

DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE BLINDAGEM PARA CONSTRUÇÕES  
TIPICAMENTE BRASILEIRAS

Isabel Cristina Poquet Salinas

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

---

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

---

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

---

Dra. Elaine Rua Rodriguez Rochedo, D.Sc.

---

Dr. Evaldo Simões da Fonseca, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2006

SALINAS, ISABEL CRISTINA POQUET

Determinação dos fatores de blindagem  
para construções tipicamente brasileiras  
[Rio de Janeiro] 2006

IX, 127 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,  
Engenharia Nuclear, 2006)

Tese – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Fator de blindagem
2. Medida de kerma no ar
3. Modelagem materiais de construção
4. Teses

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) pelo conhecimento técnico-científico adquirido para a realização deste trabalho.

Ao professor Ricardo Tadeu Lopes, pela orientação deste trabalho, pelo apoio e compreensão constante diante das dificuldades de um aluno em trabalho de tese.

Ao meu marido Claudio Conti pelo auxílio, ensinamentos, compreensão e carinho imensurável, dedicado ao longo deste trabalho.

À Elaine pelo apoio e sugestões oferecidas para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Evaldo e a Walsan pela manutenção do sistema Linux onde parte dos cálculos foram realizados.

Ao Wagner pela compreensão e carinho recebido.

Aos amigos do Serviço de Análises Ambientais (SEANA) pelo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.

Aos professores da COPPE/Engenharia Nuclear pelos conhecimentos transmitidos e à equipe da Secretaria, pela ajuda em todos os processos administrativos.

Aos amigos do IEN e especialmente à Eliane Pavesi, pelo incentivo recebido.

À Rose pela ajuda na verificação da ortografia.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE BLINDAGEM  
PARA CONSTRUÇÕES TIPICAMENTE BRASILEIRAS

Isabel Cristina Poquet Salinas

Outubro/2006

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Este estudo apresenta uma metodologia para a determinação do kerma no ar no interior de residências devido à contaminação de superfícies externas e a obtenção de fatores de blindagem dos materiais de construção para sua utilização em sistemas de modelagem de acidentes nuclear e/ou radiológico em áreas urbanas. Os materiais de construção utilizados foram simulados através do código MCNP. Foi desenvolvida uma metodologia especial para simular o tijolo furado, onde suas várias regiões foram mescladas formando apenas uma região, tornando a simulação mais fácil e rápida. Foram determinados a densidade efetiva e os coeficientes de atenuação de massa para a faixa de energia de 50 - 3000 keV. A proteção efetiva dos tijolos sem nenhuma camada de argamassa cai de 40-50% para energias maiores que 300 keV quando comparada com tijolos revestidos em ambos lados. Com os dados obtidos foi possível avaliar a influência da densidade dos materiais de construção e a espessura das paredes sobre a exposição interna devido à contaminação de superfícies externas, e estimar o erro na dose quando os fatores de blindagem aplicado nos cálculos diferem daqueles realistas. Foram determinados os fatores de blindagem para três tipos de paredes para uma casa de cinco cômodos. Medidas especiais de proteção devem ser aplicadas para residências construídas com tijolos sem revestimento de argamassa, pois estão sujeitas ao dobro da dose quando comparadas com casas possuindo os dois lados revestidos. A influência de janelas e portas também foi avaliada. Este trabalho foi desenvolvido no IRD a fim de fornecer informações dos materiais de construção comumente empregados nas residências brasileiras.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DETERMINATION OF SHIELDING FACTORS  
FOR TYPICAL BUILDINGS IN BRAZIL

Isabel Cristina Poquet Salinas

October/2006

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

This study presents a methodology for the determination of the air kerma inside buildings due to contamination on the external surfaces and the shielding factors for the construction material to be used on emergency assessment systems for urban areas. The commonly used construction materials were simulated with the MCNP computer code. A special methodology to simulate the bricks with holes were developed, mixing all different regions into a single one, making the simulation easier and faster. The effective density and the attenuation coefficients for the 50-3000 keV energy range were determined. The effective protection for the bricks with no cement cover decreases by 40-50% for energies greater than 300 keV when compared to bricks covered on both sides. With the data made available it was possible to evaluate the influence of the construction materials densities and thickness on the exposure due to external surfaces contamination and to estimate the error on the dose when the shielding factor applied on the calculation differs from the more realistic ones. The shielding factors for three types of walls were determined for a five rooms house. Special protection procedures should be applied for houses built with bricks with no cement cover, because they are due to the double of the dose when compared to houses built with bricks two-sided cement covered. The influence of windows and doors were evaluated too. This work was developed at the IRD in order to provide information on the construction material commonly uses on building in Brazil.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
SUMÁRIO.....	vii
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO .....	6
1.2 TRABALHOS CORRELATOS DESENVOLVIDOS NO IRD.....	7
CAPÍTULO 2 .....	10
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	10
2.1 PRINCIPAIS INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA ....	10
2.1.1 Grandezas (ICRU, 1993) .....	11
2.1.2. Cálculo de kerma no ar.....	13
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	15
2.2.1 Argila - Tijolos .....	15
2.2.2 Cimento .....	16
2.2.2.1 Argamassa .....	17
2.2.2.2 Concreto .....	19
2.2.3 Amianto Comercial .....	19
2.2.4 Madeira.....	20
2.2.5 Vidro.....	21
CAPÍTULO 3 .....	23
MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	23
3.2 MÉTODO DE MONTE CARLO .....	24
3.2.1 Código MCNP .....	24
3.2.2 Estrutura dos dados de entrada do MCNP.....	25
3.2.2.1 Descrição das células (Cell Cards) .....	26
3.2.2.2 Descrição das superfícies (Surface Cards) .....	26
3.2.2.3 Fonte (Source Cards).....	27
3.2.2.4 Composição química dos materiais (Data Cards) .....	27
CAPÍTULO 4 .....	28
MODELAGEM DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	28
4.1 MATERIAIS ESTUDADOS.....	28
4.2 MODELAGEM DO TIJOLO FURADO .....	30
4.2.1 Validação do modelo simplificado.....	31
CAPÍTULO 5 .....	33
MEDIDAS DE TRANSMISSÃO .....	33

5.1 CÁLCULO DO “I” EFETIVO PARA O TIJOLO FURADO .....	34
5.1.1 Contribuição de cada região .....	35
5.1.2 Contribuição da argamassa de junção .....	39
5.1.3 Contribuição da argamassa do emboço .....	42
 CAPÍTULO 6 .....	 43
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA PARA OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	 43
6.1 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE .....	43
6.1.1 Determinação do efeito da variação da composição na densidade efetiva do material para a argila e amianto.....	45
6.1.1.1 Argila .....	45
6.1.1.2 Amianto .....	46
6.1.2 Verificação visual da densidade do tijolo.....	46
6.2 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR TOTAL, $\mu$ .....	47
6.2.1 Determinação do coeficiente de atenuação de massa.....	48
 CAPÍTULO 7 .....	 49
DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE BLINDAGEM PARA CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS .....	 49
7.1 MODELAGEM DA RESIDÊNCIA.....	49
7.2 DETERMINAÇÃO DO KERMA NO AR.....	51
7.2.1 Cálculo do fator de blindagem.....	52
7.3 EFEITO DE JANELAS E PORTAS SOBRE O FATOR DE BLINDAGEM GAMA PARA RESIDÊNCIAS BRASILEIRAS .....	 53
7.3.1 Modelagem da residência .....	53
 CAPÍTULO 8 .....	 58
COMPARAÇÃO DO KERMA NO AR NO INTERIOR DE RESIDÊNCIAS ENTRE PAÍSES DE CLIMA TROPICAL E TEMPERADO DEVIDO À CONTAMINAÇÃO EXTERNA DE PAREDES .....	 58
8.1 MODELAGEM DA RESIDÊNCIA.....	58
8.1.1 Material de construção das paredes em residências de clima tropical .....	59
8.1.2 Material de construção das paredes em residências de clima temperado.....	59
8.2 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO.....	60
 CAPÍTULO 9 .....	 61
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	61
9.1 MODELAGEM DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	61
9.1.1 Composição química dos materiais de construção estudados .....	61
9.1.1.1 Argila .....	62
9.1.1.2 Amianto .....	64
9.1.2 Validação do modelo simplificado para o tijolo.....	65
9.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO PARA OS MATERIAIS ESTUDADOS.....	 66
9.2.1 Coeficientes de atenuação de massa.....	69



9.3 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE BLINDAGEM PARA CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS .....	73
9.3.1 Residências de cinco cômodos .....	74
9.3.2 Efeito de janelas e portas sobre o fator de blindagem para residências brasileiras .....	76
9.4 COMPARAÇÃO DO KERMA NO AR NO INTERIOR DE RESIDÊNCIAS ENTRE PAÍSES DE CLIMA TROPICAL E TEMPERADO DEVIDO À CONTAMINAÇÃO EXTERNA DE PAREDES .....	79
 CAPÍTULO 10 .....	 81
CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	81
10.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	84
 REFERÊNCIAS .....	 85
 APÊNDICE A .....	 91
Effective density and mass attenuation coefficients for building material in Brazil.....	91
 APÊNDICE B.....	98
Gamma shielding factor for typical houses in Brazil .....	98
 APÊNDICE C.....	104
Effect of windows and doors on the gamma shielding factor for typical houses in Brazil	104

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

A determinação da taxa de dose devido à exposição à radioatividade ambiental é um dos objetivos básicos de qualquer programa de monitoração. Por isso, nas últimas décadas, houve um crescente interesse na determinação dos níveis de radiação gama ambiental, aos quais a população de uma determinada região está exposta (GIBSON et al., 1969, JULIUS AND VAN DONGEN, 1985, OTHMAN, 1995, MALANCA AND GAIDOLFI, 1996, SAJÓ-BOHUS et al., 1999, KLUSON, 2001, WANG, 2002, DOWDALL et al., 2003, SANDERSON, 2004, FLORES et al., 2004, MUMINOV et al., 2005, SENGUPTA et al., 2005).

A radiação ambiental é composta tanto da radiação natural quanto da artificial. A radiação natural é proveniente dos isótopos radioativos naturais encontrados no solo e da radiação cósmica, enquanto que a radiação artificial é decorrente de fontes produzidas pelo homem, tais como a precipitação radioativa devido a testes de artefatos nucleares na atmosfera, a liberação de efluentes de instalações nucleares, o uso de radioisótopos na medicina e na indústria, a ocorrência de acidentes radioativos ou nucleares, etc, os quais, eventualmente, não mais contribuirão para a dose devido à desintegração radioativa. (SACHETT, 1999, MIAH, 2004).

Os acidentes radiológicos não estão restritos a uma instalação, mas podem acontecer em praticamente qualquer lugar. Embora sob o ponto de vista ambiental e de exposição do público não sejam comparáveis a acidentes nucleares em relação à dimensão da área e

número de pessoas afetadas. Acidentes com materiais radioativos e fontes de radiação têm maior probabilidade de ocorrer e, normalmente, envolvem a exposição de pequeno número de pessoas, porém, as doses podem ser altas (CONTI, 2002). Por sua vez, o acidente nuclear com o reator em Chernobyl, em 1986, ressaltou a necessidade para o desenvolvimento de estratégias de identificação e mitigação das potenciais conseqüências de uma contaminação radioativa em ambientes urbanos, logo o interesse pela avaliação da exposição à radiação nestes ambientes também cresceu muito.

Na busca por melhores procedimentos de estimativa de dose, vários modelos utilizando programas computacionais foram desenvolvidos, dentre eles pode-se citar o modelo EXPURT (CRICK AND BROWN, 1990) onde avalia doses gama externa para os membros do público em ambientes urbanos e que JONES et al. (2006) apresenta na versão 3.0 uma revisão do modelo descrito por CRICK AND BROWN (1990) e o modelo URGENT, que prediz a taxa de dose em ambientes urbanos, em função do tempo, para várias densidades de população (ANDERSSON, 1996). EGED et al. (2006) fornece uma visão geral dos diferentes caminhos para o cálculo do transporte de fótons em áreas urbanas e de alguns modelos computacionais de cálculos de dose publicados.

Pode-se ressaltar o esforço realizado após o acidente de Goiânia, em 1987, por exemplo, decorrente da abertura e dispersão, à nível do solo, de uma fonte de Cs<sup>137</sup> para radioterapia, quando a revista HEALTH PHYSICS (1991) publicou uma edição especial reportando diversos aspectos médicos, científicos e técnicos preparados por especialistas brasileiros, relacionados ao acidente e ROCHEDO (2000) descreve o acidente, as ações realizadas e o acompanhamento ambiental de Goiânia, para citar

algumas dentre o amplo número de publicações disponíveis na literatura (IAEA, 1988, GODOY et al., 1997, FACURE et al., 2001a, 2001b, UMICEDO et al., 2001).

Contudo, ainda que todas as precauções sejam tomadas para se evitar uma liberação acidental de material radioativo, as autoridades devem estar cientes que, caso aconteça, várias medidas mitigadoras serão necessárias e as decisões imediatamente ao acidente serão tomadas sob forte pressão.

Tendo em vista que, como nas últimas décadas, tem aumentado consideravelmente a variedade de usos e quantidades de material radioativo ao redor do mundo, torna-se necessário um desenvolvimento contínuo de metodologias para estimar, tão precisamente quanto possível, a dose a qual uma população poderia estar exposta no caso de um acidente ocorrer.

Modelos dinâmicos capazes de prever o comportamento ambiental dos radionuclídeos mais relevantes, sob o ponto de vista de exposição do público, vêm sendo desenvolvidos ou adaptados para uso no Brasil (ROCHEDO et al., 1996, 1997, 1998, CONTI et al., 2002). Estes modelos têm como principal objetivo a estimativa de dose a curto, médio e longo prazos após uma contaminação ambiental, bem como a eficiência da implementação de medidas de proteção visando à redução de dose devido ao material depositado em função do tipo de área afetada pelo acidente.

Para atingir este intento, é necessário um conhecimento mais detalhado das propriedades de proteção das construções, pois a blindagem da exposição gama que elas oferecem, pode reduzir substancialmente a dose, sendo, portanto, um componente

importante na avaliação dos cálculos de risco para instalações nucleares e para o planejamento de medidas de gerência no caso de ocorrência de um acidente (MECKBACH et al., 1987, STEINHÄUSLER, 1987, MECKBACH et al., 1988).

Vários trabalhos têm sido realizados com o objetivo de determinar as características físicas de materiais de construção para regiões específicas (BASHTER, 1997, ALAM et al., 2001, AKKURT et al., 2004, SINGH et al., 2004, AKKURT et al., 2005, SALINAS et al., 2006). LE GRAND et al. (1987) reportam a dependência dos fatores de proteção com as estruturas das edificações e menciona que abrigar as pessoas em seus domicílios seria uma das medidas de proteção na qual poder-se-ia reduzir a exposição da população.

ROCHEDO (1994) cita a grande relevância e a necessidade de se efetuar um levantamento dos materiais de construção utilizados no Brasil, em relação à sua blindagem, em ambientes urbanos tipicamente tropical. A determinação destes parâmetros proporcionaria condições para se determinar dados mais realísticos para as habitações brasileiras, compondo um banco de dados de modelos de cálculos de dose e, assim, estar em condições de melhor estimar a dose a que uma população estaria exposta em caso de um acidente nuclear ou radiológico.

A partir de um conhecimento prévio da proteção efetiva que os materiais de construção das residências podem prover, é possível avaliar a contribuição para a dose de uma eventual pluma e deposição de material radioativo sobre telhados, jardins e paredes, e estimar a diminuição de dose recebida pela população por estar simplesmente em sua própria residência, evitando, assim, a necessidade de evacuação e diminuindo

transtornos a indivíduos já sensibilizados pelo acidente. Ademais, se torna viável a estimativa dos níveis de descontaminação que devem ser alcançados para garantir que a exposição, a curto, médio e longo prazos, seja minimizada.

As condições atmosféricas influenciam o comportamento dos radionuclídeos dispersos no meio ambiente (VINHAS et al., 2005), mas também são relevantes nas características das moradias, influenciando o tipo de residências existentes na região ou país. Regiões de clima temperado tendem a apresentar habitações mais robustas, proporcionando maior blindagem, enquanto que nos de clima tropical tendem a ser mais leves, proporcionando menor blindagem.

Os cálculos de estimativa de dose devem incluir a inalação de aerossóis e ingestão de alimentos contaminados, o que dependerá do comportamento do radionuclídeo disperso no ambiente, contudo, também é necessário considerar a contribuição da exposição externa para cálculos mais realistas. A população pode estar exposta tanto fora quanto dentro de suas casas, pois, como exemplo, os moradores da Califórnia, nos Estados Unidos, permanecem, em média, 87% do tempo dentro de prédios (JENKINS et al., 1992). Analisando, mesmo que superficialmente, as habitações em geral, verifica-se que as construções em clima temperado tendem a ser mais robustas que nas regiões de clima tropical.

Por estes motivos, para uma melhor estimativa de dose é importante um conhecimento prévio do clima da região de interesse para considerar o comportamento dos radionuclídeos no meio-ambiente e as características predominantes das habitações.

A proteção oferecida pelas construções é quantificada pelo fator de blindagem definido como sendo a razão entre o kerma no ar no interior de uma residência e o kerma no ar em campo aberto. Várias são as publicações que apresentam esses fatores para examinar a redução da exposição no interior das residências, devido à contaminação externa em construções de países de clima temperado (JENSEN, 1985, LE GRAND et al., 1987, JACOB AND MECKBACH, 1987, MECKBACH AND JACOB, 1988, MÜCK, 1996).

Com o desenvolvimento deste trabalho pôde-se determinar os fatores de blindagem de alguns dos materiais de construção utilizados no Brasil (SALINAS et al., no prelo a, SALINAS et al., no prelo b).

