeito fotoelétrico.....	44
Figura 3.3 - Representação esquemática do espalhamento coerente	44
Figura 3.4 - Diagrama esquemático do efeito Compton	45
Figura 3.5 - Esquema de funcionamento dos tubos de raios X.	48
Figura 3.6 - Formação de raios-X de bremsstrahlung	50
Figura 3.7 - Ilustração dos raios X característicos.....	51
Figura 3.8 - Detalhes arquitetônicos de um ambiente para diagnóstico de raios X	59
Figura 3.9 - Ilustração das radiações primária, espalhada, de fuga e transmitida em uma sala de radiografia com um paciente posicionado verticalmente em frente ao bucky de tórax ...	65
Figura 3.10 - Geometria utilizada nas equações derivadas para o cálculo das espessuras das barreiras de proteção utilizada pelo NCRP 147/2004.....	69
Figura 3.11 - Ilustração planta baixa sem escala de um labirinto	71
Figura 4.1 - Mapa do estado do Rio Grande do Norte mostrando as localidades das matérias-primas minerais selecionadas para o trabalho	81
Figura 4.2 - Esquema do procedimento experimental Parte I do trabalho.....	82
Figura 4.3 - Petrografia mineral	86
Figura 4.4 - Seção transversal da montagem em uma fatia de rocha (escala vertical exagerada)	87
Figura 4.5 - Esquema do procedimento experimental Parte II do trabalho	89
Figura 4.6 - Esquema do procedimento experimental Parte III do trabalho	94
Figura 4.7 - Pontos indicados para medições das características geométricas dos blocos cerâmicos.....	96
Figura 4.8 - Posições esquemáticas para as medições da espessura das paredes externas e septos.....	97
Figura 4.9 - Desvio em relação ao esquadro (D) – Representação esquemática.....	97
Figura 4.10 - Planeza das faces – Representação esquemática.	98
Figura 4.11 - Compressão axial do bloco de vedação	100

Figura 4.12 - Representação e distâncias da estrutura metálica com blocos baritados para posicionamento das paredes de alvenaria para o ensaio de atenuação dos materiais.....	101
Figura 4.13 - Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos	102
Figura 4.14 - Arranjo experimental utilizado para as medições dos fatores de atenuação da parede de alvenaria como material de proteção em função da tensão	103
Figura 4.15 - Arranjo experimental da equivalência em chumbo montado no Laboratório do IEE/USP, utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.	104
Figura 4.16 - Distâncias utilizadas no arranjo experimental para as medições de kerma no ar da equivalência de chumbo em função da tensão.....	105
Figura 5.1 - Difratoograma de raios X da barita n° 2.....	110
Figura 5.2 - Difratoograma de raios X da argila	110
Figura 5.3 - Análise térmica da matéria-prima barita n° 2.....	111
Figura 5.4 - Análise térmica da matéria-prima argila.....	112
Figura 5.5 - Petrografias barita n° 2. Baritito granoblástico com cristais tabulares de barita	114
Figura 5.6 - Comparação gráfica da perda de massa das formulações nas três temperaturas: 950 °C, 1000 °C e 1050 °C	115
Figura 5.7 - Efeito da variação da formulação do bloco cerâmico na retração linear em diferentes temperaturas	117
Figura 5.8 - Absorção de água em função das temperaturas dos corpos-de-prova estudados	118
Figura 5.9 - Porosidade aparente das formulações em função das temperaturas de queima	120
Figura 5.10 - Comparação gráfica da tensão de ruptura à flexão das formulações em três temperaturas: 950 °C, 1000 °C e 1050 °C	121
Figura 5.11 - Comparativo dos blocos cerâmicos baritados com argamassas baritadas existentes no mercado, em função da tensão e equivalência de chumbo.....	127
Figura 5.12 - Fotografia dos blocos cerâmicos extrudados e queimados na temperatura de 950 °C	128
Figura 5.13 - Micrografias obtidas por MO e MEV da superfície de fratura do bloco cerâmico queimada a 950 °C	129
Figura 5.14 – Resultados analíticos por EDS das áreas A, B e C da Figura 5.12 (c), respectivamente	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classes de resistência de blocos cerâmicos de alvenaria (ABNT NBR 15270-1).	31
Tabela 3.1 - Doses associadas aos efeitos determinísticos letais para exposição de corpo inteiro de radiação X.....	55
Tabela 3.2 - Simbologia das áreas controladas e livres e os níveis de restrição de dose, correspondentes	60
Tabela 3.3 - Valores típicos de carga de trabalho semanal	66
Tabela 3.4 - Fatores de ocupação definidos pela NCRP 147 (2004) para diferentes tipos de ocupação.....	67
Tabela 3.5 - Fatores de uso sugeridos para o cálculo de barreiras primárias.....	68
Tabela 3.6 - Comparação dos níveis de restrição de doses efetivas fornecidas pelo NCRP n° 147 (2004) e de equivalente de dose ambiente fornecidas pela Portaria n° 453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998) para as áreas controladas e áreas livres	70
Tabela 4.1 - Nomenclatura da ocorrência e das amostras de baritas adotadas para o trabalho, e sua localização no estado.....	80
Tabela 4.2 - Formulações cerâmicas estudadas (% em peso)	88
Tabela 4.3 - Tolerâncias dimensionais relacionados à média das dimensões efetivas.....	96
Tabela 4.4 - Configuração do arranjo experimental para a parede de blocos cerâmicos de vedação e suporte com folhas de chumbo.....	105
Tabela 5.1 - Análise química semi-quantitativa da argila (% em peso).....	107
Tabela 5.2 - Análise química semi-quantitativa das baritas (% em peso).....	108
Tabela 5.3 - Distribuição do tamanho médio de partículas da argila.....	108
Tabela 5.4 - Limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade para a classificação da matéria-prima argila.....	109
Tabela 5.5 - Perda de massa ao fogo das formulações do protótipo cerâmico	115
Tabela 5.6 - Retração linear de queima das formulações do protótipo cerâmico	116
Tabela 5.7 - Absorção de água de queima das formulações do protótipo cerâmico	118
Tabela 5.8 - Porosidade Aparente de queima das formulações do protótipo cerâmico	119
Tabela 5.9 - Resistência mecânica das formulações do protótipo cerâmico	120
Tabela 5.10 - Resumo dos resultados das propriedades tecnológicas dos corpos-de-prova sinterizados a 950, 1.000 e 1.050 °C.....	122

Tabela 5.12 - Resultados da avaliação quanto à especificação dos blocos cerâmicos de vedação para alvenaria	124
Tabela 5.13 - Média dos valores de transmissão, resultantes das medições para a parede de bloco cerâmico em diferentes tensões	125
Tabela 5.14 – Média dos valores de Kerma no ar, resultantes das medições para diferentes espessuras de folhas de chumbo em diferentes tensões (kV).....	126

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
AG	Análise Granulométrica
AP	Análise da Plasticidade
AT	Análise Térmica
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Térmica Gravimétrica
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CREA	Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia
DNA	Ácido desoxirribonucleico
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICV	Indústria Cerâmica Vermelha
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INCA	Instituto Nacional de Câncer
IP	Índice de Plasticidade
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
MRF	Módulo de Ruptura à Flexão
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCRP	National Council on Radiation Protection
NR	Norma Regulamentadora

NX	Nicóis Cruzado
N//	Nicóis Paralelo
PA	Porosidade Aparente
PCMSO	Programa de Controle Médico e Saúde Ocupacional
PF	Perda de massa ao Fogo
QGN	Química Geral do Nordeste
RL	Retração Linear de queima
RM	Resistência Mecânica
RN	Rio Grande do Norte
SUS	Sistema Único de Saúde
UR	Umidade Relativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 INDÚSTRIA CERÂMICA	22
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	22
2.2 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	24
2.2.1 Extração.....	24
2.2.2 Beneficiamento	24
2.2.3 Extrusão.....	26
2.2.4 Secagem	26
2.2.5 Queima.....	27
2.2.6 Acabamento.....	29
2.2.6.1 Inspeção	29
2.2.6.2 Armazenamento	29
2.2.6.3 Expedição	29
2.3 PRINCIPAIS PRODUTOS	30
2.3.1 Blocos cerâmicos.....	30
2.3.2 Argila - a matéria-prima da indústria de cerâmica vermelha.....	31
2.3.2.1 Fração Argilosa	34
2.3.2.2 Fração não-argilosa	36
3 FATORES QUE INTERFEREM NA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	39
3.1 PRINCÍPIOS GERAIS DE RADIOPROTEÇÃO	39
3.2 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	40
3.2.1 Limitação do tempo de exposição	41
3.2.2 Distância da fonte de radiação.....	41
3.2.3 Blindagem da fonte de radiação	41
3.3 INTERAÇÃO RAIOS X COM A MATÉRIA	41
3.3.1 Efeito fotoelétrico	43
3.3.2 Espalhamento Coerente	44
3.3.3 Espalhamento Compton.....	45
3.4 PRODUÇÃO DE RAIOS X.....	46
3.4.1 Os Raios Roentgen	46

3.4.2 Equipamentos de raios X	47
3.4.2.1 Tubo de raio X	47
3.4.3 Interação elétron-alvo	49
3.4.4 Produção de calor	49
3.5 MECANISMOS DE PRODUÇÃO DE RAIOS X	50
3.5.1 Radiação de Freamento	50
3.5.2 Raios X Característico	50
3.6 GRANDEZAS E UNIDADES DOSIMÉTRICAS BÁSICAS	51
3.6.1 Atividade	51
3.6.2 Exposição	52
3.6.3 Kerma no ar	52
3.6.4 Dose Efetiva	53
3.6.5 Dose absorvida	53
3.6.6 Dose Equivalente	54
3.7 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE	54
3.7.1 Interação da radiação com as células	54
3.7.1.1 Efeitos Determinísticos	55
3.7.1.2 Efeitos estocásticos	55
3.8 REQUISITOS DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA O LICENCIAMENTO E FISCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES EM RADIODIAGNOSTICO	56
3.8.1 Autoridades Regulatórias em Proteção Radiológica no Brasil	56
3.8.2 Exigências Administrativas e Técnicas para Licenciamento de Instalações de Radiodiagnóstico Médico e Odontológico	58
3.8.2.1 Dados Gerais para elaboração de projeto	58
3.8.3 Fabricação e uso de vestimentas de Proteção Individual	60
3.8.4 Papel dos Engenheiros	60
3.9 CÁLCULO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA DE BLINDAGENS DE SALAS RADIOLÓGICAS: CONCEITOS, METODOLOGIAS E MATERIAIS	62
3.9.1 Introdução	62
3.9.2 Conceitos aplicados à Proteção Radiológica	63
3.9.3 Limites autorizados e classificação de áreas	69
3.9.4 Labirinto convencional	71
3.9.5 Modelos matemáticos	72

3.9.5.1 Modelo para cálculo de blindagem (NCRP n°147/2004).....	72
3.9.6 Materiais de Blindagem	73
3.9.6.1 Concreto.....	74
3.9.6.2 Aço e chumbo	74
3.9.6.3 Argamassa Baritada.....	75
3.9.6.4 Materiais cerâmicos.....	75
3.10 BARITA – MATÉRIA-PRIMA PARA BLINDAGEM DE RADIAÇÃO X.....	76
3.10.1 Mineralogia.....	77
3.10.2 Geologia	77
3.10.3 Usos e Funções	78
3.10.4 Propriedades Físicas e Químicas	78
4 MATERIAIS E MÉTODOS	79
4.1 ENSAIOS PRELIMINARES – PARTE I.....	79
4.1.1 Matérias-primas empregadas.....	79
4.1.1.1 Argila.....	79
4.1.1.2 Baritas.....	80
4.1.2 Caracterização das matérias-primas	81
4.1.2.1 Análise granulométrica.....	82
4.1.2.2 Avaliação da plasticidade	83
4.1.2.3 Análise química por fluorescência de raios X	84
4.1.2.4 Análise mineralógica por difração de raio X.....	84
4.1.2.5 Análise Térmica	85
4.1.2.6 Petrografia	86
4.2 FORMULAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS - PARTE II.....	87
4.2.1 Materiais	87
4.2.2 Métodos	87
4.2.3 Caracterização das propriedades tecnológicas.....	89
4.2.3.1 Perda de massa ao fogo	90
4.2.3.2 Retração Linear de queima	91
4.2.3.3 Absorção de água	91
4.2.3.4 Porosidade aparente.....	92
4.2.3.5 Resistência Mecânica	92
4.3 ELABORAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS - PARTE III	93
4.3.1 Materiais	93

4.3.2 Métodos	93
4.3.3 Caracterização – ensaios tecnológicos	94
4.3.3.1 ABNT NBR 15270-3 – Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de Ensaios	95
4.3.3.2 Avaliação da atenuação da radiação X.....	100
4.3.3.3 Caracterização final	106
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS – PARTE I	107
5.1.1 Análise química por fluorescência de raio X.....	107
5.1.2 Análise granulométrica	108
5.1.3 Avaliação da plasticidade.....	109
5.1.4 Análise mineralógica por difração de raios X.....	109
5.1.5 Análise térmica.....	111
5.1.6 Petrografia.....	103
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS – PARTE II	115
5.2.1 Perda de massa ao fogo	115
5.2.2 Retração Linear	116
5.2.3 Absorção de água	118
5.2.4 Porosidade Aparente	119
5.2.5 Resistência Mecânica (RM).....	120
5.3 CARACTERIZAÇÃO ENSAIOS TECNOLÓGICOS BLOCOS CERÂMICOS – PARTE III	123
5.3.1 NBR 15270: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Parte 1, Terminologia e requisitos e Parte 3, Matérias e Métodos.....	123
5.3.2 Avaliação da atenuação da radiação X.....	124
5.3.3 Caracterização final	128
5.3.3.1 Microscopia ótica e eletrônica	128
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
REFERENCIAS.....	134
APÊNDICES.....	142

1 INTRODUÇÃO

O homem está exposto a diversas fontes de radiação ionizante, naturais e artificiais, que contribuem para a produção de uma dose em seu organismo. A contribuição de todas as fontes de uso médico para a dose per capita varia de uma pequena percentagem da radiação em países em desenvolvimento até percentuais significativamente altos em países desenvolvidos. A maior parte dessas contribuições é decorrente da utilização em radiologia diagnóstica, que é responsável por cerca de 90% das exposições em países desenvolvidos. Cerca de metade da população realiza, pelo menos um exame radiológico por ano, portanto, é necessário uma atenção especial para as exposições médicas. Segundo a Comissão Internacional de Proteção Radiológica, a exposição médica é a única categoria na qual é possível grande redução na dose média comparada a da população (FREITAS; DREXLER, 1992).

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 nos profissionais e no público. 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 pelo National Council on Radiation Protection and Measurements 147 (NCRP) (2004) para cálculos de blindagem contra radiações, além das determinações impostas pela portaria nº 453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

As técnicas radiográficas utilizadas nos primórdios da Radiologia Diagnóstica apresentavam tempos de exposição que poderiam chegar a 40 ou 45 minutos. Existem relatos de uso de um equipamento durante uma hora e quinze minutos para a obtenção da imagem de uma bacia. Um manual de utilização de tubos de raio X do início do século considerava tempos de exposição de 1 a 2 minutos para imagens de antebraço e das mãos, 10 minutos para o ombro e pulmão, 9 minutos para o joelho e 20 minutos para a bacia, cabeça e pelve, quando a distância do tubo ao paciente era de 25 cm (COSTA, 1999).

A radiologia diagnóstica está em evolução contínua, em resposta ao desenvolvimento tecnológico, permitindo diagnósticos com qualidade cada vez melhor e reduzindo a exposição da população. Entretanto, faz-se necessário o estudo de materiais aplicados em barreiras de proteção para diminuir os efeitos das radiações quando profissionais e público em geral são

expostos, além de aperfeiçoar o dimensionamento e aumentar o conhecimento das propriedades de atenuação para outros materiais (WRIGHT, 1998; BARROS, 2001).

Para o dimensionamento das barreiras de proteção devem ser observados os dados técnicos e operacionais das instalações radiológicas, estudados por Simpkin (1996) e Costa (1999), 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 (FRIMAIO, 2006). 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 exequíveis – *as low as reasonably achievable* (NATIONAL COUNCIL, 1976).

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

O NCRP 147 (2004) 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 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998) 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 exequíveis. 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 Comissão Nacional de Energia Nuclear -3.01 (CNEN-NE -3.01) (1988) não sejam excedidos.

Segundo a portaria nº 453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998) 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.

Passados alguns anos, o NCRP iniciou a publicação de relatórios nos quais foram descritas algumas recomendações específicas para a proteção de salas de radiologia diagnóstica. O último período, descrito por Archer (1995) como “Era moderna”, iniciou-se pela crescente sofisticação nas técnicas de proteção radiológica para a radiologia diagnóstica.

Nas últimas décadas, o NCRP 49 (1976), substituído recentemente pelo NCRP 147 (2004), juntamente com as determinações da portaria nº 453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998), 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, argamassa baritada (uma composição com alto teor de sulfato de bário (BaSO_4), areia, ligas de agregação e outros elementos minerais) vem sendo utilizada como material para revestimento em salas de radiologia diagnóstica. Este material apresenta alta densidade (4,0 à 5,0 g/cm^3), 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. (VASCONCELOS, 2007).

Com o objetivo de contribuir no cumprimento dos requisitos de proteção radiológica, a proposta principal deste trabalho é o desenvolvimento de blocos cerâmicos de vedação

utilizando para a fabricação destes materiais comuns à área de construção civil, para serem utilizados como barreira de proteção e blindagem de instalações médicas e odontológicas, quando submetidas aos raios X diagnósticos. A composição do bloco cerâmico foi estabelecida para viabilizar um procedimento mais econômico, que demande menor tempo e custo com maior praticidade para construção de paredes nas quais se faz necessário o uso de barreira protetora, seguindo as metodologias desenvolvidas por Archer (1995), Costa (1999), e os padrões estabelecidos pelo Ministério da Saúde que determinam sobre planejamento e dimensionamento de equipamentos para estabelecimentos assistenciais de saúde, atendendo às Normas Técnicas do Ministério da Saúde (1995) e aos métodos de cálculos de blindagens orientados pela NCRP n.º 147 (NATIONAL COUNCIL, 2004).

Este trabalho tem por finalidade determinar as propriedades de atenuação de parede feita com blocos cerâmicos de vedação constituídos de barita e argila, para serem usados como elementos de atenuação no cálculo de barreiras de proteção e blindagens em ambientes hospitalares e odontológicos, quando submetidos aos raios X.

Dentro deste contexto, a pesquisa foi programada para cumprir etapas experimentais capazes de seguir e concluir tais objetivos específicos:

- Esboçar e realizar formulações do suporte cerâmico definido utilizando as devidas proporções de cada matéria prima;
- Fabricar protótipos com as formulações fabricadas e sinterizá-los em três temperaturas distintas;
- Verificar o comportamento das composições formuladas sinterizadas com relação a porosidade aparente, absorção de água, perda de massa ao fogo, retração linear e tensão de ruptura a flexão, e compara-las com um material de referência para verificar que tipo de formulação apresenta melhores propriedades físicas;
- Produzir em laboratório, na forma de blocos cerâmicos, a formulação e a temperatura que apresentaram melhores resultados nas simulações;
- Determinar as propriedades dos blocos cerâmicos produzidos com relação à atenuação da radiação X, absorção de água e resistência a compressão;
- Analisar, segundo o NCRP 147 (2004), a equivalência em chumbo dos blocos cerâmicos produzidos.

A tese abrange seis capítulos, e um anexo. Na introdução, são apresentadas as legislações, normas técnicas, recomendações nacionais e internacionais para proteção radiológica, os objetivos e justificativa deste trabalho. O capítulo 2 apresenta a

fundamentação teórica sobre a Indústria Cerâmica. No capítulo 3 são apresentados os conceitos e metodologias para o cálculo de blindagens para salas radiológicas e os fatores que interferem na proteção radiológica. O capítulo 4 trata da caracterização do material ensaiado, elaboração do protótipo, procedimentos do ensaio e coleta de dados, os quais serão aplicados conforme a metodologia de cálculo de barreiras para proteção radiológica. No capítulo 5, são apresentadas as discussões e os resultados em forma de tabelas e gráficos, representando as análises do protótipo e do bloco cerâmico. O capítulo 6 é dedicado às discussões gerais, conclusões, e em seguida, são mostradas as perspectivas de trabalhos futuros.

2 INDÚSTRIA CERÂMICA

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Em vista da facilidade de fabricação e abundância de matéria-prima – o barro, a indústria cerâmica é uma das mais antigas do mundo. Já, no período neolítico, o homem pré-histórico calafetava as cestas de vime com o barro. Mais tarde, verificou-se que podia dispensar o vime, e fez-se potes só de barro. Posteriormente, constatou que o calor endurecia o barro, e surgiu a cerâmica propriamente dita, que nessa fase da humanidade, foi largamente empregada para os mais diversos fins. Mais tarde, com o uso de barros diversos, utilizando-se argilas com mais baixo ponto de fusão, surgiram os vidrados e vitrificados. No ano 4000 a.c., os assírios já obtinham cerâmica vidrada. Chama-se cerâmica à pedra artificial obtida pela moldagem, secagem e cozedura de argilas ou de misturas contendo argilas (VERÇOSA, 1985).

As Indústrias de Cerâmica Vermelha (ICV) distribuem-se por todo país, muito pulverizadas, em micro e pequenas empresas, quase sempre de organização simples e familiar. É responsável, principalmente, pela fabricação de materiais para a indústria da construção civil (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2006).

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) (2002), o número de olarias e cerâmicas no Brasil é de aproximadamente 12 mil empresas, as quais geram 650 mil empregos diretos, 2 milhões de empregos indiretos e um faturamento anual de R\$ 6 bilhões.

A Cerâmica tem um papel importante para economia do país, com participação no Produto Interno Bruto (PIB) estimado em 1%, correspondendo a cerca de 6 bilhões de dólares. A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada.

De forma mais ampla, a ICV constitui um segmento da indústria de transformação inserido no ramo dos materiais não-metálicos, e tem como atividade a produção de blocos (de vedação e estrutural), telhas, tijolos, tubos, manilhas, lajotas e outros produtos menos comuns.

No Brasil, o segmento da cerâmica vermelha conta com cerca de 5.500 empresas, sendo em sua maioria micro e pequenas empresas, com um faturamento anual estimado em

R\$ 6 bilhões, empregando diretamente 400 mil pessoas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2006). No estado do RN, de acordo com o último relatório do setor, existem cerca de 160 empresas em atividade, localizadas em 39 municípios do Estado. Essas empresas cerâmicas se concentram em 8 regiões, das quais 6 pertencem às bacias de grandes rios (Ceará - Mirim, Potengi, Trairi/Jacu, Curimataú, Baixo Açu e Seridó) além das empresas da Chapada do Apodi e da região serrana do extremo oeste potiguar (CARVALHO, 2001).

Apesar de antigo, o processo de fabricação dos produtos da ICV sofreu poucas transformações ao longo dos anos, com utilização de tecnologia desenvolvida nas décadas de 1950 e 1960. Somente na década de 1990, com o surgimento dos programas de qualidade dos materiais de construção, como o Programa da Qualidade da Construção Habitacional (QUALIHAB) no estado de São Paulo, se iniciaram os programas de certificação das empresas, produtos e serviços no setor da construção civil. Esta proposta de qualidade, inicialmente foi desenvolvida para o estado de São Paulo e, em seguida, foi ampliada ao resto do país, sendo adotado por outros Estados com algumas adaptações em função de características regionais, por meio do Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-H) (BASTOS, 2003).

De maneira geral, devido à falta de investimento em pesquisa pela melhoria do processo e produtos ao longo das últimas décadas, no Brasil, a ICV é atualmente caracterizada pela elevada produção e baixa produtividade, baixo valor agregado ao produto, alto índice de produtos não conformes, pouco controle ambiental e emprego de mão-de-obra pouco qualificada (SOARES, 2004; BEZERRA, 2005). De acordo com Tavares (2002), a produtividade brasileira de blocos vazados situa-se em torno de 13.000 peças por funcionário, enquanto na Europa a produtividade em média é de 200.000. O autor em referência justifica a elevada produtividade européia a pesquisas em inovação tecnológica e processos, a modernização de equipamentos, a qualificação da mão-de-obra e ao incentivo governamental ao setor.

Em se tratando de tecnologia, de acordo com Mafra (1983), a indústria de cerâmica vermelha brasileira vem ao longo dos anos percorrendo o caminho inverso da conquista da produtividade e qualidade, devido a enormes problemas peculiares a este setor. Estes problemas se iniciam no mercado consumidor, que não exige produtos com especificações definidas, ocasionando a despreocupação dos fabricantes em preparar suas empresas para demandas maiores, com dimensões padronizadas e qualidade assegurada.

O poder de competitividade das indústrias deste setor é ainda muito reduzido, em virtude do baixo nivelamento da maioria das empresas que compõe o mesmo, razão pela qual não obriga os empresários a investirem tecnologicamente em suas unidades produtoras.

2.2 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

2.2.1 Extração

A extração da argila é feita a céu aberto utilizando retro-escavadeiras ou equipamentos semelhantes. Normalmente, a mineração se encontra próxima à indústria (constituindo-se num dos principais indicadores para a sua localização), já que a dificuldade da entrada de caminhões de grande porte na jazida inviabiliza o transporte a grandes distâncias.

Segundo Pólo Produções Ltda. (2000) a extração e beneficiamento de argilas para a indústria cerâmica vermelha, vêm tendo ultimamente uma melhor atenção no tratamento de argilas. Isto só foi possível através da utilização de conhecimentos tecnológicos e da aplicação de controles no processamento cerâmico.

2.2.2 Beneficiamento

A prática da estocagem a céu aberto, ou seja, o sazonalamento das argilas é comum desde a antiguidade e atua de forma positiva no tratamento das argilas. O processo de intemperismo (sol-chuva) alivia as tensões nos produtos conformados, auxilia na plasticidade, na trabalhabilidade da argila e na homogeneização e distribuição da umidade nas massas.

No processo de sazonalamento, as argilas são geralmente dispostas segundo características ou propriedades desejadas no produto final. A extensão e altura dos montes são definidas conforme o espaço físico disponível. Apesar do período ideal ser de 1 (um) ano de descanso para alcançar os resultados ideais no processamento cerâmico, é comum a fase de sazonalamento estar associada à operacionalização de cada indústria.

No beneficiamento das argilas, o grau de redução do grão ou da granulometria das partículas se dá através de moedores, num processo a seco em britadores de mandíbulas e moinhos de martelo. O cuidado que geralmente deve ser tomado com estes equipamentos,

além dos processos rotineiros de manutenção, é o monitoramento dos elementos moedores e das grelhas.

Quando existe a necessidade de mais de um tipo de argila ocorre a pré-mistura, feita de forma manual ou com o auxílio de pás carregadeiras. A seguir são dosadas por caixão alimentador ou diretamente em correias transportadoras que levam aos quebradores de aglomerados maiores (“torrões”, que freqüentemente ocorrem). Em seguida misturadores de pás homogeneizam a matéria-prima. Neste mesmo ponto acrescenta-se também a água necessária para que seja ultrapassado o limite de plasticidade, devendo o teor de umidade estar entre 25% e 30% da massa total.

Conforme Motta (2001), a preparação da massa é feita geralmente através da mistura de uma argila “gorda”, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais; com uma argila “magra”, esta rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade. Observa-se que, na prática ceramista, a utilização da classificação granulométrica da massa é empírica, baseada na experiência do cerâmico prático, o que dificulta a padronização e a formalização dos conhecimentos da área.

A homogeneização ou mistura é feita manualmente ou com pás carregadeiras, conforme o percentual de cada matéria-prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea. Em um galpão onde o material fica protegido contra as intempéries, a massa chega ao caixão alimentador através de correias transportadoras. Por último, segue para o segundo misturador, onde as palas têm as funções de homogeneizar a massa, promover o avanço da massa pelo interior do equipamento e, ainda, auxiliar na eliminação de bolhas de ar de grandes dimensões. As palas podem ser fixas ou móveis, que permitem uma regulagem da intensidade da mistura, e maior ou menor produção. Quanto maior a inclinação das palas maior será a produção e menor o desgaste, o inverso reduz a produção e aumenta o desgaste das partes em contato com a mistura. Nesta etapa do processo produtivo, faz-se conveniente controlar a homogeneização, a umidade e a mistura da massa, bem como a eliminação de pedras, raízes, metais e outras impurezas nocivas ao processo.

2.2.3 Extrusão

Conforme Pólo Produções Ltda. (2000), a obtenção de produtos pelo processo de extrusão consiste em compactar uma massa plástica numa câmara de alta pressão equipada com sistema de vácuo, contra um molde de formato desejado.

Na saída do extrusor, a massa moldada, expelida de forma contínua, é seccionada no comprimento desejado.

Ainda que os custos de preparação e conformação de matérias-primas em uma fábrica de telhas, tijolos e blocos girem em torno da fabricação dos produtos é certo que se estas operações não forem devidamente conduzidas, podem aumentar notavelmente os custos das fases mais caras do processo, como a secagem e a queima.

Os defeitos causados por se trabalhar com uma massa conformada com tensões, freqüentemente, são visíveis somente quando as peças saem do secador, do forno e, às vezes só depois de vários anos após sua aplicação.

Entre vários fatores que devem ser levados em conta para obtenção de um bom resultado no processo de extrusão, dois deles merecem especial atenção: fatores relacionados à massa e ao equipamento de extrusão.

A primeira condição para se obter um bom resultado na extrusão é garantir que o material a ser conformado, apresente as mínimas variações possíveis, tanto na composição (plasticidade) como na preparação (granulometria), e no seu teor de umidade.

Para que o equipamento de extrusão e seus periféricos (bomba de vácuo) estejam sempre em perfeitas condições de uso, é imprescindível que façam parte de um sistema devidamente implantado de manutenção preventiva.

2.2.4 Secagem

Para Oliveira (2000), o processo de secagem pode ser definido como a eliminação da água de conformação dos produtos cerâmicos através do ar aquecido, e é considerada uma das fases mais delicadas do processo produtivo. A umidade de extrusão dos produtos cerâmicos normalmente oscila entre 20 e 30% e, após a secagem, esta umidade residual deve estar abaixo de 5%.

A secagem pode ser do tipo natural ou forçada. A primeira acontece com exposição das peças cerâmicas ao ar livre. Este processo é utilizado quando a empresa possui uma

produção baixa ou quando se dispõem de sol o ano todo e mão de obra barata. A secagem natural pode durar de 2 a 8 dias dependendo da temperatura ambiente e da ventilação. A exposição em pátio deve ser de forma que garanta a circulação de ar entre as mesmas evitando a retração diferenciada e, conseqüentemente, as trincas, comuns no processo lento.

A secagem forçada pode ser através de secadores intermitentes ou contínuos. A temperatura no início da secagem deve ser de aproximadamente 40°C aumentando gradativamente até chegar a 100°C. Temperaturas elevadas no início da secagem serão fontes de trincas, já as baixas aumentam cada vez mais o ciclo de secagem e neste caso, para se evitar as trincas é recomendável levantar a curva de Bigot das argilas para se conhecer o momento em que é permitido acelerar a secagem.

Oriundos de uma das três operações anteriores, os elementos já moldados e transportados para áreas cobertas são dispostos em prateleiras (fixas ou móveis) ou simplesmente empilhados no chão a fim de perderem a maior parte da umidade. Também são utilizadas estufas para este fim, aproveitando, via de regra, o calor residual dos fornos quando de seu resfriamento. A umidade final desejada é da ordem de 3 a 4%. E dependendo do produto, ocorre uma contração que pode variar entre 4 e 10%.

Outro fator de grande importância é a umidade relativa do ar (UR). No início da secagem, a UR deve estar por volta de 95% para impedir a eliminação de água de forma rápida, o que pode ser realizado através da tiragem. Atingindo o ponto crítico, pode-se acelerar a secagem, aumentando-se a temperatura e a velocidade do ar injetado.

2.2.5 Queima

Segundo Mafra (1983), o material seco é levado ao forno, e os mesmos podem utilizar como fonte de energia a lenha, a serragem, os rejeitos de madeira, o óleo, o carvão mineral, ou o gás natural. O processo de queima dura aproximadamente 150 horas, em virtude do elevado nível de umidade proveniente da secagem natural.