Procedimentos de cálculo utilizando o método de Monte Carlo, vem ganhando terreno com a evolução dos computadores pessoais e atualmente é a principal ferramenta para o estudo da exposição gama devido à radioisótopos depositados em ambientes urbanos (JACOB AND MECKBACH, 1987, MECKBACH AND JACOB, 1988, MECKBACH et al., 1988, MECKBACH et al., 1996, GÖKSU et al., 1996, CLOUVAS et al., 1998, 2000, EGED et al., 2006).

## 1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal determinar os fatores de blindagem dos principais tipos de materiais de construção normalmente empregados no Brasil, especialmente no Estado do Rio de Janeiro, onde estão localizados os reatores nucleares. Todavia, o procedimento desenvolvido deverá viabilizar o cálculo para qualquer outro material empregado tanto dentro do Estado quanto fora dele. Para atingir

o objetivo será ainda necessário determinar a densidade e os coeficientes de atenuação destes materiais.

Este trabalho faz parte do esforço realizado pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN) em aprimorar os procedimentos de estimativa de dose. Os parâmetros determinados por este estudo serão empregados no Sistema Integrado para Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental em Situações de Emergência, desenvolvido no IRD.

## 1.2 TRABALHOS CORRELATOS DESENVOLVIDOS NO IRD

O IRD vem desenvolvendo ao longo dos anos trabalhos com o objetivo de obter, cada vez mais, um melhor planejamento e resposta à situações de emergências radiológicas e/ou nucleares. Assim, vem dedicando esforços em projetos de desenvolvimento de métodos para avaliação de dose em casos deste tipo de acidente em áreas urbanas.

Os trabalhos correlatos desenvolvidos no IRD são apresentados a seguir em ordem cronológica:

- PARATI - Modelo para Avaliação da Exposição Radiológica em um Ambiente Urbano após uma Contaminação Radioativa (ROCHEDO, 1994).

Desenvolve um modelo quantitativo e dinâmico para a avaliação da exposição de indivíduos do público resultante de uma contaminação radioativa nas superfícies de ambientes urbanos e semi-urbanos, após uma liberação acidental de material radioativo.



O modelo foi projetado para estimar a exposição radiológica acumulada, para diferentes tipos de pessoas, como uma função do tempo; para indicar a contribuição para esta exposição relativa a cada via de exposição; e indicar possíveis contramedidas e sua eficácia relativa, sob o ponto de vista de redução de doses.

- Medida de Kerma no Ar e Determinação de Coeficientes de Conversão para Dose devido à Radiação Gama Ambiental (CONTI C., 1999).

Estabelece uma metodologia para calibração de detectores de germânio, empregados na espectrometria gama *in situ*, para a determinação da distribuição da taxa de kerma no ar em função da energia, devido à radioatividade ambiental e calcula fatores de conversão de kerma no ar para dose, aplicável em exposição gama ambiental devido à fonte plana infinita. Empregou-se o método de Monte Carlo através do código “Eletron Gamma Shower” - EGS4.

- Caracterização da Radiação Gama Ambiental em Áreas Urbanas Utilizando uma Unidade Móvel de Rastreamento (SACHETT, 2002).

Determina curvas resposta de detectores NaI(Tl) empregados na determinação de taxa de kerma no ar, utilizando o método de Monte Carlo através do código “Elétron Gamma Shower (EGS4); estabelece metodologia de calibração de detectores de grande volume acoplados a uma unidade móvel de espectrometria gama, empregados na medida direta de taxa de kerma no ar em áreas urbanas, e um mapeamento radiométrico terrestre das regiões urbanas de Guarapari – ES e do Planalto de Poços de Caldas – MG, com a unidade móvel de rastreamento.

- Desenvolvimento de um Sistema Integrado para Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental em Situações de Emergência (CONTI L., 2002).

Desenvolve um modelo integrado, quantitativo e dinâmico, que permite a avaliação da exposição de indivíduos do público como consequência de uma liberação acidental de material radioativo. O sistema é composto por diversos modelos de previsão do comportamento ambiental dos radionuclídeos a curto, médio e longo prazos, para ambientes urbanos e rurais sendo flexível para simular a exposição de membros do público devido desde pequenos acidentes envolvendo fontes individuais até acidentes nucleares de larga escala.

## **CAPÍTULO 2**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

A radiação direta ou indiretamente ionizante é caracterizada por seu poder de interagir com a matéria. Nestas interações, normalmente ocorre transferência de energia da radiação para a matéria, provocando uma série de excitações e ionizações de átomos ao longo do seu percurso. A Física Radiológica estuda estas radiações, suas interações, os mecanismos de transferência e a absorção de energia, enquanto que a Dosimetria de Radiação quantifica a energia transferida ou absorvida.

#### **2.1 PRINCIPAIS INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA**

Os três processos mais importantes de interações de fótons com a matéria são o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton e a produção de pares, sendo que este último ocorre somente para energias de fótons maiores que 1,022 MeV. Adicionalmente, outro processo de interesse é o espalhamento coerente (Rayleigh), que se torna importante na região de baixas energias (KNOLL, 1999, p.48-53).

- Efeito fotoelétrico: é a interação que ocorre quando o fóton colide com um elétron fortemente ligado ao átomo do material e toda a sua energia é transferida para este elétron, que é ejetado de uma das camadas eletrônicas do átomo. Este efeito é predominante em baixas energias e também é acentuado quando o material alvo é de alto número atômico.

- Efeito Compton: é a interação que ocorre quando o fóton colide com um elétron

considerado livre no material e somente parte de sua energia é transferida; o fóton sofre espalhamento saindo, assim, de sua trajetória inicial. Não obstante, pode ocorrer espalhamento múltiplo onde, no final, toda a energia do fóton pode ser depositada em um certo volume do material. Este efeito é predominante em baixas e médias energias e aumenta linearmente com o número atômico do material.

- Produção de pares: é o modo de interação que somente é possível em energias superiores a 1,022 MeV onde o fóton, ao atravessar um campo de força coulombiana, perde toda a sua energia na criação de um par elétron-pósitron, com o somatório de suas energias cinéticas igual à energia do fóton excedente a 1,022 MeV, que equivale a duas vezes a energia de repouso do elétron.

- Espalhamento Rayleigh (coerente): é uma colisão elástica, na qual o fóton é redirecionado, sofrendo um desvio de trajetória de um pequeno ângulo, sem perda de energia.

As interações da radiação com a matéria descritas acima, podem produzir excitação ou ionização das moléculas; se esta molécula está numa célula viva, esta célula poderá sofrer danos. Os efeitos podem ser diretos, se a molécula é crítica à função celular, ou indiretos, pelas mudanças químicas nas moléculas adjacentes.

### 2.1.1 Grandezas (ICRU, 1993)

Fluência ( $\Phi$ ), grandeza radiométrica, definida, pelo ICRU, como:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad 2.1$$

Onde:

$N$  é o número de partículas incidentes sobre uma esfera de seção de área  $da$ .

Fluência de energia ( $\Psi$ ):

$$\Psi = \frac{dR}{da} \quad 2.2$$

Onde:

$R$  é a energia radiante incidente sobre uma esfera de seção de área  $da$ .

Dose absorvida ( $D$ ):

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad 2.3$$

Onde:

$d\bar{\epsilon}$  é a energia média depositada pela radiação ionizante em um meio de massa  $dm$ .

A dose absorvida é expressa em J/kg no sistema internacional e o nome especial para esta unidade é gray (Gy);

Como os efeitos da radiação podem variar de acordo com a qualidade da radiação para uma mesma dose absorvida, foi necessário criar um conceito com o qual fosse possível comparar os efeitos devido às diferentes qualidades de radiação. A dose equivalente utiliza um fator para correlacionar os efeitos das diferentes qualidades de radiação comparativamente a uma radiação de referência.

Kerma (K):

É o quociente da soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas, liberadas por partículas não carregadas incidentes em um material de massa  $dm$ , ou seja, energia transferida,  $dE_{tr}$ , em determinado elemento de volume  $dV$ , dividido pela massa  $dm$  do elemento.

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad 2.4$$

O kerma em um ponto  $P$  está relacionado à fluência de energia  $\Psi(E)$  pelo coeficiente de transferência de energia por massa  $(\mu_{tr}/\rho)_{E,Z}$ , característico para cada energia de fóton, e o número atômico do material em  $P$ . Para feixes mono energéticos esta relação é dada por:

$$K = \Psi \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{E,Z} \quad 2.5$$

No caso em que há um espectro de energia de fótons, variando de  $E_0$  a  $E_{MAX}$ , presente no ponto de interesse, a relação entre o kerma e a fluência de energia é dada por:

$$K = \int_{E_0}^{E_{MAX}} \Psi(E) \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{E,Z} dE \quad 2.6$$

O kerma é expresso em J/kg no sistema internacional, tendo o nome especial de gray.

### 2.1.2. Cálculo de kerma no ar

A taxa de kerma no ar é uma forma conveniente de caracterizar um campo de radiação gama. Conseqüentemente, é importante relacionar o kerma no ar com a fluência de

energia. Primeiramente, pode-se ressaltar a proporcionalidade entre kerma e fluência por energia como mostra a Equação 2.8. Pode-se, então, obter a Equação 2.9, que relaciona o kerma com a fluência incidente na banda  $j$  de energia. Da Equação 2.9, pode-se obter também a distribuição da taxa de kerma gama com a energia dos fótons incidentes.

$$K = \sum_{j=1}^L \phi_j E_j \frac{(\mu_{tr})_{E_j,ar}}{\rho_{ar}} \quad 2.7$$

Onde:

$K$  é o kerma no ar (J/kg);

$L$  é o número de faixas de energia do espectro;

$\phi_j$  é a fluência na banda  $j$  ( $\gamma/m^2$ );

$E_j$  é a energia média na banda  $j$  (J);

$\mu_{tr}$  é o coeficiente de transferência linear de energia no ar na energia  $E_j$  ( $m^{-1}$ )

(NOWOTNY, 1998);

$\rho$  é a densidade do ar ( $kg/m^3$ ).

ou:

$$K = 1,602 \times 10^{-13} \sum_{j=1}^L \phi_j E_j \frac{(\mu_{tr})_{E_j,ar}}{\rho_{ar}} \quad 2.8$$

Onde:

$K$  é o kerma no ar (Gy);

$E_j$  é a energia média na banda  $j$  (keV);

$\mu_{tr}$  é o coeficiente de transferência linear de energia no ar na energia  $E_j$  ( $cm^{-1}$ );

$\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $g/cm^3$ );

$\phi_j$  é a fluência na banda  $j$  ( $\gamma/cm^2$ ).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A simulação pelo método de Monte Carlo requer informações sobre a geometria e a constituição química do material como dados de entrada no código computacional, além de necessitar descrever o material de forma que seja o mais próximo possível da realidade para se obter uma melhor qualidade no resultado da simulação. Assim, a seguir descreve-se os materiais de construção selecionados para o estudo, de forma a se obter as informações necessárias para atender ao código computacional MCNP.

### 2.2.1 Argila - Tijolos

Denomina-se argila ao conjunto de minerais compostos principalmente de silicatos de alumínio hidratados que possuem a propriedade de formarem, com a adição de água, uma pasta plástica suscetível de conservar a forma moldada, secar e endurecer sob a ação do calor (PETRUCCI, 1987, p. 2-3) e é componente essencial das telhas e tijolos (SANTOS, 1989, p. 7-8).

A análise química das argilas revela em sua constituição a existência de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ), magnésia ( $\text{MgO}$ ), álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ), anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ). A sílica forma, em geral, entre 40% e 80% do total da matéria-prima. A alumina aparece comumente com teores entre 10% e 40%. O óxido férrico não ultrapassa, usualmente, 7% e é o mais importante fator na coloração do produto cozido. A cal tem geralmente um teor abaixo de 10% e a magnésia não ultrapassa 1%. O teor de álcalis é da ordem de 10% (PETRUCCI, 1987, p. 4).



Segundo PETRUCCI (1987, p. 36), a densidade para os tijolos maciços varia entre 1,7 g/cm<sup>3</sup> e 2,0 g/cm<sup>3</sup>. Os tijolos furados têm densidade média de 1,1 g/cm<sup>3</sup>, mas as variações são grandes (BAUER, 1994, v. 2, p. 544).

Devido à larga faixa no percentual de cada composto na constituição da argila foi necessário um estudo para observar o efeito da variação na composição química no valor da densidade no tijolo.

### 2.2.2 Cimento

O tipo de cimento utilizado nos trabalhos gerais de construção é o cimento Portland (BAUER, 1994, v. 1, p. 51).

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), e o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), certa quantidade de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto. Possui impurezas como constituintes menores, tais como óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) e outras substâncias de menor importância. Cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem, geralmente, entre 95% e 96% do total da análise de óxidos. A magnésia está usualmente presente na proporção entre 2% e 3%. Os óxidos menores comparecem em proporção inferior a 1% (BAUER, 1994, v. 1, p. 35).

O cimento Portland é obtido pela pulverização de “clinker” constituído essencialmente de silicatos hidratados de cálcio (BAUER, 1994, v. 1 p. 35).

“Clinker” é o produto da mistura de matérias-primas que contém em proporções convenientes os constituintes fundamentais do cimento Portland quando submetido à ação do calor no forno produtor de cimento. Nesse processo ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação dos seguintes compostos (BAUER, 1994, v. 1 p. 35-36):

- silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ),
- silicato bicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ),
- aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- ferro aluminato tetracálcico ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Esses compostos foram utilizados como referência para compor a composição química básica do cimento, a matéria prima fundamental para o preparo de argamassas e concretos.

#### 2.2.2.1 Argamassa

As argamassas são materiais de construção constituídos por uma mistura de um ou mais aglomerantes (ex.: cimento, cal, gesso), agregado miúdo (ex.: areia, brita) e água. No caso do emprego de um aglomerante e água, exclusivamente, obtém-se uma pasta. Quando se acrescenta areia a esta pasta obtém-se o que se chama de argamassa (PETRUCCI, 1987, p. 351).

As argamassas são empregadas em construção no assentamento de pedras, tijolos e blocos; nas alvenarias, onde favorecem a distribuição dos esforços; nos trabalhos de acabamento como emboço e reboco; nos acabamentos de tetos e pisos; nos reparos de obras de concreto; etc. (PETRUCCI, 1987, p. 352).

As práticas de produção de argamassa e de sua aplicação como revestimento externo são desprovidas de um procedimento sistemático para definição do proporcionamento adequado e das formas de produção, acompanhadas de controle tecnológico, de racionalização das técnicas de produção e de avaliação do desempenho de revestimento ao longo da vida útil (IPT, 1995, Boletim 68, p.13-14).

Dessa forma, visando obter uma proporção comum, foram contatados alguns profissionais da área de construção civil, tendo sido relatado que é comum o uso de uma proporção de três partes de areia para uma parte de cimento no preparo de argamassas.

Para a obtenção da composição química da argamassa considerou-se os mesmos compostos utilizados para compor a composição química do cimento, porém acrescido da sílica, componente básico da areia. A Tabela 1 apresenta a composição química para a argamassa em fração atômica.

Tabela 1: Composição química para a argamassa em fração atômica.

Elemento	Argamassa (%)
Ca	0,2222
Fe	0,0370
Al	0,0741
Si	0,0926
O	0,5741

### 2.2.2.2 Concreto

A preparação do concreto é realizada pela mistura de agregados (ex.: pedra britada), aglomerantes (ex.: cimento), aditivos e água até obter uma massa homogênea (BAUER, 1994, v. 1, p. 240).

A densidade dos concretos comuns realizados com os agregados normais varia segundo o processo de adensamento utilizado na sua fabricação, apresentando-se com valores médios entre  $2,1 \text{ g/cm}^3$  e  $2,4 \text{ g/cm}^3$  (BAUER, 1994, v. 1, p. 108, 285, 286). A Tabela 2 apresenta a composição química por peso utilizada para o concreto como dados de entrada do código MCNP.

Tabela 2: Composição química por peso do concreto.

Elemento	Concreto (%)
Na	0.0171
Ca	0.0826
Fe	0.0122
Al	0.0456
Si	0.3203
O	0.5028
K	0.0194

### 2.2.3 Amianto Comercial

O amianto comercial ou fibro-cimento consiste de uma mistura de compostos de amianto e cimento. A proporção entre os dois constituintes varia de acordo com as

qualidades de cada material e de acordo com as qualidades do produto que se deseja obter. Em geral, a proporção é em peso, de 1 parte de amianto para 6 a 10 partes de cimento (PETRUCCI, 1987, p. 364).

O amianto pode se apresentar sob diferentes formas, uma delas é a crisotila que é um amianto de serpentina, silicato hidratado de magnésio, muito resistente à ação do fogo, suas fibras são sedosas e curtas com densidade entre 1,5 e 2 g/cm<sup>3</sup> (PETRUCCI, 1987, p. 365, 367).

Nos cálculos relativos à composição química do amianto comercial foi utilizado o amianto crisotila que, por possuir fibras curtas não se entrelaçam, o que faz, segundo a literatura (PETRUCCI, 1987, p. 365) conduzir à produtos mais homogêneos e resistentes; e o cimento Portland comum, por ser normalmente o empregado (PETRUCCI, 1987, p. 365).

Devido à larga faixa na proporção de cimento que pode conter o amianto foi necessário um estudo para observar o efeito da variação na composição química, no valor da densidade.

#### **2.2.4 Madeira**

Segundo PFEIL (1994), a madeira é constituída principalmente por substâncias orgânicas. A Tabela 3 apresenta os principais elementos e as porcentagens aproximadas, o que é praticamente independentemente da espécie vegetal (PFEIL, 1994, p. 6).

Tabela 3: Composição química em porcentagem para a madeira (PFEIL, 1994).

Elemento	Madeira (%)
C	50
O	44
H	6

A densidade varia de peça para peça, conforme a localização no lenho do exemplar de origem e de exemplar para exemplar, conforme as condições regionais de crescimento. São consideradas densas as resinosas com densidade superior a  $0,7 \text{ g/cm}^3$ , as folhosas com densidade entre  $0,8$  e  $1,00 \text{ g/cm}^3$  e as muito densas com densidade acima de  $1,00 \text{ g/cm}^3$  (BAUER, 1994, v. 2, 17 p. 462).

A madeira utilizada neste trabalho foi a Grapia, madeira considerada densa, utilizada como “madeira de lei” nas construções (PETRUCCI, 1987, p. 118).

### 2.2.5 Vidro

O vidro é um material complexo que pode ser considerado como uma solução sólida de silicatos alcalino-terrosos em silicatos alcalinos simples e mais fusíveis (PETRUCCI, 1987, p. 392).

A composição química do vidro calco-sódico, normalmente utilizado, é de 70% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 15% de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e 10% de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), com 5% de outros óxidos (BAUER, 1994 v.2 p. 833). Os valores de densidades encontrados são muito variáveis, dependendo do tipo de vidro, contudo, o vidro ordinário apresenta o valor de  $2,53 \text{ g/cm}^3$  (PETRUCCI, 1987, p. 393).

A Tabela 4 apresenta a composição química por peso do vidro comum utilizada para compor os dados de entrada do código computacional.

Tabela 4: Composição química por peso do vidro comum (BAUER, 1994).

<u>Elemento</u>	<u>Vidro (%)</u>
Si	0,2414
Ca	0,0370
Mg	0,0257
Na	0,1003
O	0,5956

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foi utilizado um detector semicondutor de germânio hiper-puro, HPGe, para a realização das medidas de transmissão. A especificação do detector é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Especificação do detector HPGe.

Tipo	Germânio hiper-puro
Marca	EG&G ORTEC
Modelo	GEM – 20190 - P
Eficiência relativa ( $^{60}\text{Co}$ – 1,33MeV)	20%
Resolução ( $^{57}\text{Co}$ – 122 keV)	1100 eV
Dimensões do cristal	5,55 cm de diâmetro e 3,94 cm de altura

A eletrônica associada para aquisição de espectro e o sistema de análise utilizados foram o sistema de espectroscopia Inspector e o código Genie 2000, respectivamente, ambos da Camberra. O Inspector é um sistema portátil integrado e apropriado para operação autônoma com detector HPGe.



## 3.2 MÉTODO DE MONTE CARLO

Encontra-se na literatura grande quantidade de informação sobre o método de Monte Carlo, abrangendo sistemas, modelos, simulações, geração de números randômicos, etc., (RUBINSTEIN, 1981, KALOS AND WHITLCK, 1986).

No contexto de transporte de radiação, as técnicas de Monte Carlo são aquelas as quais simulam as trajetórias de partículas individuais e os processos de interação da radiação com a matéria pela geração de números pseudo-aleatórios, a partir da distribuição probabilística que governa os processos físicos envolvidos. Pela simulação de um grande número de histórias, obtêm-se informações sobre o valor médio de quantidades macroscópicas.

### 3.2.1 Código MCNP

O programa de Monte Carlo MCNP é um código computacional amplamente utilizado na área de transporte de radiação envolvendo nêutrons, fótons e elétrons. A capacidade de tratamento de geometrias complexas em três dimensões e a variedade de opções de dados de entrada faz deste código uma ferramenta muito conveniente e poderosa no campo da proteção radiológica, modelagem de instalações nucleares, detectores e blindagem de radiação (CARACAPPA P., XU X., 2005, IPEN. Disponível em: [http://www.ipen.br/cen/cenf/em\\_mcnp.html](http://www.ipen.br/cen/cenf/em_mcnp.html)).

O código é bem documentado, tem sido extensamente validado, e os resultados obtidos a partir de seu uso são amplamente aceitos, assim como a extensa metodologia de

cálculo aplicada.

O intervalo de energia, que é possível de ser representado no MCNP, para cada tipo de radiação é (LANL, 2003):

- Nêutrons:  $10^{-11}$  MeV a 20 MeV para todos os isótopos e até 150 MeV para alguns isótopos,
- Fótons: 1 keV a 100 GeV,
- Elétrons: 1 keV a 1 GeV.

### 3.2.2 Estrutura dos dados de entrada do MCNP

O MCNP é composto por uma série de códigos de comando e arquivos de dados relacionados com a interação da radiação com a matéria. Neste contexto, o usuário cria um arquivo de entrada de dados que é processado pelo MCNP. O modelo a seguir é usado para configurar a problemática em estudo, incluído descrição de geometria, materiais, registros de saída, etc. a partir do bloco de mensagem ou da execução das linhas, apresentando a seguinte forma:

Bloco de Mensagem	}	opcional
Linha em Branco Delimitadora		
Título		
Células		
.		
.		
Linha em Branco Delimitadora		
Superfícies		
.		
.		
Linha em Branco Delimitadora		

Fonte

Composição química dos materiais

.

Linha em Branco Indicativa da Finalização dos dados de entrada (recomendável)

Informação adicional caso necessário (opcional)

### 3.2.2.1 Descrição das células (Cell Cards)

O número de célula é o primeiro dado de entrada e deve iniciar nas cinco primeiras colunas. Nesta parte dos dados de entrada, é feita a construção da geometria do problema. Para essa representação geométrica, se utilizam combinações de formas geométricas pré-definidas, como planos, esferas, elipsóides, dentre outras, que são selecionadas e descritas no item a seguir (Superfícies).

As regiões são combinadas utilizando-se operadores booleanos tais como intercessões e uniões. Para cada célula é necessário informar o número atribuído que servirá como sua referência, o número do material de que é composto, a densidade e a lista dos operadores e superfícies indicativas daquela região.

### 3.2.2.2 Descrição das superfícies (Surface Cards)

As formas geométricas básicas que compõem cada célula são definidas por caracteres mnemônicos indicando o tipo de superfície seguido de coordenadas que caracterizam seu posicionamento no espaço.

### 3.2.2.3 Fonte (Source Cards)

A fonte é definida de acordo com sua geometria (pontual, plana, volumétrica), posicionamento no espaço, direção, tipo e energia da radiação.

### 3.2.2.4 Composição química dos materiais (Data Cards)

Os materiais que formam as células são definidos de acordo com a sua composição química, podendo ser em fração por massa ou atômica.

## **CAPÍTULO 4**

### **MODELAGEM DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

Devido à situação econômica no Brasil, é possível encontrar várias combinações dos materiais comumente empregados nas construções das residências no país. O material amplamente utilizado para se construir paredes é o tijolo de barro furado e suas variações empregando cimento, juntamente com a madeira nas áreas muito pobres.

Apesar de o acabamento mais apropriado para os tijolos ser uma camada de argamassa em cada lado, devido à proteção que fornece ao mesmo, é comum o uso com somente uma camada de argamassa, normalmente, aplicado no lado interno da parede da residência, ou mesmo sem nenhum revestimento.

#### **4.1 MATERIAIS ESTUDADOS**

Os materiais selecionados para o presente estudo, para os quais foram determinados a densidade efetiva e o coeficiente de atenuação de massa, estão relacionados a seguir:

- tijolo de barro maciço, referenciado como TM,
- tijolo furado de barro sem nenhuma contribuição de argamassa, referenciado como TP,
- tijolo furado de barro com uma camada de argamassa de junção colocado entre os tijolos para uni-los, referenciado como TJ,
- tijolo furado de barro, camada de junção mais uma camada de argamassa, simulando tijolo com um lado emboçado, referenciado como T1L,

- tijolo furado de barro, camada de junção mais uma camada de argamassa em cada lado, simulando tijolo com dois lados emboçados referenciado como T2L,
- concreto,
- amianto,
- madeira.

A Tabela 6 apresenta as espessuras consideradas para os materiais estudados nas simulações e a Figura 1 mostra alguns dos materiais de construção habitualmente utilizados no Brasil e que foram estudados neste trabalho. Um profissional da construção civil preparou as amostras dos tijolos revestidos com argamassa semelhante aos normalmente encontrados nas paredes de uma casa.

Tabela 6: Espessura dos materiais de construção das residências consideradas nos cálculos.

Material	Espessura (cm)
Tijolo TM	5,0
Tijolo TP	7,5
Tijolo TJ	7,5
Tijolo T1L	9,6
Tijolo T2L	11,4
concreto	6,0
amianto	1,6
madeira	3,5

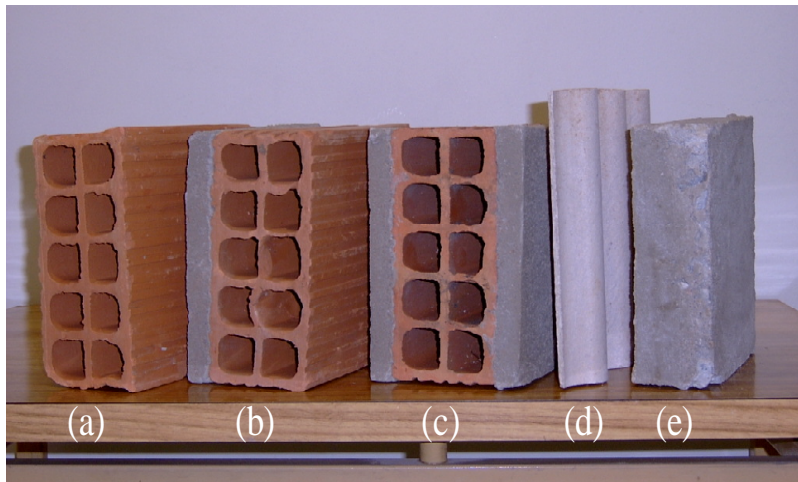


Figura 1. Materiais de construção comumente usados no Brasil: (a) Tijolo TP (b) Tijolo T1L; (c) Tijolo T2L; (d) Amianto; e (e) Concreto.

#### 4.2 MODELAGEM DO TIJOLO FURADO

Uma grande dificuldade para simular uma parede é o desenho peculiar e irregular do tijolo comumente utilizado no Brasil. Pode-se observar na Figura 1 que, devido ao processo de produção, os tijolos são irregulares em sua forma e apresentam duas regiões distintas: uma região de furos e outra de paredes como em (a). Porém outras regiões devem ser consideradas quando possuem também revestimento de argamassa como em (b) e (c). No caso dos tijolos que possuem os dois lados revestidos de argamassa, ou emboçados, como também podem ser denominados, devem ser adicionadas outras duas regiões.

Um único tijolo pode ser simulado, mas uma casa como um todo torna o procedimento praticamente impossível, primeiro devido ao processo de descrição da simulação por si só e segundo pelo tempo computacional necessário para realizar os cálculos de transporte de radiação.

Para superar estas dificuldades desenvolveu-se uma forma simplificada de modelagem do tijolo furado que consistiu em considerar uma mistura de todas as regiões e trabalhar com uma única região, tornando a simulação mais fácil e também minimizando o tempo de cálculo. A relação entre o tijolo real e a abordagem de uma única camada está apresentada na Figura 2.

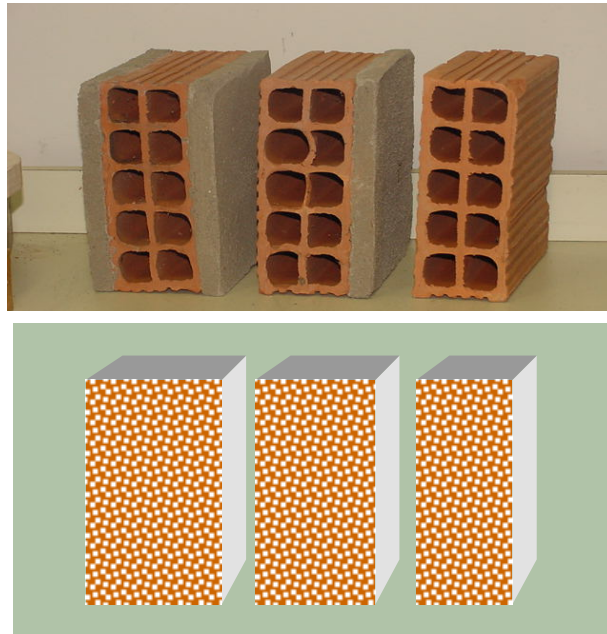


Figura 2. Relação entre o tijolo real e a abordagem de uma única camada.

Dessa forma, realizou-se uma série de medidas experimentais com o objetivo de se obter a transmissão no tijolo, viabilizando o cálculo das contribuições de cada região do material.

#### 4.2.1 Validação do modelo simplificado

Com o objetivo de verificar a validade de se usar uma única região para modelar o tijolo furado, foram realizadas comparações entre os fluxos transmitidos obtidos para os



modelos completo e simplificado. Empregou-se, então, duas condições extremas que se podem encontrar os tijolos em uma parede: a) tijolo sem nenhuma camada de argamassa (TJ) e, b) tijolo com os dois lados revestidos com argamassa (T2L), para as energias de 300 keV, 662 keV e 3000 keV.

Devido à heterogeneidade que pode ser encontrada dentro de um simples tijolo e entre tijolos, foram realizados também cálculos para estimar a variação do fluxo transmitido relacionado com as paredes do tijolo e a espessura da camada de emboço. As dimensões originais consideradas foram 0,55 cm e 2 cm de espessura para as paredes dos tijolos e a camada de cimento, respectivamente. A Figura 3 mostra uma representação gráfica do tijolo com as regiões consideradas na simulação do tijolo completo com os dois lados revestidos com argamassa.

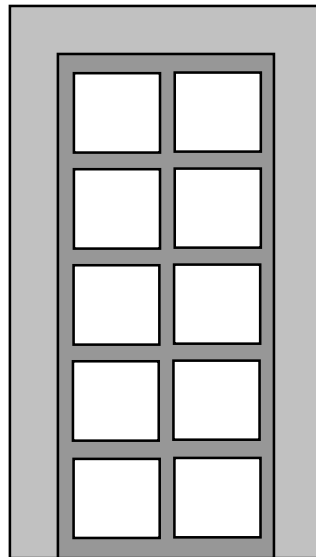


Figura 3. Representação gráfica do tijolo com as regiões consideradas na simulação do tijolo completo com dois lados revestidos de argamassa. A região em cinza claro é de argamassa (junção e revestimento), região em cinza escuro é de argila (paredes do tijolo) e as outras são de ar (furos).

## **CAPÍTULO 5**

### **MEDIDAS DE TRANSMISSÃO**

As medidas de transmissão para o cálculo das densidades efetivas e dos coeficientes de atenuação de massa dos materiais selecionados foram realizadas utilizando-se um detector de germânio hiperpuro com 20% de eficiência relativa.

Para a obtenção de um perfeito alinhamento fonte-colimador-amostra-colimador-detector utilizou-se um suporte de PVC, para o colimador e a fonte, de altura regulável, possibilitando, assim, nivelar a altura da fonte com a do detector.

Foram empregados dois colimadores, um de 11 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro na frente da fonte, para limitar o feixe e evitar o espalhamento e, outro de 9 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, na frente do detector. Utilizou-se um colimador de menor diâmetro junto ao detector para facilitar o alinhamento e, ao mesmo tempo, restringir a medida à região central do mesmo.

O arranjo experimental consistiu, então, de dois colimadores: um em frente ao detector e outro em frente à fonte, uma fonte de 172,5 MBq de  $^{137}\text{Cs}$ , posicionada a 1 m de distância do detector HPGe portátil. O material a ser medido foi colocado entre o detector e a fonte. O arranjo experimental é apresentado na Figura 4.

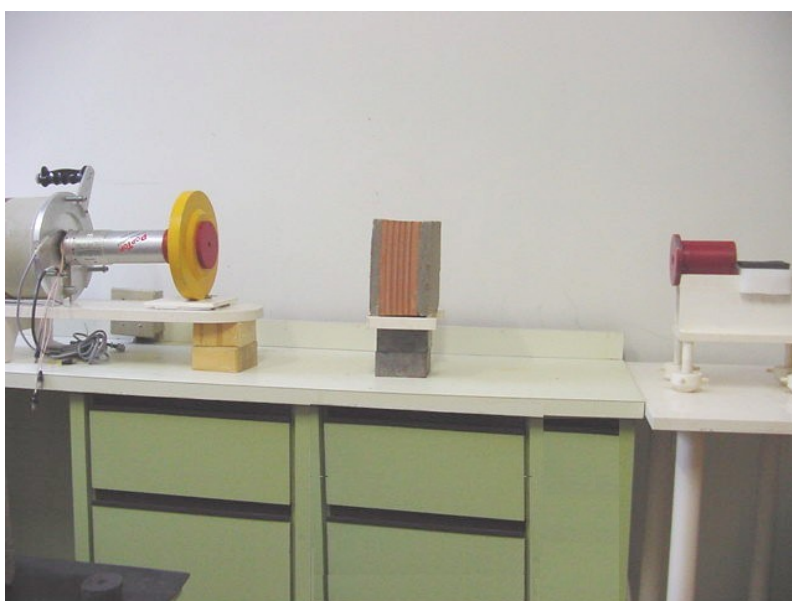


Figura 4. Arranjo experimental da medida de transmissão dos materiais de construção estudados. Consiste em um detector HPGe 20% e fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , ambos colimados. A amostra é posicionada entre fonte e detector.

Mediu-se, primeiramente, o fluxo direto a partir da fonte e depois cada amostra foi colocada entre a fonte e o detector. Por este procedimento determinou-se a intensidade do fluxo direto ( $I_0$ ) e do fluxo transmitido ( $I$ ) para cada material. A seguir, a razão  $I/I_0$  pôde ser calculada para cada material.

### 5.1 CÁLCULO DO “T” EFETIVO PARA O TIJOLO FURADO

Para se realizar os cálculos para a transmissão nos tijolos, por apresentarem uma forma peculiar possuindo regiões de furos e paredes internas em sua estrutura, requereu um cuidado especial durante a realização das medidas. Assim, primeiramente o feixe de fótons foi direcionado para a região de furos e depois para a região de parede interna longitudinal do tijolo. O valor usado para “T” foi o resultado da composição de ambas

medidas, levando em conta os volumes das faixas relativas aos furos e paredes de menor dimensão.