Conforme a Sudene (1989), a operação fundamental para a obtenção das características dos produtos cerâmicos é a queima. É durante esta fase que os produtos cerâmicos, submetidos ao tratamento térmico, sofrem transformações físico-químicas, alterando as suas propriedades mecânicas e conferindo-lhes as características inerentes a todo produto cerâmico.

Os fornos são os equipamentos utilizados nesta fase do processo, e são classificados de acordo com o ciclo de operação em: intermitentes e contínuos. Os fornos intermitentes funcionam em ciclo periódico de carga-queima-descarga. Os fornos contínuos funcionam em ciclos de 24 horas/dia, sem necessidade de paradas para carga ou descarga dos produtos.

Nos fornos intermitentes, o calor sensível gasto para aquecer a carga e a alvenaria do forno (estrutura), não é normalmente recuperado no final da queima e durante a fase de resfriamento. Todo o calor retirado da massa dos produtos e da massa estrutural do forno é dissipado para o ambiente. Em alguns casos, dependendo do volume da alvenaria do forno, este consumo chega a representar 50% ou mais do calor total requerido no processo de queima. Nos fornos contínuos, este calor é aproveitado para aquecer o ar combustão ou para pré-aquecer a carga enformada.

Segundo Villar (1988), os fornos mais utilizados são os do tipo intermitente, os quais possuem pouca variação de modelos. O forno denominado “semi-contínuo” é comumente encontrado, este inicia o processo pela queima do combustível em fornalhas frontais dispostas no lado oposto ao da chaminé, fazendo o calor percorrer todo o seu comprimento, completando a secagem.

A queima efetiva ocorre pela alimentação seqüencial (da frente para o lado da chaminé) através de aberturas na parte superior do forno, de lenha ou serragem, propiciando chama direta sobre a carga.

Diferenciam-se pelo formato, um circular, chamado “garrafão”, outro retangular, chamado “chinês”. O término desta fase ocorre no resfriamento e descarga do forno com o produto acabado.

Na queima do material consubstanciam-se todas as dificuldades encontradas neste tipo de unidade produtiva. A utilização de fornos rudimentares, sem flexibilidade operacional alguma, obriga à dependência da habilidade do responsável pela queima.

Parâmetros como o conhecimento (ou sensibilidade) na detecção visual da temperatura correta para a queima ou do término da fase de secagem que ocorre dentro do forno, indicada pela redução da saída de vapor na chaminé, são exemplos da habilidade exigida.

2.2.6 Acabamento

2.2.6.1 Inspeção

É feita na saída do forno, rejeitando material quebrado, trincado, lascado, queimado em excesso e, no caso das telhas, as que possuem som chocho.

2.2.6.2 Armazenamento

É feito em área coberta, permanecendo no local até a expedição.

2.2.6.3 Expedição

Efetuada através de caminhões por via rodoviária, utilizando equipamentos próprios ou frentistas.

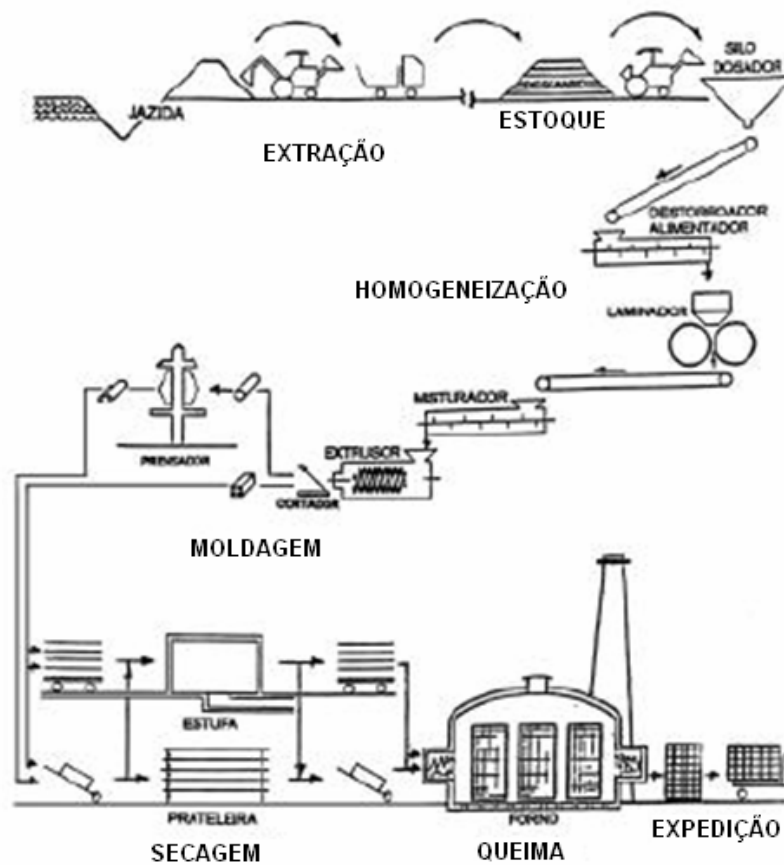


Figura 2.1: Processo de fabricação da cerâmica vermelha
Fonte: Adaptado Silva (2008, p. 42).

2.3 PRINCIPAIS PRODUTOS

Os principais produtos fabricados pela ICV são blocos e telhas. Quanto aos blocos cerâmicos, podem ser de vedação ou estruturais NBR 15270-1. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA..., 2005). Os principais tipos de telhas cerâmicas são: (i) telha de capa e canal, (ii) telha colonial, (iii) telha paulista, (iv) telha capa e canal plan, (v) telha francesa ou marselhesa, (vi) telha romana, (vii) termoplan, (viii) telha portuguesa, dentre outras. NBR 15310 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA..., 2009).

2.3.1 Blocos cerâmicos

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (2002), os blocos cerâmicos são componentes utilizados em alvenaria (vedação, estrutural ou portante). Apresentam furos de variados formatos, paralelos a qualquer um dos seus eixos.

São dois os tipos de blocos cerâmicos utilizados na construção civil e produzidos no Brasil.

- Bloco de vedação – são aqueles destinados à execução de paredes que suportarão o peso próprio e pequenas cargas de ocupação (armário, pias, lavatórios, etc.). Geralmente são utilizados com furos na horizontal e com atual tendência ao uso com furos na vertical.
- Blocos estruturais ou portantes – são aqueles que além de exercerem a função de vedação, também são destinados à execução de paredes que constituirão a estrutura resistente da edificação (podendo substituir pilares e vigas de concreto). Estes blocos são utilizados com os furos sempre na vertical.

Conforme a NBR 15270-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) - Bloco cerâmico para alvenaria, este define-se como componente de alvenaria que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que as contém.

Os blocos cerâmicos de vedação constituem as alvenarias externas e internas e não possuem a função de suportar outras cargas além do seu peso próprio e pequenas cargas de ocupação (apoio para armários, caixas de ar condicionado, pranchas etc.).

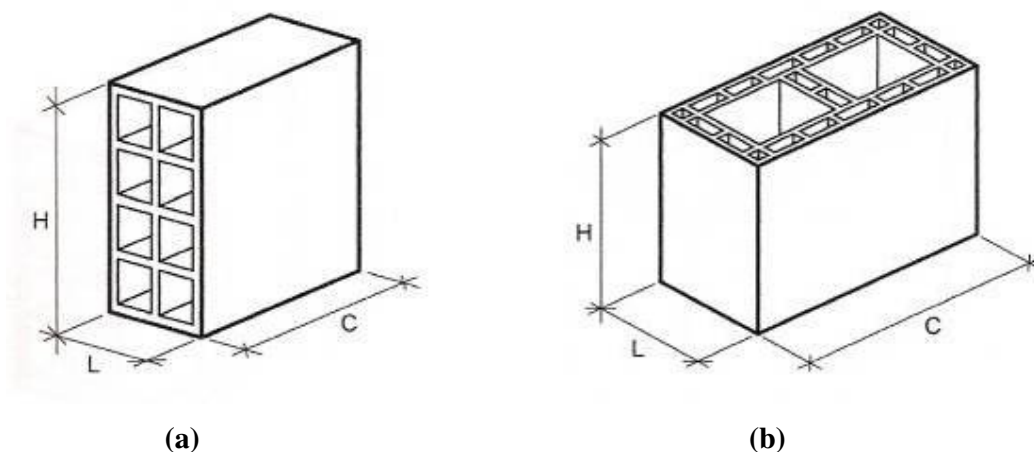


Figura 2.2: Tipos de blocos cerâmicos para vedação. (a) Blocos usados com furos na horizontal, (b) Blocos usados com furos na vertical.
 Fonte: Adaptado NBR 15270-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p.7).

As dimensões nominais destes blocos são muito variadas, indo desde (10 x 20 x 20)cm até (25 x 25 x 40)cm.

No tocante às especificações técnicas, estes blocos devem atender aos parâmetros de características geométricas como dimensões reais, a planeza das faces, o desvio em relação ao esquadro, a espessura das paredes e dos septos dos blocos, e apresentar um teor de absorção de água no intervalo entre 8% e 25%, além de obedecer aos critérios de resistência à compressão indicados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classes de resistência de blocos cerâmicos de alvenaria (ABNT NBR 15270-1).

Posição dos furos	Resistência à compressão (MPa)
Para blocos com furos na horizontal (fig. 2.2 a)	$\geq 1,5$
Para blocos com furos na vertical (fig. 2.2 b)	$\geq 3,0$

2.3.2 Argila - a matéria-prima da indústria de cerâmica vermelha

Como citado anteriormente, a argila é praticamente a única matéria-prima utilizada pela ICV. Segundo Motta (2001), sobre este ponto de vista, o setor desta indústria cerâmica utiliza basicamente argila comum, tendo, portanto, uma massa do tipo monocomponente - só argila.

Por possuir uma grande diversidade e conter numerosos tipos de minerais, a argila é uma das matérias-primas mais utilizadas, não só na ICV, mas também em outras indústrias cerâmicas e em diversos processos industriais.

As argilas fazem parte dos chamados “minerais industriais” formado pelo grupo dos silicatos, grupo este de grande importância, pois cerca de 25 % dos minerais conhecidos e quase 40 % dos minerais comuns são silicatos (MACHADO 2006), representando aproximadamente 97 % em volume da crosta continental.

Considerando que os minerais dominantes da crosta terrestre são os silicatos e os óxidos, cujas propriedades dependem das condições físicas e químicas de sua formação (SANTOS, 1989), os silicatos podem ser agrupados, conforme o arranjo espacial, em 6 classes:

- (i) nesossilicatos;
- (ii) sorossilicatos;
- (iii) ciclossilicatos
- (iv) inossilicatos;
- (v) filossilicatos; e
- (vi) tectossilicatos.

Dentre estas seis classes, a dos filossilicatos é a que possui maior participação dentro da química de materiais, incluindo nesta classe os minerais argilosos. Por causa da superposição de fenômeno de degradação, de transporte e de reações químicas é difícil encontrar um único tipo de argila na natureza em estado puro (FACINCANI, 1993; MACHADO 2006).

Na maioria das vezes as argilas são constituídas de outros materiais, chamados materiais complementares ou minerais acessórios, como, por exemplo, os feldspatos, o quartzo e os carbonatos.

Os constituintes das argilas podem ser divididos em dois grupos de características distintas: um de fração argilosa e outro de fração não-argilosa. O primeiro grupo, também denominada de fração argila, é constituído pelos argilominerais (minerais de argila), os quais, pela sua natureza, proporcionam à argila característica plástica; enquanto que a fração não argilosa é constituída pelos minerais acessórios, proporcionando a argila característica não plástica (DEER, 1992).

De um modo geral, as argilas apresentam combinações bastante distintas destas duas frações, o que influi fortemente no seu comportamento reológico, nas alterações físicas e químicas durante a etapa de queima e nas propriedades tecnológicas do produto final

(DUTRA, 2006). Por exemplo, uma argila com uma fração majoritária de minerais argilosos, comparativamente a fração de minerais acessórios, tende a apresentar uma elevada plasticidade, bem como, granulometria muito fina e elevada reatividade química e sinterabilidade. Inversamente, uma argila com predominância da fração de minerais acessórios, apresenta menor plasticidade, grãos mais grossos com formas arredondadas e equidistantes, menor superfície específica e elevada estabilidade térmica (BORBA, 1997; PRACIDELLI, 1997).

Os materiais cerâmicos apresentam elevada resistência ao calor, considerável resistência à oxidação e ao ataque químico, elevada resistência à deformação plástica e alta rigidez mecânica. Além disso, são comumente bons isolantes térmicos e elétricos. Possuem, em geral, baixa resistência ao impacto e grande variação da resistência à fratura (OLIVEIRA, 2004).

Segundo a ASSOCIACAO BRASILEIRA DE CERÂMICA (2004), os materiais cerâmicos podem ser classificados da seguinte forma: cerâmica vermelha, cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, abrasivos, vidros, cimento e cal.

São materiais terrosos naturais, que misturados com água, adquirem a propriedade de apresentar alta plasticidade, constituídas essencialmente de partículas cristalinas extremamente pequenas, chamada de argilo-minerais. De acordo com a ABNT, as argilas são compostas de partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005 mm, com alta plasticidade quando úmidas e que, quando secas, formam torrões dificilmente desagregáveis pela pressão dos dedos (VERÇOSA, 1985).

O termo argila representa para um ceramista um material natural que quando misturado com água se converte numa pasta plástica. Para um sedimentologista, representa um termo granulométrico que abrange todos os sedimentos em que dominam as partículas com diâmetro esférico equivalente inferior a 2 μm . Para um petrologista, é uma rocha, e, para um mineralogista, é um mineral ou mistura de minerais argilosos que apresentam estrutura essencialmente filitosa e granulometria muito fina (GOMES, 1988).

Contudo, o conceito que reúne aceitação mais geral considera que a argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire quando umedecido com água certa plasticidade, e é constituída essencialmente por argilominerais - os silicatos hidratados de alumínio - podendo conter minerais que não são considerados argilominerais (calcita, dolomita, gipsita, quartzo, aluminita, pirita e outros), matéria orgânica e outras impurezas. Caracteriza-se principalmente por ser constituída essencialmente por

argilominerais, geralmente cristalinos, e ter um elevado teor de partículas de diâmetro equivalente abaixo de 2 μm , constituído praticamente por argilominerais (GOMES, 1988).

2.3.2.1 Fração Argilosa

A fração argilosa constitui, normalmente, a maior parcela do corpo cerâmico, transformando-se, na maioria das vezes, em um material cristalino depois de queimado. Tem a função de proporcionar moldabilidade à massa, de aumentar a plasticidade da massa, de atuar como agente de suspensão em meio aquoso e de conferir coesão e solidez à massa verde, sendo responsável pela retração na secagem e elevada resistência mecânica depois de queimada. Como citado anteriormente, os argilominerais são os principais constituintes desta fração, os quais apresentam entre si algumas características comuns, como: (i) suas estruturas são formadas por camadas (capas) de componentes com coordenações tetraédricas e octaédricas; (ii) quimicamente, são definidos como silicatos hidratados (principalmente de alumínio ou magnésio), os quais, sob aquecimento, perdem água adsorvida e constitucional, e, a altas temperaturas, produzem materiais altamente refratários (DEER, 1992).

De acordo com Barba (1997), os argilominerais presentes na fração argilosa são filosilicatos hidratados que apresentam cristais muito pequenos (4-8 μm) com estrutura lamelar hexagonal e poucas vezes com estrutura fibrosa. Possuem estrutura cristalina composta por capas tetraédricas e capas octaédricas de átomos ou íons de oxigênio e de íons hidroxila com pequenos cátions ao redor, principalmente Si^{4+} e Al^{3+} . As ordens das capas (tetraédricas e octaédrica) e o espaçamento entre elas (7Å, 10Å, 14Å, etc.) é o que determina o tipo de argilomineral, como também as substituições que podem ocorrer, dentro da estrutura.

Os principais grupos de argilominerais são:

(i) grupo da caulinita/serpentina - deste grupo o argilomineral mais comum é a caulinita, a qual possui estrutura bilaminar, composta por uma capa tetraédrica (SiO_4) e uma octaédrica $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, tipo T:O ou 1:1 (Figura 2.3), podendo ocorrer substituições de Si^{4+} por Al^{3+} no tetraedro e de Al^{3+} por Fe^{2+} e/ou Mg^{2+} no octaedro (SANTOS, 1999). Os outros minerais do grupo da caulinita são: a nacrita, a diquita e a haloisita. Este último tem duas formas distintas - uma com a composição da caulinita e outra derivada da caulinita por desidratação com perda de duas moléculas de água. Normalmente, as argilas cauliniticas apresentam pouca plasticidade (caulinita < illita e

clorita < montmorilonita), maior tendência de formar mulita (caulinita > illita > montmorilonita), e maior velocidade de secagem da peça (caulinita > illita > montmorilonita).

(ii) grupo das esmectitas - os argilominerais deste grupo são constituídos por três capas, sendo duas capas tetraédricas e uma octaédrica do tipo 2:1, cuja estrutura é mostrada na Figura 2.4. São classificadas de acordo com a localização e os tipos de cátions presentes na estrutura cristalina. Quando todos esses sítios são ocupados por cátions, o filossilicato é chamado trioctaédrico. Quando somente dois terços são ocupados por cátions, trata-se de um filossilicato dioctaédrico. Neste grupo, o principal argilomineral dioctaédrico é a montmorilonita, a qual apresenta como principal característica a capacidade de absorver moléculas de água, produzindo uma marcante dilatação de sua estrutura (BARBA, 1997).

(iii) grupo das illitas - também denominadas de minerais micáceos ou mica hidratada, o argilomineral illita apresenta uma estrutura cristalina semelhante à da montmorilonita, a diferença é que existe uma substituição maior do alumínio por silício (SANTOS, 1989). Como consequência desta substituição, as camadas estruturais são rigidamente ligadas e não se expandem, tendo distância interplanar basal de 10Å (Figura 2.3).

(iv) grupo das cloritas - as cloritas são argilominerais cuja estrutura cristalina é constituída por quatro capas, sendo duas tetraédricas e duas octaédrica, do tipo T:O:T:O, conforme Figura 2.3.

(v) grupo da vermiculita - a vermiculita é um filossilicato que pode ser considerado como micas trioctaédricas que sofreram um “inchamento” com a substituição do Si^{4+} por Al^{3+} nas camadas tetraédricas, e o Fe^{3+} e Al^{3+} para substituições de Mg^{2+} nas camadas octaédricas. Esta argila é constituída por lamelas ou placas de perfil hexagonal, devido ao arranjo hexagonal das unidades constituintes das folhas de silicato e de hidróxido de alumínio, em que cada partícula monocristalina é formada pela superposição de um certo número de camadas de estrutura e espessura bem definidas, separadas por intervalos denominados espaços interfoliares. Cada camada, por sua vez, é composta por duas folhas de tetraedros, entre as quais se liga uma folha octaédrica. O espaço interfoliar é ocupado por cátions hidratados que têm a função de neutralizar as cargas elétricas geradas pelas substituições isomórficas que ocorrem na estrutura do mineral. Os cátions interfoliares mais comuns encontrados em vermiculitas naturais são magnésio e cálcio, e podem ser facilmente trocados por potássio, sódio, rubídio, célio, lítio e amônio (CHUI, 2005). Com isso, as vermiculitas

são, entre os argilominerais, as que apresentam maior capacidade de troca de cátions, sendo muito utilizadas nas cerâmicas avançadas.

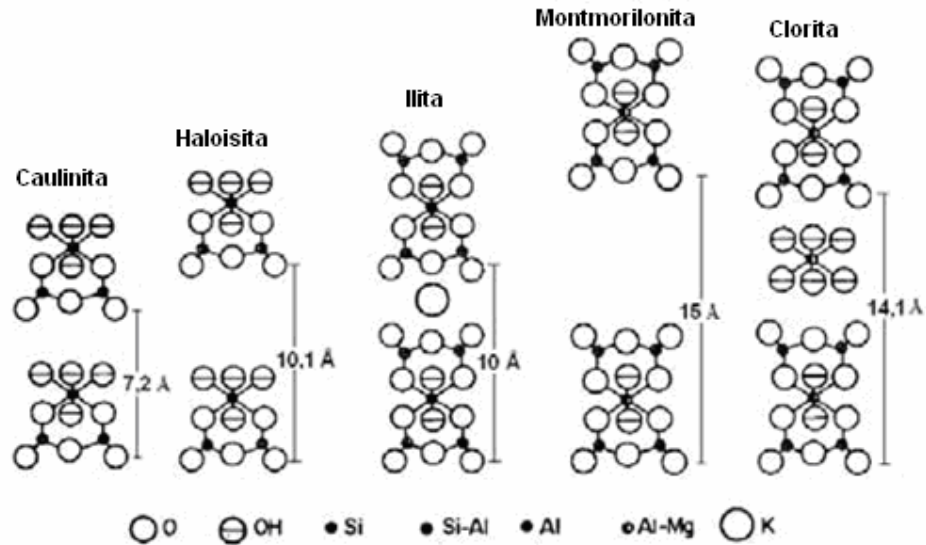


Figura 2.3: Estrutura dos principais argilominerais.
Fonte: Adaptada Dutra (2007, p. 28).

Os argilominerais interestratificados são minerais compostos formados por uma alternância de diferentes argilominerais, presentes na maior parte dos sedimentos de argilas. As principais interestratificações ocorrem entre os argilominerais ilita, biotita, montmorilonita, vermiculita, clorita e caulinita; quando envolvem três ou mais espécies, constituem-se em amostras difíceis de serem identificadas na difração de raios X.

2.3.2.2 Fração não-argilosa

A fração não-argilosa, representada pelos minerais acessórios, segundo Barba (1997), é formada pela sílica, carbonatos, feldspatos, compostos de ferro e titânio, sais solúveis e matéria orgânica.

A sílica se apresenta na maior parte das variedades de argilas em forma de quartzo, sendo um dos minerais mais abundantes da crosta terrestre. Durante a preparação da massa cerâmica, a elevada quantidade de quartzo tende a diminuir a plasticidade da massa, enquanto

que na etapa de conformação, o quartzo tende a aumentar a permeabilidade da peça, facilitando, posteriormente, o processo de secagem da peça. Contudo, a principal característica das argilas com elevado percentual de quartzo é o aumento do coeficiente de dilatação da peça.

Dependendo do tamanho das partículas, o quartzo tende a aumentar ou não a refratariedade da massa cerâmica na etapa de queima, uma vez que tamanhos grandes diminuem a reatividade, atuando como material inerte, enquanto que, tamanhos pequenos de quartzo tendem a fundir e reagir com os outros constituintes da massa. Normalmente, elevadas quantidades de quartzo diminui a resistência mecânica do material (BARBA, 1997).

Os carbonatos frequentemente encontrados nas argilas é a calcita (CaCO_3), a magnesita (MgCO_3) e a dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) (BARBA, 1997). Em geral, os carbonatos regulam a porosidade da peça cerâmica e proporcionam um mais amplo intervalo de queima, com também reduzem a expansão por umidade dos materiais. Com a redução do tamanho de partículas é possível reduzir a temperatura de decomposição dos carbonatos e aumentar a reatividade da massa.

Os feldspatos são aluminosilicatos de sódio, cálcio, potássio e bário, com diferentes tipos de ordenamento, dentre os quais os principais são: albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), arnotita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e ortoclase (KAlSi_3O_8). Os feldspatos são encontrados em maiores quantidades em argilas residuais e raramente em argilas sedimentares. São grupos mineralógicos muito abundantes na crosta terrestre, constituindo frequentemente 50 % de muitas rochas, aparecendo misturados, principalmente, com quartzo. (BARBA, 1997). Os feldspatos são constituídos de um retículo tridimensional formados por SiO_4 , sendo que alguns destes retículos podem estar preenchidos por AlO_4 , o que ocasiona um desbalanceamento de cargas quando o Si^{4+} é substituído pelo Al^{3+} . Para compensar este desequilíbrio e ocupar os grandes espaços existentes neste retículo, entram os alcalinos Na^+ e K^+ e o alcalino terroso Ca^{2+} (BORBA, 1996).

A matéria orgânica, também denominada de matéria carbonosa está presente nas argilas em proporções muito variadas, em função da origem e característica da jazida. A matéria orgânica influi sobre diferentes características e propriedades das argilas, proporcionando a argila uma cor que varia de cinza ao preto em função do seu conteúdo (BARBA, 1997).

Argilas naturais podem conter como impurezas diversos tipos de óxidos de ferro cristalinos ou amorfos, tais como: hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$) e lepidocrocita (γ -

FeOOH), além de outras formas combinadas, como a magnetita ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) e a ilmenita ($\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$) (LEITE, 2000).

A fração não-argilosa atua nas fases de conformação e secagem da peça, diminuindo a retração e favorecendo a secagem. Na fase do processamento térmico, esta fração da argila desempenha o papel mais relevante, controlando as transformações, deformações e a sinterização. Devido principalmente ao seu papel na fase de queima, os materiais não plásticos são ainda qualificados de inertes, vitrificantes e fundentes (MOTTA, 2002), dependendo da temperatura de queima. Por exemplo: o feldspato, por natureza, é uma matéria-prima fundente. No entanto, se comporta como inerte se a temperatura de queima for inferior a $1100\text{ }^\circ\text{C}$ (FACINCANI, 1993).

As matérias-primas fundentes têm como função aumentar a cinética de sinterização, por meio da formação de fase líquida viscosa, de modo a adequar as características finais do produto a um ciclo de queima industrial (BORBA, 1996). Segundo Riella (2002), a importância de um material fundente na massa cerâmica está relacionada com sua capacidade de diminuir a temperatura de formação de fase líquida durante o processo de queima. Este líquido formado tende a preencher as cavidades do corpo cerâmico, dependendo da sua viscosidade, eliminando assim a porosidade. Os elementos mais eficientes para promover a formação de fase líquida são os óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e os alcalino-terrosos (CaO e MgO).

3 FATORES QUE INTERFEREM NA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

O presente capítulo faz uma revisão dos principais assuntos referentes ao tema do trabalho. Inicialmente, são descritos os princípios gerais de radioproteção, proteção radiológica e as características dos raios X, assim como sua produção, interação com a matéria, grandezas, unidades dosimétricas e seus efeitos biológicos. Em continuidade ao capítulo, são tratados temas de segurança e proteção radiológica para o licenciamento e fiscalização de instalações em radiodiagnóstico. No final deste, serão apresentados conceitos, materiais aplicados à proteção radiológica e a metodologia de cálculo de barreiras de proteção de acordo com o NCRP 147 (NATIONAL COUNCIL, 2004).

3.1 PRINCÍPIOS GERAIS DE RADIOPROTEÇÃO

As recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), publicação nº 26 de 1977 e publicação nº 60 de 1990, servem de base para as normas de proteção radiológica atualmente utilizadas no Brasil. A radioproteção está fundamentada em três princípios básicos:

- **Justificação:** nenhuma prática que envolva exposição à radiação deve ser adotada a menos que produza um benefício líquido positivo ao indivíduo exposto ou à sociedade.
- **Otimização:** Consiste em considerar qual a melhor forma de utilizar os recursos para reduzir os riscos da radiação para os indivíduos e para a população. Todas as exposições às radiações devem ser tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, levando-se em conta fatores sociais e econômicos. A aplicação desse princípio requer a otimização da proteção radiológica em todas as situações onde possam ser controlados por medidas de proteção, particularmente na seleção, planejamento de equipamentos, operações e sistemas de proteção. Os esforços envolvidos na proteção e o detrimento da radiação podem ser considerados em termos de custos; desta forma uma otimização em termos quantitativos pode ser realizada com base numa análise custo-benefício.
- **Limitação da dose individual:** As doses individuais de trabalhadores e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de equivalente de dose efetiva estabelecidos na Norma CNEN-NE-3.01 (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA

NUCLEAR 1988), que estabelece: Trabalhadores: *50 mSv/ano*; Indivíduos do público: *1 mSv/ano*.

3.2 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. (FRIMAIO, 2006).

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 (MASHI, 2008).

A prática da proteção radiológica é um aspecto especial do controle dos perigos para a saúde do homem e do seu ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante CNEN/NE – 3.01 (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1988). No ambiente industrial, o primeiro procedimento habitual a se implementar é a eliminação do perigo. Se não é possível eliminá-lo, deve-se tentar isolá-lo. Se ambas as técnicas falharem, então é necessário proteger o trabalhador. A maneira exata de como se aplicam esses princípios gerais depende de cada situação em particular (SCAFF, 1979).

A radiação externa se origina de máquinas de raios X e de outras fontes especialmente designadas para produção de radiação, e a exposição de pessoas a essas fontes de radiação ionizante deve ser submetida à aplicação de uma ou mais das seguintes técnicas (CEMBER, 1996):

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

3.2.1 Limitação do tempo de exposição

No ambiente de trabalho, onde existe uma fonte de radiação ionizante, com uma determinada taxa de dose, verifica-se que a dose acumulada por uma pessoa exposta a essa radiação, nesse ambiente, é diretamente proporcional ao tempo que ela permanece na área e pode ser controlada pela limitação desse tempo. A restrição do tempo de exposição é necessária para que o indivíduo exposto à radiação ionizante não exceda o valor máximo de dose admitido, fazendo com que o trabalho seja realizado de acordo com os critérios de segurança do ponto de vista da radioproteção (ALMEIDA JR., 2005).

3.2.2 Distância da fonte de radiação

A exposição à radiação decresce com o inverso do quadrado da distância entre a fonte e o alvo (CEMBER, 1996). Assim, a maximização da distância da fonte de radiação é uma providência que visa proteger o homem, reduzindo o nível de radiação ao qual estaria sujeito.

3.2.3 Blindagem da fonte de radiação

A redução do nível de radiação ionizante, em um ambiente onde existe uma fonte de radiação, é alcançada através da blindagem dessa fonte (CEMBER, 1996). Entretanto, a eficiência da blindagem da instalação depende, dentre outros fatores, do material a ser utilizado e do tipo de radiação emitida pela fonte.

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 (FRIMAIO, 2006). A figura 3.1 mostra esquematicamente a passagem de um fóton pelo material.

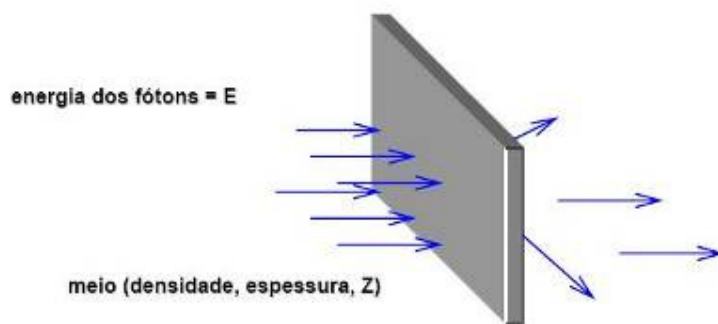


Figura 3.1: Representação esquemática da interação da radiação com o meio.
Fonte: Adaptada Barros (2001, p.13)

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 frequentes 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 (EVANS, 1982).

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 (FRIMAIO, 2006).

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, e, nestas condições, a radiação é espalhada devido aos efeitos coerente e Compton, enquanto que a absorção da radiação ocorre devido ao efeito fotoelétrico (COSTA, 1999).

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

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \quad (3.1)$$

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.

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 (ATTIX, 1986; JONHS; CUNNINGHAN, 1974). A equação (3.2) estendida para um espectro de raios X é representada como:

$$I_x = \int N(E) e^{-\mu(E)x} dE, \quad (3.2)$$

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 processo de absorção da radiação por efeito fotoelétrico, o fóton incide sobre um elétron de uma camada atômica interna e transfere toda sua energia a este elétron. O elétron ejetado, ou fotoelétron, emerge com energia cinética transferida do elétron de tal maneira que:

$$E_c = h\nu - E_L, \quad (3.3)$$

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

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 (FRIMAIO, 2006).

Portanto, para que o efeito fotoelétrico ocorra é necessário que a energia do fóton seja maior que a energia de ligação do elétron. Como há ionização e o átomo fica excitado, esta excitação é eliminada pelo preenchimento da vaga criada pelo elétron ejetado por um elétron de outra camada, e assim sucessivamente (BARROS, 2001). A figura 3.2 mostra um esquema do efeito fotoelétrico.