Para o tijolo revestido com argamassa (emboçado), similar procedimento foi realizado, observando-se a quantidade de argila e argamassa, e todas as camadas consideradas como uma só, consistindo uma mistura de todas as camadas dos materiais.

Com estas informações pôde-se determinar um valor médio de transmissão da radiação pela parede, em diferentes condições de construção, e apresentando a parede como uma construção uniforme, onde as regiões se misturam, facilitando a tarefa de modelagem.

#### **5.1.1 Contribuição de cada região**

Devido às dimensões e forma do tijolo furado, para realizar as medidas de transmissão foi necessário considerar duas posições para o direcionamento do feixe. Uma delas direcionando-se o feixe gama para a faixa de furos, e outra na direção da parede interna do tijolo longitudinal ao feixe. As duas posições de medida são apresentadas na Figura 5.

Quando a medida é realizada na posição (a), a transmissão é realizada nas paredes perpendiculares em direção do feixe. Contudo, na posição (b), devido ao diâmetro do colimador e da espessura da parede longitudinal à direção do feixe, a transmissão é realizada parte na faixa de furos e parte na parede longitudinal. A contribuição das diferentes faixas foi considerada nos cálculos de transmissão através de correlação de áreas e volumes.

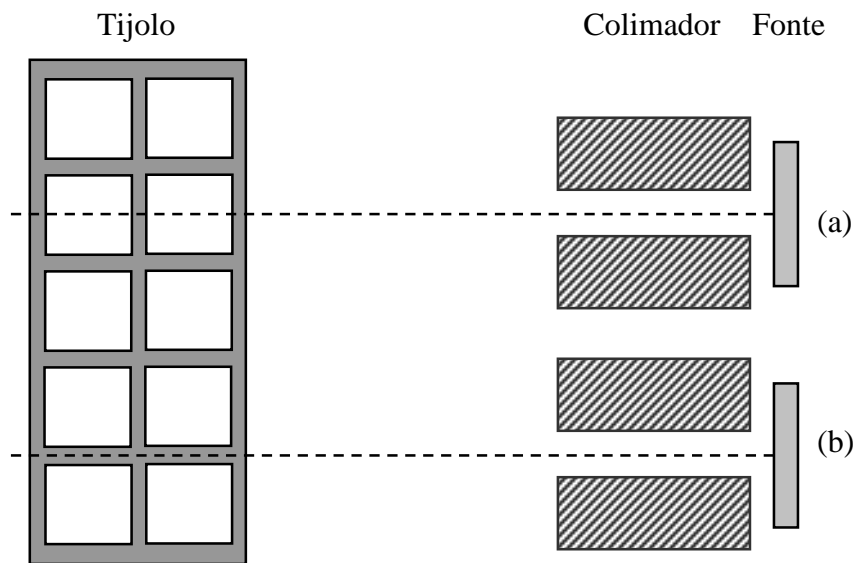


Figura 5. Alinhamento do feixe gama relativamente ao tijolo furado. Posição (a): medição realizada na faixa de furo do tijolo; posição (b): medição realizada na faixa de parede interna longitudinal ao feixe.

A Figura 6 apresenta esquematicamente a composição de áreas quando o feixe gama é direcionado para a região de furo e para a região de parede interna longitudinal ao feixe no tijolo furado.



Figura 6. Representação esquemática da composição de áreas quando o feixe gama é direcionado para a região de furo (a) e para a região de parede interna longitudinal ao feixe no tijolo furado (b).

O raio do colimador ( $r$ ) utilizado foi de 0,5 cm, enquanto que a parede do tijolo apresenta espessura ( $L$ ) de 0,55 cm. Portanto:

- área “vista” pelo colimador  $\rightarrow A_{col.} = \pi r^2 = 0,7854 \text{ cm}^2$ ,

- área da parede interna na área vista pelo colimador  $\rightarrow A_{PI} = L \times h = 0,55 \text{ cm}^2$ ,  
onde  $h$  = diâmetro do colimador.

A contagem esperada para a posição (b) na Figura 6 é igual a razão  $A_{PI}/A_{col}$ , isto é, 0,7003 da contagem obtida caso o tijolo furado fosse maciço, somado de  $(1-A_{PI}/A_{col})$  da contagem obtida para a posição (a).

A Tabela 7 apresenta as contagens obtidas para os vários materiais e posições.

Tabela 7: Contagens obtidas, para o mesmo tempo de contagem, para o tijolo maciço, tijolo furado nas posições (a) e (b) da Figura 6, concreto, amianto e madeira.

Material	Contagem	Espessura (cm)
Feixe direto ( $I_0$ )	28841	---
Tijolo maciço (TM)	13633	5,0
Tijolo furado posição (a) da Figura 6 (TFa)	21356	7,5*
Tijolo furado posição (b) da Figura 6 (TFb)	12839	7,5*
Tijolo furado + 1 emboço (TFa1e)	17538	9,5*
Tijolo furado + 2 emboço (TFa2e)	13517	11,5*
Concreto	9600	6,0
Amianto	22265	1,6
Madeira	22560	3,5

\* Valores relativos aos pontos de medida.

A contagem esperada caso o tijolo furado fosse maciço pode ser calculada através das equações:

$$\mu_{TM} = -\frac{1}{x_{TM}} \cdot \ln\left(\frac{I_{TM}}{I_0}\right) \quad 5.1$$

$$I_{TP} = I_0 \cdot e^{-\mu_{TM} \cdot x_{TFb}} \quad 5.2$$

Onde,  $\mu_{TM}$  é o coeficiente de atenuação linear para o tijolo maciço e  $I_{TP}$  o valor calculado para a contagem caso o tijolo furado fosse maciço, obtendo-se, então, o valor de 9373 contagens  $I_{TP}$ . Substituindo na seguinte equação:

$$I_{TFb} = TFA(1 - 0,7003) + I_{TP} * 0,7003 \quad 5.3$$

Onde,  $I_{TFb}$  é o valor de contagem calculado para o tijolo furado na posição (b) da Figura 6, cujo resultado obtido é 12965. Observa-se boa concordância entre o valor calculado e o medido apresentado na Tabela 7 para  $TFb$ , com desvio de 1,0%. Conclui-se, então, que é possível calcular, através da combinação de diferentes medidas, a contribuição individual de cada região, obtendo-se valores aceitáveis. Assim sendo, pode-se calcular o valor transmitido efetivo para o tijolo furado como um todo, se baseando na relação entre os volumes das diferentes regiões do tijolo furado. A Tabela 8 apresenta as dimensões do tijolo furado considerado nos cálculos.

Tabela 8: Dimensões do tijolo furado considerado nos cálculos.

Região do tijolo	Altura (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)
Tijolo todo	7,5	17,95	17,95
Paredes	0,55	*	17,95
Furos	2,93	2,93	17,95

\* Altura e largura das paredes internas dependem da orientação da parede considerada.

Assim sendo, tem-se:

$$\text{Volume Total} = 17,95^2 * 7,5 \approx 2417 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume das Faixas de Furos} = 2,93 * 7,5 * 17,95 * 5 \approx 1972 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume das Faixas de Paredes Horizontais} = 2416 - 1972 \approx 445 \text{ cm}^3$$

O valor da contagem efetiva para ser aplicada nos cálculos relativos ao tijolo furado ( $I_{ef\_TF}$ ) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$I_{ef\_TF} = \frac{1972}{2417} TFa + \frac{445}{2417} I_{TP} = 19151 \quad 5.4$$

### 5.1.2 Contribuição da argamassa de junção

No processo de construção de paredes com tijolo furado é utilizada uma camada de argamassa para unir um tijolo ao outro. Esta camada de argamassa, aplicada em duas faces contíguas mais estreitas do tijolo, é aqui denominada de “junção” e, como parte integrante da parede, é necessário ser considerada nos cálculos, pois contribuirá para a blindagem à radiação. A Figura 7 apresenta esquematicamente as regiões de junção do tijolo furado.

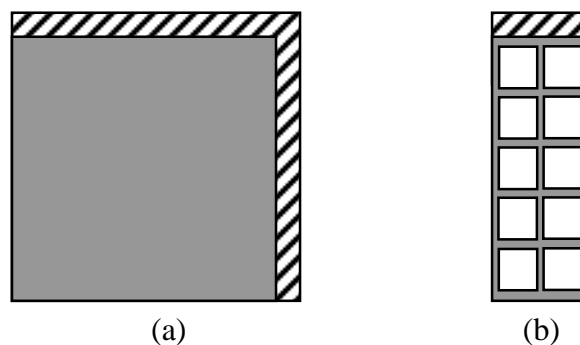


Figura 7. Representação esquemática da vista lateral (a) e frontal (b) de um tijolo furado com as junções de argamassa. A região hachurada corresponde à região de junção.



Para se calcular o efeito da junção no feixe transmitido é necessário, primeiramente, determinar o coeficiente de atenuação linear ( $\mu_{\text{ARG}}$ ) para a argamassa, que é o material utilizado tanto para a junção quanto para o emboço.

Este estudo considerou a espessura de 2 cm de argamassa para a região de junção e para o emboço. A contagem relativa ao emboço ( $I_{\text{emb}}$ ) pode ser calculada pela equação 5.5:

$$I_{\text{emb}} = I_0 - (TFa - TFa1e) = 25023 \quad 5.5$$

Aplicando-se novamente a Equação 5.1 para a espessura e contagens relativa ao emboço, tem-se que  $\mu_{\text{ARG}} = 0,0710$ .

Com o feixe de radiação alinhado como apresentado na Figura 8, o feixe transmitido pode ser calculado conforme a Equação 5.2 para  $\mu_{\text{ARG}}$  e  $x_{\text{junção}} = 7,5$  cm, tem-se que  $I_{\text{junção}} = 16934$ .

Aplicando-se novamente a relação de volumes com base nas dimensões apresentadas para o tijolo e região de junção, tem-se:

$$\text{Volume Total Tijolo + Junção} = (17,95 + 2)^2 * 7,5 \approx 2985 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume do Tijolo} = (17,95)^2 * 7,5 \approx 2416 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume da Junção} = 2985 - 2416 \approx 569 \text{ cm}^3$$

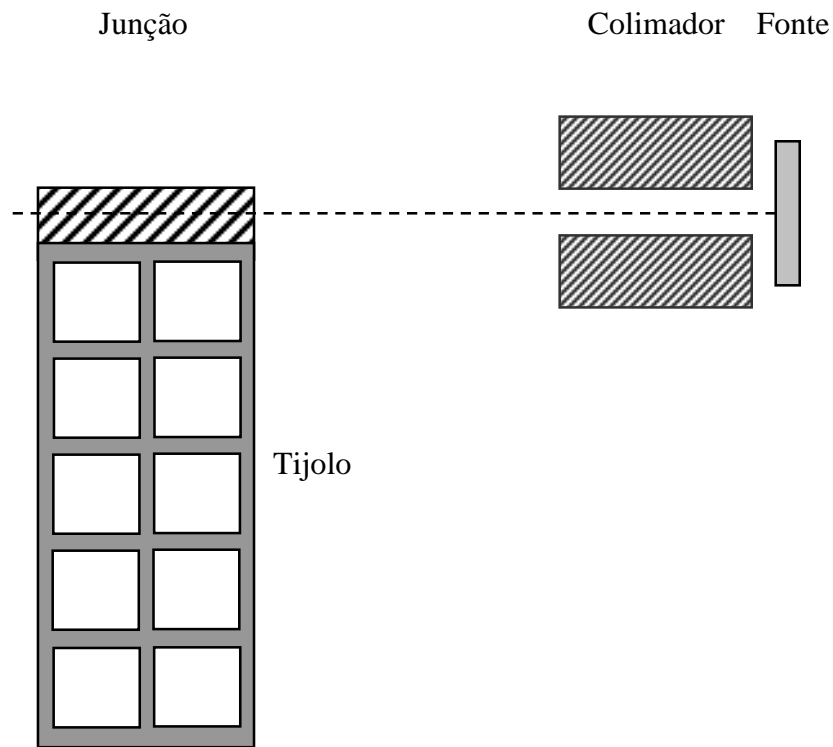


Figura 8. Representação esquemática do feixe de radiação alinhado para a região de junção.

O valor da contagem efetiva para ser aplicada ao tijolo furado mais a junção de argamassa ( $I_{ef\_TFj}$ ) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$I_{ef\_TFj} = \frac{569}{2985} I_{junção} + \frac{2416}{2985} I_{ef\_TF} = 18731 \quad 5.6$$

### 5.1.3 Contribuição da argamassa do emboço

O valor do feixe transmitido para o tijolo furado com apenas um ou dois lados revestidos com argamassa pode ser calculado diretamente dos valores dos feixes transmitidos calculados anteriormente. As Equações 5.7 e 5.8 apresentam o cálculo para um e dois lados emboçados, respectivamente.

$$I_{ef\_TFj+1e} = I_{ef\_TFj} - (TFa - TFa1e) = 14913 \quad 5.7$$

$$I_{ef\_TFj+2e} = I_{ef\_TFj} - (TFa - TFa2e) = 10892 \quad 5.8$$

## **CAPÍTULO 6**

### **DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA PARA OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

#### **6.1 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE**

Como visto, para simular uma casa ou partes de uma casa é necessário um conhecimento prévio dos parâmetros dos materiais de construção, que consistem na constituição química e densidade, para os cálculos de transporte de radiação. Como este trabalho propõe o uso de uma mistura das várias regiões que podem compor as paredes de uma residência, foi necessário determinar a densidade efetiva para cada material e combinação destes. As medidas de transmissão foram realizadas para viabilizar a determinação da densidade efetiva.

Uma abordagem simplificada do arranjo experimental realizado para as medidas de transmissão foi simulada para a mesma energia de 662 keV, utilizando o código de Monte Carlo MCNP. Nesta abordagem o detector foi substituído por um plano circular de diâmetro semelhante ao do detector, a saída de dados consistia do número e energia de todos os fótons que cruzavam esta superfície e o material ensaiado foi descrito como uma mistura de todas as regiões.

Sendo a densidade do material um dos dados de entrada para o MCNP, um valor inicial foi estimado e, através da análise dos resultados obtidos, este valor foi sendo ajustado gradativamente até que a razão entre o feixe transmitido através do material ensaiado e

o feixe direto ( $I/I_0$ ) calculado por simulação, fosse igual à razão obtida através da medida de transmissão realizada experimentalmente. Este procedimento foi repetido para tijolo maciço, tijolo furado sem nenhuma contribuição de argamassa, tijolo furado com argamassa de junção, tijolo furado mais um lado com argamassa e junção, tijolo furado mais dois lados com argamassa e junção, concreto, amianto e madeira, determinando-se, assim, as densidades efetivas para estes materiais. O procedimento de cálculo é apresentado como fluxograma na Figura 9.

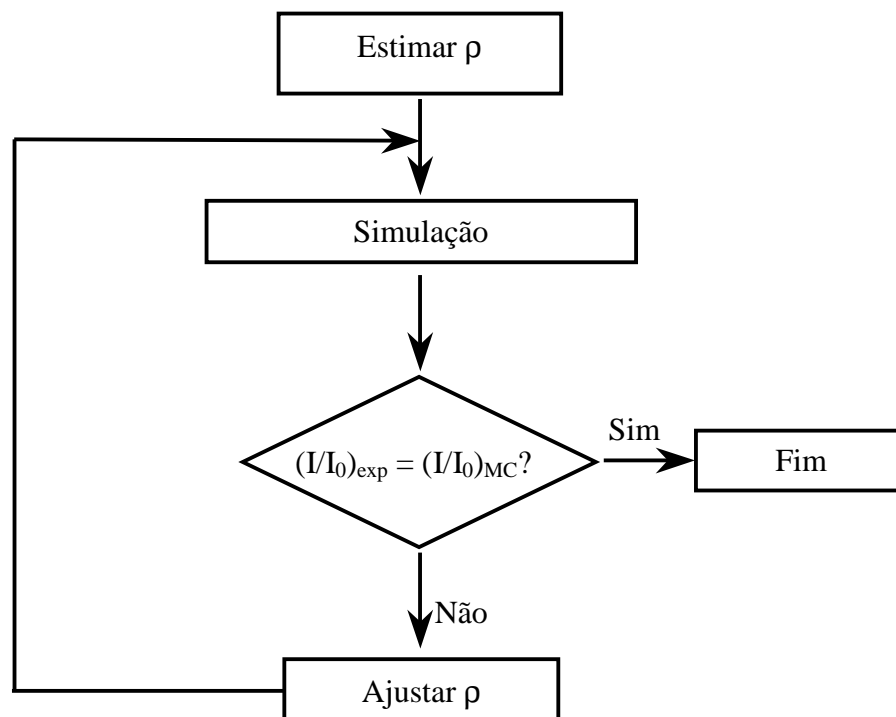


Figura 9. Fluxograma do procedimento de cálculo para determinação da densidade efetiva dos materiais de construção. Onde  $\rho$  é a densidade efetiva,  $I$  e  $I_0$  são o feixe transmitido e direto, respectivamente e os índices  $exp$  e  $MC$  significam experimental e Monte Carlo, respectivamente.

### **6.1.1 Determinação do efeito da variação da composição na densidade efetiva do material para a argila e amianto**

Segundo a literatura (PETRUCCI, 1987, p. 4, 365, 367, BAUER, 1994, v. 1, p.35) a argila e o amianto podem se apresentar com uma faixa de concentração para os elementos constituintes, o que poderia influenciar no coeficiente de atenuação e, conseqüentemente na densidade do material determinado pelo procedimento descrito no item anterior. Por este motivo foi realizado um estudo sobre a influência da composição química no feixe transmitido e, conseqüentemente, na densidade através de testes computacionais.

#### **6.1.1.1 Argila**

No caso da argila, o estudo da influência da composição química no feixe transmitido foi realizado empregando-se o tijolo de barro furado como material para se determinar a variação da densidade efetiva em relação à composição da argila empregada.

A Tabela 9 apresenta as três diferentes composições estudadas dos compostos químicos constituintes: argila A, argila B e argila C. Esses valores de composição da argila foram escolhidos de forma a manter uma relação das quantidades de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que cobrissem a faixa de composição apresentada por Petrucci (1987) citada no item 2.2.1.

Através do procedimento de cálculos descrito no item 6.1 determinou-se a densidade para cada composição de argila discriminada na Tabela 9.

Tabela 9: Percentual dos constituintes químicos da argila.

Constituinte químico	Argila A (%)	Argila B (%)	Argila C (%)
Na <sub>2</sub> O e K <sub>2</sub> O	8,5	10	2
MgO	0,5	1	0,5
CaO	4	8	4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	7	3,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	20	10
SiO <sub>2</sub>	40	54	80

#### 6.1.1.2 Amianto

Para se observar a influência da variação da composição química na densidade efetiva do amianto, foi aplicado o mesmo procedimento de cálculos empregado para o estudo da argila no item anterior. Determinou-se a densidade para a composição do amianto, nas proporções de crisotila e cimento de 1:6, 1:8 e 1:10.

#### 6.1.2 Verificação visual da densidade do tijolo

Os resultados obtidos para a densidade do tijolo furado nas três condições comumente encontradas nas construções, por serem muito próximas a da água, observou-se a possibilidade de realizar uma confirmação visual. Assim, uma peça de tijolo furado foi revestido com filme plástico e colocado dentro de um tanque contendo água. Este procedimento foi repetido para o tijolo nas três condições estudadas, ou seja, sem nenhum revestimento de argamassa, com um lado do tijolo revestido e com ambos lados revestidos com argamassa.

A Figura 10 mostra os tijolos revestidos com filme plástico de PVC, tanto para evitar que a argila absorvesse água quanto para vedação dos furos do tijolo, pois a densidade efetiva considera a contribuição do ar.



Figura 10. Vista dos tijolos impermeabilizados com filme plástico.

## 6.2 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR TOTAL, $\mu$

Quando um feixe de radiação gama incide sobre um corpo, uma fração destes fótons é retirada do feixe, seja por espalhamento ou absorção no material, o restante o atravessa sem interagir. A intensidade do fluxo transmitido ( $I$ ) está relacionada com a intensidade do fluxo direto ( $I_0$ ), pela seguinte equação:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad 6.1$$

Onde:

$I$  é a intensidade do fluxo transmitido;

$I_0$  é intensidade do fluxo direto;

$\mu$  é o coeficiente de atenuação linear ( $\text{cm}^{-1}$ );



$x$  é a espessura do material (cm).

### 6.2.1 Determinação do coeficiente de atenuação de massa

O uso do coeficiente de atenuação linear é limitado pelo fato de variar com a densidade do absorvedor, ainda que o material seja o mesmo. Por essa razão, o coeficiente de atenuação de massa ( $\mu/\rho$ ) é mais amplamente usado e pode ser calculado dividindo a Equação 6.1 pela densidade ( $\rho$ ). Através de manipulação matemática, obtém-se:

$$\mu / \rho = -1/(\rho x) \cdot \ln(I / I_0) \quad 6.2$$

Os coeficientes de atenuação de massa foram determinados por simulação através do código MCNP, para seis diferentes materiais de construção e vinte energias, na faixa de 50 a 3000 keV. Para a energia de 662 keV, o coeficiente de atenuação de massa para cada material foi determinado por simulação e, também, experimentalmente através de medidas de transmissão descritas no Capítulo 5.

## **CAPÍTULO 7**

### **DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE BLINDAGEM PARA CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS**

O código MCNP foi utilizado neste estudo para avaliar o kerma no ar em campo aberto e no interior de residências devido à contaminação externa de paredes, telhado e solo para fótons com energia de 300 keV, 662 keV e 3000 keV para posterior cálculo do fator de blindagem de residências tipicamente brasileiras. As paredes externas e internas foram consideradas como sendo do mesmo material e densidade.

As casas consideradas consistiram de três tipos de construção de paredes:

- tijolo, sem revestimento de argamassa mais a junção, referenciado como TJ,
- tijolo, com um lado revestido de argamassa mais a junção, referenciado como T1L,
- tijolo, com ambos lados revestidos de argamassa mais a junção, referenciado como T2L.

#### **7.1 MODELAGEM DA RESIDÊNCIA**

Todas as superfícies ao redor de uma construção, tais como paredes, laje, jardim, ruas e igualmente as construções vizinhas, contribuem para o kerma no ar em seu interior. Contudo, devido às grandes diferenças nas dimensões das casas, jardins, e ruas no Brasil, é difícil determinar um modelo padrão que possa ser típico no país e ser usado como referência.

Todavia, a fim de estabelecer valores aproximados para fornecer alguma informação sobre o tema, as residências foram simuladas com um tamanho médio, possuindo dois cômodos na parte da frente e três na parte de trás da casa, caracterizando uma sala de estar, dois quartos, uma cozinha e um banheiro. As dimensões da casa simulada foram 10 m de comprimento, 14 m de largura e 3,48 m de altura. O piso e a laje, ambos de concreto, foram de 33 cm e 15 cm de espessura, respectivamente.

As residências foram simuladas em um raio de 400 m em campo aberto, sem nenhuma construção ao seu redor. Foram consideradas uma camada de ar de 200 m de altura com densidade de  $0,001205 \text{ g/cm}^3$  e uma camada de 50 cm de solo com densidade de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , acima e abaixo da interface solo-ar, respectivamente, para considerar o espalhamento. As regiões de detecção da radiação gama incidente, perfazendo um total de sete, são esferas de 50 cm de raio centradas a 1 m de altura com relação ao piso.

A Tabela 10 apresenta a composição do solo que é típica para solos arenosos (JACOB AND PARETZKE, 1986) e a Figura 11 apresenta a planta baixa da casa simulada e as regiões de detecção.

Tabela 10: Composição química por peso para o solo (JACOB AND PARETZKE, 1986).

Elemento	Solo (%)
Ca	0,041
Fe	0,011
Al	0,050
Si	0,271
O	0,577
K	0,013
H	0,021
C	0,016

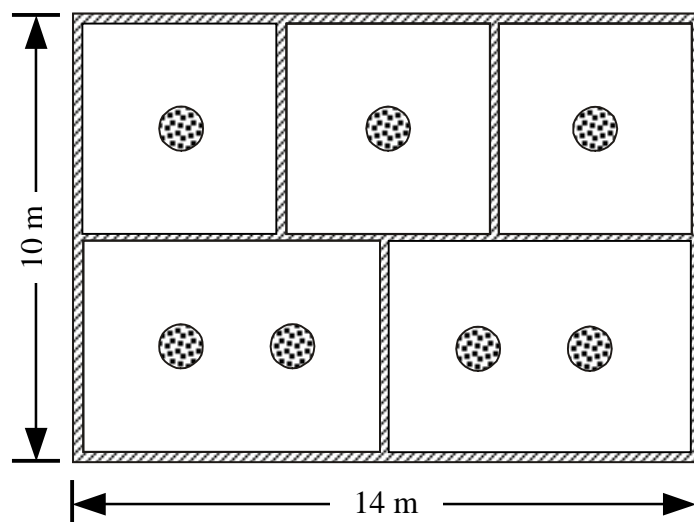


Figura 11. Planta baixa da casa simulada. Os círculos pontilhados representam as regiões de detecção.

## 7.2 DETERMINAÇÃO DO KERMA NO AR

Os cálculos foram efetuados para fótons mono energéticos com energias de 300 keV e 3000 keV para fornecer informação para baixa e alta energia, respectivamente, e 662 keV devido ao acidente com  $^{137}\text{Cs}$  em Goiânia no ano de 1987 e, também, por este radionuclídeo contribuir para a dose por longo período de tempo no caso de um acidente nuclear.

A fonte de radiação consistiu de raios gama sendo emitidos isotropicamente devido ao material radioativo depositado homogeneamente sobre as superfícies externas das paredes, laje e campo ao redor. A geometria de irradiação consistiu na casa centrada em campo aberto de 400 m de raio, sem nenhuma construção vizinha. Uma camada de solo de 50 cm de espessura com  $1,8 \text{ g/cm}^3$  de densidade e 200 m de uma camada de ar com densidade de  $0,001205 \text{ g/cm}^3$  foram consideradas abaixo e acima da interface solo-ar,

respectivamente, para considerar o espalhamento. Os fótons foram descartados quando ultrapassaram a região de interesse e o número das histórias da simulação calculada foi suficiente para manter a incerteza menor que 2%.

O resultado obtido a partir dos cálculos por Monte Carlo é o número de fótons que atravessa a superfície das regiões de detecção em função da energia, sendo a seguir dividido pelo número e área da esfera, obtendo-se, assim, a fluência gama média em função da energia no interior da residência, a qual é multiplicada pelo coeficiente de transferência de energia (NOWOTNY, 1998). O kerma no ar total pode ser obtido pelo somatório nas faixas de energia do espectro, como na Equação 2.8.

### 7.2.1 Cálculo do fator de blindagem

Após a determinação dos valores de kerma no ar para cada superfície estudada, calculou-se o fator de blindagem, cujo valor é inversamente proporcional à blindagem, sendo definido como o somatório do kerma no ar devido às várias superfícies contaminadas dividido pelo kerma no ar de referência ( $K_{ref}$ ), utilizando a seguinte equação (JENSEN, 1985, JACOB AND MECKBACH, 1987):

$$Fb = \frac{Kp + Kl + Kc}{K_{ref}} \quad 7.1$$

Onde:

$Fb$  é o fator de blindagem;

$Kp$  é o kerma no ar no interior da residência devido às paredes contaminadas externamente;

$Kl$  é o kerma no ar no interior da residência devido à laje contaminada externamente;

$K_c$  é o kerma no ar no interior da residência devido à contaminação da superfície da fonte plana de 400 m de raio;

$K_{ref}$  é o kerma no ar devido à contaminação da superfície da fonte plana de 400 m de raio.

### 7.3 EFEITO DE JANELAS E PORTAS SOBRE O FATOR DE BLINDAGEM GAMA PARA RESIDÊNCIAS BRASILEIRAS

Um parâmetro importante a ser considerado nos cálculos de dose no interior de residências é a influência do tamanho das janelas e portas sobre o fator de blindagem, que dependerá da densidade e espessura dos materiais utilizados na construção.

O perfil dominante em áreas pobres, onde as residências não possuem um bom acabamento, ficando os tijolos expostos, fornecem bem menos proteção que àquelas com melhor acabamento, onde os tijolos ficam revestidos por argamassa, pode-se supor que o efeito no kerma no ar devido às janelas e portas nas primeiras, por possuírem menor densidade e espessura de paredes, seja menor que nas últimas, com maior densidade e espessura de paredes.

#### 7.3.1 Modelagem da residência

Nesta etapa, as casas simuladas foram de quatro cômodos, dois na parte frontal da casa e dois atrás. As dimensões foram de 8 m de comprimento, 8 m de largura e 3,45 m de altura. O piso possuiu 30 cm e o telhado 15 cm de espessura, ambos feitos de concreto com  $2,4 \text{ g/cm}^3$  de densidade. As janelas foram consideradas de vidro, com 0,3 cm de

espessura e densidade de  $2,53 \text{ g/cm}^3$  (PETRUCCI, 1987) e a porta de madeira, com 3,5 cm de espessura, cuja densidade foi determinada segundo procedimento descrito no Capítulo 6.

A área da janela mais a porta na sala principal representou 29% da parede, enquanto a área das janelas nos outros cômodos foi de 14% de cada parede. A área de porta mais janelas foi cerca de 9% da área total das paredes externas.

A composição da madeira e do vidro é apresentada no Capítulo 2, item 2.2, nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

As regiões de detecção consistiram de quatro esferas de ar, uma em cada cômodo, com 50 cm de raio centrada a 1 m de altura. O número de histórias simuladas computadas foi suficiente para manter a incerteza menor que 2%.

Igualmente ao item anterior, as energias consideradas foram de 300 keV, 662 keV e 3000 keV. A geometria de irradiação consistiu na casa centrada em campo aberto de 400 m de raio, sem nenhuma construção vizinha. Uma camada de solo de 50 cm de espessura com  $1,8 \text{ g/cm}^3$  de densidade e 200 m de uma camada de ar com densidade de  $0,001205 \text{ g/cm}^3$  foram consideradas abaixo e acima da interface solo-ar, respectivamente, para considerar o espalhamento.

A fonte consistiu de raios gama emitido isotropicamente devido ao material radioativo depositado homogeneamente sobre o solo e superfícies externas das paredes e laje. Os

fótons quando alcançavam os limites da região de interesse, isto é os limites externos das camadas solo-ar, eram descartados.

O procedimento de cálculo foi efetuado segundo a Equação 2.8 para se obter o kerma no ar e depois calculado o fator de blindagem segundo a Equação 7.1.

A Figura 12 apresenta a planta baixa das casas simuladas. As espessuras das paredes variam de acordo com o material. Os círculos pontilhados representam as regiões de detecção.

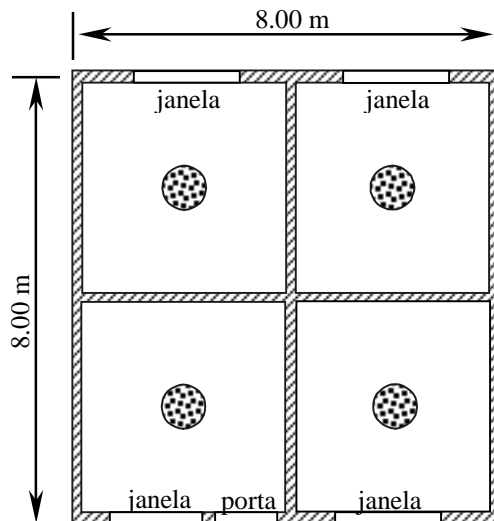


Figura 12. Planta baixa da casa simulada. Os círculos pontilhados representam as regiões de detecção.



A Figura 13 apresenta o diagrama da região de interesse e os componentes considerados na simulação. As fontes gama simuladas consistiram da interface solo-ar e as superfícies externas da casa.

A Figura 14 mostra a vista frontal e a dos fundos da casa simulada para o cálculo do efeito das janelas e porta no fator de blindagem. As paredes laterais são sem janelas.

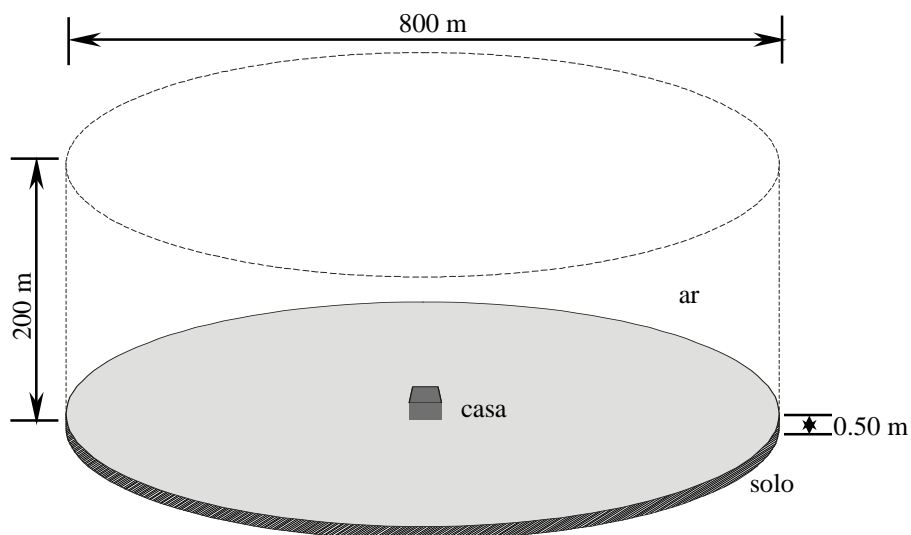


Figura 13. Diagrama da região de interesse e os componentes considerados na simulação. As fontes gama simuladas consistiram da interface solo-ar e as superfícies externas da casa.

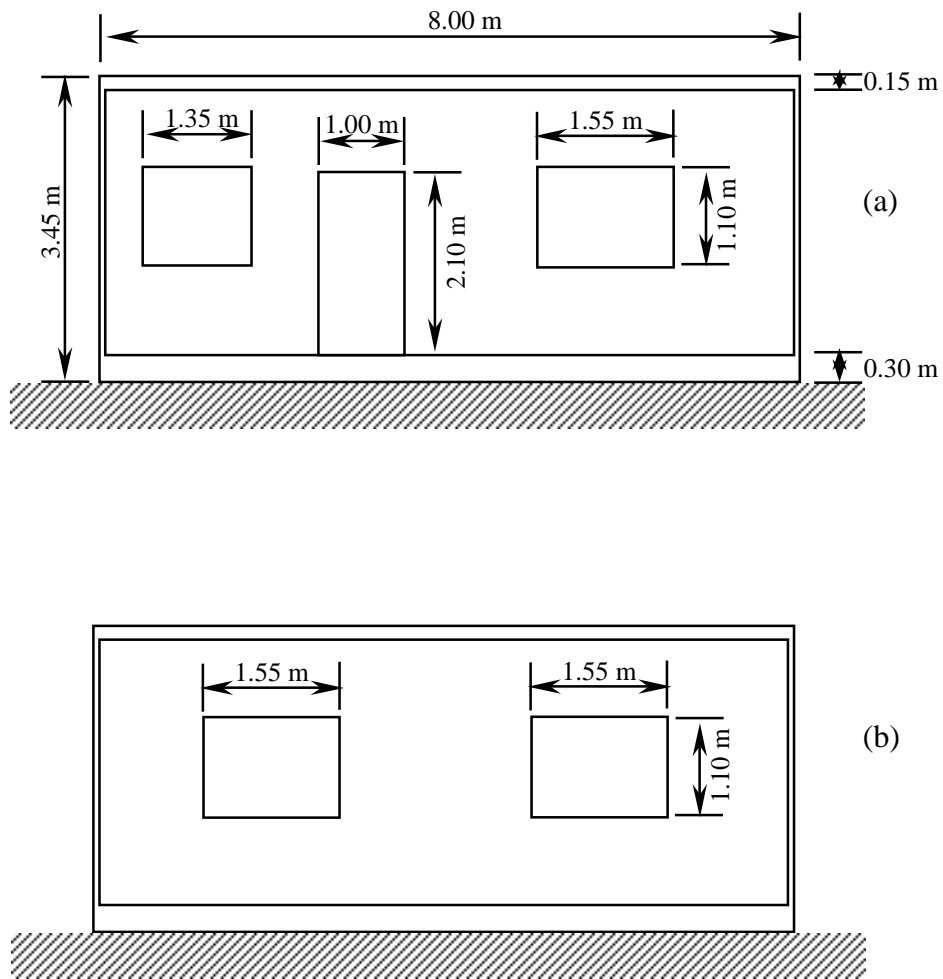


Figura 14. (a) Vista frontal da casa simulada mostrando duas janelas e uma porta e (b) Vista dos fundos da casa mostrando duas janelas.