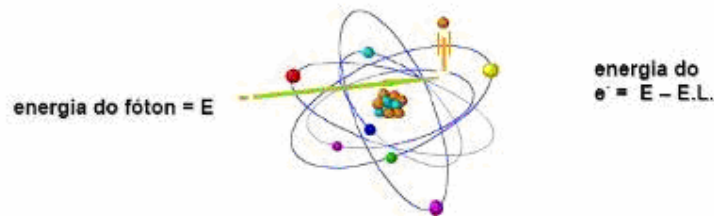


Figura 3.2: Representação esquemática do efeito fotoelétrico.
Fonte: Adaptada Barros (2001, p.14)

3.3.2 Espalhamento Coerente

O nome espalhamento coerente é dado àquelas interações em que a radiação sofre uma mudança na direção sem mudar o comprimento de onda, ou seja, sem variação de energia. Por essa razão, utiliza-se o termo "espalhamento não modificado". A figura 3.3 mostra o espalhamento coerente (BARROS, 2001).

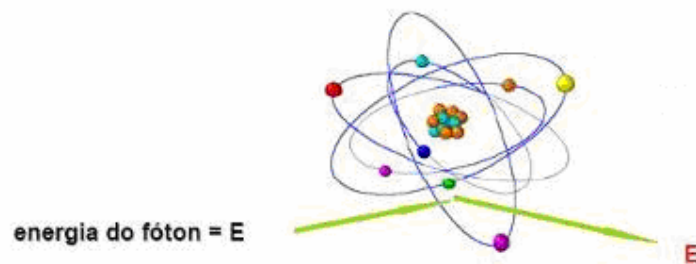


Figura 3.3: Representação esquemática do espalhamento coerente.
Fonte: Adaptada de Barros (2001, p.14).

Existem dois tipos de espalhamento coerente: o *espalhamento Thomson* que corresponde à interação com elétrons livres do meio absorvedor em que um fóton de baixa energia é absorvido pelo elétron, vibra e, por ser uma partícula carregada, emite radiação no mesmo comprimento de onda e o *espalhamento Rayleigh* que envolve todos os elétrons do átomo. Neste tipo de espalhamento, a radiação de baixa energia encontra os elétrons de um átomo e coloca-os numa vibração com a mesma frequência do fóton. Os átomos vibram e perdem a energia em forma de radiação, voltando assim a seu estado anterior (BARROS, 2001).

3.3.3 Espalhamento Compton

No efeito Compton, o fóton interage com um elétron relativamente livre do átomo, e parte da energia da radiação incidente é transferida para o meio irradiado. Neste tipo de interação, uma fração da energia do fóton incidente, E , é fornecida a um elétron, que recua após a colisão, sendo dada por:

$$E = h\nu - h\nu' \quad (3.4)$$

onde:

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

$h\nu'$ é a energia do fóton espalhado (FRIMAIO, 2006).

A figura 3.4 ilustra este conceito.

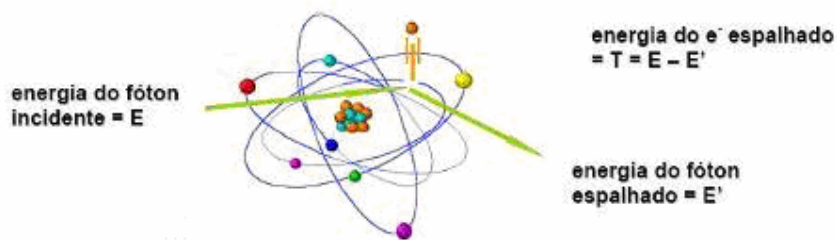


Figura 3.4: Diagrama esquemático do efeito Compton.

Fonte: Adaptada de Barros (2001, p.15).¹

¹ Um fóton incidente com energia e atinge um elétron, inicialmente em repouso. Após o choque, este elétron adquire energia T e aparece um fóton espalhado com energia E' .

Como no espalhamento Compton o fóton interage com elétrons que são considerados livres, esse processo é independente do número 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 (JONHS; CUNNINGHAM, 1974).

Quanto maior for à energia dos fótons, menor será a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, e o efeito Compton torna-se o mais importante. Em radiologia, a maior parte da radiação espalhada é proveniente do efeito Compton (BARROS, 2001).

3.4 PRODUÇÃO DE RAIOS X

3.4.1 Os Raios Roentgen

Em 1895, o cientista alemão e professor de Física Wilhelm Konrad Roentgen trabalhava com descargas elétricas numa ampola de Crookes (onde foram descobertos, pela primeira vez os raios catódicos), quando constatou que da região do vidro, onde incidiam os raios catódicos emanava uma certa radiação, provocando luminosidade em substâncias fluorescentes. Roentgen (1895) verificou, ainda, que se os raios catódicos fossem dirigidos para um anteparo metálico, o mesmo efeito se observava. Isto é, a região em que incidiam os raios catódicos (elétrons) emitia certos raios que, por apresentarem origem e características desconhecidas, foram chamados de raios X. Semanas após a descoberta, jornais já publicavam artigos descrevendo os efeitos dos misteriosos raios (ARCHER, 1995).

IRD (1999 apud Roentgen 1895), fez uma série de observações acerca dos raios X e concluiu que:

- Causam fluorescência em certos sais metálicos;
- Enegrecem placas fotográficas;
- São radiações tipo eletromagnética, pois não sofrem desvio em campos elétricos ou magnético;
- Produzem radiações secundárias em todos os corpos que atravessam;
- Propagam-se em linha reta (do ponto focal) para todas direções;
- Atravessa o corpo tanto melhor quanto maior for a tensão no tubo (kV).

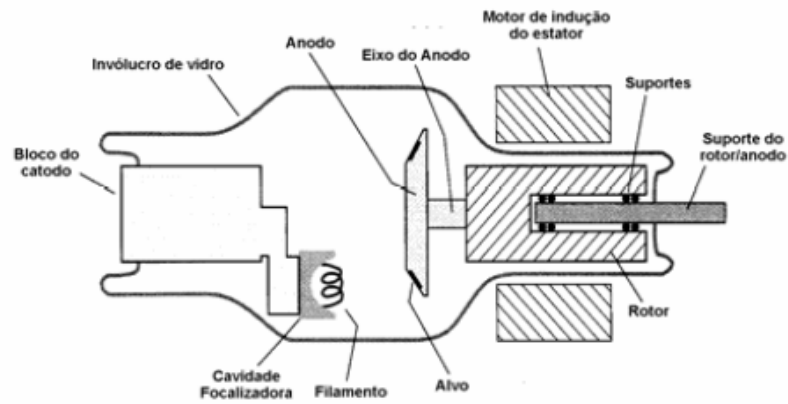
3.4.2 Equipamentos de raios X

Os aparelhos de raio X são identificados de acordo com sua capacidade de produção de raios X e com as aplicações para as quais são projetadas. Os equipamentos normalmente operam numa mesma faixa de tensão que vai de 40 a 150 kVp e a corrente do tubo é de 25 a 1200 mA. Os aparelhos de raios X terapêuticos operam com voltagens variáveis, porém a corrente do tubo não passa de 20 mA.

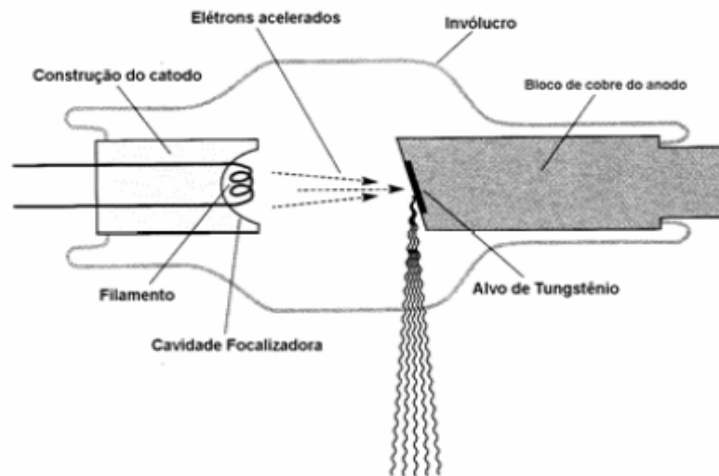
Os aparelhos de raios X possuem três componentes principais: o tubo de raio X, gerador de alta voltagem, e o painel de controle. Com exceção de aparelhos portáteis e odontológicos, onde os três componentes são montados de maneira compacta, o gerador e o tubo de raios X ficam localizados na sala de exames, o painel de controle fica localizado numa sala adjunta protegida, onde um visor (janela) de vidro pumbífero permite a observação do paciente durante o procedimento radiográfico. É no painel de controle que o operador controla a tensão e a corrente do tubo, bem como o tempo de irradiação, de maneira a obter a quantidade e a penetração necessária a uma radiografia de boa qualidade (INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA, 1999).

3.4.2.1 Tubo de raios X

O tubo de raios X é constituído por uma ampola de vidro com vácuo e possui dois eletrodos. Os raios X, desde sua descoberta, têm sido amplamente utilizados na medicina, odontologia, indústria e em pesquisas científicas. São produzidos por conversão de energia quando um feixe de elétrons de grande velocidade é desacelerado em um anodo (alvo) de um tubo de raios X. Os eletrodos são projetados para que os elétrons produzidos no catodo (eletrodo negativo ou filamento) possam ser acelerados por uma diferença de potencial alta em direção ao anodo (eletrodo positivo ou alvo). Os elementos básicos de um tubo de raios X são mostrados na figura 3.5.



(a)



(b)

Figura 3.5: Esquema de funcionamento dos tubos de raios X. (a) Tubo de raios X de anodo giratório; (b) Tubo de raios X de anodo fixo.

Fonte: Adaptada de Barros (2001, p.8)

Os raios X são ondas eletromagnéticas e, portanto, sua velocidade de propagação corresponde a $3 \cdot 10^8$ m/s, no vácuo.

No caso da utilização dos raios X para fins radiodiagnósticos, uma pequena fração dos raios X produzidos no anodo é utilizada para a formação de imagem, pois cerca da metade é absorvida no próprio anodo e a outra parte não é emitida em direção à janela de saída do feixe, sendo atenuada na blindagem de chumbo ao redor do tubo de raios X. A ampola de vidro e o óleo isolante que refrigera o tubo, denominados de filtração inerente do tubo, absorvem os raios X de baixas energias. Esta filtração pode ser aumentada com a adição de

placas de alumínio na saída do feixe, constituindo a filtração adicional (BUSHBERG et al.,1994; DE VOS, 1995).

3.4.3 Interação elétron-alvo

Os equipamentos de raios X foram planejadas de modo que um grande número de elétrons são produzidos e acelerados para atingirem um anteparo sólido (alvo) com alta energia cinética. No tubo de raios X, os elétrons obtém alta velocidade pela tensão (alta voltagem) aplicada entre o anodo e catodo.

De acordo com o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (1999), os elétrons que atingem o alvo interagem com o mesmo, transferindo suas energias cinéticas para os átomos do alvo. Estas interações ocorrem a pequenas profundidades de penetração dentro do alvo. Os elétrons interagem com qualquer elétron orbital ou núcleo dos átomos do alvo. As interações resultam na conversão de energia cinética térmica em energia eletromagnética (raios X).

3.4.4 Produção de calor

A maior parte da energia cinética dos elétrons é convertida em calor, através de múltiplas colisões com os elétrons dos átomos do alvo.

Após várias interações (ionização), é gerada uma cascata de elétrons de baixa energia. Estes elétrons não possuem energia suficiente para prosseguir ionizando os átomos do alvo, mas conseguem excitar os elétrons das camadas mais externas, os quais retornam ao seu estado normal de energia emitindo radiação infra-vermelho. Cerca de 99% da energia cinética dos elétrons incidentes é transformada em calor e cerca de 1% produz radiação. A produção de calor do anodo no tubo de raios X aumenta com o aumento da corrente do tubo. Duplicando o valor da corrente, duplica-se a quantidade de calor. A eficiência de produção de raios X independe da corrente do tubo e aumenta com a energia do projétil (INSTITUTO..., 1999).

3.5 MECANISMOS DE PRODUÇÃO DE RAIOS X

Existem dois mecanismos de produção de raios X, dependendo do tipo de interação entre os elétrons e o alvo, as interações inelásticas (interações que conduzem à perda de energia dos elétrons em um dado meio) que podem fornecer um espectro característico, ou de linhas de raios X, e um espectro contínuo de raios X (BARROS, 2001).

3.5.1 Radiação de Freamento

O processo envolve um elétron passando bem próximo a um núcleo do material do alvo. A atração entre o elétron carregado negativamente e o núcleo positivo faz com que o elétron seja desviado de sua trajetória perdendo parte de sua energia. Esta energia cinética perdida é emitida na forma de um raio X, que é conhecido com “bremsstrahlung” ou a radiação de freamento (INSTITUTO..., 1999).

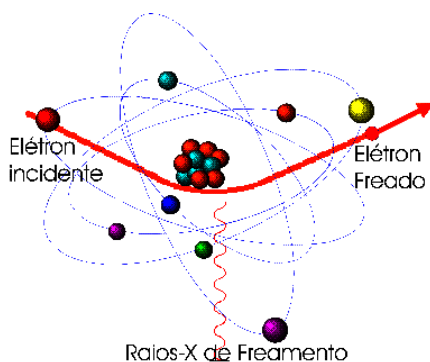


Figura 3.6: Formação de raios-X de bremsstrahlung.

Fonte: Adaptada: <http://www.cultura.com.br/radiologia/trabalho/noseasiv/noseasiv.htm>

Quanto mais próximo o elétron passar do núcleo, mais fortemente será defletido de sua trajetória inicial, transformando sua energia cinética em fótons de raios X.

3.5.2 Raios X Característico

A produção de raios X característicos ocorre quando um elétron, com energia cinética E_0 , interage com um elétron de uma camada interna de um átomo do alvo, transferindo uma energia ΔE suficiente para superar a energia de ligação do elétron no orbital e para ejetá-lo

fora do átomo, que se torna ionizado. A figura 3.7 mostra a produção de raios X característicos.

No arranjo, surge radiação X, chamada de característica, porque seus valores são discretos e característicos de cada elemento. Esta radiação forma o espectro característico ou de linhas dos raios X. Para tensões aplicadas entre 80 e 150kVp, pode-se dizer que a radiação característica contribui com aproximadamente 10% do total dos raios X produzidos pelos dois mecanismos.

Para tensões maiores, a contribuição do espectro de linhas torna-se muito pequena e negligenciável (SCAFF, 1997).

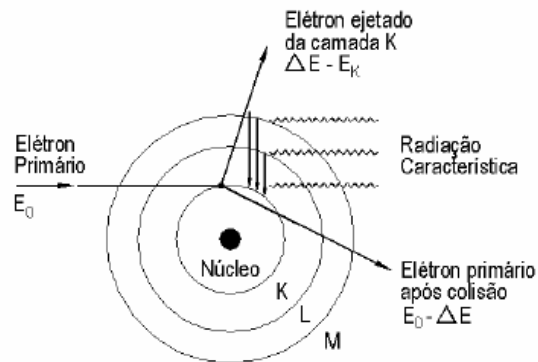


Figura 3.7: Ilustração dos raios X característicos.
Fonte: Adaptada de Barros (2001, p.9)

3.6 GRANDEZAS E UNIDADES DOSIMÉTRICAS BÁSICAS

Na utilização das radiações ionizantes, uma das questões iniciais é como realizar uma medição de grandezas utilizando a própria radiação ou os efeitos e subprodutos de suas interações com a matéria (CEMBER, 1996).

3.6.1 Atividade

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

$$A = \lambda N, \quad (3.5)$$

onde:

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

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

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

A unidade adotada pelo Sistema Internacional (SI) para a Atividade é o becquerel (Bq), que corresponde a uma desintegração radioativa por segundo (ALMEIRA JR., 2005).

3.6.2 Exposição

É uma grandeza que mede a quantidade de ionização pela radiação X. É definida em um certo ponto pela expressão:

$$X = \frac{dQ}{dm} , \quad (3.6)$$

onde dQ é a soma de todas as cargas de mesmo sinal criadas no ar quando todos os elétrons (positivos e negativos), liberados por fótons em um elemento de volume de ar de massa dm , são completamente freados no ar.

A unidade SI de exposição é o coulomb por quilograma. A unidade antiga unidade especial de exposição, mas usada ainda, é o Roentgen (R), onde $1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ (INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA, 1999).

3.6.3 Kerma no ar

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

$$K = \frac{dE}{dm} , \quad (3.7)$$

O kerma tem dimensões de energia por unidade de massa e se exprime por gray (Gy), sendo: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ (ALMEIDA JR., 2005).

3.6.4 Dose Efetiva

De acordo com a lei básica da radiobiologia, elaborada por J. Bergonié e L. Tribondeau (1979), a radiosensibilidade das células é diretamente proporcional à sua atividade reprodutiva e inversamente proporcional ao seu grau de diferenciação (SCAFF, 1997). Assim, com o objetivo de comparar o dano biológico devido a uma exposição não uniforme, com o dano causado por uma exposição uniforme (corpo inteiro), a ICRP na sua publicação n° 60 de 1990, definiu a dose efetiva (E) para vários tecidos e órgãos do corpo, como sendo:

$$E = WTHT , \quad (3.8)$$

sendo:

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

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

3.6.5 Dose absorvida

A unidade de dose absorvida no Sistema Internacional é o joule por quilograma e recebe também o nome especial de gray (Gy). Muitos ainda utilizam a unidade antiga de dose absorvida, o rad, sendo $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy}$. A dose absorvida no ar devida a uma exposição de 1R é igual a 0,87 rad.

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

$$D = \frac{dE}{dm} , \quad (3.9)$$

No SI, a unidade de dose absorvida é o gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$) (ALMEIDA JR., 2005).

3.6.6 Dose Equivalente

A dose absorvida média em um órgão ou tecido é um indicador da probabilidade de efeitos subseqüentes. Entretanto, esta probabilidade é dependente da qualidade da radiação. Diferentes tipos de radiação podem produzir diferentes efeitos biológicos (para a mesma dose absorvida). Foi, portanto, necessária à introdução de uma nova grandeza que pudesse ponderar esta dependência com a qualidade da radiação, a dose equivalente.

A dose equivalente no tecido ou órgão, H_T , em um órgão ou tecido T devido à radiação R é dada por:

$$H_T = E_{WR} D_{TR} , \quad (3.10)$$

onde: D_{TR} é a dose absorvida média no tecido ou órgão T, para uma dada radiação R e w_R é o fator de peso da radiação.

A unidade da dose equivalente no SI é o joule por quilograma que recebe o nome especial de sievert (Sv), para não confundir com a dose absorvida (INSTITUTO..., 1999).

3.7 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE

Há muitos anos verificou-se que as radiações ionizantes produzem danos biológicos nos seres vivos. Os primeiros casos de dano ao homem (dermatites, perda de cabelo, anemia) foram relatados na literatura logo após a descoberta dos raios X. Foi somente após a segunda Guerra Mundial, em virtude das explosões nucleares nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki e do uso cada vez maior de radionuclídeos nos mais variados setores de atividade, que se estudou com mais detalhes os efeitos produzidos por doses repetidas de radiação a longo prazo (BELLINTAN; GILI, 2002).

3.7.1 Interação da radiação com as células

No processo de interação da radiação com a matéria ocorre uma transferência de energia que pode provocar excitação ou ionização de átomos, com a conseguinte alteração das moléculas a que eles pertencem. Se as moléculas afetadas estão em uma célula viva, esta pode ser danificada. Dos vários danos que a radiação pode causar nas células, o mais importante é o

que ocorre no DNA. Este dano é freqüentemente reparado pela própria célula, não ficando qualquer seqüela. Entretanto, quando o dano não é reparado adequadamente, pode ocorrer a morte da célula, a incapacidade de se reproduzir ou a sua transformação em uma célula viável porém modificada (INSTITUTO..., 1999).

3.7.1.1 Efeitos Determinísticos

A morte de um pequeno número de células de um tecido, resultante da exposição à radiação, não traz normalmente consequência clínica observável. Para os indivíduos saudáveis, dependendo do tecido irradiado, nenhum indivíduo apresentará dano para doses de até centenas ou milhares de milisieverts. Acima de um valor de dose (limiar) o número de indivíduos injuriados aumentará rapidamente até atingir o valor unitário (100%).

Nos efeitos determinísticos, a severidade do dano produzido aumenta com a dose a partir do limiar, se o tecido atingido é vital e o dano suficientemente grande, pode ocorrer morte do indivíduo. A Tabela 3.1 mostra os limiares de dose absorvida e os efeitos determinísticos para os órgãos mais sensíveis à radiação para diferentes condições de exposição (INSTITUTO..., 1999).

Tabela 3.1: Doses associadas aos efeitos determinísticos letais para exposição de corpo inteiro de radiação X.

Dose Absorvida de corpo inteiro (Gy)	Principal dano que contribui para a morte	Tempo de vida após a exposição (dias)
3-5	Danos na medula óssea	30-60
5-15	Danos gastro-intestinais e pulmonares	10-20
>15	Danos no sistema nervoso	1-5

3.7.1.2 Efeitos estocásticos

Podem ocorrer a partir do dano produzido em uma única célula, apesar dos mecanismos de reparo e de defesa do organismo que inibem a sobrevivência do clone de células modificadas que gera o câncer. A probabilidade do câncer induzido pela radiação aumenta com a dose sem, provavelmente, nenhum limiar. A severidade de um determinado

câncer não é afetada pela dose, mais sim, pelo tipo e localização da condição maligna (INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA, 1999).

3.8 REQUISITOS DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA O LICENCIAMENTO E FISCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES EM RADIODIAGNOSTICO

3.8.1 Autoridades Regulatórias em Proteção Radiológica no Brasil

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

No Brasil, as atividades de controle regulatório no uso e aplicações de fontes radioativas estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Compete à CNEN as atividades regulatórias das instalações nucleares, a emissão de regulamentos técnicos relativos à proteção radiológica e segurança nuclear, a fiscalização e autorização do funcionamento de instalações que utilizam produtos radioativos, o controle do comércio desses produtos, o armazenamento de rejeitos radioativos, entre outras CNEN-NE-3.01, (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1988).

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

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

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

No âmbito da saúde do trabalhador, o Ministério da Saúde e o Ministério do Trabalho e Emprego exercem atividades regulatórias específicas e consideram, como guia, as normas de proteção radiológica da CNEN-NE-3.01 (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1988) e CNEM-NE-3.05 (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1996). As responsabilidades do Sistema Único de Saúde (SUS) relativas à saúde do trabalhador incluem as ações de Vigilância Sanitária e Epidemiológica, promoção e proteção da saúde, recuperação e reabilitação dos trabalhadores submetidos a riscos e agravos das condições de trabalho (ALMEIDA; ALMEIDA, 1995).

Em 1998, as Diretrizes de Proteção Radiológica para Radiodiagnóstico Médico e Odontológico foram estabelecidas através da portaria nº 453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998). O escopo e os requisitos estabelecidos nesse regulamento estão baseados nas recomendações da International Commission on Radiological Protection (1977, 1990 e 1996) e nas recomendações, da International Atomic Energy Agency (1990).

O Ministério do Trabalho e Emprego instituiu através da Lei nº 6.514, (BRASIL, 1977), as Normas Regulamentadoras, aprovadas pela Portaria nº 3.214 (BRASIL, 1978) em que foram enquadradas as atividades laborais com radiações ionizantes como perigosas NR-16 (BRASIL, 1978) e estabeleceu a obrigatoriedade da elaboração e implementação, por parte de todos os empregadores e instituições que admitam trabalhadores como empregados, do Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional (PCMSO) NR-7 (BRASIL, 1978), com o objetivo de promoção e preservação da saúde do conjunto dos seus trabalhadores. Além disso, obriga a empresa a fornecer aos empregados, gratuitamente, equipamentos de proteção individual NR-6 (BRASIL, 1978) adequados ao risco e em perfeito estado de conservação e funcionamento, sempre que as medidas de ordem geral não ofereçam completa proteção contra os riscos de acidentes e danos à saúde dos trabalhadores.

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

3.8.2 Exigências Administrativas e Técnicas para Licenciamento de Instalações de Radiodiagnóstico Médico e Odontológico

De acordo com a Portaria nº453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998), o licenciamento de um serviço de radiodiagnóstico deve seguir a aprovação (prévia) de projeto básico estando condicionada à análise e parecer favorável sobre os seguintes documentos:

a) Projeto básico de arquitetura das instalações e áreas adjacentes, conforme a Portaria nº1884 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1994) do ou outra que venha a substituí-la, incluindo:

- (i) planta baixa e cortes relevantes apresentando o *layout* das salas de raios x e salas de controle, posicionamento dos equipamentos, painel de controle, visores, limites de deslocamento do tubo, janelas, mesa de exame, bucky vertical e mobiliário relevante;
- (ii) classificação das áreas de serviço indicando os fatores de uso e os fatores de ocupação das vizinhanças de cada instalação;
- (iii) descrição técnica das blindagens (portas, paredes, piso, teto, etc.) incluindo material utilizado, espessura e densidade.

b) Relação dos equipamentos de raio x diagnósticos (incluindo fabricante, modelo, mA e kVp máximas), componentes e acessórios, previstos para as instalações.

c) Relação dos exames a serem praticados, com estimativa da carga de trabalho semanal máxima, considerando uma previsão de operação de cada instalação por, no mínimo, 5 anos.

d) Planilha de cálculo de blindagem assinada por um especialista em física de radiodiagnóstico, ou certificação equivalente, reconhecida pelo Ministério da Saúde.

3.8.2.1 Dados Gerais para elaboração de projeto

A planta baixa e cortes deverão estar em escala entre 1:20 a 1:100 e apresentar as seguintes informações:

- Marca e modelo;
- Utilização (indicação dos tipos de exame que o aparelho pode realizar);
- Tensão máxima do tubo do aparelho (em kV);
- Carga máxima do aparelho (em mAs/h) permitida para a tensão máxima;
- Classificação das barreiras em primárias e secundárias;
- Identificação de áreas controladas e livres;
- Indicação dos usos das áreas adjacentes à sala de raios X;

b) Restrições de dose para áreas controladas e áreas livres

Os projetos devem assegurar os níveis de restrição de dose estabelecidos na Portaria nº453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998) (Tabela 3.2). Estes níveis de equivalente de dose ambiente devem também ser utilizados para avaliar a adequação das barreiras através de levantamento radiométricos (monitoração de área) (INSTITUTO..., 1999).

Tabela 3.2: Simbologia das áreas controladas e livres e os níveis de restrição de dose, correspondentes.

Tipo de área	Restrição por Dose (mSv)	
	Por Semana	Por Ano
Controlada ¹	0,10	5
Livre ²	0,01	0,5

1 locais de trabalho em áreas expostas à radiação (sala de exames, sala de comando e compartimentos associados).

2 residências, salas de espera ou locais de trabalho de pessoas que não tenham nenhuma relação com atividade que envolvam radiação, em campo aberto ou área que não está sob jurisdição da instalação.

3.8.3 Fabricação e uso de vestimentas de proteção individual

A autoridade sanitária deve verificar se o titular da instalação oferece aos profissionais ocupacionalmente expostos e aos pacientes, as vestimentas de Proteção Individual adequadas. É necessário que o serviço de radiologia realize testes periódicos de integridade física destas vestimentas e mantenha os registros dos resultados, para apresentação à fiscalização, quando requerido. Os fabricantes devem fornecer os certificados das vestimentas, contendo instruções para uso, valor equivalente em chumbo ou grau de atenuação e instruções para conservação, inclusive limpeza (INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA, 1999).

3.8.4 Papel dos engenheiros

Segundo o Instituto Nacional de Câncer (BRASIL, 2000), os departamentos de radioterapia devem ser instalados, preferencialmente, em andar térreo, na periferia do complexo hospitalar, para evitar os problemas de radioproteção que surgem se as salas de tratamento estiverem próximas aos locais de alta ocupação. Sendo possível, deve ser um bloco independente e exclusivo e sem ocupação sobre o teto. Construções subterrâneas são aceitáveis, mas muito caras, e construções acima do térreo não são recomendadas. A situação em relação ao hospital deve ser tal que facilite a entrada de pacientes ambulatoriais,

proporcionando maior facilidade de interação com os outros serviços hospitalares, principalmente a locomoção de pacientes internados e os exames complementares.

Depois de definida a área a ser construída, as máquinas e as necessidades do serviço, o arquiteto, líder do projeto, começa a encaixar todas as peças, detalhando o projeto. Nessa etapa, é necessária a participação de toda a equipe: médicos, físicos, administração e engenheiros, que devem assegurar que a construção estará terminada e que todos os requisitos de pré-instalação exigidos pelos fabricantes estarão executados na chegada dos equipamentos.

Consultas aos fabricantes são extremamente importantes e, a maioria deles, possuem departamentos de ajuda aos usuários que fornecem todas as informações necessárias. O projeto de blindagem, incluindo as espessuras das paredes e porta e a posição do labirinto requer intensa colaboração com o físico, que deverá fornecer um desenho detalhado para ser usado como base ao projeto final. A partir desse desenho, o arquiteto arranjará as acomodações para os equipamentos auxiliares e planejará as salas de controle, de espera, de troca de roupas, recepção e de trabalho.

O papel dos engenheiros é assegurar que a sala do equipamento possa ser construída da maneira como foi planejada. Deve-se assegurar que o método de construção é tal que não existirão buracos ou juntas pelas quais a radiação possa escapar, e, que as especificações e os controles dos materiais, dosagem (composição), densidade, propriedades mecânicas, elásticas e térmicas são as necessárias e atendem ao projeto.

Junto com a sala de tratamento o engenheiro deve planejar a sala de controle. A escolha será entre uma sala fechada ou uma aberta. Na primeira, os técnicos e equipamentos ficam visualmente isolados dos pacientes. Na segunda os técnicos podem realizar suas atividades e, ao mesmo tempo, supervisionar os pacientes em espera. Nos dois casos é essencial situar a mesa de controle e equipamentos de modo que se tenha total e permanente controle de acesso à sala de tratamento e que os pacientes em espera ou outros indivíduos não possam ver os que estão sendo tratados. Nessa etapa é importante que os técnicos participem do projeto, já que estão na melhor posição para informar como o departamento trabalha e quais são suas necessidades.

3.9 CÁLCULO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA DE BLINDAGENS DE SALAS RADIOLÓGICAS: CONCEITOS, METODOLOGIAS E MATERIAIS.

3.9.1 Introdução

Todo o processo de cálculo é feito utilizando curvas do tipo logarítmicas (curvas de atenuação). Este procedimento não é exato, pois depende da qualidade de impressão destas curvas, da exatidão na leitura feita pelo observador, da aproximação dos resultados e outros fatores que interferem no resultado final da proteção. Para minimizar este problema, foram usados alguns conceitos matemáticos já estudados por profissionais da área de radiologia (SIMPKIN, 1995).

Baseado nos procedimentos de cálculo e no projeto arquitetônico preestabelecido, foi feita uma hipótese de cálculo para determinar a solução de proteção radiológica médica, utilizando-se conceitos da NCRP 147/2004 e da metodologia desenvolvida por Archer et al. (1983).

A metodologia apresentada pelo NCRP 147/2004 consiste no cálculo das espessuras de materiais atenuantes aos efeitos de raios X, tais como chumbo, concreto, madeira e gesso, para servirem de barreiras de proteção contra radiação primária (na direção do feixe principal) e secundária (radiação espalhada pelo paciente e radiação de fuga proveniente do equipamento).

Para calcular a espessura da barreira de proteção, pode-se determinar a transmissão do feixe no ponto considerado. Transporta-se este valor para um gráfico já estabelecido de curvas de atenuação em um dos apêndices do relatório do NCRP 147/2004. Obtém-se em correspondência, para um dado material, a espessura da barreira necessária para reduzir a exposição ao valor permissível.

Em 1983, Archer et al. desenvolveram o modelo matemático, chamado de Modelo de Archer, cujo propósito é ajustar uma função matemática às curvas de atenuação apresentadas no NCRP 147 (NATIONAL COUNCIL, 2004). Este modelo leva em consideração parâmetros chamados de $\alpha(V)$, $\beta(V)$ e $\gamma(V)$, utilizando-se o Método Não-Linear de Mínimos Quadrados. Archer et al. (1994) publicaram valores de $\alpha(V)$, $\beta(V)$ e $\gamma(V)$ para materiais utilizados em radioproteção com diferentes valores de tensão e retificações monofásicas e trifásicas.