## **CAPÍTULO 8**

### **COMPARAÇÃO DO KERMA NO AR NO INTERIOR DE RESIDÊNCIAS ENTRE PAÍSES DE CLIMA TROPICAL E TEMPERADO DEVIDO À CONTAMINAÇÃO EXTERNA DE PAREDES**

#### **8.1 MODELAGEM DA RESIDÊNCIA**

A configuração da casa usada neste estudo foi baseada nos dados apresentados por MECKBACH et al. (1988), onde se encontra a descrição de várias habitações urbanas e suburbanas, consideradas como sendo tipicamente européias, incluindo espessura de paredes, material e densidade. A configuração da casa estudada é uma combinação de duas residências apresentadas no mencionado trabalho, definidas como “semi-detached” e “block house”. A casa definida como “semi-detached” foi descrita como sendo uma construção leve, enquanto que a “block house” já é mais robusta.

A casa considerada neste estudo consistiu de cinco cômodos compondo somente um andar, estando distribuídos dois cômodos na parte da frente da casa e três nos fundos, sem janelas ou portas. Três paredes externas foram contaminadas, a quarta parede é dividida por duas casas. Suas dimensões foram 10 m de comprimento, 14 m de largura e 3,66 m de altura. O piso e o teto foram feitos com 33 cm de concreto.

A região de detecção consistiu de sete esferas de ar com raio de 50 cm, centradas a 1 m de altura. Duas esferas foram situadas dentro dos cômodos maiores da frente da casa e uma em cada um dos cômodos da parte dos fundos. A planta baixa da casa simulada

mostrando as regiões de detecção é apresentada na Figura 11 no item 7.1, porém com a diferença de que uma parede é compartilhada por duas casas.

#### **8.1.1 Material de construção das paredes em residências de clima tropical**

As casas de clima tropical consistiram de três tipos: a) paredes sem nenhum revestimento de argamassa, possuindo somente a contribuição da argamassa de junção dos tijolos, TJ; b) paredes com um lado revestido com argamassa, mais a junção, T1L; e c) paredes com ambos lados revestidos com argamassa, mais a junção, T2L. As paredes internas e externas da casa foram do mesmo material e densidade.

#### **8.1.2 Material de construção das paredes em residências de clima temperado**

Em estudo prévio, apresentado no Capítulo 6, referente à determinação dos coeficientes de atenuação para os materiais de construção mostrou que materiais com composição química similar apresentam coeficientes de atenuação muito semelhantes, dependendo mais da energia do fóton incidente e da densidade do material. Portanto, devido à falta de dados, a composição química para as paredes das construções de clima temperado foi a mesma utilizada para as de clima tropical para densidades similares.

Para a condição de construção de clima temperado utilizaram-se dados de espessura e densidade das paredes de acordo com as informações disponibilizadas por MECKBACH et al. (1988), onde consta que as paredes externas das habitações são constituídas de duas camadas, uma mais densa que a outra, enquanto que as paredes

internas são constituídas por uma camada apenas. Os dados sobre densidade e espessura estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Densidade e espessura das paredes de casa de clima temperado (MECKBACH et al., 1988).

Parede	Camada	Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Espessura (cm)
Paredes externas	Primeira	“block”*	1,8	11,2
	Segunda	“breeze-block”*	0,96	11,5
Paredes internas	Única	Concreto	2,3	10,0

\*Os termos foram utilizados da literatura para descrever os materiais utilizados e não foram traduzidos.

## 8.2 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

A configuração de casa apresentada na Figura 11 foi simulada pelo código MCNP. Várias seqüências de cálculos foram realizadas para cada espessura de parede, densidade e composição química, de forma a atender a cada configuração de casa. As energias consideradas foram 300 keV, 662 keV e 3000 keV.

Como este estudo visou a comparação entre o efeito da densidade e espessura das paredes no kerma no ar no interior das residências, a contaminação só foi considerada nas superfícies externas. A contribuição, devido à contaminação do telhado, não foi considerada porque não se espera grandes diferenças nos materiais usados entre os países de clima temperado e tropical. A fonte consistiu de raios gama emitidos isotropicamente devido ao material depositado homogeneamente sobre as superfícies externas das paredes. As regiões internas das casas foram preenchidas com ar com densidade de 0,001205 g/cm<sup>3</sup>. Os cálculos foram realizados de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 7, item 7.2.

## **CAPÍTULO 9**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **9.1 MODELAGEM DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

A simulação pelo método de Monte Carlo requer que tanto o material quanto a geometria de irradiação seja descrito o melhor possível para se obter uma boa resposta na saída de resultados do código. Assim vários parâmetros foram estudados de forma a atender e abranger um grande número das necessidades surgidas para o desenvolvimento do trabalho proposto.

##### **9.1.1 Composição química dos materiais de construção estudados**

Os valores das densidades efetivas dos materiais de construção foram determinados através de medidas e simulações do feixe gama transmitido por uma amostra dos materiais estudados, portanto, variações na composição química do material considerada na simulação podem interferir no resultado obtido. Como a literatura apresenta uma faixa de concentração para os elementos constituintes dos materiais de construção (PETRUCCI, 1987, p. 4, 365, 367, BAUER, 1994, v.1, p.35), foi necessário determinar o efeito da variação da composição química do material no valor determinado para a sua densidade. Contudo, não era esperada variação significativa, pois, para elementos de massa atômica semelhantes a composição química não influenciou significativamente nos coeficientes de atenuação.

### 9.1.1.1 Argila

Os resultados para os valores de densidade efetiva obtidos para as três composições químicas para as argilas tipo A, B e C, conforme apresentado na Tabela 9, apresentaram a maior variação, entre as argilas A e C, menor que 1%. A Tabela 12 apresenta os valores da densidade encontrada para cada tipo de composição da argila estudada.

Tabela 12: Valores de densidade efetiva para o tijolo TP de argilas do tipo A, B e C.

Argila	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
A	0,714
B	0,712
C	0,708

Como não se observaram variações significativas no valor da densidade com a variação na sua composição, a argila A foi escolhida para representar a composição da argila no tijolo, por manter proporções iguais, 40%, dos principais compostos que a compõem, sílica e alumina e o valor correspondente para a densidade efetiva.

Com a composição química da argila definida, e a densidade do tijolo determinada, procedimento de cálculo semelhante foi realizado, considerando-se as áreas de argila e cimento, para atender à situação do tijolo quando este possui a contribuição da argamassa, sendo apenas como argamassa de junção ou quando ademais, se apresenta revestido, com uma camada de argamassa, emboço, em um de seus lados ou em ambos lados.

A Tabela 13 apresenta a relação de argila e cimento, calculados por percentual em massa, para as diferentes condições de tijolos, sendo elas: tijolo mais a contribuição da argamassa de junção (que os une um ao outro), e sem nenhum revestimento de argamassa (emboço), referenciado TJ; tijolo mais junção e um lado emboçado, referenciado T1L e tijolo mais junção com ambos lados emboçados, referenciado T2L.

Tabela 13: Relação argila e cimento na composição dos tijolos estudados.

<u>Condições dos tijolos</u>	<u>Argila (%)</u>	<u>Cimento (%)</u>
TJ	61	39
T1L	42	58
T2L	32	68

A Tabela 14 apresenta a composição química por peso para as várias opções em que o tijolo pode ser encontrado e que foram empregados para compor os dados de entrada do código MCNP.

Tabela 14: Composição química por peso para os tipos de tijolos usados para compor os dados de entrada do código MCNP.

<u>Elemento</u>	<u>TP e TM (%)</u>	<u>TJ (%)</u>	<u>T1L (%)</u>	<u>T2L (%)</u>
Na	0,0576	0,0233	0,0138	0,0098
Mg	0,0026	0,0011	0,0007	0,0005
Ca	0,0150	0,2456	0,3098	0,3368
Fe	0,0184	0,0075	0,0044	0,0031
Al	0,1650	0,0821	0,0590	0,0493
Si	0,1400	0,0826	0,0666	0,0599
O	0,6014	0,5578	0,5457	0,5406



### 9.1.1.2 Amianto

Os resultados obtidos para os valores de densidade efetiva para as três proporções estudadas entre crisotila e cimento, 1:6, 1:8 e 1:10, empregados na fabricação do amianto, conforme apresentado na Tabela 15, se mantiveram constantes, independentemente da variação da proporção de cimento.

A Tabela 15 apresenta os valores da densidade encontrados para as três proporções estudadas.

Tabela 15: Densidade do amianto para as três proporções estudadas.

Proporção crisotila:cimento	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1: 6	1,92
1: 8	1,93
1:10	1,93

Como os resultados obtidos na densidade do amianto não apresentaram variações, optou-se por utilizar nos cálculos a proporção de uma parte de crisotila para oito partes de cimento (1: 8), para compor as características do material, por ser a proporção intermediária, segundo os valores apresentados na literatura (PETRUCCI, 1987) e que é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16: Composição química por peso do amianto.

Elemento	Amianto (%)
Mg	0,0104
Ca	0,2500
Fe	0,0417
Al	0,0833
Si	0,0486
O	0,5521
H	0,0139

### 9.1.2 Validação do modelo simplificado para o tijolo

Este trabalho propõe utilizar uma única região para o tijolo, consistindo da combinação de todos os materiais que constituem as diversas regiões encontradas no tijolo real, conforme apresentado na Figura 2 no item 4.2.

Para demonstrar a validade desta aproximação para facilitar o trabalho de modelagem e tempo de cálculos, foram realizadas simulações para determinar o feixe transmitido nos modelos simplificado e completo para os tijolos TJ e T2L e energias de 300 keV, 662 keV e 3000 keV.

A diferença encontrada no fluxo gama transmitido entre os modelos completo e o simplificado para os dois tipos de tijolos estudados, é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17: Diferença no fluxo gama transmitido pela comparação dos modelos completo e o simplificado.

Energia (keV)	Tijolo TJ (%)	Tijolo T2L (%)
300	1,2	1,8
662	-1,5	0,8
3000	-1,7	-0,4

Observa-se, pela Tabela 17, que a maior diferença encontrada foi de 1,8 %, no caso do tijolo T2L para a energia de 300 keV.

Foi, ainda, avaliado o efeito no feixe transmitido devido às possíveis diferenças nas espessuras tanto das paredes do tijolo quanto do emboço. Verificou-se que um decréscimo de 10 % nas paredes do tijolo TJ provoca um acréscimo de cerca de 2% no fluxo transmitido, enquanto que o mesmo decréscimo percentual na espessura do emboço para o tijolo T2L provoca um acréscimo de cerca de 6% no fluxo transmitido. No caso do decréscimo de 10% ocorrer simultaneamente nas paredes do tijolo e na espessura do emboço do tijolo T2L, o aumento total na transmissão é de 8%.

## 9.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO PARA OS MATERIAIS ESTUDADOS

Após a definição da composição química dos elementos constituintes dos materiais de construção e da validação do modelo simplificado foi possível calcular, através do método de Monte Carlo e pela combinação de medidas de transmissão, a densidade efetiva de cada material selecionado para o presente trabalho.

A Tabela 18 apresenta os valores de densidade efetiva calculadas com o código MCNP e os valores disponíveis na literatura (PETRUCCI, 1987, BAUER, 1994).

Tabela 18: Densidade efetiva calculada pela combinação de medidas de transmissão e simulação, espessura dos materiais de construção e valores para densidade disponíveis na literatura.

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Espessura (cm)	Densidade Literatura (g/cm <sup>3</sup> )
Tijolo 2L	1,145	11,4	-
Tijolo 1L	0,917	9,6	-
Tijolo TJ	0,737	7,5	-
Tijolo TP	0,714	7,5	1,1 <sup>a*</sup>
Tijolo TM	1,930	5,0	1,7 – 2,0 <sup>b</sup>
Concreto	2,400	6,0	2,1 – 2,4 <sup>c</sup>
Amianto	1,930	0,8	1,5 – 2,0 <sup>d</sup>
Madeira	0,790	3,5	0,7 – 1,0 <sup>e</sup>

a\*As variações são grandes, BAUER, 1994, v. 2 p.544

b PETRUCCI, 1987 p. 36

c BAUER, 1994, v. 1 p. 286, 336

d PETRUCCI, 1987 p. 367

e BAUER, 1994, v. 2 p. 46

Apesar da grande concordância observada entre os valores calculados pela combinação de medidas de transmissão e simulação com os da literatura e, considerando ainda, que a densidade para os diferentes tipos de tijolos são muito próximos ao da água, verificou-se a possibilidade de avaliar a exatidão dos resultados colocando os tijolos em um tanque com água. As Figuras 15, 16 e 17 apresentam o resultado obtido para o tijolo TP, T1L e T2L respectivamente.



Figura 15. Foto vista superior do tijolo TP flutuando em um tanque com água.

Observou-se na Figura 15 que o tijolo TP, com densidade efetiva menor que  $1 \text{ g/cm}^3$  flutua com parte de sua massa acima do nível da água. Na Figura 16, o tijolo T1L, cuja densidade efetiva é muito próximo de  $1 \text{ g/cm}^3$ , todavia ainda menor, permanece quase que completamente submerso, deixando exposta apenas uma fina camada. O tijolo T2L, cuja densidade efetiva é maior que  $1 \text{ g/cm}^3$  afunda completamente, como pode ser visto na Figura 17.



Figura 16. Foto vista superior do tijolo T1L parcialmente submerso em um tanque com água.

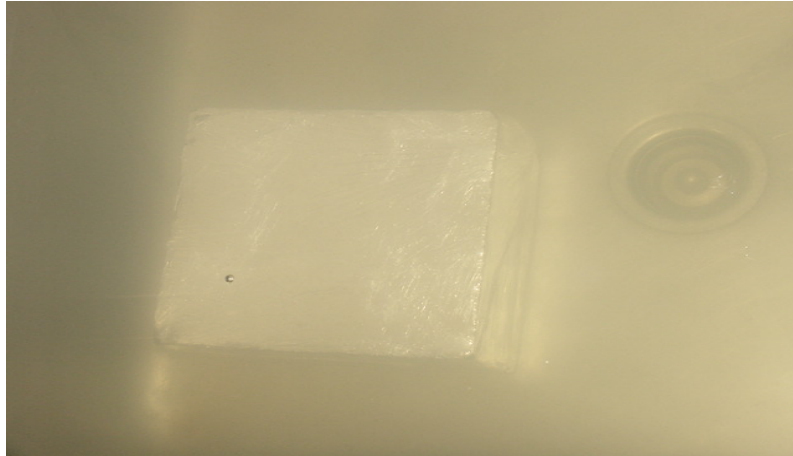


Figura 17. Foto vista superior do tijolo T2L totalmente submerso em um tanque com água.

Este experimento, embora rudimentar, e a concordância com os dados disponíveis na literatura comprovam que as densidades efetivas calculadas pela combinação de medidas de transmissão e simulação pelo método de Monte Carlo conduzem à resultados que podem ser utilizados para o cálculo de estimativa de dose.

### 9.2.1 Coeficientes de atenuação de massa

O coeficiente de atenuação de massa foi determinado para os diferentes materiais de construção estudados em várias energias entre 50 keV e 3000 keV. A Tabela 19 apresenta os valores obtidos para o coeficiente de atenuação de massa para cada material.

Tabela 19: Coeficiente de atenuação de massa para alguns materiais de construção normalmente utilizados no Brasil.

Energia (keV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)					
	Tijolo T2L	Tijolo T1L	Tijolo TJ	Concreto	Amianto	Madeira
50	0,6611	0,6433	0,5940	0,3840	0,7136	0,2046
60	0,4515	0,4399	0,4130	0,2892	0,4816	0,1889
70	0,3414	0,3352	0,3179	0,2388	0,3596	0,1786
80	0,2791	0,2753	0,2632	0,2094	0,2925	0,1715
90	0,2400	0,2365	0,2275	0,1898	0,2485	0,1656
100	0,2138	0,2102	0,2035	0,1762	0,2194	0,1611
150	0,1538	0,1523	0,1511	0,1422	0,1551	0,1428
200	0,1311	0,1308	0,1299	0,1262	0,1313	0,1301
250	0,1178	0,1179	0,1172	0,1151	0,1175	0,1200
300	0,1093	0,1092	0,1088	0,1073	0,1089	0,1125
500	0,0875	0,0872	0,0870	0,0870	0,0869	0,0918
662	0,0772	0,0767	0,0769	0,0768	0,0765	0,0814
750	0,0727	0,0725	0,0727	0,0725	0,0721	0,0770
1000	0,0633	0,0634	0,0633	0,0632	0,0631	0,0674
1250	0,0565	0,0565	0,0565	0,0564	0,0563	0,0600
1500	0,0517	0,0517	0,0517	0,0514	0,0516	0,0548
1750	0,0479	0,0477	0,0476	0,0473	0,0475	0,0505
2000	0,0449	0,0448	0,0396	0,0444	0,0446	0,0471
2500	0,0401	0,0400	0,0396	0,0396	0,0399	0,0415
3000	0,0370	0,0368	0,0366	0,0363	0,0368	0,0377

Avaliando os resultados observa-se que não existe diferença significativa entre os valores de coeficiente de atenuação de massa para os tijolos na faixa de energia de 100 a 3000 keV, o qual pode ser atribuído ao fato que os elementos constituintes serem semelhantes.

Observou-se muito boa concordância entre os resultados obtidos por esta metodologia com os coeficientes de atenuação de massa reportados na literatura para o concreto (BASHTER, 1996, HUBBELL and SELTZER, 1997). A Tabela 20 apresenta uma comparação entre os coeficientes de atenuação de massa calculados e os encontrados na literatura para o concreto, nas energias de 100 keV, 500 keV, 1000 keV e 2000 keV.

Tabela 20: Comparação entre os coeficientes de atenuação de massa calculados e encontrados na literatura para o concreto.

Energia (keV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g) <sup>a</sup>	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g) <sup>b</sup>	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g) <sup>c</sup>
100	0,1762	0,1725	0,1738
500	0,0870	0,0882	0,0891
1000	0,0632	0,0642	0,0649
2000	0,0444	0,0451	0,0455

a Valores calculados neste estudo

b BASHTER, 1997

c HUBBELL AND SELTZER, 1997

A Figura 18 apresenta uma comparação da atenuação para um feixe de fótons incidente perpendicularmente sobre os materiais de construção com a espessura normalmente empregadas nas construções. Como se pode observar o concreto, material utilizado nas lajes, e os tijolos com ambos lados emboçados, os quais compõem as paredes, são muito similares na efetividade de blindagem para os fótons na faixa de 50 a 3000 keV com as espessuras empregadas nas construções.



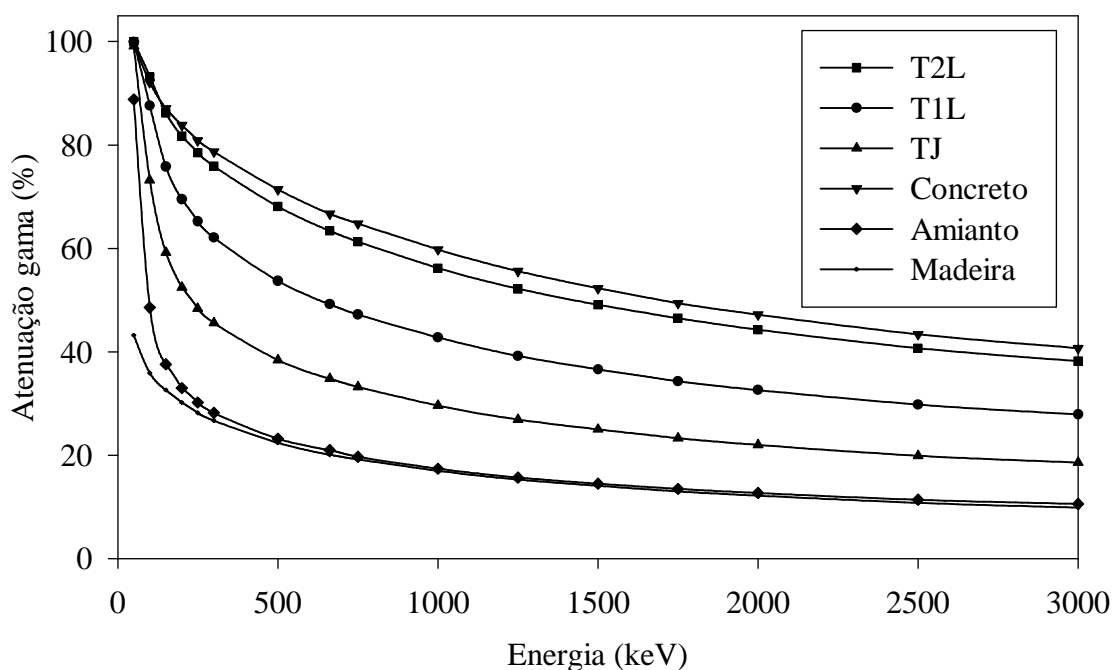


Figura 18. Comparação da atenuação para um feixe de fótons incidente perpendicularmente sobre os materiais de construção com a espessura normalmente empregadas nas construções.

Analisando a Figura 18 pode-se verificar que para um telhado contaminado com  $^{137}\text{Cs}$ , por exemplo, a efetividade na blindagem devido ao telhado de amianto é cerca de 20% para fótons de 662 keV; para a laje de concreto é aproximadamente 67%; quando ambos, laje e telhado estão presentes, a efetividade na blindagem aumenta para cerca de 73%.

É importante notar que para o tijolo sem emboço, a efetividade de blindagem diminui cerca de 40% a 50%, para energias maiores que 300 keV quando comparados com os tijolos com os dois lados revestidos com argamassa.

### 9.3 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE BLINDAGEM PARA CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS

O código MCNP computa a fluência gama incidente nas superfícies das regiões de detecção e, utilizando-se a Equação 2.8, calculou-se o kerma no ar devido a cada superfície de deposição e utilizando-se a Equação 7.1, calculou-se os fatores de blindagem para cada material de construção.

Para estimar a influência da densidade do solo para o caso de fonte plana na interface ar-solo, foram realizadas várias seqüência de cálculos utilizando o código MCNP empregando diferentes valores para densidades de solo, variando de  $1,4 \text{ g/cm}^3$  a  $1,8 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados obtidos mostraram que a densidade do solo, para esta condição de fonte, não apresenta nenhuma influência, resultado este que era esperado, haja vista que o espalhamento gama está relacionado com o número de átomos no percurso da radiação, portanto, para densidades menores o percurso na região do solo foi maior que para densidades maiores, pois o número de átomos em ambos os casos foram estatisticamente equivalentes. Este resultado também infere que a espessura para a camada de solo considerada nos cálculos foi suficiente.

A Tabela 21 apresenta os valores de kerma no ar de referência ( $K_{\text{ref}}$ ) calculado a 1 m de altura, em campo aberto devido à uma fonte plana de 400 m de raio na interface ar-solo entre uma camada de 50 cm de solo com densidade de  $1,8 \text{ g/cm}^3$  e uma camada de 200 m de ar com densidade de  $0,001205 \text{ g/cm}^3$  para as energias de 300 keV, 662 keV e 3000 keV.

Tabela 21: Kerma no ar de referência ( $K_{ref}$ ) a 1 m de altura devido à fonte plana entre uma camada de 50 cm de solo com densidade de  $1,8 \text{ g/cm}^3$  e uma camada de 200 m de ar com densidade de  $0,001205 \text{ g/cm}^3$ .

Energia (keV)	$K_{ref}$ (pGy/( $\gamma \cdot \text{mm}^{-2}$ ))
300	367
662	837
3000	2739

### 9.3.1 Residências de cinco cômodos

Residências de cinco cômodos e apenas com laje, sem telhado, portas ou janelas, e em campo aberto foram simuladas para a determinação do fator de blindagem. Para esta configuração e que é apresentada na Figura 11, foram simuladas emissões de radiação gama nas superfícies externas: laje, as quatro paredes e área de 400 m de raio ao seu redor. As energias da radiação gama consideradas foram de 300 keV, 662 keV e 3000 keV para os tijolos TJ, T1L e T2L. O kerma no ar e os fatores de blindagem calculados para cada superfície contaminada para cada tipo de casa são apresentados nas Tabelas 22, 23 e 24.

Tabela 22: Kerma no ar devido às emissões de radiação gama nas superfícies externas e fator de blindagem para a energia de fóton de 300 keV.

Tipo de tijolo	Kerma no ar (pGy/( $\gamma \cdot \text{mm}^{-2}$ ))			Fator de blindagem
	Paredes	Laje	Campo	
Tijolo TJ	34	3	95	0,36
Tijolo T1L	25	2	65	0,25
Tijolo T2L	17	3	44	0,17

Tabela 23: Kerma no ar devido às emissões de radiação gama nas superfícies externas e fator de blindagem para a energia de fóton de 662 keV.

Tipo de tijolo	kerma no ar (pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> ))			Fator de blindagem
	Paredes	Laje	Campo	
Tijolo TJ	82	12	263	0,43
Tijolo T1L	65	12	201	0,33
Tijolo T2L	48	11	143	0,24

Tabela 24: Kerma no ar devido às emissões de radiação gama nas superfícies externas e fator de blindagem para a energia de fóton de 3000 keV.

Tipo de tijolo	kerma no ar (pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> ))			Fator de blindagem
	Paredes	Laje	Campo	
Tijolo TJ	281	106	1206	0,58
Tijolo T1L	248	106	1030	0,51
Tijolo T2L	210	106	829	0,42

Os resultados mostraram que a contribuição das emissões gama provenientes da laje para o kerma no ar é menor que para as demais superfícies de deposição, especialmente para energias menores. Isto pode ser atribuído à área total, ao material e a espessura, o qual foi considerado possuir uma espessura de 15 cm de concreto. Estima-se que a contribuição para casas sem cobertura de laje seja muito maior. Ademais, os materiais das paredes, especialmente TJ e T1L, são menos densos que o concreto, os quais proporcionam menos blindagem.

Pode-se observar que o fator de proteção para uma casa construída de tijolos TJ apresenta um fator de blindagem 2,1 vezes maior que uma residência semelhante, porém

construída com tijolos T2L para fótons com energia de 300 keV; 1,8 vezes para 662 keV e 1,4 vezes para 3000 keV.

De forma geral, pode-se dizer que as pessoas vivendo em uma casa de configuração mais leve, o que é mais comum em áreas pobres, estão sujeitas ao dobro da dose que àquelas com melhor acabamento.

Portanto, os procedimentos de descontaminação em áreas com o tipo de residências construídas com tijolos sem revestimento de argamassa, após uma liberação de material radioativo, devem reduzir os níveis de radiação à valores muito menores do que em áreas de residências construídas com tijolos revestidos em ambos lados para a mesma exposição a curto e, principalmente, a longo prazos.

### **9.3.2 Efeito de janelas e portas sobre o fator de blindagem para residências brasileiras**

Residências de quatro cômodos e apenas laje, sem telhado, e em campo aberto foram simuladas com e sem porta e janelas para a determinação da sua influência no fator de blindagem. Para esta configuração e que é apresentada na Figura 12, foram simuladas emissões de radiação gama nas superfícies externas: laje, as quatro paredes e área de 400 m de raio ao seu redor. As energias da radiação gama consideradas foram de 300 keV, 662 keV e 3000 keV para os tijolos TJ, T1L e T2L.

O kerma no ar e os fatores de blindagem calculados para cada superfície contaminada para cada tipo de casa são apresentados nas Tabelas 25, 26 e 27.

Tabela 25: kerma no ar no interior da residência devido às várias superfícies de deposição e fatores de blindagem para a energia de 300 keV.

Tipo de casa	Sem janelas e porta				Com janelas e porta			
	Kerma no ar [pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> )]			Fator de blindagem	Kerma no ar [pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> )]			Fator de blindagem
	Paredes	Laje	Campo		Paredes	Laje	Campo	
Tijolo TJ	54	2	119	0,48	56	2	123	0,49
Tijolo T1L	39	2	82	0,33	41	2	85	0,35
Tijolo T2L	26	2	54	0,22	29	2	57	0,24

Tabela 26: kerma no ar no interior da residência devido às várias superfícies de deposição e fatores de blindagem para a energia de 662 keV.

Tipo de casa	Sem janelas e porta				Com janelas e porta			
	Kerma no ar [pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> )]			Fator de blindagem	Kerma no ar [pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> )]			Fator de blindagem
	Paredes	Laje	Campo		Paredes	Laje	Campo	
Tijolo TJ	134	11	338	0,58	136	11	339	0,58
Tijolo T1L	103	10	245	0,43	107	10	249	0,44
Tijolo T2L	77	9	178	0,32	83	9	184	0,33

Tabela 27: kerma no ar no interior da residência devido às várias superfícies de deposição e fatores de blindagem para a energia de 3000 keV.

Tipo de casa	Sem janelas e porta			Fator de blindagem	Com janelas e porta			Fator de blindagem
	Kerma no ar [pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> )]				Kerma no ar [pGy/( $\gamma$ .mm <sup>-2</sup> )]			
	Paredes	Laje	Campo		Paredes	Laje	Campo	
Tijolo TJ	465	97	1452	0,74	469	97	1463	0,74
Tijolo T1L	397	87	1208	0,62	404	87	1214	0,62
Tijolo T2L	338	84	1006	0,52	349	84	1016	0,53

Os resultados mostraram que o maior aumento no kerma no ar no interior das residências, entre com e sem porta e janelas, foi verificado, como esperado, para a energia da radiação gama de 300 keV. Para a maioria dos casos, a maior contribuição é aquela proveniente das paredes, incluindo porta e janelas, que mostrou um aumento de 4% para tijolo TJ e de até 11% no caso de tijolo T2L. O fator de blindagem aumentou em 2% e 9% para tijolos TJ e T2L, respectivamente, com a presença de porta e janelas, o que representa uma diminuição na proteção que proporciona.

Os resultados mostraram ainda que a influência de portas e janelas no fator de blindagem para energias de radiação gama acima de 662 keV, inclusive, pode ser considerada desprezível para os tipos de parede considerados.

#### 9.4 COMPARAÇÃO DO KERMA NO AR NO INTERIOR DE RESIDÊNCIAS ENTRE PAÍSES DE CLIMA TROPICAL E TEMPERADO DEVIDO À CONTAMINAÇÃO EXTERNA DE PAREDES

Países de clima temperado tendem a utilizar material mais robusto nas construções, especialmente as mais antigas. Por este motivo, foi realizado um estudo comparativo entre os valores de kerma no ar devido à contaminação nas superfícies externas das paredes de uma construção típica de clima tropical e uma outra típica de clima temperado para as energias de radiação gama de 300 keV, 662 keV, e 3000 keV. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 19.

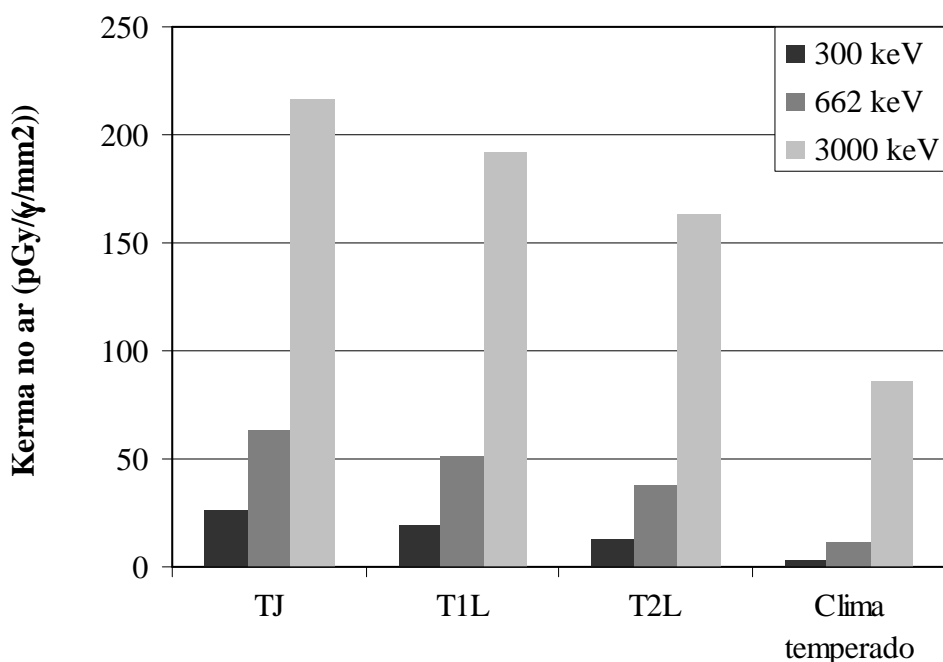


Figura 19. Kerma no ar no interior de residências devido à radiação gama emitida nas superfícies externa das paredes para casa de clima tropical e temperado e energias de 300 keV, 662 keV e 3000 keV.



O kerma no ar no interior da residência devido à emissão de radiação gama das superfícies externas das paredes contaminadas para energia de 300 keV foi de 2,5 pGy/( $\gamma/\text{mm}^2$ ) para a casa de clima temperado, ela pode ser tão alto quanto 26,1 pGy/( $\gamma/\text{mm}^2$ ) para casa de paredes de tijolo TJ, o que representa um aumento de um fator de 10,4.

Para fótons de energia de 3000 keV, o kerma no ar varia de 85,9 pGy/( $\gamma/\text{mm}^2$ ) a 217 pGy/( $\gamma/\text{mm}^2$ ), o que representa, considerando os valores extremos, um aumento de um fator de 2,5.

Os resultados mostraram que as estruturas das construções em países de clima tropical, por serem leves, fornecem bem menos proteção que nos países de clima temperado, uma vez que estes apresentam construções mais pesadas. Um melhor acabamento nas construções, ou seja, paredes revestidas com argamassa proporcionam uma melhor proteção à radiação, o que indica que a situação econômica de um país também necessita ser considerada no desenvolvimento dos procedimentos de cálculo de dose.

Os resultados também indicaram que qualquer fator de conversão somente poderia ser aplicado para casos similares e que as diferenças nas estruturas das construções devem ser levadas em consideração, mesmo que pareçam pequenas alterações, dentro de uma mesma região ou país, elas devem ser consideradas para melhor estimar a dose a qual uma população estando no interior de suas residências estaria exposta, no caso de uma extensa liberação de material radioativo.