Segundo o National Council on Radiation Protection and Measurements 147 (2004), o cálculo da barreira pode ser obtido considerando os fatores de uso (U) e ocupação (T), além

da carga de trabalho (W) e a exposição admissível à radiação (P). O valor de P depende de várias circunstâncias, são elas:

I. em áreas controladas, $P = 0,1\text{mSv/sem}$;

II. fora de áreas controladas, nas quais, para membros de grupos especiais, é recomendado, $P = 0,02\text{mSv/sem}$;

III. para membros do grupo especial e para indivíduos da população geral, para os quais é recomendado $0,5\text{Rem/ano}$, $P = 0,01\text{R/sem} \approx 0,01\text{mSv/sem}$.

3.9.2 Conceitos aplicados à Proteção Radiológica

No planejamento de um setor radiológico de acordo com as recomendações nacionais e internacionais, além do projeto com as devidas considerações de ordem funcional e do plano de instalações e obras, deve-se desenvolver, como fator de grande importância, um projeto de proteção radiológica que será apresentado para a devida aprovação e, posteriormente, entregue ao usuário das instalações no momento da entrada em funcionamento.

A função da blindagem em ambientes médicos é limitar, ou seja, reduzir as doses de radiação aos pacientes envolvidos em diagnósticos a níveis tão baixos quanto possíveis, consistentes com os procedimentos médicos que estão sendo aplicados, minimizar as doses de radiações das pessoas ocupacionalmente expostas ao serviço, e, finalmente, limitar as doses de radiação a membros da população em geral, que freqüentam instituições médicas.

Seguem abaixo, algumas definições importantes para a proteção radiológica segundo Barros (2001):

Radiação Ionizante

Para fins de proteção radiológica, é qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria biológica, ioniza seus átomos ou moléculas.

Proteção Radiológica

É um conjunto de medidas que visa proteger o homem, seus descendentes e seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante, também chamada de radioproteção.

Barreiras de Proteção

São barreiras de material absorvente. Conforme a proteção desejada contra os raios X, primários ou secundários, são denominadas barreiras primárias ou barreiras secundárias respectivamente.

Radiação Primária

É a radiação originada diretamente no ponto focal do tubo de raios X, ou na fonte radioativa.

Radiação Dispersa

É a radiação que não serve para qualquer fim útil, inclusive radiação direta e secundária de objetos irradiados.

Radiação direta

É toda a radiação saindo do tubo de raios X (com exceção do feixe útil, sendo ela absorvida em sua maior parte pela cúpula protetora).

Radiação secundária

São raios espalhados por qualquer objeto ao receber radiação mais a radiação de fuga.

Radiação de Fuga ou Vazamento

É toda a radiação, exceto o feixe útil, que emana da câmara que contém a ampola ou a fonte de radiação.

Para ilustração desses conceitos observe a Figura 3.9. abaixo:

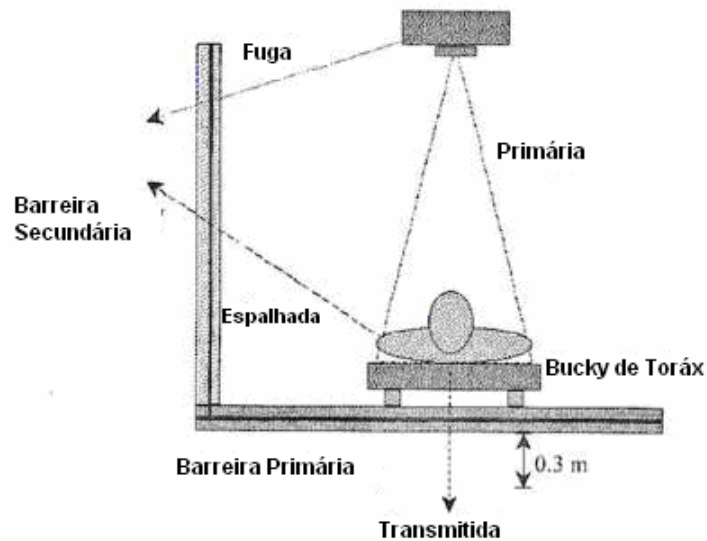


Figura 3.9: Ilustração das radiações primária, espalhada, de fuga e transmitida em uma sala de radiografia com um paciente posicionado verticalmente em frente ao bucky de tórax.
 Fonte: Adaptada NCRP 147 (NATIONAL COUNCIL, 2004, p.10)

Carga de trabalho (W)

É medida em unidades convenientes do montante de utilização da equipe de raios X. É o somatório dos produtos da corrente pelo tempo (mAs) utilizados na semana. A unidade utilizada é mA.min/sem para radiação X.

A Tabela 3.3 mostra os valores típicos de carga de trabalho semanal apresentados na Portaria n.º.453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998), que podem ser utilizados como orientação nos cálculos de barreiras. Outros valores são sugeridos em estudos referentes a carga de trabalho total (COSTA, 1999).

Tabela 3.3: Valores típicos de carga de trabalho semanal.

EQUIPAMENTO DE RADIODIAGNÓSTICO	Número de Pacientes/dia	Carga de Trabalho		
		100 kVp	125 kVp	150 kVp
Unidade de radiografia geral	24	320	160	80
Unidade de radiografia de tórax	60	160	80	-
Tomógrafo computadorizado	24	-	5000	-
Unidade de fluoroscopia*	24	750	300	-
Unidade de procedimentos especiais	08	700	280	140
Unidade de radiografia intra-oral	24	430	-	-
Unidade de radiografia panorâmica	24	200	-	-
Mamógrafo (<50kVp)	24	2000	-	-

* (para unidades sem intensificador de imagem e para telecomandos, multiplicar por 2).

De acordo com Costa (1999), quando o responsável pelo projeto de proteção de uma sala radiológica inicia os cálculos da espessura de um material protetor que deverá ser instalado nas barreiras, conta com as seguintes informações:

- Tipo de pessoas (trabalhadores com radiação ou membros do público) e fatores de ocupação em cada região adjacente, que definirão a quantidade de radiação que poderá atingir o local durante um período de tempo;
- Arquitetura da sala, com especial atenção às distâncias da fonte às barreiras;
- Carga de trabalho da fonte (e seus fatores de uso), que é proporcional à quantidade de radiação total gerada na sala e que atinge as barreiras; e
- Tensão de operação do equipamento.

Fator de ocupação (T)

É um fator utilizado para redução dos requisitos de blindagem, determinado pela estimativa da fração da ocupação por indivíduos na área em questão, durante o período de operação da instalação. É o fator pelo qual a carga de trabalho deve ser multiplicada para corrigir o grau ou tipo de ocupação da área considerada. Esse valor deve ser considerado tomando por base o grau de ocupação médio durante um ano. A Tabela 3.4 mostra os valores propostos pelo NCRP 147 (NATIONAL COUNCIL, 2004) para fatores de ocupação típicos, considerando diferentes áreas ocupadas.

Tabela 3.4: Fatores de ocupação definidos pela NCRP 147 (2004) para diferentes tipos de ocupação.

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 fatores de ocupação (T) foram introduzidos nos cálculos de radioproteção com a função de ponderar a quantidade de radiação que alcança uma determinada área pela fração média do tempo que um indivíduo possa ocupar esta área. O fator de ocupação, contudo, não é a fração do tempo em que a área em questão é ocupada por qualquer pessoa, mas sim a fração do tempo em que o indivíduo que permanece mais naquela região, fica realmente lá.

Com isso, os níveis de radiação que uma área parcialmente ocupada pode receber poderão ser superiores aos níveis a que uma área totalmente ocupada possa estar submetida. Este conceito considera que o funcionamento do equipamento radiológico é distribuído aleatoriamente no tempo e o fator de ocupação será dado como uma fração de um período normal de trabalho, ponderado sobre todo o ano (COSTA, 1999).

Fator de uso (U)

É um fator que indica a porcentagem da carga de trabalho semanal para uma determinada direção de feixe primário de raios X.

A Tabela 3.5 apresenta os valores do fator de uso segundo o NCRP 147 (2004).

Tabela 3.5: Fatores de uso sugeridos para o cálculo de barreira primária.

Barreira	Aplicação	Fator de Uso (U)
Piso	Sala de radiação (pisos e outras barreiras)	1
Oposto a mesa da parede	Sala de radiação (pisos e outras barreiras)	0,09
Receptor de imagem de tórax	Sala de radiação (buck de tórax)	1

Feixe útil

É a parte aproveitável da radiação primária que passa pela abertura da câmara, de um cone localizador ou de outro meio limitador.

O feixe de radiação primária colimado é chamado de feixe útil. Qualquer estrutura construída, para qual seja apontado o feixe útil, é chamada de barreira de proteção primária. A distância do alvo do tubo de raios X a barreira primária é "dp". Paredes, pisos e forros que somente interceptam radiação espalhada do paciente ou radiação de vazamento do invólucro da fonte são chamados barreiras de proteção secundária. O paciente, que age como meio espalhador, está a uma distância de "de" fonte. A figura 3.10 mostra a disposição e as definições apresentadas acima (BARROS, 2001).

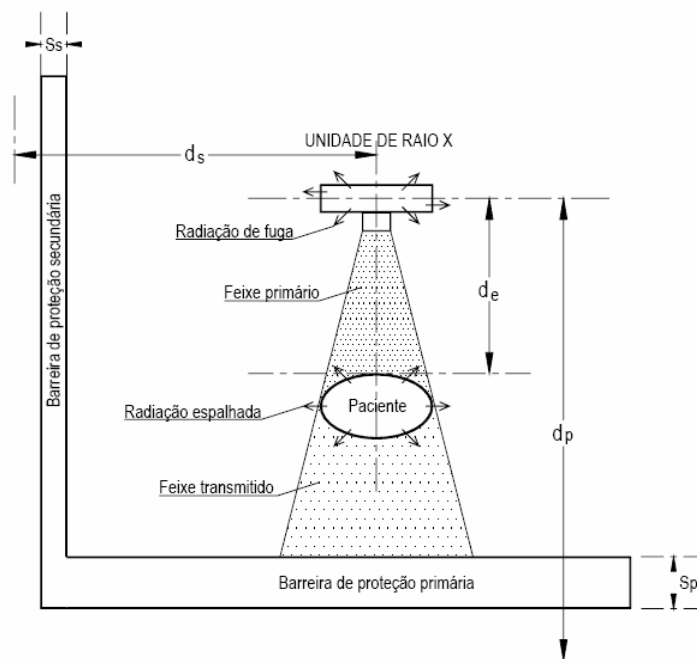


Figura 3.10: Geometria utilizada nas equações derivadas para o cálculo das espessuras das barreiras de proteção utilizada pelo NCRP 147/2004.²
 Fonte: Adaptada de Barros (2001, p.39).

3.9.3 Limites autorizados e classificação de áreas

Segundo o INCA (BRASIL, 2000), as blindagens de fontes de radiação e as dimensões da instalação devem ser tais que estejam em conformidade com os limites autorizados pela CNEN e com o princípio da otimização. Os projetos devem assegurar que as blindagens ofereçam radioproteção adequada, calculando-se inicialmente as barreiras para os limites primários de dose equivalente efetiva e , e em seguida, os valores obtidos segundo o processo de otimização. As áreas onde são utilizadas radiações ionizantes, bem como sua circunvizinhança, devem ser classificadas em restritas (exclusiva para trabalhadores) ou livres (indivíduos do público).

Os limites de dose equivalente efetiva anual a serem usados são:

- a) para trabalhadores: 50 mSv/ano;
- b) para indivíduos do público: 1 mSv/ano (BRASIL, 2000).

² Considera-se a barreira primária de proteção de espessura S_p , a uma distância d_p , perpendicular ao eixo central do feixe primário, e a barreira secundária de proteção de espessura S_s , a uma distância d_s do ponto focal do tubo de raios X na direção do eixo do feixe primário. Considera-se, ainda, um objeto espalhador, paciente, posicionado a uma distância d_e do ponto focal do tubo de raios X na direção do feixe primário.

Os valores dos níveis de restrição de doses efetivas fornecidas pelo NCRP 147 (2004) e de equivalente de dose ambiente fornecido pela Portaria n°453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998) são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Comparação dos níveis de restrição de doses efetivas fornecidas pelo NCRP n°147 (2004) e de equivalente de dose ambiente fornecidas pela Portaria n° 453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998) para áreas controladas e áreas livres.

Classificação das áreas	NCRP n°147	Portaria n°453
Áreas controladas	0,1 mGy/semana	0,1 mSv/semana
Áreas livres	0,02 mGy/semana	0,01 mSv/semana

Para cada ponto e parede deve-se apresentar as espessuras mínimas de blindagem para feixe primário, para fuga pelo cabeçote e para espalhamento. Para a porta deve-se descrever o material de blindagem e levar em conta os múltiplos espalhamentos no paciente e nas superfícies da sala. Descrever os diversos espalhamentos e determinar corretamente seu número, distância de cada um e percentual de atenuação para incidência angular.

Para o teto, utilizar o mesmo procedimento empregado nas paredes. Geralmente o pavimento superior é área livre e a taxa de ocupação dependerá dos fins a que se destina. Aqui, deve-se calcular também a blindagem necessária para atenuar o feixe em regiões não diretamente sobre a sala do equipamento.

Geralmente as salas blindadas são localizadas no andar térreo, sendo desnecessário calcular blindagem do piso. Caso haja pavimento abaixo da sala de tratamento, os cálculos são semelhantes aos de blindagem de parede e teto. Dois tipos de barreiras são consideradas: primárias e secundárias. A barreira primária é aquela irradiada pelo feixe útil e a secundária recebe somente radiação transmitida pela blindagem da máquina (fuga) e/ou espalhada pelo paciente e pelas superfícies da sala de tratamento.

A radiação primária é limitada em direção pela colocação da máquina na sala e pelo campo máximo de radiação, que ditarão quais porções das paredes, teto e piso serão blindagens primárias. Radiação secundária é emitida em todas as direções e cobre todas as superfícies da sala de tratamento, inclusive o labirinto, se houver, e a porta.

A transmissão pela barreira primária necessária para reduzir a intensidade do feixe ao limite autorizado em áreas externas (B_p) é dada por:

$$B_p = (x_{barreira} + x_{pré}) = (PT)(dp^2 / Kp^1UN) , \quad (3.11)$$

onde P é o limite autorizado derivado semanal para regiões externas; dp é a distância em metros entre o alvo ou fonte até o ponto protegido; U é o fator de uso e T o fator ocupacional. Depois de (B_p) , determinamos a espessura necessária para atender o limite autorizado baseados no tipo do material empregado na blindagem (BRASIL, 2000).

Para barreiras secundárias o fator de uso é sempre igual a um ($U=1$) e tanto a fuga pelo cabeçote quanto a radiação espalhada devem ser consideradas.

$$B_{sec} = (x_{barreira}) = P / K_{sec} , \quad (3.12)$$

3.9.4 Labirinto convencional

A construção de um labirinto em salas de radioterapia é recomendada para diminuir a intensidade de radiação que chega na entrada da sala de tratamento, tornando desnecessária a instalação de uma porta muito pesada. A radiação que atinge a região da porta no labirinto é proveniente tanto do espalhamento no paciente e nas superfícies da sala, quanto da penetração direta de radiação pela parede do labirinto. A região da porta deve estar fora do feixe primário, para evitar que a parede do labirinto tenha que ser muito espessa, e a porta muito pesada. Assim sendo, a radiação que passa diretamente pela parede do labirinto será a de fuga pelo cabeçote (que ditará a espessura dessa parede) e a espalhada pelo paciente ou superfícies da sala. (BRASIL, 2000).

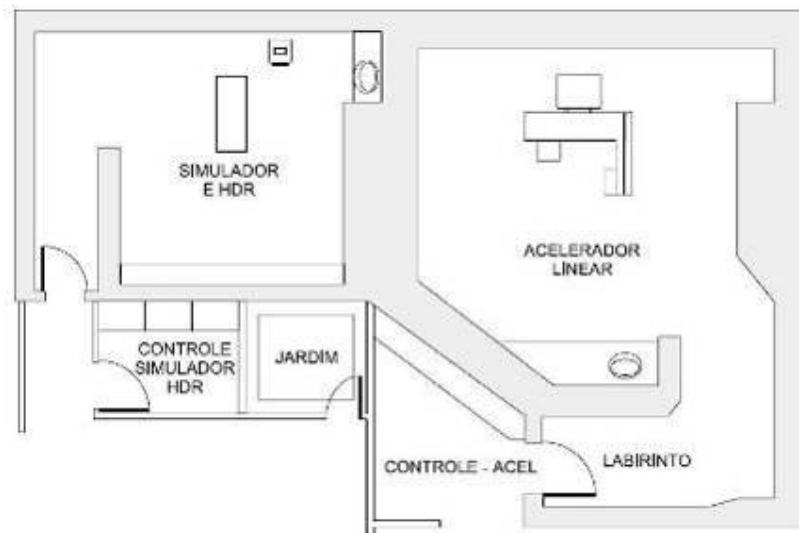


Figura 3.11: Ilustração da planta baixa sem escala de um labirinto.
Fonte: Adaptada Instituto Nacional de Câncer (BRASIL, 2000, p.33).

3.9.5 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 (FRIMAIO, 2006).

3.9.5.1 Modelo para cálculo de blindagem (NCRP nº147/2004)

Com o avanço da tecnologia de equipamentos radiológicos com características técnicas mais eficientes, têm sido desenvolvidos no sentido de reduzir a exposição desnecessária à radiação, como, 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).

Para o cálculo da barreira são definidos alguns fatores que são: o número **N** de pacientes esperados para exame por semana ($N=125$), o fator de ocupação **T** para uma determinada área, 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), a distância entre fonte de radiação e o indivíduo a ser protegido **d** (m), e o fator de uso **U**.

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 do NCRP 147 (2004), que visam otimizar a quantidade de blindagem necessária para proteger áreas controladas ou não controladas, de forma a minimizar o custo da blindagem.

3.9.5.2 Modelo de Archer

Archer, Thornby e Bushong (1983) introduziram um modelo matemático que traz grande simplificação à formulação apresentada no NCRP 49 (NATIONAL COUNCIL, 1976), 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 147 (NATIONAL COUNCIL, 2004) 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:

$$B = I / I_0 [(1 + \beta / \alpha) e^{\alpha \beta \gamma} - \beta / \alpha]^{-1/\gamma}, \quad (3.13)$$

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;

I₀ 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 (NATIONAL COUNCIL, 1976) com referência às cargas de trabalho foi publicado por Simpkin (1996). A metodologia aplicada pelo NCRP 49 (NATIONAL COUNCIL, 1976) não leva em conta a variação da forma espectral quando o feixe de radiação atravessa o material protetor. Costa (1999) 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.

3.9.6 Materiais de Blindagem

Diversos materiais podem ser utilizados em blindagem contanto que seja empregada a espessura suficiente para atenuar a intensidade da radiação aos limites autorizados. As características principais dos materiais a serem consideradas são:

- área (espaço físico) para a instalação;
- espessura e peso da barreira;
- uso múltiplo (blindagem e estrutura);

- blindagem de vários tipos de radiação;
- uniformidade e homogeneidade;
- estabilidade;
- custo da construção;
- acabamento, limpeza e conservação.

Atualmente podem ser empregados os seguintes materiais para blindagem de radiação ionizante:

3.9.6.1 Concreto

O concreto comum tem a vantagem do baixo custo e da facilidade de construção. Embora as blindagens em concreto sejam bastante espessas, devido ao número atômico e densidade relativamente baixos, ele é o material de escolha quando o espaço não é problema. A concretagem exige armação de ferragem para aumentar a resistência, e fôrmas para contenção da massa fluida. Sempre que possível ela deve ser feita de forma contínua e vibratória para evitar fendas e espaços vazios. A dosagem do concreto fresco deve ser cuidadosa e corpos-de-prova devem assegurar a necessária densidade, resistência à compressão e à tração e propriedades elásticas. O controle de temperatura é essencial para evitar perda rápida de água.

Como as espessuras são baseadas em concreto comum de $2,35 \text{ g/cm}^3$, qualquer variação na densidade do concreto usado acarreta um ajuste na espessura calculada que, se não for muito grande, pode ser feito baseado na razão entre as densidades. Concreto de alta densidade pode ser usado quando o espaço é limitado. Entretanto, seu custo relativamente alto e a falta de curvas de atenuação apropriadas contra-indicam sua utilização de rotina.

O uso da relação de densidades na correção da espessura superestima a espessura necessária. Caso seja indicado o uso do concreto de alta densidade, deve-se medir ou obter as curvas de atenuação para a energia empregada e usá-las na determinação das espessuras de blindagem.

3.9.6.2 Aço e chumbo

Aço de baixo teor de carbono apresenta características favoráveis de blindagem e, devido à resistência, pode também ser usado como componente estrutural. Placas de aço

podem ser usadas complementarmente ao concreto quando o espaço está à prêmio e, também, como marco e blindagem de portas, e, ainda, como preenchimento de recessos nas paredes. Chumbo só é aconselhado como blindagem nas portas. Embora esse material seja denso, lençóis ou lâminas de chumbo são difíceis de manusear, possuem baixa resistência e são muito caros.

As mantas de chumbo utilizadas na proteção radiológica devem ser feitas com o elemento puro, sem impurezas. Elas são laminadas na espessura necessária para proteção das paredes e portas de acordo com a orientação do projeto de radioproteção específico da sala. A espessura necessária é determinada em função de vários fatores entre eles o tipo de equipamento, a ocupação das áreas adjacentes, a quantidade de exames realizados e outros. (VERÇOSA, 1985).

3.9.6.3 Argamassa Baritada

A argamassa é um composto de areia, cimento e aglomerante, destinada a regularizar ou preencher uma superfície qualquer na construção civil. A argamassa baritada é um composto que por ter agregado um minério de alta densidade “barita” ou sulfato de bário hidratado (BaSO_4) que presta-se à proteção radiológica. A sua alta densidade resultante, se comparada à densidade de uma argamassa tradicional, absorve mais radiação (cerca de $3,2 \text{ g/cm}^3$). É utilizada em diversas áreas: médica, veterinária, odontológica e industrial (Raios X, tomografia, mamografia, medicina nuclear, radioterapia, etc.). A aplicação é manual e não se pode garantir a homogeneidade nem a espessura em todas as paredes. (GRUPO GRX, 2008).

3.9.6.4 Materiais cerâmicos

Estudos com tijolos cerâmicos maciços apresentaram equivalência a 1,63 mm de chumbo, provocando uma redução nos custos da proteção, conforme mostrado por Barros (2001).

O comportamento de placas cerâmicas de grês branco como atenuador da radiação X foi investigado por Frimaio (2006) que obteve resultados satisfatórios de atenuação à radiação X, levando em conta as energias utilizadas em raio X diagnóstico de 80, 100 e 150 kVp.

3.10 BARITA – MATÉRIA-PRIMA PARA BLINDAGEM DE RADIAÇÃO X

Diante da grande utilização dos materiais cerâmicos no mercado devido as suas inúmeras vantagens, descritas em capítulos anteriores, obteve-se a idéia de incorporar o mineral barita na formulação de massa cerâmica para produção de um bloco baritado. A seguir são descritas as características da barita.

Atualmente, a barita é explorada em 66 países, sendo a China (3,5 Mt), a Índia (0,9 Mt) e os EUA (0,4 Mt) os maiores produtores e, também, os detentores das maiores reservas (SEARLS, 2004). Em termos mundiais, cerca de 90% da barita produzida destina-se ao uso de perfuração de poços de petróleo, e parte significativa dos 10% restantes destina-se à manufatura de carbonato de bário para a fabricação de vidros de TV (GRIFFITHS, 1995; HARBEN, 2002). No Brasil, o perfil típico de consumo da barita tem a seguinte distribuição: indústria química 50%; indústria petrolífera 35%; outros (tinta, papéis, borracha, vidros, abrasivos etc.) 15% (DUTRA, 2006).

No ano de 2003, a produção nacional de barita bruta foi de 68 mil toneladas, representando apenas 1% da produção mundial. O estado da Bahia foi responsável por 96% da produção nacional e por 85% da oferta de produtos beneficiados.

As principais empresas produtoras de barita no Brasil são: a Química Geral do Nordeste S/A (QGN), controlada pelo Grupo Carbonor/Church & Dwight Co., com unidade industrial instalada em Feira de Santana; Baroid Pigmina Comercial e Industrial Ltda., controlada pela Halliburton Ltda., instalada na Ilha Grande, município de Camamu; e Mamoré Mineração Ltda., controlada pelo Grupo Paranapanema, com jazida em Seabra e unidade de moagem em Maiquinique (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2001).

Foram cadastrados 11 (onze) ocorrências de barita em municípios do Estado do Rio Grande do Norte, sendo seis encaixadas em ortognaises e cinco em quartzitos, distribuídos em municípios de Caicó, Cerro Cora, Equador, Lages, Ouro Branco, Parelhas, Pedro Avelino e São Rafael. Estas ocorrências enquadram-se em depósitos do tipo hidrotermais filoneanos. Tratando-se de depósitos no contexto geológico, foi realizada uma estimativa de recurso econômico total de ordem de 218.400 toneladas de minério de barita com teor de 81,20% de BaSO₄ e densidade média de 4,22 t/m³. (NESI, 1999).

3.10.1 Mineralogia

Apresenta-se mais freqüentemente como mineral incolor, branco leitoso ou cinza, podendo ter outras cores dependendo das impurezas presentes na rede cristalina. A barita tem clivagem prismática, brilho vítreo, cristal transparente a translúcido e índice de refração 1,63. É o mineral mais denso entre os não metálicos (densidade em torno de $4,5 \text{ g/cm}^3$), com dureza variando entre 2,5 e 3,5 na escala de Mohs (VELHO et al., 1998).

A barita, geralmente, ocorre associada a uma grande quantidade de minerais: calcita, dolomita, aragonita, apatita, quartzo, hematita, siderita, vanadinita, cerusita, fluorita, gipsita, anglesita, celestita, calcopirita, pirita, galena e esfalerita, entre outros (VELHO et al., 1998).

3.10.2 Geologia

A barita ocorre em várias regiões do mundo, podendo ser encontrada em rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares. Os depósitos de valor comercial são classificados, geologicamente, em três tipos: camada, veios e depósitos residuais.

Os depósitos em camadas ocorrem em rochas sedimentares e são considerados os de maior importância em termos comerciais, sendo normalmente constituídos de lentes ou horizontes de barita, agrupados. O teor de BaSO_4 é maior no centro das lentes, diminuindo em direção às extremidades. Nos depósitos do tipo veio, geralmente, a barita ocorre em rochas calcárias, associada a sulfetos de chumbo e zinco. Esse tipo de ocorrência costuma apresentar volumes menores de minério se comparados com os do tipo camada. Os veios têm origem hidrotermal, sendo formados a partir da precipitação de sulfato de bário. Por último, tem-se os depósitos residuais encontrados em materiais não consolidados e que são formados pelo intemperismo de materiais preexistentes.

Nesi (1999), agrupou as ocorrências de barita no Rio Grande do Norte adotando critérios essencialmente geológicos em dois grupos; um relacionado com os metamorfitos pré-cambrianos, por sua vez subdivididos em três tipos, baseados em critérios de tipologia litológica das encaixantes (ortognaisse, xistos e quartzitos), e o outro ocorrente no seio das rochas sedimentares fanerozóicos, utilizando as idades das formações mineralizadas.

3.10.3 Usos e Funções

A elevada densidade da barita determina o seu uso em fluidos de perfuração de petróleo e gás e carga para diversos produtos. A barita é relativamente inerte, tem alvura elevada e apresenta baixa absorção de óleo, propriedades que ampliam bastante o seu uso como carga, pigmento e extensor. A considerável capacidade que possui em absorver raios X e Gama possibilita também o seu uso na área médica, em exames de Raios X do sistema digestivo, na fabricação de cimentos especiais usados em *containers* para armazenagem de material radioativo e na fabricação de protetores contra radiações de monitores de computador e tubos de televisão. A relação de usos da barita inclui ainda a indústria têxtil, a fabricação de papel, plásticos, borracha, tintas, pigmentos brancos, vidro, cerâmica, asfalto e em sistemas de freio e embreagem de carros e caminhões entre outros (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2001).

É ainda agente protetor de radiação por possuir as propriedades de densidade (forte empacotamento de elementos pesados atenuando a ação de raios gama), fabricabilidade (é capaz de ser usada como agregado em concretos), durabilidade (não perde ou atenua suas propriedades e nem é suscetível ao quebraamento), transferência de calor (dispersa o calor gerado por radiação).

3.10.4 Propriedades Físicas e Químicas

O mineral barita é um sal de bário de fórmula química simplificada $BaSO_4$, cuja composição média teórica contém 65,7% de monóxido de bário, sendo que o bário elementar participa em média, com 58,8% e o trióxido de enxofre, com 34,3%. possui brilho vítreo, resinoso ou nacarado e sua cor mais comum é branca a cinza clara, quando isenta de impurezas, podendo entretanto variar ao cinza escuro ou rosa, conforme a presença de matéria carbonosa e óxidos de ferro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os materiais selecionados para a realização deste estudo e todo o método experimental utilizado realizar os objetivos propostos. O procedimento experimental foi dividido em três partes. Inicialmente são apresentados os materiais e a metodologia adotada para a caracterização das matérias-primas a serem utilizadas para o estudo. Essa primeira parte foi denominada de ensaios preliminares, onde são descritas as técnicas de caracterização utilizadas para identificação destes materiais. Na segunda parte, descrevem-se os materiais e os métodos tomados para as formulações das massas cerâmicas escolhidas a partir da primeira parte do trabalho. Na terceira e última parte do trabalho é mostrado o procedimento adotado na elaboração de blocos cerâmicos e suas caracterizações com relação a propriedades tecnológicas e medidas de atenuação da radiação X.

4.1 ENSAIOS PRELIMINARES – PARTE I

4.1.1 Matérias-primas empregadas

4.1.1.1 Argila

A argila utilizada é proveniente de uma indústria cerâmica do município de São Gonçalo do Amarante/RN, sendo originária de material intemperizado, transportado pelo Rio Potengi e sedimentado em bacias de inundação nos períodos de enchentes do rio. A argila foi coletada em forma de torrões e submetida a um processo de secagem ao ar livre, seguido de desagregação mecânica em um moinho de bolas. Em seguida, foi submetida ao processo de secagem em uma estufa à temperatura de 110°C por 24 horas, passando posteriormente ao peneiramento até a fração passante em 200 Mesh (74 µm).

4.1.1.2 Baritas

As matérias-primas foram obtidas através de sete ocorrências localizadas em municípios do Estado do Rio Grande do Norte, onde se procurou obter uma amostra representativa que mostrasse uma situação geral com relação aos tipos de matérias-primas utilizadas no Estado. A nomenclatura das amostras foi estabelecida conforme seqüência de coleta durante as visitas as ocorrências, apresentada na Tabela 4.1, a qual apresenta a fazenda que possui ocorrência da matéria-prima, a localização conforme regiões e a nomenclatura adotada.

Tabela 4.1: Nomenclatura da ocorrência e das amostras de baritas adotadas para o trabalho, e sua localização no estado.

Amostra	Fazenda	Nomenclatura	Localização no RN
1	Alive	B ₁	Lajes
2	Jurema	B ₂	Lajes
3	Juazeiro	B ₃	Lajes
4	Cabugi	B ₄	Lajes
5	Nísia Floresta	B ₅	Pedro Avelino
6	Nísia Floresta	B ₆	Pedro Avelino
7	Mundo Novo	B ₇	Pedro Avelino

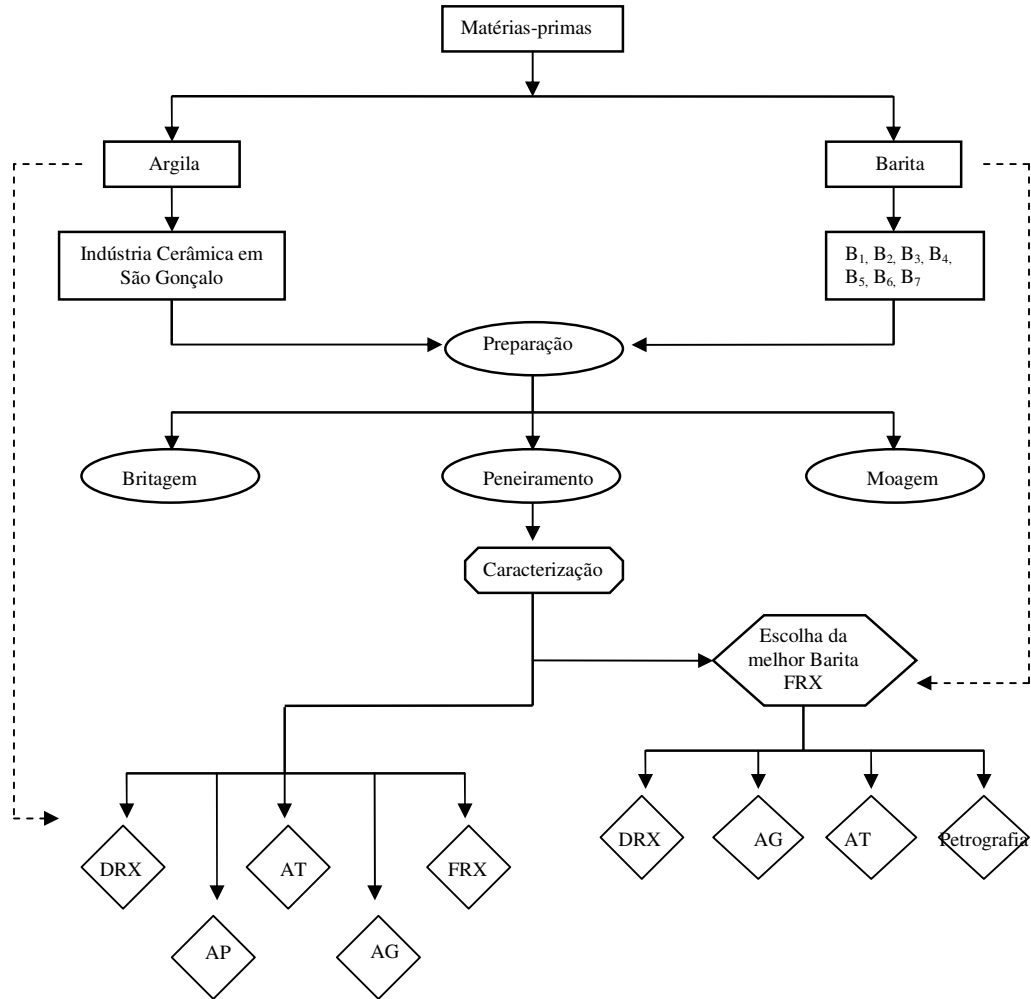


Figura 4.1: Mapa do estado do Rio Grande do Norte mostrando as localidades das matérias-primas minerais selecionadas para o trabalho.

Fonte: <http://www.cultura.gov.br/site/2009/02/12/edital-de-selecao-dos-pontos-de-cultura-do-rio-grande-do-norte/>

4.1.2 Caracterização das matérias-primas

Os ensaios preliminares de caracterização foram realizados nas duas matérias-primas coletadas para o desenvolvimento deste trabalho, de acordo com o esquema da Figura 4.2. Inicialmente as amostras de argila, pertencentes a uma indústria cerâmica, e as baritas, proveniente de sete ocorrências em fazendas, foram coletadas e preparadas seguindo métodos específicos de preparação para cada técnica de caracterização a serem submetidas. Antes das análises, todas as amostras passaram pelo processo de amostragem por quarteamento a fim de se obter uma amostra representativa. Em seguida, foram secas em estufa e acondicionadas para os futuros ensaios de caracterização.



Legenda: DRX = Difração de Raio X/ AP = Análise Plasticidade/ AT = Análise Térmica/ AG = Análise Gravimétrica/ FRX = Fluorescência de Raio X.

Figura 4.2: Esquema do procedimento experimental Parte I do trabalho.

A seguir são descritas as técnicas de caracterização utilizadas neste trabalho com ênfase na importância e no objetivo de cada análise, nos equipamentos utilizados, na preparação da amostra e no tipo de resultado gerado.

4.1.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica (AG) foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais da UFRN, com o objetivo principal de quantificar as matérias-primas e classificá-las de acordo com a faixa granulométrica em: argila, silte e areia, segundo norma, NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 1995). Em se tratando de materiais argilosos e considerando que a granulometria influencia no processamento e nas propriedades finais do material, esta técnica é de fundamental importância para uma completa e precisa caracterização da matéria-prima argila.

As amostras a serem analisadas foram preparadas partindo-se de 2 g da matéria-prima e adição de 2 ml de detergente neutro, diluídos em 10 ml de água destilada. Nesta análise, foi utilizado um granulômetro a Laser (920L, Cilas) acoplado a um sistema de ultra-som com função de dispersar as partículas argilosas.

O resultado da análise foi fornecido pelo software The Particle Expert. O equipamento fornece os diâmetros correspondentes das partículas do fluxo retido nas frações de interesse (por exemplo, 10 %, 50 % e 90 %), como também o diâmetro médio (D_M) e as curvas de distribuição granulométrica das partículas.

4.1.2.2 Avaliação da plasticidade

No processamento de materiais cerâmicos, a plasticidade é uma propriedade fundamental já que ela define os parâmetros técnicos necessários para converter, mediante aplicação de pressão, uma massa de partículas em um componente com uma dada geometria (DUTRA, 2007).

De maneira geral, dentre os principais métodos para determinação da plasticidade, destacam-se o índice de plasticidade de Atterberg, o índice de plasticidade de Pfefferkorn, e as curvas tensão/deformação. (FLORES, 2006).

De acordo com Barba (1997), o método de Atterberg, devido a sua simplicidade e sua sensibilidade, é o método mais adequado para caracterização de materiais argilosos. Por isso, foi o método escolhido para determinação da avaliação da plasticidade da matéria-prima argilosa deste trabalho, além de ser um método direto e muito utilizado para o tipo de material em estudo.

O limite de Atterberg foi determinado a partir do limite de liquidez NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) e do limite de plasticidade NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) os quais compõem o índice de plasticidade (IP) da amostra.

A preparação da amostra para este ensaio, os equipamentos utilizados e as condições de ensaio foram seguidos de acordo com as Normas Técnicas citadas

anteriormente. Com o resultado do índice de plasticidade é possível saber se a matéria-prima possui mais ou menos quantidade de materiais argilosos, como também fazer uma relação com outras propriedades da matéria-prima como, por exemplo, a granulometria.

4.1.2.3 Análise química por fluorescência de raios X

A determinação da composição química dos materiais argilosos é de grande importância para a caracterização desse tipo de material. Essa análise raramente serve para caracterizar o material se não vier acompanhado de alguns dados físicos ou sem conhecer as espécies mineralógicas que contém as matérias-primas. No entanto, com os resultados da análise química e da difração de raios X é possível indicar e quantificar os minerais argilosos e os minerais acessórios presentes em uma argila.

Por ser uma técnica instrumental muito reproduzível, rápida e precisa, a fluorescência de raios X (FRX) é o método mais usual para determinação da composição química dos materiais (BARBA, 1997).

Neste trabalho, as amostras em estudo antes de serem analisadas foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,074 mm, correspondendo à peneira nº200 da ABNT, e secas em estufa (110 °C) por 24 h.

Nesta análise, foi utilizado um espectrômetro por fluorescência de raios X (EDX-700, Shimadzu) em uma atmosfera a vácuo, empregando o método semi-quantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras. O resultado em forma de óxidos limita-se na identificação dos elementos químicos da Tabela Periódica.

4.1.2.4 Análise mineralógica por difração de raio X

A composição mineralógica e especialmente da fração argila é de grande importância no entendimento das propriedades tecnológicas de produtos cerâmicos de base argilosa, bem como na otimização dos ciclos de queima para produção de materiais de qualidade e com processamento adequado (DUTRA, 2007).

A difração de raios X (DRX) é o método mais abrangente para determinar a mineralogia das matérias-primas devido não só à possibilidade da identificação das espécies minerais presentes, mas também por permitir estudar as características

cristalográficas desses minerais (BARBA, 1997), e com o uso de software específico quantificar cada espécie mineral. Além disso, é possível analisar a microestrutura dos materiais por meio de informações sobre orientação e tamanho dos cristais, parâmetros de rede, tensões internas, identificação de fases, entre outras possibilidades (BOWEN, 1975).

As amostras a serem estudadas por DRX foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,074 mm, secas e analisadas em um difratômetro de raios X (XRD-6000, Shimadzu) localizado no Laboratório de Metrologia do Centro de Tecnologia do Gás, utilizando-se as seguintes condições: radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de 2 ° a 60 °. Os resultados gerados, representados pelas fases mineralógicas das amostras, foram analisados por comparação entre os picos gerados com as cartas padrões do software JCPDF cadastradas no ICDD (Internacional Centre for Diffraction Data).

4.1.2.5 Análise Térmica

A análise térmica é muito utilizada na complementação dos ensaios de caracterização. As principais técnicas termoanalíticas utilizadas em materiais são: Análise Termogravimétrica (ATG) e Análise Térmica Diferencial (ATD).

A ATD revela mudanças de energia que ocorrem em material durante o seu aquecimento ou arrefecimento, resultantes de quatro causas principais: transições de fase, decomposições no estado sólido, reações com um gás ativo como o oxigênio e transições de 2º ordem (mudança de entropia sem mudança de entalpia).

Na ATG, a curva termogravimétrica revela as modificações de peso que ocorrem durante o aquecimento de um material e que podem ter duas causas: decomposição ou oxidação. A ATG fornece informações mais restritas que a ATD, no entanto, para análises quantitativas de certas substâncias as informações obtidas podem ser mais precisas.

As curvas ATD das amostras foram obtidas por meio de um analisador Termodiferencial (ATD-50H, Shimadzu), localizado no Laboratório de Metrologia do Centro de Tecnologia do Gás, utilizando-se as seguintes condições: amostras com granulometria inferior a 200 Mesh (ABNT n°200, 0,074 mm) totalizando-se,

aproximadamente, 15 mg, sob fluxo de ar sintético de 50 ml/min, taxa de aquecimento de 10 °C/min e temperatura final de 1000 °C.

As curvas termogravimétricas foram obtidas utilizando um analisador termogravimétrico (ATG-50, Shimadzu), localizado no Laboratório de Metrologia do Centro de Tecnologia do Gás, em atmosfera a ar e taxa de aquecimento de 10 °C/min. As amostras foram preparadas na granulometria inferior a 200 mesh (ABNT n°200, 0,074 mm).

4.1.2.6 Petrografia

Seções delgadas (espessura de 30 µm) foram preparadas a partir de amostras de mão do mineral barita, no Departamento de Geologia da UFRN, objetivando a análise e descrição das propriedades óticas dos minerais constituintes ao microscópio Olympus BX-51 de luz transmitida.

A seção delgada de barita foi confeccionada conforme descrito a seguir. O material a ser estudado foi primeiro cortado, gerando uma superfície lisa e plana, em seguida a superfície passa, então, por um processo de montagem em lâmina de vidro para microscópio (Figura 4.3). Por último, o material é colocado em um suporte que fixa a lâmina em paralelo ao corte da serra. O material sobre a lâmina foi cortado a 0,06 mm. A lâmina é então colocada sobre um suporte e, de maneira suave, granulada pelas bordas até atingir 0,03 mm de espessura (Figura 4.4), por fim, uma cobertura de vidro é fixada com bálsamo transparente na parte superior da lâmina (KERR, 1961).

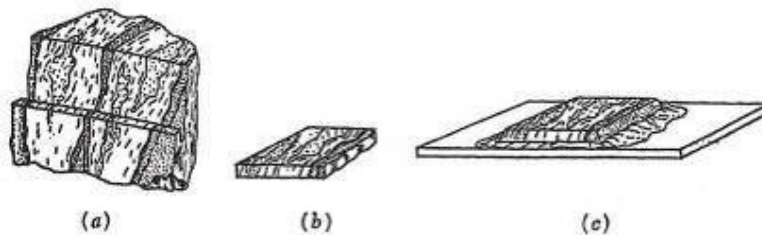


Figura 4.3: Petrografia mineral. (a) Uma rocha selecionada para uma seção fina e cortada para obter uma peça. (b) Uma peça cortada de dimensões adequadas para uma seção delgada. (c) Material montado sobre uma fatia de vidro.

Fonte: Adaptada de Kerr (1961, p.4)

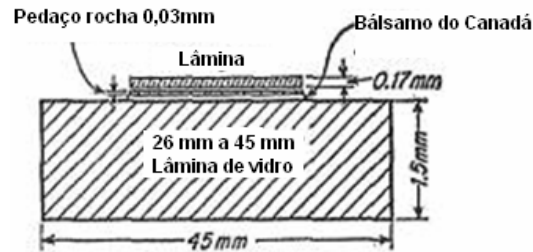


Figura 4.4: Seção transversal da montagem em uma fatia de rocha (escala vertical exagerada).

Fonte: Adaptada de Kerr (1961. p.5)

4.2 FORMULAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS - PARTE II

4.2.1 Materiais

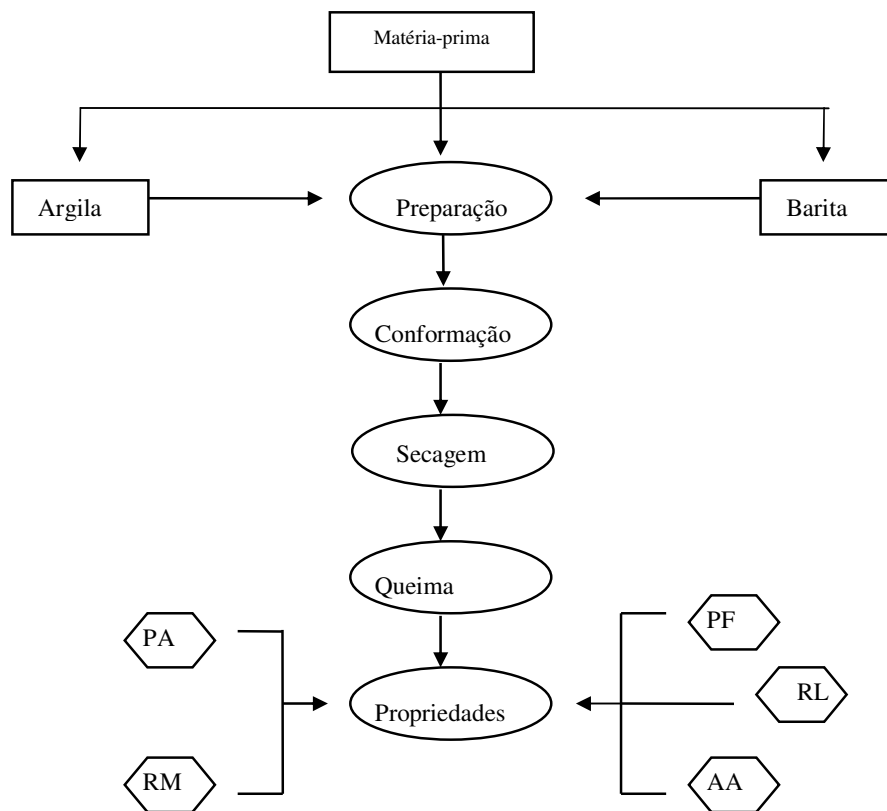
As formulações das matérias-primas foram desenvolvidas utilizando-se a argila da indústria cerâmica relacionada anteriormente, com a barita cujas características foram determinadas na Parte I. Apesar da barita de número 03, ter apresentado a maior teor de bário, comparado às outras ocorrências (Tabela 5.2), foi utilizada ao longo deste trabalho a barita de número 02, pois com as intensas chuvas do ano de 2008, o veio onde existente na ocorrência geológica foi encoberto por camadas de solo e vegetação da região, encontrando-se inacessível.

4.2.2 Métodos

A partir da amostra referencial foram preparadas dez formulações com mistura barita-argila nas proporções indicadas na Tabela 4.2, compactadas em matriz uniaxial, retangular e sinterizadas em forno resistivo nas temperaturas de 950°C, 1.000°C e 1.050°C. As formulações foram processadas de acordo com o procedimento experimental mostrado na Figura 4.5.

Tabela 4.2: Formulações cerâmicas estudadas (% em peso).

NÚMERO	FORMULAÇÕES	MATÉRIAS-PRIMAS (%)	
		ARGILA	BARITA
Referência	100A	100	0
F ₁	90A-10B	90	10
F ₂	80A-20B	80	20
F ₃	70A-30B	70	30
F ₄	60A-40B	60	40
F ₅	50A-50B	50	50
F ₆	40A-60B	40	60
F ₇	30A-70B	30	70
F ₈	20A-80B	20	80
F ₉	10A-90B	10	90
F ₁₀	100B	0	100



Legenda: PA = Porosidade Aparente/ RM = Resistência Mecânica/ PF = Perda de Massa ao Fogo/ RL = Retração Linear/ AA = Absorção de Água.

Figura 4.5: Esquema do procedimento experimental Parte II do trabalho.

Com esses protótipos foram avaliadas a coesão dos materiais, bem como, a existência de trintas, fissuras, e a coloração da queima. As análises de propriedades tecnológicas serão descritas a seguir.

4.2.3 Caracterização das propriedades tecnológicas

Para caracterização tecnológica por meio dos ensaios físicos e mecânicos, todas as matérias-primas foram processadas separadamente no Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais e Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos da UFRN, obedecendo a seguinte seqüência:

- (i) secagem em estufa elétrica por 24 h para retirada da umidade natural;

- (ii) destorroamento manual utilizando-se almofariz e mão-de-gral;
- (iii) peneiramento em malha passante em abertura de 0,074 mm;
- (iv) adição de 10 % de água a fim de manter a umidade de conformação constante para todas as amostras;
- (v) prensagem uniaxial e de simples efeito (Schulz, PHS 15 t) sob pressão de 25 MPa. Nesta etapa, para cada formulação de matéria-prima foram conformados 10 corpos-de-prova, pesando-se 13 g do material, e utilizando-se de um molde metálico com seção interna de 6 cm x 2 cm;
- (vi) secagem em estufa elétrica com temperatura de 110 °C por 24 h. Após a secagem, os corpos-de-prova foram medidos quanto as suas dimensões e massa, com um paquímetro (150 mm / 0,01 mm) e uma balança (4 kg / 0,01 g), respectivamente.
- (vii) a queima foi realizada em um forno elétrico (EDG, 3P-S) em atmosfera ao ar, obedecendo a variável de 10°C/min;
- (vii) determinação das propriedades físico-mecânicas. Nesta, foram realizados ensaios de retração linear de queima, determinação da perda de massa ao fogo, absorção de água, porosidade aparente e de resistência mecânica sob flexão em três pontos. Para todas as propriedades tecnológicas o resultado final foi obtido a partir de uma média aritmética das medidas obtidas dos corpos-de-prova. Todo procedimento experimental para determinação dessas propriedades tecnológicas é apresentado a seguir, bem como a importância de cada propriedade.

4.2.3.1 Perda de massa ao fogo

Quando um material argiloso é queimado ele sofre transformações químicas e físicas devido às reações que ocorrem nas temperaturas específicas. A perda de massa ao fogo (PF) quantifica quanto de massa o material perdeu em relação à temperatura de queima, sendo determinada pela Equação 4.1. Para determinação da PF foi utilizada uma balança analítica. Todos os resultados foram obtidos da média aritmética de 10 corpos-de-prova.

$$PF(\%) = \frac{M_s - M_q}{M_q} \times 100, \quad (4.1)$$

onde:

M_s = massa do corpo-de-prova seco (após a conformação e secagem), em grama;

M_q = massa do corpo-de-prova queimado, em grama.

4.2.3.2 Retração Linear de queima

A retração linear de queima (RL) foi determinada com base na variação dimensional linear (comprimento) dos corpos-de-prova após queima (Equação 4.2). Neste, utilizou-se um paquímetro, e fez-se a medida do comprimento do corpo-de-prova seco, antes e após a queima nas diferentes temperaturas.

$$RL(\%) = \frac{L_0 - L_f}{L_f} \times 100, \quad (4.2)$$

onde:

L_0 = comprimento do corpo-de-prova seco (antes da queima), em centímetro;

L_f = comprimento do corpo-de-prova queimado, em centímetro.

4.2.3.3 Absorção de água

A absorção de água (AA) foi determinada usando o princípio de Arquimedes em imersão em água (Equação 4.3), de acordo com a norma ABNT, NBR 13818. Para sua realização foi utilizado um tanque de fervura e uma balança digital analítica com resolução de 0,01 g.

$$AA(\%) = \frac{M_u - M_q}{M_q} \times 100, \quad (4.3)$$

onde:

M_u = massa do corpo-de-prova úmido (após retirada do tanque de fervura), em gramas;

M_q = massa do corpo-de-prova queimado (após secagem a 110°C por 24 h), em gramas.

4.2.3.4 Porosidade aparente

A porosidade aparente (PA) foi avaliada através do método de Arquimedes em corpos-de-prova queimados, utilizando-se como fluido de imersão a água na temperatura ambiente.

$$PA(\%) = \frac{M_u - M_q}{M_u - M_i} \times 100, \quad (4.4)$$

onde:

M_u = massa do corpo-de-prova úmido (após retirada do tanque de fervura), em gramas;

M_q = massa do corpo-de-prova queimado (após secagem a 110°C por 24 h), em gramas;

M_i = massa do corpo-de-prova imerso em água, em gramas.

4.2.3.5 Resistência Mecânica

A resistência mecânica (RM) dos corpos-de-prova prensados foi determinada pela tensão ou módulo de ruptura à flexão (MRF) em 3 pontos, utilizando-se uma máquina de ensaios mecânicos da Shimadzu (Autograph AG-25TA, 100KN). O ensaio foi realizado com uma velocidade de 0,5 mm/min e o MRF foi calculado pela Equação 4.5.

$$MRF(MPa) = 3 \frac{CA}{20ab}, \quad (4.5)$$

onde:

C = carga de ruptura, em quilograma-força;

A = distância entre os apoios do suporte, em centímetro;

a = largura do corpo-de-prova, em centímetro;

b = altura do corpo-de-prova, em centímetro.

4.3 ELABORAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS - PARTE III

4.3.1 Materiais

A elaboração do bloco cerâmico foi desenvolvida utilizando a formulação escolhida na parte II do trabalho, que obteve melhores resultados da caracterização das propriedades tecnológicas. Para tanto, utilizou-se a argila da indústria cerâmica, e a barita de número 02.

4.3.2 Métodos

A partir da formulação e da temperatura de queima que apresentou melhor resultado das propriedades tecnológicas, foram preparados trinta e quatro blocos cerâmicos com mistura barita-argila, extrudados em uma maromba e sinterizados em forno Hoffman na temperatura de $800\pm 50^{\circ}\text{C}$. Em seguida, as formulações foram processadas de acordo com a Figura 4.6.

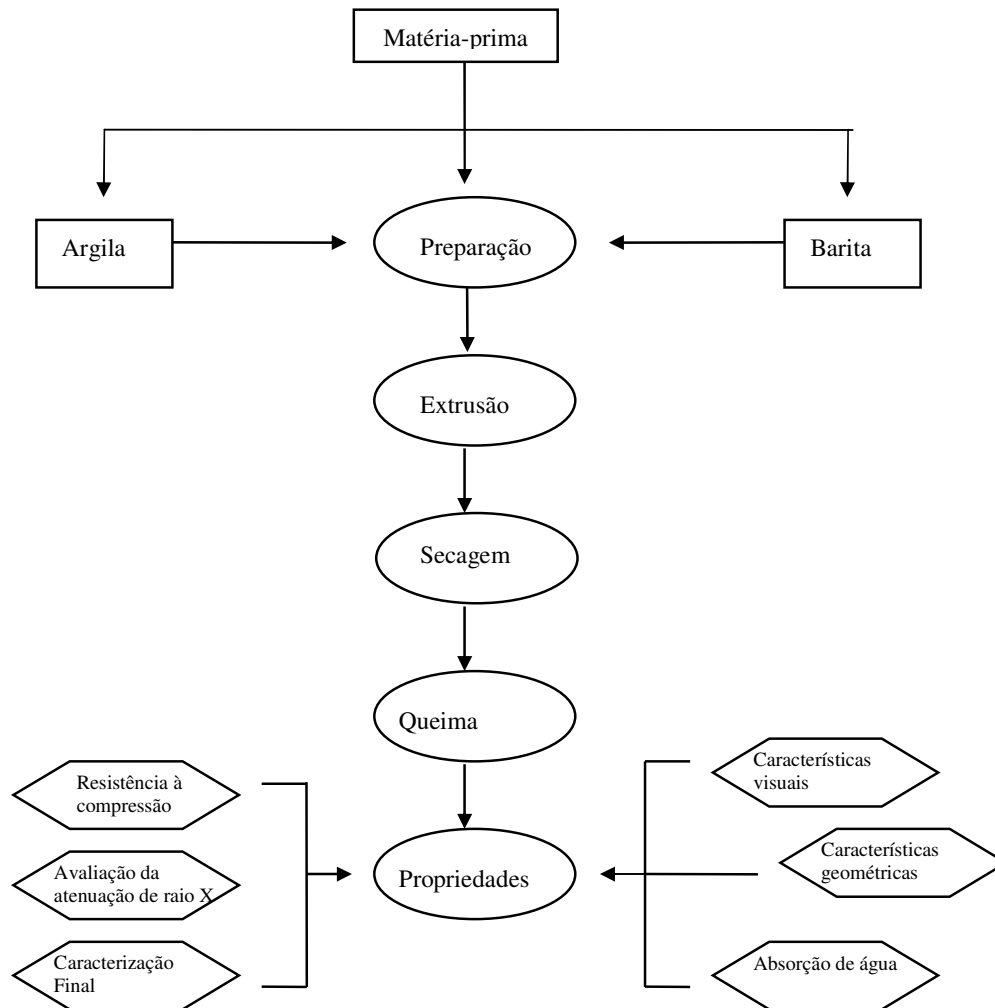


Figura 4.6: Esquema do procedimento experimental Parte III do trabalho.

4.3.3 Caracterização – ensaios tecnológicos

Para caracterização tecnológica por meio dos ensaios físicos e mecânicos, todas as matérias-primas foram processadas separadamente obedecendo a seguinte sequência:

- (i) secagem em estufa elétrica por 24 h para retirada da umidade natural;
- (ii) destorroamento manual utilizando-se moinho de bolas;
- (iii) peneiramento em malha com abertura de 0,18mm;
- (iv) adição de 10 % de água a fim de manter a umidade de conformação constante para todas as amostras;

(v) extrusão utilizando a extrusora da Indústria Cerâmica localizada em São Gonçalo/RN. Nesta etapa, foram fabricados 34 blocos cerâmicos,

(vi) secagem natural por 48 h. A queima foi realizada em um forno tipo Hoffman com combustível a lenha,

(vii) determinação das propriedades físico-mecânicas. Foram realizadas análises de caracterização visual e geométrica, ensaios de absorção de água, resistência à compressão, teste de equivalência de blindagem e, por fim, caracterização final do material. Para todas as propriedades tecnológicas, o resultado final foi obtido a partir de uma média aritmética dos valores obtidos nas análises dos blocos cerâmicos. Todo procedimento experimental para determinação dessas propriedades tecnológicas é apresentado a seguir, bem como a importância de cada propriedade.

4.3.3.1 ABNT NBR 15270-3 – Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de Ensaio

Esta norma estabelece os métodos para execução dos ensaios dos blocos cerâmicos estruturais e de vedação. Para a realização dos ensaios contidos nesta norma foram utilizados dez corpos-de-prova devidamente identificados.

Características Visuais

Com a identificação de cada corpo-de-prova através de numeração, realiza-se a observação de características visuais dos blocos. No referido trabalho, foram descritas a uniformidade da cor, trincas, fissuras e deformações. O bloco cerâmico de vedação não deve apresentar defeitos sistemáticos, tais como quebras, superfícies irregulares ou deformações que impeçam o seu emprego na função especificada.

Características geométricas

As características geométricas do bloco cerâmico de vedação são as seguintes:

- a) Medidas das faces – dimensões efetivas:

Os blocos devem ser colocados sobre uma superfície plana e indeformável, onde através de uma régua metálica com sensibilidade mínima de 0,05mm devem ser medidos os valores da largura (L), altura (H) e comprimento (C), de acordo com os pontos indicados na figura 4.7.

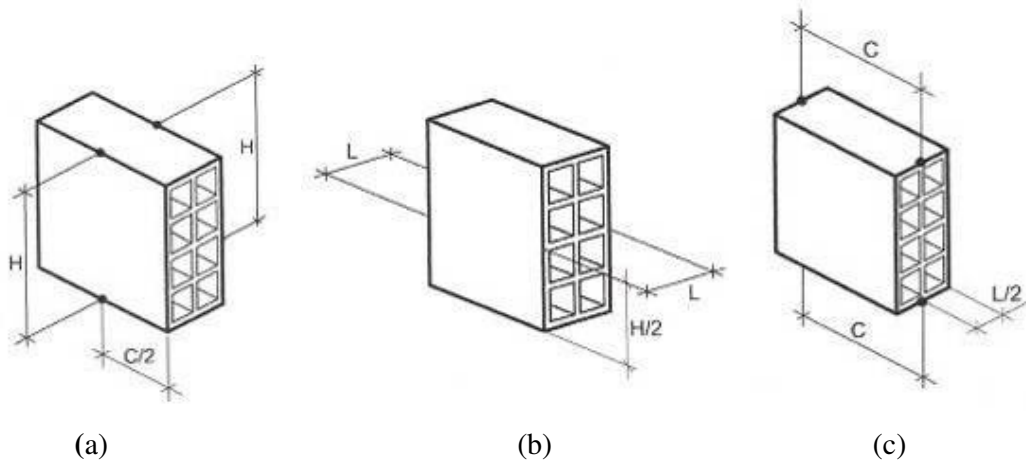


Figura 4.7: Pontos indicados para medições das características geométricas blocos cerâmicos. Medidas da: (a) altura - H (b) largura - L e (c) comprimento - C.

Fonte: Adaptado NBR 15270-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p.8).

As tolerâncias dimensionais relacionados à média das medições dimensionais são as indicadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tolerâncias dimensionais relacionadas à média das dimensões efetivas

Grandezas controladas	Tolerância individual (mm)
Largura (L)	
Altura (H)	± 3
Comprimento (C)	

b) Espessura das paredes externas e dos septos e dos blocos:

As espessuras das paredes externas devem ser medidas no mínimo nos pontos indicados na figura 4.8, buscando o ponto onde a parede apresenta a menor espessura. As medições das espessuras dos septos devem ser obtidas na região central destes, utilizando no mínimo quatro medições, buscando os septos de menor espessura.



Figura 4.8: Posições esquemáticas para as medições da espessura das paredes externas e septos.

Fonte: Adaptado NBR 15270-3, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p.9).

A espessura dos septos dos blocos cerâmicos de vedação deve ser no mínimo 6mm e das paredes externas no mínimo 7mm.

c) Desvio em relação ao esquadro (D):

Deve-se medir o desvio em relação ao esquadro entre umas das faces destinadas ao assentamento e a maior face destinada ao revestimento do bloco, conforme a figura 4.9, empregando-se o esquadro metálico e a régua metálica. O desvio com relação ao esquadro deve ser no máximo 3mm.

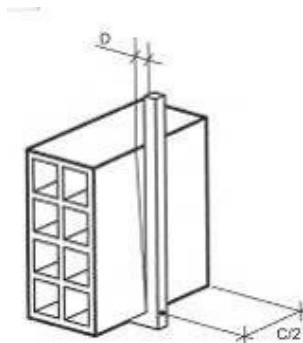


Figura 4.9: Desvio em relação ao esquadro (D) – Representação esquemática.

Fonte: Adaptado NBR 15270-3, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p.9).

d) Planeza das faces (F):

Deve-se determinar a planeza de uma das faces destinadas ao revestimento através da flecha formada na diagonal, conforme a figura 4.10, empregando-se o esquadro metálico e a régua metálica. A flecha deve ser no máximo 3mm.

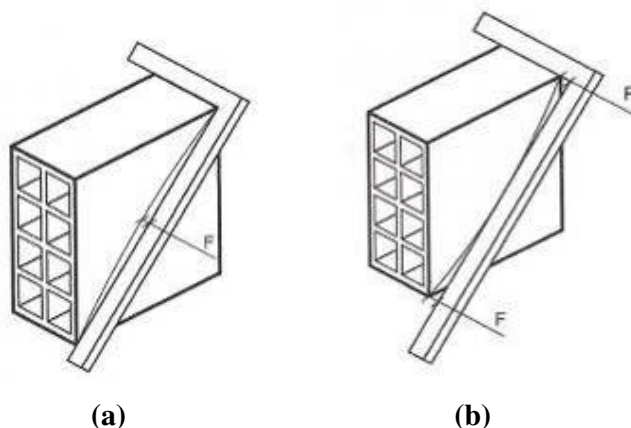


Figura 4.10: Planeza das faces – Representação esquemática. (a) desvio côncavo e (b) desvio convexo.

Fonte: Adaptado de NBR 15270-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p.10).

Índice de Absorção d'água (AA)

Os corpos-de-prova devem ser recebidos, identificados, limpos, ter as rebarbas retiradas e colocados em ambiente protegido que preserve suas características originais. Após essa etapa, colocam-se todos os corpos-de-prova dentro de uma estufa (105 ± 5)° C por aproximadamente 24 (vinte e quatro) horas e, passado o referido tempo, pesa-os numa balança, em intervalos de 1h, até que duas pesagens consecutivas de cada um deles difiram em no máximo 0,25%. Com isso, obtem-se a massa do tijolo seco (M_s) em gramas.

Quando os corpos-de-prova estiverem na temperatura ambiente, colocam-os em um recipiente com água e deixa-os fervendo por 2 (duas) horas, mantendo-os sempre cobertos pela água. Em seguida, deixa-os esfriar, até chegar à temperatura ambiente. Desta forma, retira-se por meio de um pano úmido o excesso de água da superfície do corpo-de-prova e mede-se a massa saturada (M_h) dos corpos-de-prova em gramas.

Com a massa seca e saturada, calcula-se a absorção de água, que é dada pela seguinte fórmula:

$$AA = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100, \quad (4.6)$$

onde:

AA = absorção de água

M_h = massa do tijolo em estado saturado

M_s = massa do tijolo em estado seco

O índice de absorção d'água não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%.

Resistência à compressão individual

Neste ensaio, a princípio, realiza-se a regularização das faces de trabalho dos corpos-de-prova, devendo ser utilizadas pasta de cimento ou argamassas com resistência superiores às resistências dos blocos na área bruta. Então, cobre-se uma superfície com folhas de papel umedecidas, aplicando-se nesta uma pasta de cimento, e em seguida, coloca-se a face destinada ao assentamento sobre essa pasta (capeamento), exercendo sobre o bloco uma pressão manual suficiente para fazer refluir à pasta interposta, de modo que a espessura não ultrapasse 3 (três) milímetros; logo que a pasta endurece, retira-se com a espátula a rebarba existente.

Em seguida, além disso, ocorre a regularização da face oposta, obtendo assim, um corpo-de-prova com duas faces de trabalho devidamente regularizadas e tanto quanto possível paralelas (Figura 4.11). Após o endurecimento das camadas das pastas, os blocos são imersos em água potável durante 06 (seis) horas.

O corpo-de-prova deve ser colocado na prensa de modo que o seu centro de gravidade esteja no eixo de carga dos pratos da prensa. O ensaio deve proceder de forma que a tensão aplicada calculada em relação à área bruta se eleve progressivamente à razão de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s.

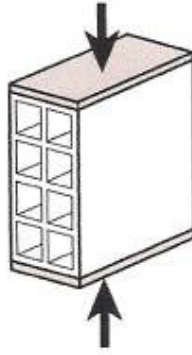


Figura 4.11: Compressão axial do bloco de vedação.

4.3.3.2 Avaliação da atenuação da radiação X

a) Preparo da parede de alvenaria e suporte para transporte

Foram determinadas as quantidades de material para executar uma parede de blocos cerâmicos para vedação, com 9,0 cm de espessura. Após a avaliação do material através do ensaio de especificação, foram utilizados blocos cerâmicos de vedação com dimensões de $193 \pm 0,1 \times 92 \pm 0,1 \times 188 \pm 0,1$ mm. Os valores adotados são a média aritmética dos valores medidos conforme Anexo 01. Para uní-los, foi utilizada uma argamassa pronta, cujas juntas não foram superiores a 1cm de espessura.

A parede foi executada em estrutura metálica sobre rodas para facilitar o transporte para o Laboratório de ensaio, a mesma possui 90cm de largura por 150cm de altura, com espessura de 13cm. A estrutura metálica sobre rodas para realização do ensaio está mostrada na figura 4.12.

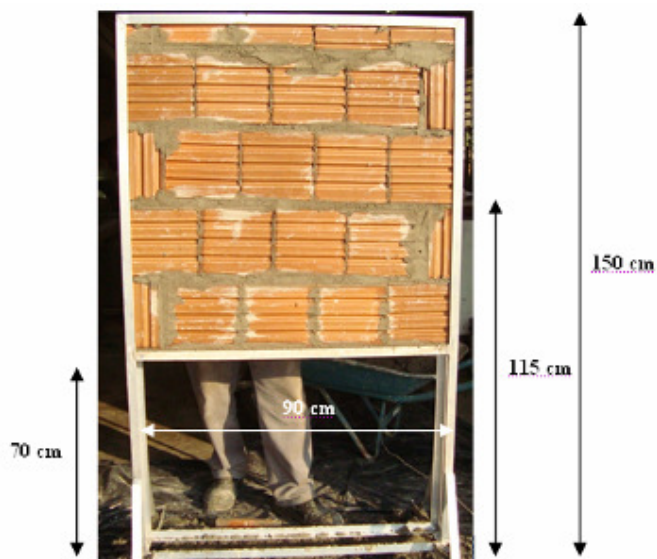


Figura 4.12: Representação e distâncias da estrutura metálica com blocos baritados para posicionamento das paredes de alvenaria para o ensaio de atenuação dos materiais.

b) Posicionamento do arranjo experimental

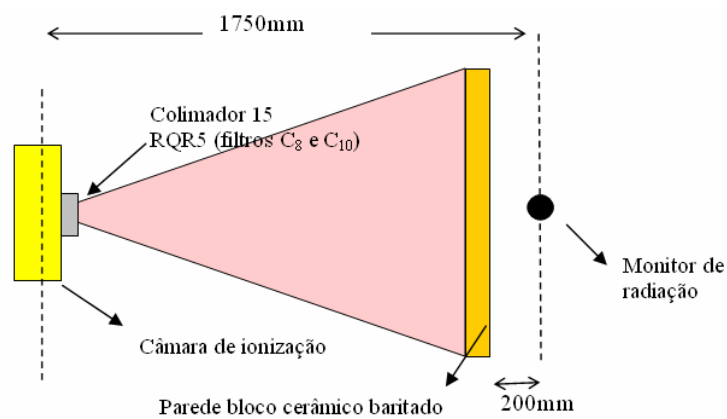
Os ensaios de atenuação dos materiais propostos foram executados no Laboratório da Seção Técnica de Desenvolvimento Tecnológico em Saúde do IEE/USP, credenciado pelo INMETRO, empregando um equipamento de raios X Philips MCN 323 que opera entre 15 kV e 320 kV, foco grosso, corrente de 22,5mA nas tensões de 40 a 150 kV, com filtração adicional de 0,15, 0,25 e 4mmAl, respectivamente, utilizando câmaras de ionização Radcal Corporation 10X5-6, de 6cm³ e monitor de radiação, modelo 9095.

A estrutura metálica contendo os blocos cerâmicos de vedação foi posicionado entre as câmaras de ionização na direção do equipamento radiológico, para obter as medições de atenuação. A figura 4.13 mostra a disposição dos equipamentos montados no Laboratório do IEE-USP para o levantamento dos valores de kerma no ar transmitidos, resultantes das medições para a espessura de parede de alvenaria de blocos cerâmicos de vedação.



Figura 4.13: Arranjo experimental utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.

O arranjo experimental foi configurado colocando-se a parede confeccionada com blocos cerâmicos de vedação previamente assentados sobre a estrutura metálica móvel. As dimensões consideradas para a medida da atenuação foram 10cm de espessura, 90cm de comprimento e 90cm de altura. A figura 4.14 mostra o arranjo experimental com as respectivas distâncias entre os equipamentos e a parede de alvenaria.



(a)

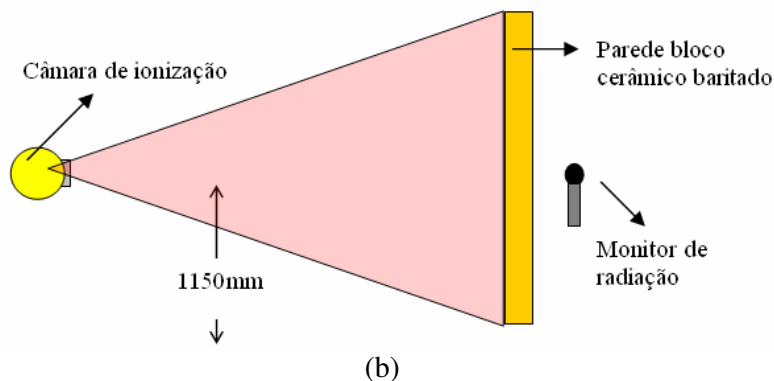


Figura 4.14: Arranjo experimental utilizado para as medições dos fatores de atenuação da parede de alvenaria como material de proteção em função da tensão. (a) Vista superior e (b) Vista frontal. As distâncias utilizadas foram $d_{ref} = 175\text{cm}$ para a distância entre o ponto focal (câmara de ionização) e o monitor de radiação, e a distância o monitor de radiação e a face anterior da parede igual a 20cm.

c) Metodologia para avaliação da atenuação da radiação X

Como não foi possível realizar várias medições com espessuras de parede diferentes, neste trabalho, será apresentada uma comparação dos resultados com a parede de alvenaria, em termos de transmissão (ou atenuação) da radiação para uma dada espessura em folhas de chumbo, com os resultados experimentais, referente a argamassa baritada.

Determinação da equivalência em chumbo

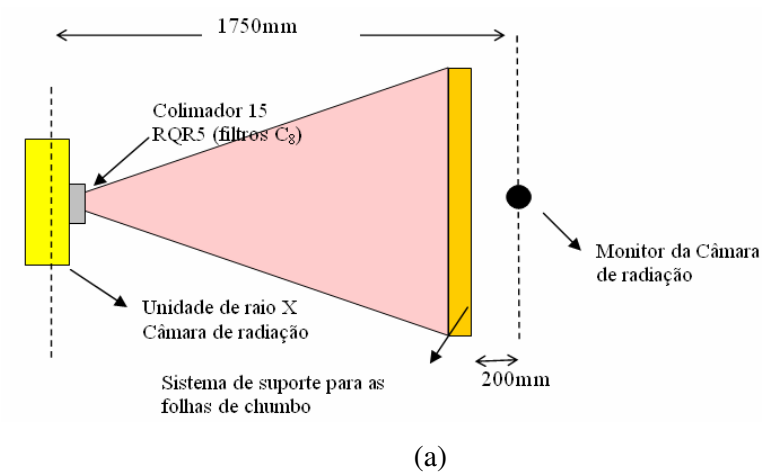
Para determinação da equivalência em chumbo, foi utilizado um equipamento de potencial constante (PHILIPS MGC40) do laboratório da Seção Técnica de Desenvolvimento Tecnológico em Saúde do IEE/USP, uma câmara de ionização de 6cm^3 , da Radical Co., acoplada a um monitor de medição da radiação transmitida modelo 9095, também fabricado pela Radical Co. Foram realizadas cinco medições nas exposições utilizando 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 e 150 kV, com corrente de 22,5mA, durante 30s, usando foco grosso com filtração de 4mm de alumínio (Tabela 5.13), primeiramente com a parede de bloco cerâmico (I - intensidade do feixe de radiação X atenuada por uma espessura de material protetor) e conseguinte sem a

parede (I_0 - intensidade do feixe de radiação X não atenuada), com isso obtida a razão de transmissão para cada tensão.

Em seguida, com esses dados obtidos, realizou-se esse mesmo ensaio utilizando os mesmos parâmetros e equipamentos com folhas de chumbo MT 1404, para verificar uma equivalência com relação à parede de alvenaria, obtendo um gráfico de kerma no ar transmitido por equivalência em folhas de chumbo. As figuras 4.15 e 4.16 apresentam o arranjo experimental e suas distâncias utilizadas para o cálculo de atenuação da radiação X.



Figura 4.15: Arranjo experimental da equivalência em chumbo montado no Laboratório do IEE/USP, utilizado para a determinação das propriedades de atenuação dos blocos cerâmicos.



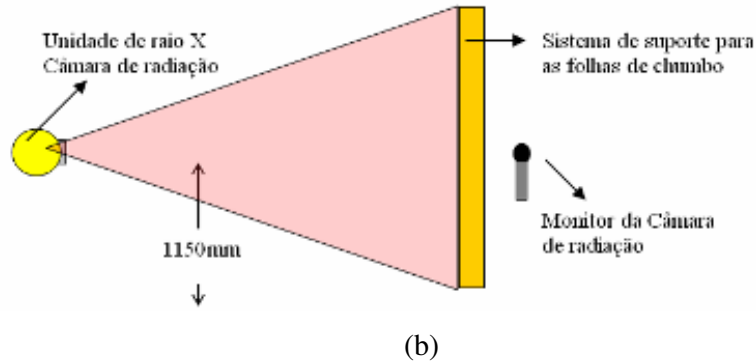


Figura 4.16: Distâncias utilizadas no arranjo experimental para as medições de kerma no ar da equivalência em chumbo em função da tensão. (a) Vista superior e (b) Vista frontal. As distâncias utilizadas foram $d_{\text{prim}} = 175\text{cm}$ para a distância entre o ponto focal (câmara de ionização) e o monitor de radiação, e a distância entre o monitor de radiação e a face anterior do sistema de suporte das folhas de chumbo igual a 20cm.

Através desta curva obteve-se a equivalência de folhas de chumbo pelas tensões pode-se comparar aos resultados experimentais de três fabricantes argamassa baritadas cedidos pelo IEE/USP. A metodologia para a avaliação das argamassas baritadas a serem utilizadas como blindagem em salas de radiologia diagnóstica seguiu os parâmetros e tabelas do NCRP 147 (2004).

Tabela 4.4: Configuração do arranjo experimental para a parede de blocos cerâmicos de vedação e suporte com folhas de chumbo.

Parâmetros	Parede de blocos cerâmicos (9cm)
Intensidade do feixe	Variável*
Corrente do tubo	22,5mA
Foco	Grosso – 4mm
D_{prim}**	1750 mm
Distância entre o ponto focal e a face da parede	1150 mm
Distância do monitor de medição e a face da parede	20 cm
Temperatura do laboratório	25,1°C
Umidade Relativa	49%
Número de medições por intensidade do feixe	cinco
Tempo de exposição para cada medição	30s

* Variação da intensidade do feixe de raio X: 40 a 150 kV.

** Distância entre ponto focal e o monitor de medição.

4.3.3.3 Caracterização final

Após os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos, foram realizados ensaios de caracterização final: microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

Microscopia Ótica

A microscopia ótica (MO) foi realizada com o objetivo principal de visualizar as características superficiais e internas das microestruturas do bloco cerâmico fabricado.

A amostra analisada foi individualmente preparada para a análise microscópica por meio de lixamento e polimento da superfície a ser analisada. Nesta análise, foi utilizado um microscópio ótico (Olympus, BX-51) acoplado a uma microcâmera.

Microscopia eletrônica de varredura

A amostra estudada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi a mesma que foi preparadas para a MO.

A análise foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura (SSX-550, Shimadzu) pertencente ao Centro de Tecnologia do Gás.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS – PARTE I

5.1.1 Análise química por fluorescência de raio X

A Tabela 5.1 e 5.2 contém os resultados da composição química, expressa na forma de óxidos, dos principais constituintes das matérias-primas estudadas.

Tabela 5.1: Análise química semi-quantitativa da argila (% em peso).

Matéria-prima	Principais elementos (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	Outros
Argila	63,25	16,03	1,37	3,31	0,10	3,58	0,07	0,81	2,51	2,06	7,01

Com os resultados da Tabela 5.1 foi pressuposto que o elevado teor de óxido de silício (SiO₂) da matéria-prima (63,25 %) deve-se à presença de minerais argilosos e não-argilosos que possuem o silício na sua composição química.

O óxido de alumínio (Al₂O₃) que geralmente é associado à presença do mineral illita, foi o segundo óxido predominante na matéria-prima. Por conta do teor de óxido de ferro (Fe₂O₃) inferior a 5 %, o bloco cerâmico deverá apresentar cores beges ou vermelho claro.

Os óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO), os quais têm efeito fundente moderado em temperaturas de queima abaixo de 1100 °C, aparecem em quantidade de 2,51% e 1,37% respectivamente. O óxido de sódio (Na₂O) e o óxido de potássio (K₂O), geralmente presentes nos feldspatos, têm um efeito fundente intenso abaixo de 1100 °C. A matéria-prima estudada apresentou 3,31% e 2,06% respectivamente da quantidade desses óxidos.

Tabela 5.2: Análise química semi-quantitativa das baritas (% em peso).

Matéria-prima	Principais elementos (%)						
	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ba
Barita 01	0,07	0,26	15,32	n.d.	n.d.	1,02	53,37
Barita 02	n.d.	0,29	17,36	1,08	n.d.	n.d.	50,20
Barita 03	n.d.	0,24	15,39	n.d.	0,13	n.d.	54,53
Barita 04	0,06	0,34	16,35	n.d.	n.d.	1,21	50,70
Barita 05	0,08	0,58	15,95	0,09	1,10	1,49	49,30
Barita 06	0,22	1,47	14,97	n.d.	0,11	4,68	46,77
Barita 07	0,20	2,19	16,55	0,19	n.d.	0,41	47,31

Legenda: n.d = não detectado

Observa-se que a composição química das amostras de barita analisadas é, basicamente, bário e enxofre e eventualmente alguns óxidos de ferro, cálcio, sílica, alumínio e potássio, resultando em cor alaranjada em algumas amostras. Nenhum dos teores dos elementos, que poderiam ser considerados contaminantes, desabona a matéria-prima enquanto parcelas da composição de partida de massa cerâmica para a fabricação de blocos cerâmicos de vedação.

Observa-se que a barita n°3 apresenta maior percentual de bário, no entanto, devido a problemas de chuvas que impossibilitaram o acesso a esse veio, foi escolhida para dar continuidade as análises futuras ao trabalho à barita n° 02.

5.1.2 Análise granulométrica

A Tabela 5.3 contém os resultados do diâmetro médio (D_M) das matérias-primas estudadas e as percentagens de distribuição de tamanhos de partículas nas frações acumuladas de 10 %, 50 % e de 90 %.

Tabela 5.3: Distribuição do tamanho médio de partículas da argila

Matéria-prima	D_M	10%	50%	90%
Argila	7,42 μm	1,67 μm	6,45 μm	14,28 μm
Barita	5,18 μm	0,85 μm	3,74 μm	10,87 μm

A partir dos resultados da Tabela 5.3. verifica-se que os dois tipos de matérias-primas são de granulometria fina, as quais apresentaram diâmetro médio das partículas inferior a 10 µm.

5.1.3 Avaliação da plasticidade

A Tabela 5.4 apresenta os resultados dos limites de Atterberg e a classificação da argila estudada.

Tabela 5.4: Limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade para a classificação da matéria-prima argila.

Matéria-prima	LL	LP	IP	Classificação
Argila	50,7	32,2	16,5	Altamente plástica

Sabendo-se que existe uma relação direta entre a granulometria com a plasticidade, observa-se que a argila apresentou granulometria fina, sendo classificada com de alta plasticidade.

5.1.4 Análise mineralógica por difração de raios X

Os resultados gerados, foram analisados por comparação dos picos gerados com as cartas padrões do software ICPDF cadastradas no International Center for Diffraction Data (ICDDA). A Figuras 5.1 e 5.2, contêm os difratogramas das matérias-primas estudadas.

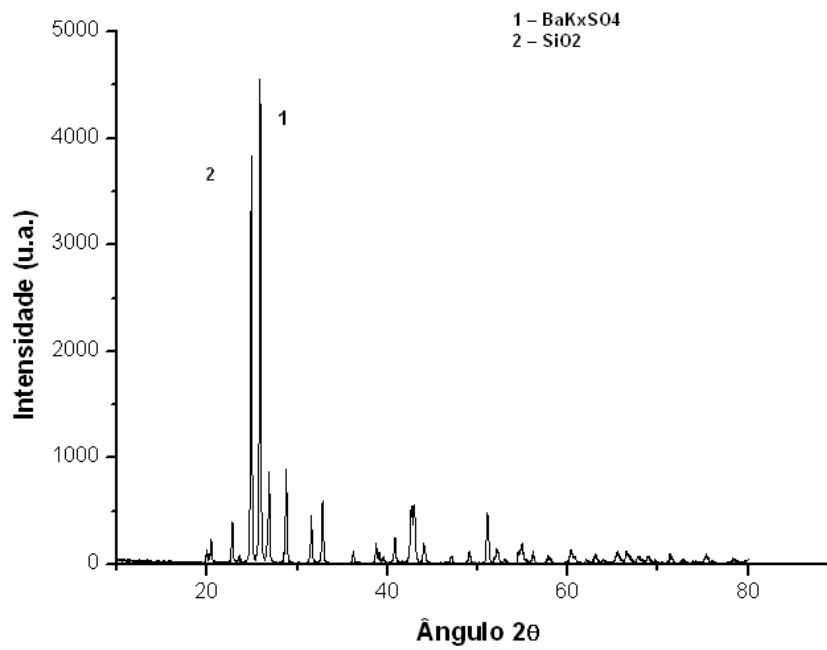


Figura 5.1: Difratoograma de raios X da barita n° 2.

Na figura 5.1 observa-se que a barita apresenta o Sulfato de Bário e Potássio e a Sílica, o que pode ser confirmado pelos resultados das análises químicas desta matéria-prima.

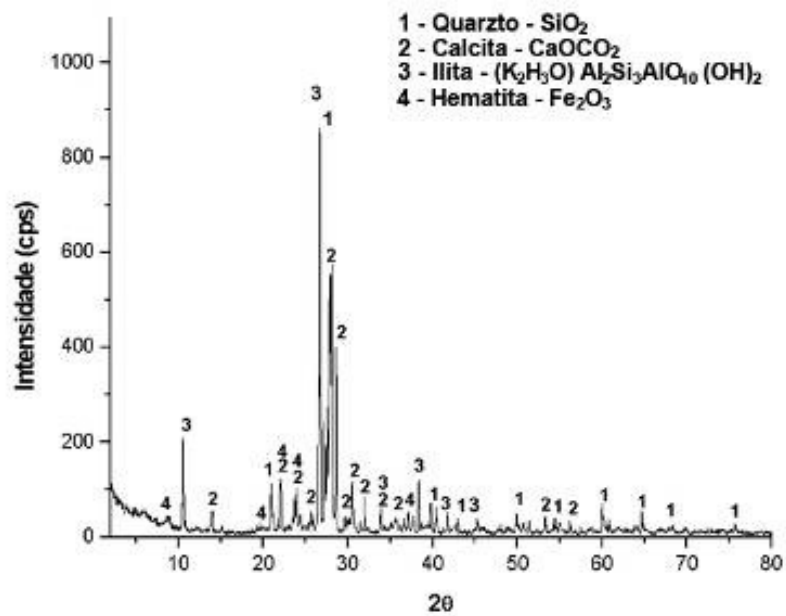


Figura 5.2: Difratoograma de raios X da argila.

De acordo com a Figura 5.2, observa-se a presença dos minerais argilosos hematita (4), ilita (3) e calcita (2) em fases majoritárias, enquanto o único mineral acessório detectado foi o quartzo (1).

5.1.5 Análise térmica

As Figuras 5.3 e 5.4 contêm as curvas termogravimétricas das matérias-primas estudadas.

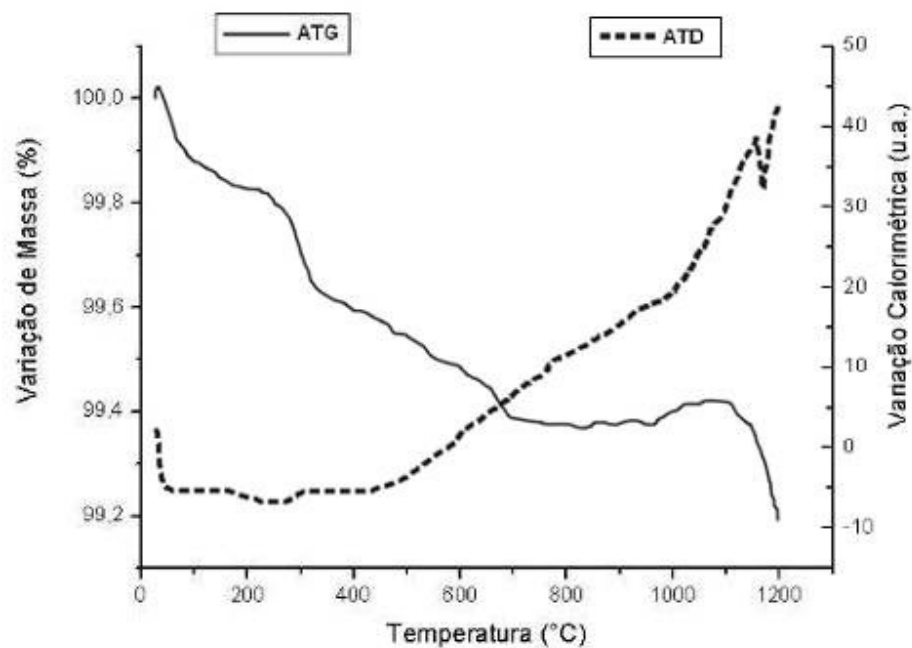


Figura 5.3: Análise térmica da matéria-prima barita nº 2.

A partir da curva de análise termogravimétrica (ATG) pode-se observar que a perda de massa mais significativa nesta amostra está compreendida no intervalo de temperatura entre 350 e 500°C; o restante é liberado entre 500 e 750° C.

A partir da análise térmica diferencial (ATD) observa-se que a barita apresenta um pico endotérmico (vale), nas temperaturas de 275°C e 350°C respectivamente. No intervalo de temperatura entre 420 e 580° C é observado outro pico endotérmico.

Turcaniova et al. (2002) utilizam os dados de estudos em carbonatos efetuados por McCauley e Johnson (1991) para justificar que as explosões mais intensas são causadas por moléculas de água presentes na estrutura do mineral, as quais na temperatura de crepitação

(curva ATG) produziram pressão de vapor de água similar à pressão necessária para romper grãos minerais.

Os autores apontam ainda que é necessário notar também que em temperaturas menores do que 350°C o processo de desintegração dos materiais por crepitação espontânea é conduzido por ruptura do material das inclusões minerais.

No presente trabalho, a perda de massa mais significativa observada na curva de ATG está compreendida no intervalo de temperatura entre 350 e 500°C, valores mais elevados do que os considerados por Turcaniova et al. (2002) para a desintegração dos materiais por crepitação espontânea, que ocorre por ruptura do material das inclusões minerais. A temperatura de 450°C é correlata às temperaturas medida por microtermometria de inclusões fluidas em exsudados de quartzo co-genéticos aos filões de barita (Cunha de Souza, 1996). A esta faixa de temperatura está associado o fraturamento hidráulico observado na região Seridó, ligado a atividade hidrotermal durante a fase final da orogênese brasileira (Cunha de Souza, 1996) na região onde foram coletadas as amostras, nos filões hidrotermais de barita.

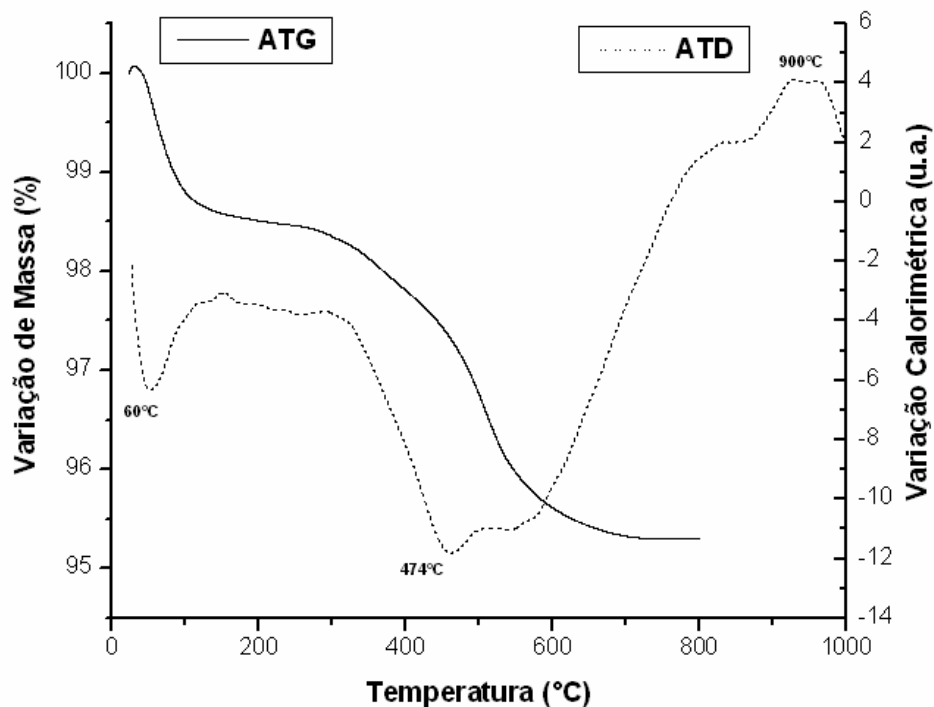


Figura 5.4: Análise térmica da matéria-prima argila.

A Figura 5.4 corresponde ao gráfico de análises térmicas da argila. Os resultados mostram a ocorrência de duas reações endotérmicas e uma exotérmica.

O primeiro pico endotérmico, a aproximadamente 60°C corresponde à eliminação de água constitucional ou água livre. A água se encontra adsorvida sobre a superfície das partículas finas de caulinita.

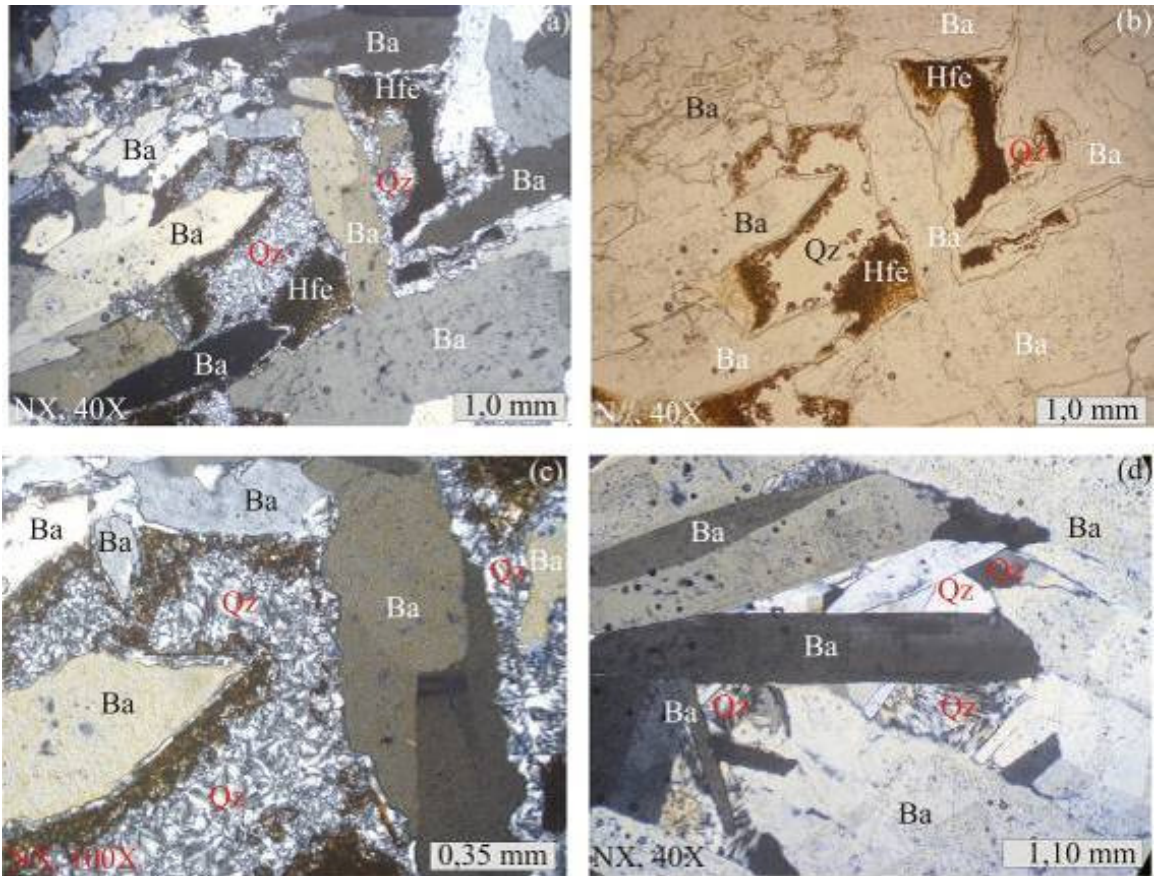
No segundo pico endotérmico, que ocorre a aproximadamente 474 °C, há a eliminação dos íons OH⁻ da estrutura cristalina, comportamento este que ocorre na faixa de 500 °C a 700 °C. Nesta mesma região de temperaturas ocorre a inversão térmica onde o quartzo passa de α para β , em torno de 500 °C. Estes dois eventos se sobrepõem sendo difícil a sua separação.

O pico exotérmico que ocorre a aproximadamente 900 °C, se refere às reações de cristalização de fases amorfas ou fases vítreas, oriundas da linita.

Com relação ao gráfico da ATG, até aproximadamente 200 °C observa-se uma discreta expansão devido à dilatação térmica que ocorre nos materiais, ao serem aquecidos. No intervalo de 500 °C e 600 °C há uma retração brusca devido à eliminação de água constitucional, característica da reação endotérmica da caulinita.

5.1.6 Petrografia

A barita analisada é ripiforme, prismática a xenoblástica, milimétrica a centimétrica, possuindo fissuras preenchidas por quartzo. O quartzo, por sua vez, é xenoblástico, granular a fibroso, intersticial, às vezes venular, sendo por vezes acompanhado por opacos transformados em hidróxidos de ferro. Cristais milimétricos de barita tabular são observados na Figura 5.5.



Legenda: Ba = barita / Hfe = Hidróxido de ferro / Qz = quartzo / N// = nicóis paralelos / NC = nicóis cruzados.

Figura 5.5: Petrografias barita n° 2. Baritito granoblástico com cristais tabulares de barita.

A amostra, corresponde a um baritito granoblástico com barita (97%), quartzo (2%) e opacos (<<1%). A barita é granoblástica, uniforme a prismática, com extinção ondulante forte a moderada, sendo sua granulometria de aproximadamente 1,0 mm. Localmente sofre cataclase, com forte fragmentação. O quartzo é xenoblástico, granular a fibroso, submilimétrico, intersticial e mais raramente ocorrendo como veios, formando agregados granoblásticos. Os opacos são raros, intersticiais e submilimétricos.

Na figura (a) e (b), observa-se a presença de hidróxido de ferro e sílica (quartzo e calcedônia) fibrosa nos interstícios de primas alongadas da barita. A figura (c), é uma aproximação da figura (a) para 100X. Em (d), são mostrados os agregados da barita prismática com arranjo granoblásticos, possuindo em seus interstícios cristais de quartzo e sílica fibrosa.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS – PARTE II

5.2.1 Perda de massa ao fogo

A Tabela 5.5 contém os resultados da perda de massa ao fogo das formulações estudadas com seus respectivos desvios padrões (DP) nas diferentes temperaturas de queima.

Tabela 5.5: Perda de massa ao fogo das formulações do protótipo cerâmico.

T (°C)	Perda de massa ao fogo (%)								
	Ref.	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈
950°C	6,12	6,30	5,87	5,32	5,47	4,74	4,33	3,61	3,21
DP	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
1000°C	7,8	7,03	6,98	6,18	6,06	5,95	5,07	4,67	3,77
DP	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2
1050°C	n.p.r.	n.p.r.	9,22	10,09	10,61	9,97	8,74	6,88	6,07
DP	n.d.	n.d.	0,4	0,9	0,8	0,9	0,3	0,4	0,1

Legenda: n.d. = não detectado / n.p.r. = não possui resultado

De acordo com a Tabela 5.5, observa-se que a perda de massa em relação ao aumento de temperatura é crescente para todas as amostras. Este comportamento pode ser melhor visualizado graficamente pela Figura 5.6, a qual apresenta os resultados da perda de massa ao fogo nas três diferentes temperaturas.

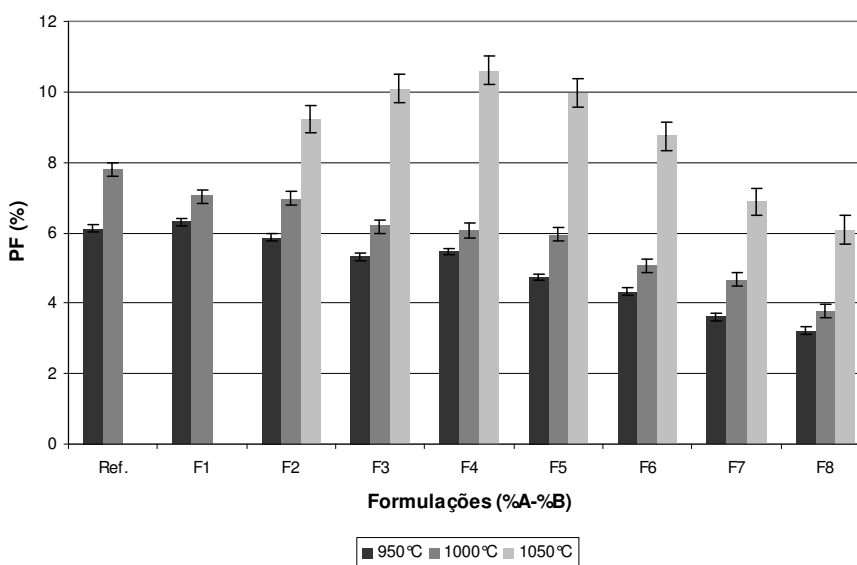


Figura 5.6: Comparação gráfica da perda de massa das formulações nas três temperaturas: 950 °C, 1000 °C e 1050 °C.

Considerando que a perda de massa de uma argila deve-se as transformações químicas e físicas que ocorre no material quando submetidas a elevadas temperaturas, nota-se que o comportamento das temperaturas de 950 e 1.000 °C são semelhantes, nas duas há o decréscimo dos valores com a diminuição da quantidade de argila. Fazendo uma comparação da perda de massa com o teor de argila, observa-se que quanto maior a quantidade de minerais argilosos, maior a perda de massa da matéria-prima.

Observa-se nas amostras a 1.050 °C, que a perda ao fogo tende a aumentar até a formulação F₄ (60A-40B), diminuindo em seguida; este comportamento é devido a uma variação das amostras analisadas quanto ao percentual de argila plástica e não-plástica, uma vez que a cerâmica trabalha com misturas variadas destes dois tipos de argilas.

5.2.2 Retração Linear

A Tabela 5.6 contém os resultados da retração linear de queima das formulações estudadas com seus respectivos desvios padrões nas temperaturas de queima.

Tabela 5.6: Retração linear de queima das formulações do protótipo cerâmico.

T (°C)	Retração Linear (%)								
	Ref.	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈
950°C	1,90	1,83	1,15	0,73	0,71	0,31	-0,31	-0,40	-0,48
DP	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1000°C	6,19	3,07	2,13	0,83	0,85	0,09	-0,58	-0,26	-0,21
DP	0,9	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
1050°C	n.p.r.	n.p.r.	2,27	1,27	2,35	0,91	0,60	0,50	0,05
DP	n.d.	n.d.	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2

Legenda: n.d. = não detectado / n.p.r. = não possui resultado

A Figura 5.7 apresenta os resultados da retração linear das formulações em três diferentes temperaturas.

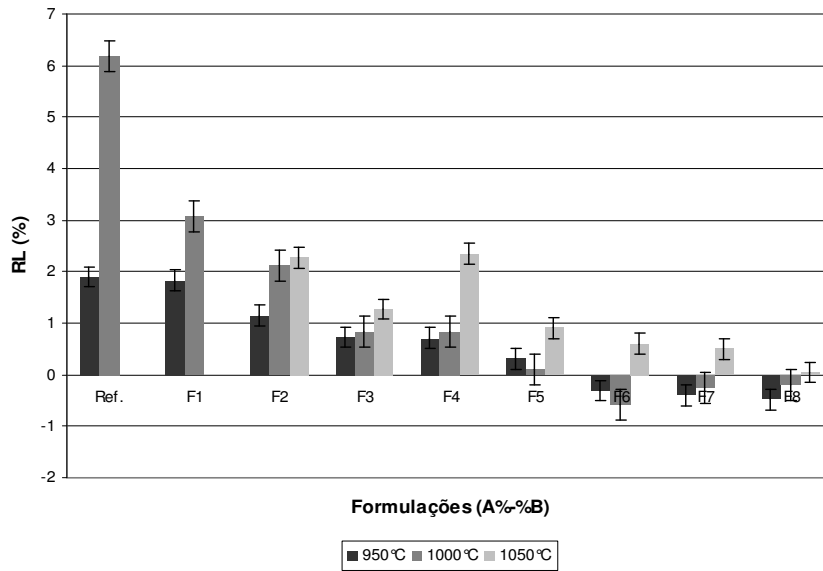


Figura 5.7: Efeito da variação da formulação do bloco cerâmico na retração linear em diferentes temperaturas.

A retração linear é uma propriedade importante para a determinação das dimensões do produto final, bem como está relacionado ao grau de sinterização do material. Enquanto as formulações nas temperaturas de 1.050 °C apresentaram retração positiva, na temperatura de 950 °C e 1.000 °C obtiveram retração negativa, ou seja, expandiu. Essa expansão e retração da barita está associada à desintegração dos materiais por crepitação espontânea, que ocorre por ruptura do material das inclusões minerais; este fato é análogo ao fraturamento hidráulico observado em baritas da região Seridó, ligado à atividade hidrotermal. (SOUZA, 1996).

As formulações F₁ a F₄ (90A-10B/80A-20B/70A-30B/60A-40B) contendo maior teor de minerais de argila e a formulação F₅ (50A-50B) contendo igual, apresentam retração de queima linear crescente com o aumento da temperatura. A utilização de uma alta taxa de aquecimento provocou uma diminuição da retração linear de todas as formulações comparadas com a amostra referencial, devido possivelmente, ao menor tempo de sinterização do material. Este comportamento foi observado em todas as temperaturas, sendo a temperatura de 1.000 °C a que apresentou maior variação.

5.2.3 Absorção de água

A Tabela 5.7 contém os resultados da absorção de água de queima das formulações estudadas com seus respectivos desvios padrões nas temperaturas de queima.

Tabela 5.7: Absorção de água de queima das formulações do protótipo cerâmico.

T (°C)	Absorção d'água (%)								
	Ref.	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈
950°C	9,55	10,23	11,26	11,54	10,94	10,95	10,30	9,83	9,71
DP	0,3	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,2	0,5	0,7
1000°C	4,07	9,00	10,46	11,63	11,56	11,00	9,94	9,96	11,26
DP	0,3	0,6	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
1050°C	n.p.r.	n.p.r.	9,29	11,56	12,47	12,16	9,97	9,63	10,85
DP	n.d.	n.d.	0,2	0,4	0,4	0,2	0,2	0,6	0,2

Legenda: n.d. = não detectado / n.p.r. = não possui resultado.

Nota-se que as três temperaturas de queima possuem comportamento semelhante, inconstância da absorção água, este comportamento está associado à retração linear do material, devido ao processo de sinterização mais rápido. Observa-se que todos os resultados se encontram dentro dos padrões normativos $\leq 25\%$ (SANTOS, 1989).

Na Figura 5.8 pode-se observar os resultados da absorção de água dos corpos-de-prova em três diferentes temperaturas.

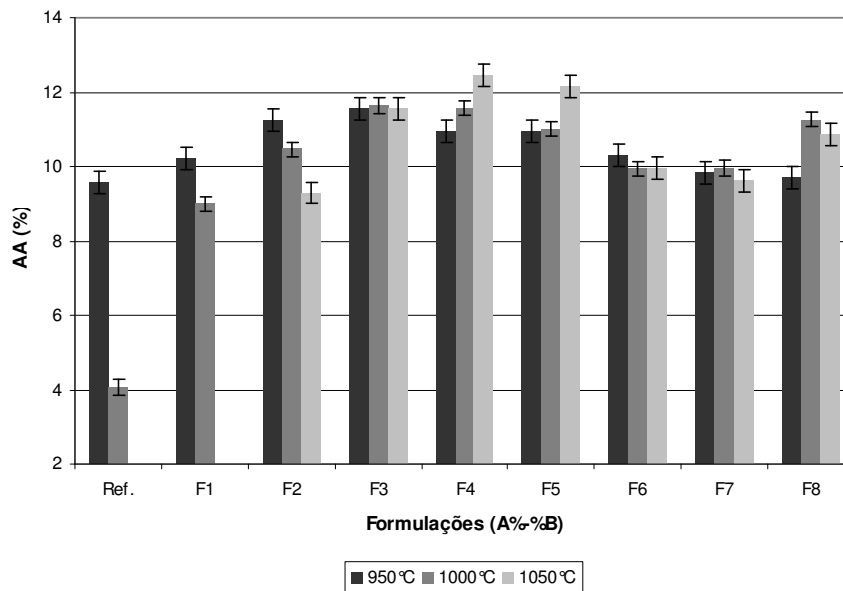


Figura 5.8: Absorção de água em função das temperaturas dos corpos-de-prova estudados.

5.2.4 Porosidade Aparente

A Tabela 5.8 contém os resultados da porosidade aparente das formulações com seus respectivos desvios padrões (DP) nas diferentes temperaturas de queima.

Tabela 5.8: Porosidade Aparente de queima das formulações do protótipo cerâmico.

T (°C)	Porosidade Aparente (%)								
	Ref.	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈
950°C	20,28	22,27	24,86	26,07	26,02	26,76	26,72	26,07	27,04
DP	0,6	0,4	0,6	0,2	0,4	0,5	0,4	1,2	0,8
1000°C	9,76	20,19	23,64	26,55	26,48	27,18	25,91	26,95	30,99
DP	0,8	1,2	0,4	0,5	0,4	0,8	0,4	0,3	0,3
1050°C	n.p.r.	n.p.r.	20,75	25,94	28,64	29,07	26,02	26,35	29,59
DP	n.d.	n.d.	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	1,3	0,4

Legenda: n.d. = não detectado / n.p.r. = não possui resultado

Como a porosidade aparente quantifica a porosidade aberta do material, seu resultado está associado à absorção água. Através das Figuras 5.8 e 5.9, observa-se que o comportamento da porosidade aparente é o mesmo da absorção de água. A maior absorção de água e porosidade aparente foram constatadas na maior temperatura 1.050°C, encontradas nas formulações F₅ (50A-50B) e F₆ (40A-60B) respectivamente, e todos os resultados se encontram dentro dos padrões normativos $\leq 35\%$ (SANTOS, 1989).

A Figura 5.9 apresenta o comportamento da porosidade aparente, das formulações estudadas com relação às temperaturas de queima.

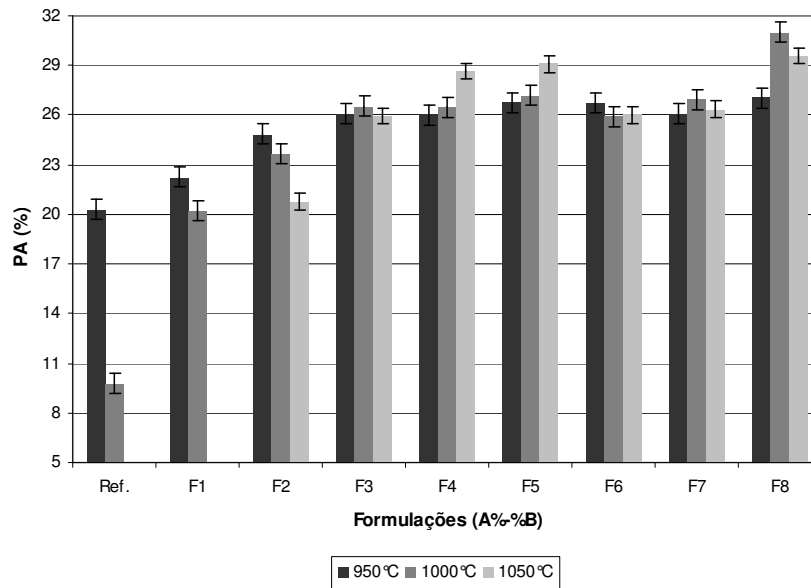


Figura 5.9: Porosidade aparente das formulações em função das temperaturas de queima.

5.2.5 Resistência Mecânica (RM)

A Tabela 5.9 contém os resultados da resistência mecânica das formulações estudadas com seus respectivos desvios padrões nas temperaturas de queima.

Tabela 5.9: Resistência mecânica das formulações do protótipo cerâmico.

T (°C)	Resistência Mecânica (MPa)									
	Ref.	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	
950°C	11,44	9,97	7,18	5,21	6,56	5,15	3,54	1,55	0,58	
DP	1,1	0,6	0,9	0,7	0,3	0,6	0,6	0,3	0,0	
1000°C	20,43	12,73	9,90	6,50	5,72	3,39	2,60	2,16	1,55	
DP	2,4	0,8	0,6	0,5	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	
1050°C	n.p.r.	n.p.r.	10,27	6,88	5,95	4,93	4,71	2,91	1,41	
DP	n.d.	n.d.	1,0	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	

Legenda: n.d. = não detectado / n.p.r. = não possui resultado.

De acordo com a Tabela 5.9, pode-se observar que a tensão de ruptura a flexão em todas as formulações e nas três temperaturas, apresentaram comportamento decrescente de valores com o aumento do percentual de barita; da formulação F₅ em diante a tensão de ruptura à flexão não se encontra dentro dos padrões normativos (≥ 5 MPa), nas três temperaturas,

devido as trincas e fissuras decorrentes da menor plasticidade da massa cerâmica e alto valores de porosidade aparente. (SANTOS, 1989).

A Figura 5.10 apresenta a resistência mecânica das matérias-primas estudadas nas três temperaturas.

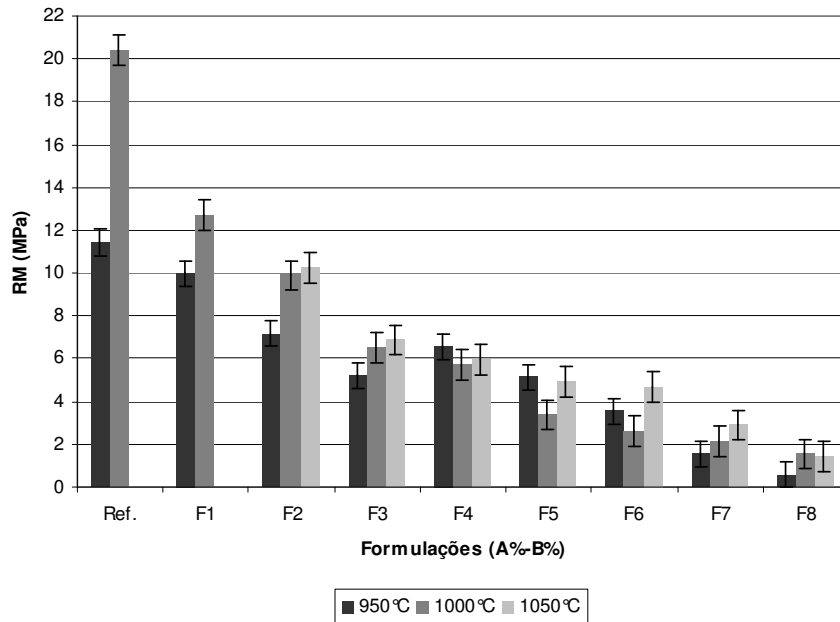


Figura 5.10: Comparação gráfica da tensão de ruptura à flexão das formulações em três temperaturas: 950 °C, 1000 °C e 1050 °C.

Através dos ensaios físicos e mecânicos verificou-se a possibilidade da incorporação de barita para utilização em blocos cerâmicos de vedação na indústria de Cerâmica Vermelha. Os resultados experimentais indicam claramente que o aumento da temperatura ocasionou uma ascensão da retração linear, possuindo menores valores na temperatura de 950°C, gerando um produto sinterizado semelhante ao desenvolvido no projeto e com boa estabilidade dimensional dos corpos queimados, resultando na redução do custo de produção.

Comparando-se a absorção de água e porosidade aparente com a formulação de partida, verifica-se que houve um pequeno acréscimo nos valores nas três temperaturas; estes, porém se encontram inseridos dentro dos padrões normativos.

Com isso, na Tabela 5.10 pode ser visualizado o resumo dos resultados das propriedades tecnológicas dos corpos-de-prova sinterizados a 950, 1.000 e 1.050 °C. Ao longo da fabricação das formulações foi observado que devido à barita ser insolúvel em água e pela pequena proporção utilizada de argila, as formulações de números F₉ e F₁₀, não

conseguiram ser compactadas, pois não possuíam plasticidade suficiente para serem conformadas.

A formulação da amostra referencial, não é representativa na fabricação de blocos cerâmicos para serem utilizados para blindagem de radiação, sendo fabricados somente para estudo da matéria-prima argila e comparações de resultados. Verifica-se que na temperatura de 1.050 °C, não possui os valores das formulações da amostra de referência (100A) e F₁ (90A-10B), pois houve vitrificação da argila nesta temperatura, não podendo ser realizado ensaios com estas composições. Os valores que se encontram fora das especificações estão na cor vermelha.

Tabela 5.10: Resumo dos resultados das propriedades tecnológicas dos corpos-de-prova sinterizados a 950, 1.000 e 1.050 °C.

Temperaturas	Formulações	Propriedades Tecnológicas									
		PF (%)	DP	RL (%)	DP	AA (%)	DP	PA (%)	DP	RM (MPa)	DP
950 °C	Referência	6,12	0,1	1,90	0,7	9,55	0,3	20,28	0,6	11,44	1,1
	F ₁	6,30	0,1	1,83	0,2	10,23	0,2	22,27	0,4	9,97	0,6
	F ₂	5,87	0,1	1,15	0,2	11,26	0,3	24,86	0,6	7,18	0,9
	F ₃	5,32	0,1	0,73	0,1	11,54	0,1	26,07	0,2	5,21	0,7
	F ₄	5,47	0,2	0,71	0,1	10,94	0,2	26,02	0,4	6,56	0,3
	F ₅	4,74	0,1	0,31	0,1	10,95	0,3	26,76	0,5	5,15	0,6
	F ₆	4,33	0,1	-0,21	0,1	10,30	0,2	26,72	0,4	3,54	0,6
	F ₇	3,61	0,1	-0,40	0,1	9,83	0,5	26,07	1,2	1,55	0,3
	F ₈	3,21	0,1	-0,48	0,1	9,71	0,7	27,04	0,8	0,58	0,0
1.000 °C	Referência	7,80	0,2	6,19	0,9	4,07	0,3	9,76	0,8	20,43	2,4
	F ₁	7,03	0,1	3,07	0,6	9,00	0,6	20,19	1,2	12,73	0,8
	F ₂	6,98	0,2	2,13	0,1	10,46	0,1	23,64	0,4	9,90	0,6
	F ₃	6,18	0,1	0,83	0,1	11,63	0,3	26,55	0,5	6,50	0,5
	F ₄	6,06	0,2	0,85	0,1	11,56	0,3	26,48	0,4	5,72	0,2
	F ₅	5,95	0,2	0,09	0,1	11,00	0,2	27,18	0,8	3,39	0,4
	F ₆	5,07	0,3	-0,58	0,2	9,94	0,2	25,91	0,4	2,60	0,3
	F ₇	4,67	0,1	-0,26	0,1	9,96	0,1	26,95	0,3	2,16	0,3
	F ₈	3,77	0,2	-0,21	0,1	11,26	0,1	30,99	0,3	1,55	0,4
1.050 °C	Referência	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F ₂	9,22	0,4	2,27	0,2	9,29	0,2	20,75	0,3	10,27	1,0
	F ₃	10,09	0,9	1,27	0,2	11,56	0,4	24,94	0,5	6,88	0,8
	F ₄	10,61	0,8	2,35	0,2	12,47	0,4	28,64	0,4	5,95	0,8
	F ₅	9,97	0,9	0,91	0,1	12,16	0,2	29,07	0,4	4,93	0,7
	F ₆	8,74	0,3	0,60	0,2	9,97	0,2	26,02	0,4	4,71	0,6
	F ₇	6,88	0,4	0,50	0,2	9,63	0,6	26,35	1,3	2,91	0,5
	F ₈	6,07	0,1	0,05	0,2	10,85	0,2	29,59	0,4	1,41	0,4
Especificações*		ne		ne		≤ 25		≤ 35		≥ 5	

Legenda: * Segundo Santos (1989), ne = não especificado, DP = desvio padrão, PF = Perda de massa ao Fogo, RL = Retração Linear, AA = Absorção de Água, PA = Porosidade Aparente e RM = Resistência Mecânica.

A F₄ (60A-30B) é uma formulação de transição entre as outras faixas de formulação, pois seus resultados são diferenciados com relação aos outros na temperatura de 1.050°C. Isso ocorreu devido a alta taxa de aquecimento, justamente com a sinterização em uma temperatura muito elevada, influenciando para o desequilíbrio térmico das reações e a amplitude da retração. Houve uma dificuldade da densificação proporcionando contração excessiva, rápida e não uniforme; ocasionando o desenvolvimento de feridas no corpo cerâmico aumentando a absorção de água e perda de massa ao fogo nesta.

Do exposto, pode-se verificar que a adição de 10% a 40% (F₁ a F₄) do mineral barita dentro da produção de blocos de vedação para cerâmica vermelha, é proveitosa e confiável, nas três temperaturas. Porém para este trabalho foi escolhida a formulação F₃ (70A-30B), com a temperatura de 950 °C, não havendo necessidade de temperaturas mais elevadas para se obter bons valores de resistência desses materiais, contribuindo assim para a redução de custos durante sua fabricação.

5.3 CARACTERIZAÇÃO ENSAIOS TECNOLÓGICOS DOS BLOCOS CERÂMICOS – PARTE III

5.3.1 NBR 15270: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Parte 1, Terminologia e requisitos, e Parte 3, Matérias e Métodos.

A NBR 15270-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) padroniza as formas e as dimensões de blocos cerâmicos de vedação a serem utilizados em alvenaria, com ou sem revestimento.

Para o desenvolvimento das paredes de alvenaria foram utilizados blocos cerâmicos de vedação fabricados em uma Indústria Cerâmica localizada em São Gonçalo - RN. Esse material foi analisado quanto a sua especificação pela NBR 15270, Parte 1: Terminologia e requisitos e Parte 3: Métodos de ensaio, forma e dimensões, absorção de água e resistência à compressão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Estes ensaios foram feitos com dez amostras através da análise visual, e com uma régua graduada em mm, devidamente aferida, foram obtidos as dimensões da face, septos, paredes externas, planeza das faces, desvio em relação ao esquadro, planeza das faces, índice de absorção de água e resistência a compressão (Anexo 01). Na tabela 5.12 pode observar a média dos resultados obtidos nas amostras.

Tabela 5.12: Resultados da avaliação quanto à especificação dos blocos cerâmicos de vedação para alvenaria.

MATERIAL AVALIADO (bloco cerâmico para vedação)		
ESPECIFICAÇÃO (itens avaliados)	RESULTADO	NORMA
Características visuais	Todos os blocos cerâmicos analisados apresentaram trincas e fissuras. Somente o número 10, apresentou desuniformidade de cor.	Os blocos não devem apresentar defeitos sistemáticos, tais como quebras, superfícies irregulares ou deformações.
Dimensões efetivas (CxLxH) mm	(193 x 92 x 188) ± 0,1	(190 x 90 x 190) ± 3
Paredes externas (mm)	8,5±0,6	≥7
Septos dos blocos (mm)	7,4±0,6	≥6
Desvio com relação ao esquadro (mm)	2,5±0,7	≤3
Planeza das faces (mm)	4,3±1,8	≤3
Índice de Absorção de água (%)	10,5±0,4	8 ≤AA≤25
Resistência à compressão (MPa)	1,50±0,1	≥1,5

Em função destes resultados, pode-se afirmar que os blocos cerâmicos estão quase dentro de todos os padrões exigidos para a execução de paredes de alvenaria; somente a planeza das faces e desvio em relação ao esquadro, não se encontram dentro dos padrões normativos. Mesmo assim, foi dada continuidade aos trabalhos, uma vez que o objetivo principal é a avaliação da capacidade de atenuação deste material quando submetido a feixes de raios X.

5.3.2 Avaliação da atenuação da radiação X

Determinação da equivalência em chumbo

Conforme descrito no item 4.3.3.2 c, as curvas de equivalência em chumbo são obtidas após a medição da razão de transmissão na parede de bloco cerâmico ensaiado e do valor de kerma no ar nas folhas de chumbo. A tabela 5.13 mostra a média dos valores da razão de transmissão (I/I_0) para cada tensão (kV).

Tabela 5.13: Média dos valores da razão de transmissão, resultantes das medições para a parede de bloco cerâmico em diferentes tensões. As incertezas apresentadas correspondem ao desvio padrão da média de cinco medições.

Tensão (kV)	Razão de transmissão (I/I_0)
40	0,0001±0,0001
50	0,0016±0,0002
60	0,0054±0,0005
70	0,0096±0,0003
80	0,0153±0,0009
90	0,0215±0,0012
100	0,0278±0,0012
110	0,0341±0,0052
120	0,0407±0,0032
130	0,0407±0,0043
140	0,0532±0,0062
150	0,0594±0,0240

Para construir os gráficos de atenuação foi utilizado o programa Origin 6.0, onde foram medidas o kerma no ar transmitido em diferentes tensões com relação à equivalência em folhas de chumbo, obtendo com esses parâmetros a equação da reta. Os resultados do kerma no ar transmitido em função das folhas de chumbo nas diferentes tensões são apresentados na tabela 5.14.

Tabela 5.14: Média dos valores de Kerma no ar, resultantes das medições para diferentes espessuras de folhas de chumbo em diferentes tensões (kV). As incertezas apresentadas correspondem ao desvio padrão da média de cinco medições.

Tensão kV	Espessura da folha de chumbo (mm)	Kerma (mGy)
40	0,369	0,0010±0,0005
	0,492	0,0003±0,0001
50	0,369	0,0093±0,0006
	0,492	0,0047±0,0011
60	0,369	0,1225±0,1940
	0,492	0,0222±0,0006
70	0,369	0,1426±0,0004
	0,492	0,0716±0,0006
80	0,369	0,3449±0,0021
	0,492	0,1921±0,0011
90	0,492	0,4032±0,0019
	0,616	0,2575±0,0017
100	0,492	0,6282±0,0042
	0,616	0,4067±0,0020
110	0,369	1,4098±0,0033
	0,492	0,8081±0,0026
120	0,369	1,8342±0,0041
	0,492	1,0574±0,0018
130	0,369	2,3272±0,0058
	0,492	1,3508±0,0040
140	0,369	2,8982±0,0169
	0,492	1,6872±0,0188
150	0,369	3,5778±0,0276
	0,492	2,1246±0,0116

Legenda:

0,369 mm = 3 folhas de chumbo MT 1404

0,492 mm = 4 folhas de chumbo MT 1404

0,616 mm = 5 folhas de chumbo MT 1404

Com a equação da reta de cada gráfico foi obtido o valor de x e assim construído o gráfico de equivalência em chumbo para as tensões. Em seguida, foram comparados esse resultado com os resultados experimentais de três fabricantes de argamassa baritadas cedido pelo IEE/USP.

A Figura 5.11, mostra a comparação dos resultados da parede de alvenaria com bloco cerâmico baritado com três fabricantes de argamassa baritadas existentes no mercado em função da tensão e equivalência em folhas de chumbo.

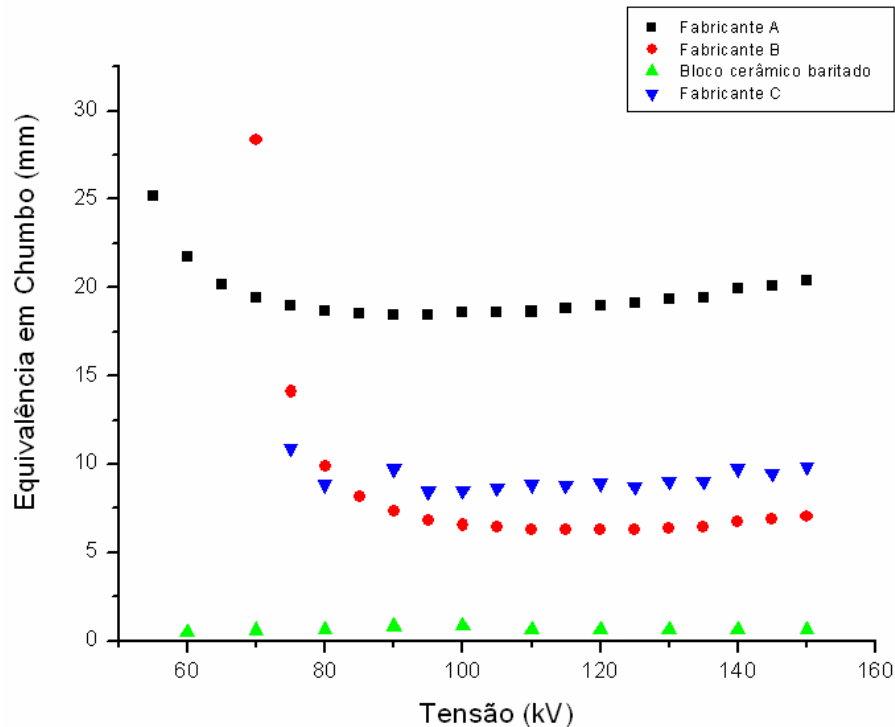


Figura 5.11: Comparativo dos blocos cerâmicos baritados com argamassas baritadas existentes no mercado, em função da tensão e equivalência de chumbo.

Na Figura 5.11, pode-se observar que no caso da parede de bloco cerâmico baritado, a equivalência de chumbo não é constante com relação à tensão, variando de 0,5 a 0,8 mm de folha de chumbo.

Comparando os resultados do bloco cerâmico baritado com as argamassas baritadas, observa-se que o material cerâmico obteve uma excelente performance, pois consegue uma equivalência em chumbo menor para todas as tensões utilizadas.

Sabe-se que as barreiras protetoras das salas de radiologia variam de acordo com sua utilização, energia do feixe, quantidade e técnica das radiografias feitas, tipo de equipamento utilizado e grau de ocupação das áreas vizinhas. Portanto, de acordo com a empresa de Radiação Núcleo 2009, em salas de raios X de pequeno porte podem considerar a aplicação de folhas de chumbo (Pb), um valor habitual de 2,00 mm de espessura, no entanto, a depender das condições do serviço este valor poderá ser maior ou menor. A espessura correta é necessariamente determinada por um projeto de radioproteção específico e sua eficácia deve ser comprovada por ensaio radiométrico posteriores.

Com base nisto, os valores dos blocos cerâmicos baritados (aproximadamente 1mm), são suficientes para blindar uma sala de radiação X, com segurança, pois são necessários somente 2,00 mm de chumbo enquanto os valores de equivalência deram de 0,5 a 0,8 mm.

5.3.3 Caracterização final

A Figura 5.12 mostra a fotografia dos blocos cerâmicos extrudados e queimados na temperatura de 950 °C com taxa de aquecimento de 20 °C/min.



Figura 5.12: Fotografia dos blocos cerâmicos extrudados e queimados na temperatura de 950 °C.

5.3.3.1 Microscopia ótica e eletrônica

A Figura 5.13 apresenta as micrografias, obtidas por Microscopia Ótica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), das superfícies de fratura. Essas micrografias são referentes ao bloco cerâmico queimado na temperatura de 950 °C. A Figura 5.14 apresenta a microanálise obtida por EDS da amostra analisada.

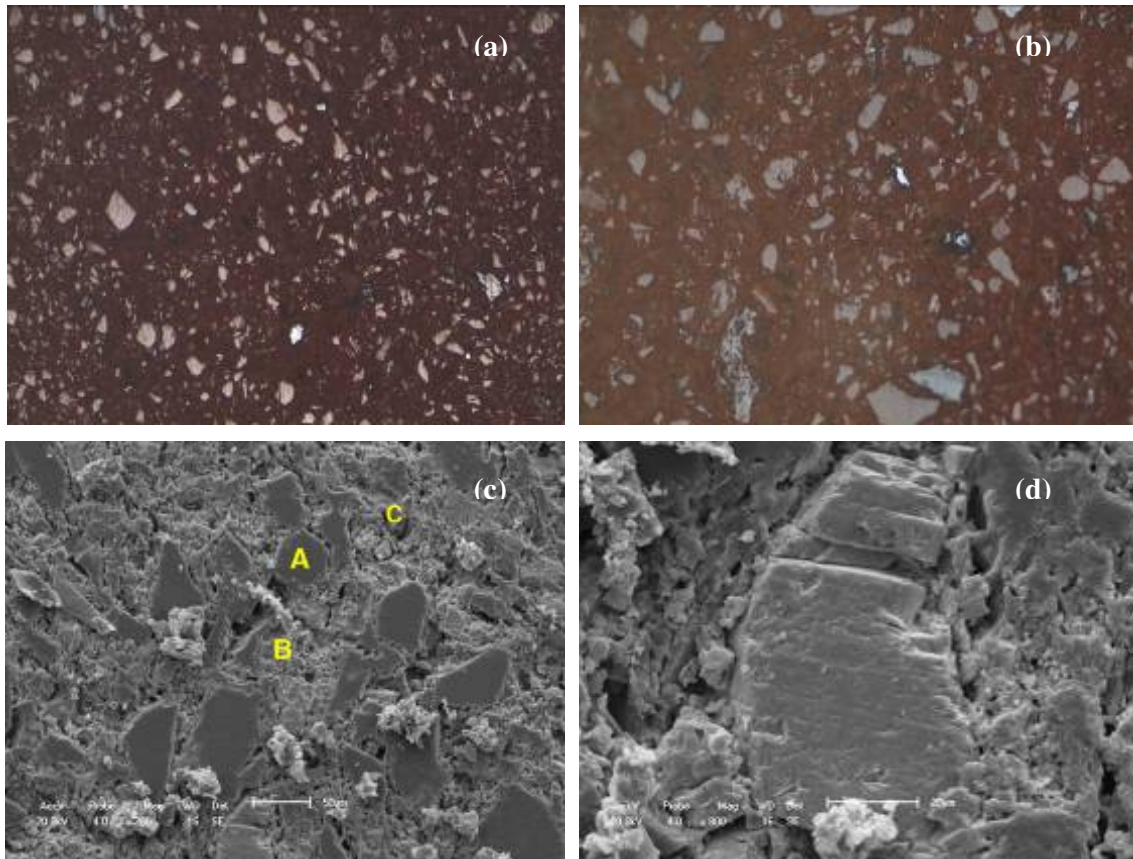
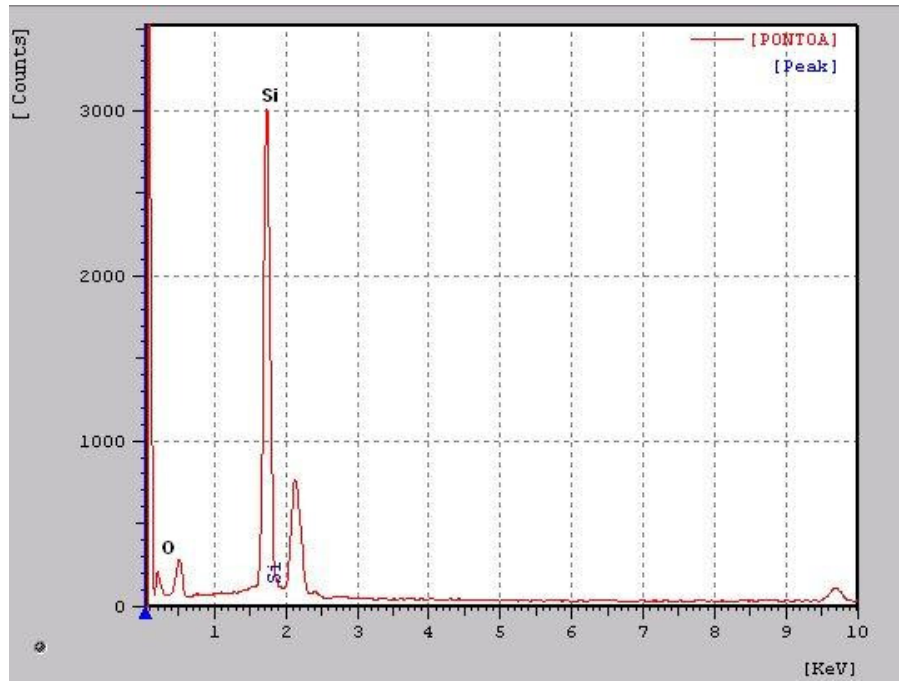
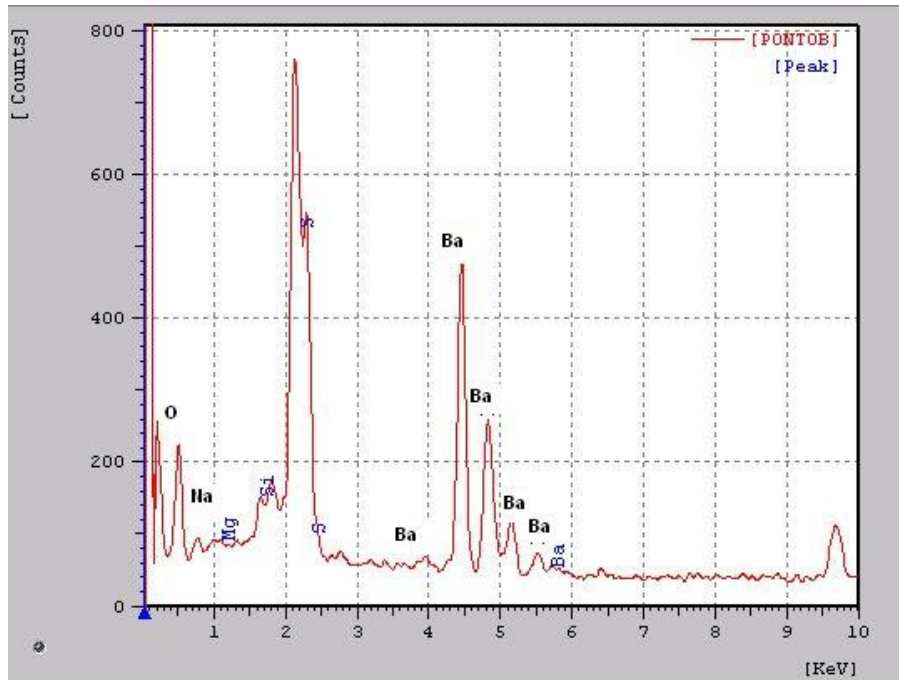


Figura 5.13: Micrografias obtidas por MO e MEV da superfície de fratura do bloco cerâmico queimada a 950 °C. (a) MO 50 X, (b) MO 100 X, (c) Pontos para análise EDS 200X e (d) MEV 800X.

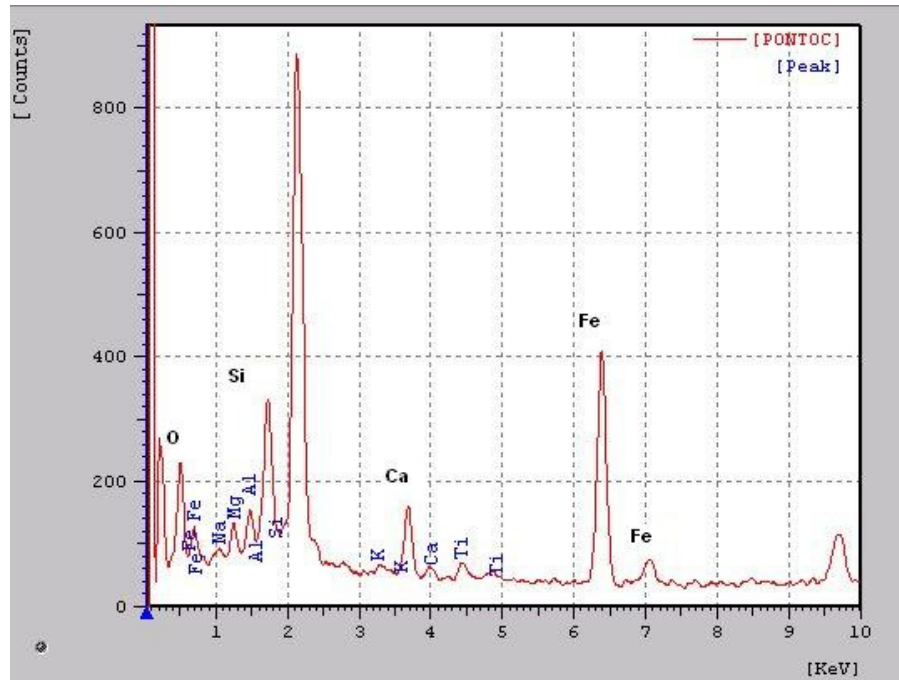
Observa-se na Figura 5.13 (a) e (b) que os pontos mais claros são cristais de sílica. A figura 5.13 (c) mostra os pontos para a análise de EDS e a 5.13 (d) mostra um cristal de barita.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.14: Resultados analíticos por EDS das áreas A, B e C da Figura 5.13 (c), respectivamente.

A Figura 5.14 corresponde aos resultados de microanálise obtidos por EDS nos pontos A, B e C da micrografia da Figura 5.13 (c). Os resultados mostram claramente que a região A corresponde a cristais de sílica, é a mais escura; a região B corresponde a barita, é a mais clara; e a região C corresponde a matriz argilosa. Verifica-se que a região que corresponde à barita apresenta uma microestrutura típica de um material de elevada porosidade, caracterizado por grãos finos formando aglomerados. Verifica-se ainda que estes grãos estão em um estágio intermediário de sinterização, visto que a formação de pescoços entre as partículas finas é bastante evidente e pronunciada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseando-se nos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- ✓ Os percentuais de barita a partir de 10% a 40%, incorporados na matriz cerâmica, obtiveram os melhores resultados em termos de propriedades tecnológicas.
- ✓ A utilização de barita nas formulações das massas cerâmicas foi de fundamental importância para determinar a proporção ideal de cada material para a obtenção das melhores propriedades tecnológicas.
- ✓ No caso de formulações com argilas e barita para fabricação de blocos cerâmicos de vedação, a temperatura de 950°C foi a ideal para processamento dessa argila incorporada com a barita, não havendo necessidade de se trabalhar com temperaturas mais elevadas para obter bons valores de resistência desses materiais, contribuindo assim para a redução de custos durante sua fabricação.
- ✓ A incorporação de barita em uma amostra referencial de argila apresentou expressivos valores quanto ao comportamento do material no processo, quanto à economia do produto final, contribuindo para o decréscimo do custo de produção, além de diminuir o consumo de argila e utilizar um mineral abundante no estado do Rio Grande do Norte.
- ✓ A composição formulada com concentração de 20% de barita e 80% de argila permitiu a fabricação de blocos cerâmicos de vedação.
- ✓ Os blocos cerâmicos obtidos a partir da formulação proposta contendo 20% de BaSO₄ alcançaram os níveis de aceitação para serem classificadas como bloco cerâmico para alvenaria de vedação, se mostraram resistentes e foram aprovados nos testes realizados conforme a norma NBR 15270-1/05 e 15270-3/05.
- ✓ Os resultados obtidos mostraram que paredes confeccionadas com blocos cerâmicos, podem ser aplicadas em salas radiológicas. Esta afirmação é baseada no comparativo com fabricantes de argamassa baritada que foram obtidos em função dos resultados experimentais. Fazendo uma comparação entre os materiais tradicionalmente usados, como por exemplo, o chumbo e os confeccionando no presente estudo, pode-se afirmar que uma parede de 9cm de espessura feita com blocos cerâmicos baritados é equivalente a 0,5mm a 0,8mm de chumbo, conforme mostrado na figura 5.11. Assim sendo, ter-se-á uma redução de custos na execução da proteção, bem como facilidade e uniformidade na aplicação do material.

Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Estudar a influência de taxa de aquecimento mais lenta nas propriedades finais de massa cerâmicas;
- ✓ Estudar a incorporação de barita em tijolos de solo-cimento observando suas propriedades tecnológicas;
- ✓ Realizar medições com varias espessuras para aprofundar o estudo do ajuste semi-empírico desenvolvido por Archer, melhorando assim as curvas de atenuação e as curvas resultantes da equivalência de materiais, para posterior aplicação no cálculo de barreiras de proteção. Utilização dos resultados como banco de dados em programas computacionais destinados ao cálculo de barreiras de proteção.
- ✓ Comparar os resultados atuais com a adição de 10%, 30% e 40% de barita na massa cerâmica observando a atenuação a radiação X.
- ✓ Estudar a incorporação de barita a partir de 10% a 40%, com o acréscimo de 1% em cada percentual, ou seja, realizar um estudo mais detalhado para obter o percentual ideal na formulação da massa do bloco cerâmico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C.D. ALMEIDA, C.E. Metodologia para implantação do programa de controle e garantia de qualidade na radiologia de um hospital universitário. In: **Encontro Nacional de Aplicações Nucleares**, v.2, p. 1161-1166, São Paulo, 1995.

ALMEIDA JR.; A.T. **Caracterização da Barita e do Vidro Cristal como Atenuadores na Blindagem nas Radiações X e Gama**. Recife, 2005. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade de Pernambuco.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Dados do Setor**. 2002. Disponível em: <http://www.anicer.com.br>. Acesso em: 20 fev. 2008.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA VERMELHA. São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2000.

ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO. Brasília, DNPM 2001.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Terminologia e Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270-3**: Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005, 27p.

_____. **NBR 15310**: Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

ATTIXS, F.H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. London: John Willey & Sons, 1986.

BALTAR, C. A. M.; DA LUZ A. B. **Rochas & Minerais Industriais**: usos e especificações. Rio de Janeiro: CETEM, 2005.

BARBA, A., FELIU, C. et. al. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. 1.ed. Castellón: AICE, 1997.

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**. Paraná, 2001. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

BASTOS, F. A. **Avaliação do processo de fabricação de telhas e blocos cerâmicos visando a certificação do produto**. 2003. 152f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2003.

BELLINTANI, S.A.; GILI, F. N. **Noções básicas de proteção radiológica**. s.l.: IPEN, 2002.

BEZERRA, F.D. Perfil da indústria de cerâmica vermelha no nordeste. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49, 2005, São Paulo. **Anais...**, São Paulo, São Paulo, 2005. 1 CD-ROM.

BORBA, C. D. G.; RODRIGUES NETO, J.B. et. al. Estudo de matérias-primas fundentes. **Cerâmica Industrial**, v.1, n.1, p.34, 1996.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE. **Resolução nº6, de 1988**. Dispõe sobre as normas técnicas gerais sobre o sistema nacional de vigilância Sanitária. Brasília, DF. 1988.

_____. **Lei Ordinária nº 6.514, de 22 de dezembro 1977**. Altera o capítulo V do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo à segurança e medicina do trabalho. Brasília, 1977.

_____. Ministério da Saúde. Instituto de Câncer. **Blindagem em radioterapia: técnica e normas.** Rio de Janeiro, INCA, 2000.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **Aprova as normas regulamentadoras – NR, do Capítulo do Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo à segurança e medicina do trabalho.** Brasília, 1978.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **NR-6: Equipamento de proteção individual,** Brasília, DF, 1978.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **NR-7: Programa de controle médico de saúde ocupacional,** Brasília, DF, 1978.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **NR-16: Atividades e operações perigosas,** Brasília, DF, 1978.

BUSHBERG, J.T.; SEIBERT, J.A.; LEIDHOLDT JR. E. M.; BOONE, J.M. **The essential physics of medical imaging.** Maryland: Williams & Wilkins, 1994.

CARVALHO, O.O. **Perfil industrial da cerâmica vermelha do Rio Grande do Norte.** Natal- RN: SENAI, 2001. 1 CD-ROM.

CEMBER, H. **Introduction to Health Physics.** 3.ed. USA: Pergamon Press, 1996.

CHUI, Q.S.H. **Uso de vermiculita massapé paulistana como adsorvedora de metais.** Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN/NE – 3.01: Diretrizes básicas de radioproteção.** São Paulo, 1988.

_____. **CNEN/NE – 3.05: Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear.** São Paulo, 1996.

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, 1999.

CULTURA, disponível em:

www.cultura.com.br/radiologia/trabalho/noseasiv/noseaiv.htm. Acesso em: 3 dez. 2008.

SOUZA, L Cunha de. **Zoneographie metamorphique, chimie des mineraux, petrochimie**, geocronologie $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ et historie P-T-t dès micaschistes englobant le massif gabro-granitique d'Acari (Brasiliano), ceinture móbile du Seridó (Ne du Bresil). Laboratoire de Géologie et Mineralogie, Universite Catholique de Louvain, Thése Docteur en Sciences, 345 p.

DA SILVA, J. B. **Avaliação da potencialidade dos resíduos de gesso de revestimento incorporados em formulações de massas cerâmicas**. Natal, 2008. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2 ed. USA: Paperback, 1992.

DE VOS, D.C. **Basic principles of radiographic exposure**. 2 ed. Westwood: Willians & Wilkins, 1995.

DIXON, R. L., SIMPKIN, D. J. Primary Shielding Barrier for Diagnostic X-Ray Facilities: A New Model. **Health Physics**, v.2, n.74, p. 181-189, 1998.

DUTRA, R.P.S., ARAUJO, P.A.S. et al. Desenvolvimento de formulações de massas para a indústria de cerâmica vermelha do Rio Grande do Norte. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n.3, p.15, 2006.

DUTRA, R.P.S., ARAUJO, P.A.S., et al. **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**. Natal, 2007. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

EVANS, R.D. **The atomic Nucleus**. USA: Roberth e Kringer Publishing Company, Inc; 1982.

FACINCANI, E. **Tecnología cerámica los ladrillos**. 1 ed. Castellón: Faenza Editrice Ibérica, 1993.

FONSECA, M.G., AIROLDI, C. Híbridos inorgânicos-orgânicos derivados da reação de filossilicatos com organossilicatos. **Química Nova**, 2003.

FREITAS, L. C.; DREXLER, G. The role of secondary standard dosimetry laboratories in diagnostic radiology. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 43, n. 1, p. 99-102, 1992.

FRIMAIO, A. **Desenvolvimento de um material Cerâmico para utilização em proteção Radiológica Diagnóstica**. São Paulo, 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares, Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, P.S.; VALDERLINDE, F. V. F. Tecnologia cerâmica: núcleo Cerâmica, S.l.: SENAI, 2003.

GOMES, C. F. **Argilas: o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.

GRIFFITHS, J. Barytes. A heavyweight amongst fillers. In: BOLGER, R. L.; O'DRISCOLL M. J. **Raw Materials for Filler: pigments and extender**. 2.ed. Industrial Mineral Consumer Survey, p.55-58.

GRUPO GRX, Disponível em: http://www.rxnet.com.br/grx/argamassa_baritada.htm. Acesso em: 19 dez. 2008.

HARBEN, P.W. The Industrial Minerals HandyBook. 4.ed. Barite and barium compounds, 2002. p.28-34.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Summary of the current ICRP principles for protection of the patient in diagnostic radiology**. Oxford and New York: Pergamon Press, 1993.

_____. **Recommendations of the Internacional Commission on Radiological Protection**, ICRP Report 26. ICRP Publications, Elmsford: NY, Pergamon Press, 1977.

_____. **Recommendations of the Internacional Commission on Radiological Protection**, ICRP Report 60. ICRP Publications: Elmsford, NY, Pergamon Press, 1990.

_____. **Radiological protection and safety in medicine**, ICRP Report 73. ICRP Publications: Elmsford, NY, Pergamon Press, 1996.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: Recommendations for the safe use and regulation sources in industry, medicine reseach and teaching. Safety Series, n°102, Viena 1990.

INSTITUTO de Radioproteção e Dosimetria. **Curso Básico de Proteção Radiológica em Radiodiagnóstico**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1999.

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

KERR, P. F. **Optical mineralogy**. EUA: Library of Congress Cataloging in Publication Data, 1961.

LEITE, S.Q.M., COLODETE, C.H.A., DIEGUEZ, L.C. **Extração de ferro de esmectita brasileira com emprego do método ditionito-citrato-bicarbonato**. S.l.: Química Nova, 2000.

MACHADO, F.B., MOREIRA, C.A. et al. **Enciclopédia Multimídia de Minerais e Atlas de Rochas**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>>. Acesso em: 13 ago 2006.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Secretaria de Assistência à Saúde. **Normas para Projetos Físicos de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde**. Departamento de Normas Técnicas: Brasília, 1995.

_____. Portaria n° 453. Diretrizes de Proteção Radiológica em radiodiagnóstico Médico e Odontológico. **Diário Oficial da União**. Brasília: 1998.

_____. Portaria n° 1884. Aprova as normas que com estas baixam destinadas ao exame e aprovação dos Projetos físicos de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde. **Diário Oficial da Saúde**. Brasília: 1994.

MOTTA, J.F.M., CABRAL JUNIOR, M., et.al. **As matérias-primas cerâmicas Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional**. Cerâmica Industrial, 2002.

NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **NCRP 49: Structural shielding design and evaluation for medical use of Xrays and gamma rays of energies up to 10 Mev**. Bathesda: NCRP Publications, 1976.

_____. **NCRP 107: Implementation of the principle of as Low as reasonably Achievable (ALARA) for medical and dental personal**. Bathesda: NCRP Publications, 1990.

_____. **NCRP 147: Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities.** NCRP Publications, Bethesda, MD, 2004.

NESI, J. R. **Minerais Industriais do Estado do Rio Grande do Norte.** 1 ed. Recife: CPRM, 1999 **NÚCLEO PROTEÇÃO RADIOLOGICA**, disponível em: <http://www.nucleo.com/faq.html#01>. Acesso em: 25 jul. 2009.

OLIVEIRA, A. P. N. Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v.5, n.6, p. 37-47, nov./dez. 2000.

PALLESTRINI, L. A Cerâmica pré-histórica no estado de São Paulo. **Revista Cerâmica**. São Paulo, v. 29, n.159, p. 71-74, 1983.

PÓLO PRODUÇÕES LTDA. **Anuário Brasileiro da Cerâmica Vermelha.** Pólo Produções Ltda. Santa Catarina, 2000.

RIELLA, H.G., FRANJNDLICH, E.U.C., DURAZZO, M. Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v.7, n.3, p.33, 2002.

SANTOS, C.V., CHAGAS, A.A.P., CASTRAL JR, J. Estudo da influência da proporção dos argilominerais ilita/caulinita nas propriedades físicas de argilas da região de Santa Gertrudes - SP. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 43, 1999. **Anais...**, Florianópolis, Santa Catarina, 1999. 1 CD-ROM.

SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia de argilas**, v.1, 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

SCAFF, L. A.M. **Bases Físicas da radiologia: diagnostico e terapia.** São Paulo: Sarvier, 1979.

SCAFF, L.A.M. **Física da Radioterapia.** São Paulo, SP: SAVIER, 1997.

SEARLS, J. P. Barite. **Mineral Industry Surveys**, USGS, 2004.

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.

SIMPKIN, D. I. Fitting Parameters for Medical Diagnostic X-Ray Facilities. **Health Physics**. v.68, n.3, p. 704-709, 1995.

SOARES, J.M.D., TOMAZETTI, R.R., TAVARES, I.S., PINHEIRO, R.B. Panorama socioeconômico das indústrias de cerâmica vermelha da região central do estado do Rio Grande do Sul. **Cerâmica Industrial**, v.9, n.3 p. 43, 2004.

SOUZA, C., L. Zoneographie metamorphique, chimie des mineraux, petrochimie, geocronologie $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ et historie P-T-t des micaschistes englobant le massif gabro-granitique d'Acari (Brasiliano), ceinture mobile du Seridó (Ne du Bresil). Laboratoire de Géologie et Mineralogie, Université Catholique de Louvain, Thèse Docteur en Sciences, 345 p.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – SUDENE. **Conservação de energia no setor industrial**: cerâmica estrutural. Sudene. Pernambuco, 1989.

TAVARES, S. F., GRIMME, F.W. Análise de processos produtivos em cerâmica vermelha: estudo de caso comparativo entre Brasil e Alemanha. In.: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 9. **Anais...**, Foz do Iguaçu, PA 2002.

TURCANIOVA, L., SHIMADA, S., BALAZ, P. E ELIAS, K. Thermoanalytical Study of Baryte Decrepiation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. Vol. 67, p. 555-562, 2002.

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: 3 mar.2007.

VELHO, J.; GOMES, C.; ROMARIZ, C. **Minerais Industriais**. Universidade de Aveiros, 1998.

VÉRAS, A. M. **Barita**. Sumário Mineral, DNPM, 2004.

VERÇOSA, Enio José. **Materiais de Construção**. Porto Alegre, PUC-EMA, 1985.

VILLAR, V. S. **Perfil e perspectivas da indústria de cerâmica vermelha no sul de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 1988.

WRIGHT, D. J.; RAMSDALE, M. L. The use of national and locally set reference dose level in a regional programme for dose reduction in diagnostic radiology. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 80, n. 1, p. 103-107, 1998.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Resultados da avaliação quanto à especificação dos blocos cerâmicos de vedação para alvenaria

Especificação dos blocos cerâmicos de vedação para alvenaria

Nº Bloco	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Desvio em relação ao esquadro (D) (mm)	Planeza das faces (F) (mm)	Paredes Externas (mm)	Septos dos blocos (mm)
01	194	92	188	3,0	7,0	9,0	8,0
02	193	92	189	3,0	7,0	9,0	7,0
03	193	92	187	3,0	3,0	9,0	8,0
04	192	91	188	3,0	6,0	9,0	7,0
05	194	91	188	2,0	3,0	9,0	8,0
06	193	92	188	3,0	3,0	8,0	7,0
07	193	91	189	2,0	3,0	8,0	8,0
08	194	91	189	2,0	6,0	9,0	7,0
09	191	92	189	3,0	2,0	7,0	7,0
10	192	91	189	0,5	3,0	8,0	7,0
Média	193	92	188	2,5	4,3	8,5	7,4
DP	0,1	0,1	0,1	0,7	1,8	0,6	0,6
Resultado	193±0,1	92±0,1	188±0,1	2,5±0,7	4,3±1,8	8,5±0,6	7,4±0,6

LEGENDA: DP = desvio padrão.

Especificação dos blocos cerâmicos de vedação para alvenaria (continuação)

N° Bloco	Massa seca (m _s) (Kg)	Massa úmida (m _u) (Kg)	Absorção de água (AA) (%)	Resistência a compressão (MPa)
01	2,512	2,772	10,350	1,39
02	2,494	2,764	10,826	1,52
03	2,504	2,756	10,064	1,61
04	2,512	2,770	10,271	1,57
05	2,516	2,776	10,344	1,59
06	2,518	2,778	10,326	1,45
07	2,526	2,798	10,768	1,49
08	2,532	2,816	11,216	1,52
09	2,510	2,774	10,518	1,43
10	2,506	2,750	9,737	1,38
Média	2,518	2,783	10,4	1,50
DP	0,0	0,0	0,4	0,1
Resultado	2,5	2,8	10,4±0,4	1,50±0,1

LEGENDA: DP = desvio padrão