## **CAPÍTULO 10**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

A dificuldade encontrada para simular uma parede, descrito no Capítulo 4, devido ao desenho peculiar e irregular do tijolo comumente utilizado no Brasil, foi superada pelo desenvolvimento de uma modelagem simplificada do tijolo furado, o que tornou a simulação mais fácil e também minimizando o tempo de cálculo, verificando-se, com os resultados obtidos, que a aplicação do modelo simplificado pode ser utilizado sem comprometer o resultado das simulações e conseqüentes estimativas de dose. Contudo, vale ressaltar que esta simplificação somente é válida para feixes largos, isto é, que atinjam completamente uma área equivalente a um tijolo no mínimo.

A metodologia desenvolvida para determinação da densidade efetiva de materiais de construção foi satisfatória, haja vista que os valores calculados de densidade efetiva e os valores reportados na literatura apresentaram boa concordância ademais da comparação com a densidade da água.

A metodologia desenvolvida para a determinação dos coeficientes de atenuação para os materiais de construção foi satisfatória, haja vista que os resultados obtidos para o concreto apresentaram boa concordância com os valores apresentados na literatura.

Como esperado, a densidade do material e a energia do fóton são os principais parâmetros que afetam o coeficiente de atenuação de massa. Dessa forma, os materiais de construção

estudados, por envolverem elementos com número atômico semelhantes, a variação na composição química não foi significativa.

Foram determinados coeficientes de atenuação de massa para os materiais de construção normalmente empregados no Brasil. Esta informação é relevante em todo cálculo de blindagem para situações em que as fontes são acondicionadas em construções de alvenaria e que, até o presente momento, não estava disponível na literatura para a faixa de energia apresentada neste estudo.

Foram determinados fatores de blindagem para as construções tipicamente brasileiras, viabilizando cálculos de estimativa de dose mais precisos, haja vista que os fatores de conversão devem ser somente aplicados para casos similares, o que foi comprovado pela comparação dos resultados obtidos para residências de climas temperado e tropical.

Para estimar mais precisamente a dose a qual uma população, estando no interior das residências, estaria exposta no caso de uma extensa liberação de material radioativo, as diferenças na estrutura da casa, devem ser consideradas, mesmo que pareçam mudanças pequenas dentro de uma mesma área ou região. Empregar algum fator de correção de um cenário para outro, pode não conduzir a resultados satisfatórios devido à forte influência da energia do fóton, como foi comprovado através da comparação dos dados obtidos por residências de climas temperado e tropical.

A população de regiões com residências de construção mais rudimentar, está sujeita ao dobro da dose quando comparadas com casas com melhores condições de acabamento.

Assim, atenção especial deve ser dada às medidas de proteção neste tipo de áreas urbanas.

Os resultados mostraram que a influência de janelas e porta no fator de blindagem para energias de radiação gama acima de 662 keV, inclusive, pode ser considerada desprezível para os tipos de parede considerados neste estudo.

Devido à ampla variedade de materiais de construção, layout das casas, tamanho de jardim (quando existente) e largura de ruas (comumente encontradas no Brasil) devem ser calculados um conjunto de dados envolvendo todas as possibilidades. Todavia, como diretrizes, os resultados apresentados neste estudo podem ser usados como estimativa geral de dose.

As metodologias desenvolvidas para a determinação da densidade efetiva e para o cálculo de fator de blindagem de residências podem ser aplicadas para qualquer configuração de construções. Desta forma, habilita o IRD a desenvolver cálculos de estimativa de dose mais precisos e/ou específicos, de acordo com a necessidade.

Devido à falta de informação disponível, esforço urgente deve ser feito para desenvolvimento de um banco de dados com fatores de blindagem para construções em países pobres e em desenvolvimento.

## 10.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Seria de grande relevância a determinação de fatores de blindagem para os vários andares de um prédio, haja vista que este estudo contemplou apenas construções de um andar.

Além das diferentes possibilidades para as construções brasileiras, ainda é importante considerar que muitas residências podem possuir apenas laje ou apenas telhado assim como laje e telhado, que pode ser de telha de barro ou amianto, entre outros. Estas variantes irão, forçosamente, alterar o fator de blindagem, portanto, seria importante a complementação deste estudo no sentido de considerar esta influência visando obter cálculos de dose mais realistas.

Devido à configuração peculiar nas áreas residenciais no Brasil, sendo muitas dessas áreas sem planejamento urbanístico, faz-se necessário quantificar a influência das superfícies de deposição das casas vizinhas.

Muitas residências possuem árvores ou arbustos em seus jardins, cujas copas também devem ser consideradas como superfície de deposição de material radioativo em caso de um acidente radiológico ou nuclear. Portanto, seria importante derivar parâmetros para incluir nos cálculos esta via de contribuição na dose.

## REFERÊNCIAS

- AKKURT, I., KILINCARSLAN S., BASYIGIT C., 2004, “The Photon Attenuation Coefficients of Barite, Marble and Limra”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 31, pp. 577-582,
- AKKURT, I. et al., 2005, “The Shielding of  $\gamma$ -Rays by Concretes Produced with Barite”, *Progress in Nuclear Energy*, v. 46, n. 1, pp. 1-11.
- ALAM, M. N. et al., 2001, “Attenuation Coefficients of Soils and Some Building Materials of Bangladesh in the Energy Range 276-1332 keV”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 54, pp. 973-976.
- ANDERSON K. G., 1996, “Modelling external radiation doses in contaminated urban areas: Implications for development of decontamination strategies”. IRPA 9. *International Congress on Radiation Protection Proceedings*. Volume 3. Horn (Austria), Berger 1996. 697 p pp. 265-267. Vienna (Austria). 14-19 Apr.
- ATTIX, F. H., 1986, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, EUA, John Wiley & Sons.
- BASHTER I. I., 1997, “Calculation of Radiation Attenuation Coefficients for Shielding Concretes”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 24, n. 17, pp.1389-1401.
- BASTOS, P. S. S., MARQUES, G. M., 2002, “Avaliação dos tijolos maciços cerâmicos produzidos nas olarias da região de Bauru/SP”. *V Congresso de Engenharia Civil*, Juiz de Fora, MG, Brasil, 21-25 de setembro.
- BAUER L. A. F., 1994, *Materiais de Construção 1*, 5<sup>a</sup> ed, Rio de Janeiro, 2v, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- BAUER L. A. F., 1994, *Materiais de Construção 2*, 5<sup>a</sup> ed, Rio de Janeiro, 2v, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- CARACAPPA, P. F., XU, X. G., 2005, “The Monte Carlo method: versatility unbounded in a dynamic computing world”, *American Nuclear Society*, Chattanooga, Tennessee, on CD-ROM, Lagrange Park, 1L, 17-21 April.
- CLOUVAS, A. et al., 1998, “Monte Carlo Based Method for Conversion of In-Situ Gamma Ray Obtained with a Portable Ge Detector to an Incident Photon Flux Distribution”, *Health Physics*, v. 74, n. 2, pp. 216-230.
- CLOUVAS, A. et al., 2000, “Monte Carlo Calculation of Dose Rate Conversion Factor for External Exposure to Photon Emitters in soil”, *Health Physics*, v. 78, n. 3, pp. 295-302.

- CONTI, C. C., 1999, *Medida de Kerma no Ar e Determinação de Coeficientes de Conversão para Dose Devido à Radiação Gama Ambiental*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CONTI, L. F. C., 2002, *Desenvolvimento de Um Sistema Integrado para Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental em situações de Emergência*. Tese de D.Sc., IBRAG/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CONTI, L. F. C., ROCHEDO, E. R. R. AND AMARAL, E. C. S., 2002, “Desenvolvimento de Um Sistema Integrado para Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental em Situações de Emergência”, *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, v. 4, n. 3 - Parte 1, pp. 872-879,.
- CRICK, M. J. and BROWN, J., 1990, “A model for evaluating exposure from radioactive material deposited in the urban environment”, *National Radiological Protection Board, NRPB, London, 57p, NRPB-R-235 Report*.
- DOWDALL, M., GERLAND, S., LIND, B., 2003, “Gamma-Emitting Natural and Anthropogenic Radionuclides in the Terrestrial Environment of Kongsfjord, Svalbard”, *The Science of the Total Environment*, v. 305, pp. 229-240.
- EGED, K., KIS, Z., VOIGT, G., 2006, “Review of Dynamical Models for External Dose Calculation Based on Monte Carlo Simulations in Urbanised Areas”. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 85, pp. 330-343.
- FACURE, A. et al., 2001a, “GOIÂNIA: 14 Years After  $^{137}\text{Cs}$  Radiological Accident”. *3. NURT – 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nuclear & Related Techniques*, La Habana, Cuba, CD-ROM, 22-26 Oct.
- FACURE, A. et al., 2001b, “Remains of  $^{137}\text{Cs}$  Contamination in the City of Goiânia, Brazil”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 95, n. 2, pp. 165-171.
- FLORES, O. B., ESTRADA, A. M. AND ZERQUERA, J.T., 2005, “Natural Radioactivity in Some Building Material in Cuba and Their Contribution to the Indoor Gamma Dose Rate”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 113, n. 2, pp. 218-222.
- GIBSON, J. A. B., RICHARDS, J. E. AND DOCHERTY, J., 1969, “Nuclear Radiation in the Environment Beta and Gamma-ay Dose Rates and Air Ionisation from 1951 to 1968”, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 31, n. 9, pp. 1183-1196.
- GODOY, J. M., MOREIRA, M. C. F. AND FONSECA, E. S., 1997, “The Goiânia accident – environmental survey”. In: *Seventh Coordination Meeting of world Health Organization Collaborating Centers in Radiation Emergency Medical Preparedness and Assistance network-REMPAN*, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 179-183, 09-14 November.

- GÖKSU, H. Y. et al., 1996, “Depth-dose Distribution in bricks Determined by Thermoluminescence and by Monte-Carlo Calculation for External  $\gamma$ -Dose Reconstruction”, *Applied Radiation and Isotopes*, v.47, n. 4, pp. 433-440.
- HEALTH PHYSICS, 1991, “The Goiânia radiation accident”, *The Radiation Protection Journal – SPECIAL ISSUE*, v. 60, n. 1, ISSN 00179078, January.
- HUBBELL, J. H. and SELTZER, S. M., 1997, “Tables of X-Ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients”, (version 1.03), [Online] Available: <http://physics.nist.gov/xaamdi> [2004, July 26]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- IAEA, 1988, “The radiological accident in Goiânia”. *International Atomic Energy*, Vienna, Austria.
- IAEA, 2000, “Generic Procedures for Assessment and Response During a Radiological Emergency”, *International Atomic Energy Agency*, IAEA-TECDOC-1162, Vienna, Austria.
- ICRU, 1993, “Quantities and units in radiation protection dosimetry”, *ICRU International Commission on Radiation Units and Measurements*, Report 51, Bethesda, Maryland, USA.
- IPEN, 2005, *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, Centro de Engenharia Nuclear, São Paulo, disponível em: [http://www.ipen.br/cen/cenf/em\\_mcnf.html](http://www.ipen.br/cen/cenf/em_mcnf.html). Acesso em: 01 nov.
- IPT, 1995, “Argamassas de revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio”, *Instituto de Pesquisas Tecnológicas*, Boletim 68, , Publicação IPT 2378, São Paulo.
- JACOB, P. AND MECKBACH R., 1987, “Shielding Factors and External Dose Evaluation”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 21, n. 1-3, pp. 79-85.
- JACOB, P. AND PARETZKE, H. G., 1986, “Gamma-Ray Exposure from Contaminated Soil”, *Nuclear Science and Engineering*, v. 93, pp. 248-261.
- JACOB, P. AND PARETZKE, H. G., 1987, “Dose-Rate Conversion Factors for External Gamma Exposure”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, section A, v. 255, pp. 156-159.
- JENKINS, P. L. et al., 1992, “Activity Patterns of Californians: Use and Proximity to Indoor Pollutant Sources”, *Atmospheric Environment*, v. 26A, no. 12, pp. 2141-2148.
- JENSEN, P. H., 1985, “Shielding Factors for Gamma Radiation from Activity Deposited on Structures and Ground Surfaces”, *Nuclear Technology*, v. 68, pp. 29-39.



- JONES, J. A., SINGER, L. N., BROWN, J., 2006, "The EXPURT Model for Calculating External  $\gamma$  Doses from Deposited Material in Inhabited Areas", *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 85, pp. 314-329.
- JULIUS, H. W. AND VAN DONGEN, R., 1985, "Radiation Doses to the Population in the Netherlands, Due to External Natural Sources", *The Science of the Total Environment*, v. 45, pp. 449-458.
- KALOS, M. H., WHITLOCK, P. A., 1986, *Monte Carlo Methods*, v. 1: Basics, New York, USA, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons.
- KASE, K. K., BJÄRNGÅRD, B. E., ATTIX, F. H., 1985, *The dosimetry of Ionizing Radiation*, v. 1, EUA, Academic Press.
- KLUSON, J., 2001, "Environmental Monitoring and In Situ Gamma Spectrometry", *Radiation Physics and Chemistry*, v. 61, pp. 209-216.
- KNOLL G. F., 1999, *Radiation Detection and Measurement*, 3<sup>rd</sup> ed., EUA, John Wiley & Sons, Inc.
- LANL, 2003, "MCNP - A general Monte Carlo n-particle transport code", *Los Alamos National Laboratory*, version 5, I: Overview and theory, U.S.A.
- LE GRAND, J. et al., 1987, "Statistical Survey of the Housing Characteristics and Evaluation of Shielding Factors in the Surroundings of French Nuclear sites", *Radiation Protection Dosimetry*, v. 21, n. 1-3, pp. 87-95.
- MALANCA, A., GAIDOLFI, L., 1996, "Natural Radiation Exposure in a Municipality of the Brazilian Sertão", *Environment International*, v. 22, n. 2, pp. 213-217.
- MECKBACH, R. et al., 1996, "Calculation and Measurement of Depth Dose Distributions in Bricks", *Radiation Protection Dosimetry*, v. 66, n. 1-4, pp.183-186.
- MECKBACH, R., JACOB, P. and PARETZKE, H. G., 1987, "Shielding of Gamma Radiation by Typical European Houses", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A255, pp. 160-164.
- MECKBACH, R., JACOB, P. and PARETZKE, H. G., 1988, "Gamma Exposures Due to Radionuclides Deposited in Urban Environments. Part I: Kerma Rates from Contaminated Urban Surfaces", *Radiation Protection Dosimetry*, v. 25, n. 3, pp. 167-179.
- MECKBACH, R. and JACOB, P., 1988, "Gamma Exposures Due to Radionuclides Deposited in Urban Environments. Part II: Location Factors for Different Deposition Patterns", *Radiation Protection Dosimetry*, v. 25, n. 3, pp.181-190.
- MIAH, M. I., 2004, "Environmental Gamma Dose Rates and Influencing in Buildings", *Building and Environment*, v 39, pp. 847-850.

- MÜCK, K., 1996, "Shielding of Building in an Urban Environment", *Radiation Protection Dosimetry*, v. 62, n. 2, pp. 113-121.
- MUMINOV, I. T. et al., 2005, "Application of NaI(Tl) Detector for Measurement of Natural Radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  in Environmental Samples: New Approach by Decomposition of Measured Spectrum", *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 84, pp. 321-331.
- NOWOTNY, R., 1998, XMuDat: Photon Attenuation Data on PC (v.1.0.1), IAEA-NDS-195.
- OTHMAN, I., YASSINE, T., 1995, "Natural Radioactivity in the Syrian Environment", *The Science of the Total Environment*, v. 170, pp. 119-124.
- PETRUCCI, E. G. R., 1987, *Materiais de Construção*, 8<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, Brasil, Editora Globo S.A.
- PFEIL, W., 1994, *Estruturas de Madeira*, 5<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- ROCHEDO, E. R. R., 1994, *PARATI - Modelo para a Avaliação de Exposição Radiológica em um Ambiente Urbano após Uma Contaminação Radioativa*. Tese de D.Sc., IBCCF/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROCHEDO, E. R. R., 2000, "The radiological accident in Goiânia: Environmental aspects in restoration of environments with radioactive residues", *International Atomic energy Agency, IAEA, Vienna, Proceeding Series*, pp. 365-384.
- ROCHEDO, E. R. R., CONTI, L. F. C. and PARETZKE, H. G., 1996, "PARATI - A Dynamic Model for Radiological Assessments in Urban Areas - Part I: Modelling of Urban Areas, Their Contamination and Radiation Fields", *Radiation and Environmental Biophysics* v. 35, pp. 243-261.
- ROCHEDO, E. R. R., CONTI, L. F. C. and PARETZKE, H. G., 1997, "PARATI - A Dynamic Model for Radiological Assessments in Urban Areas - Part II: Specifications of individuals and populations, their radiation exposures and variabilities", *Radiation and Environmental Biophysics*, 36, pp. 183-193.
- ROCHEDO, E. R. R. et al., 1998, "PARATI - A Dynamic Model for Radiological Assessments in Urban Areas - Part III: Parameter Uncertainty Analysis", *Radiation and Environmental Biophysics* v. 36, pp. 285-292.
- RUBINSTEIN, R. Y., 1981, *Simulation and the Monte Carlo Method*, New York, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- SACHETT, I. A., 2002, *Caracterização da Radiação Gama Ambiental em Áreas Urbanas Utilizando Uma Unidade Móvel de Rastreamento*. Tese de D.Sc., IBRAG/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- SAJÓ-BOHUS, L. et al., 1999, “Environmental Gamma and Radon Dosimetry in Venezuela. Radiation Measurements”, v.31, pp. 283-286.
- SALINAS, I. C. P., CONTI, C. C., LOPES, R. T., 2006, “Effective Density and Mass Attenuation Coefficient for Building Material in Brazil”, *Applied Radiation and Isotopes*, 64, pp. 13-18.
- SALINAS, I. C. P. et al., “Gamma Shielding Factor for Typical Houses in Brazil”, *Radiation Protection Dosimetry*, no prelo a.
- SALINAS, I. C. P., CONTI, C. C., LOPES, R. T., “Effect of Windows and Doors on the Gamma Shielding Factor for Typical Houses in Brazil”, *Health Physics*, no prelo b.
- SANDERSON, D. C. W. et al., 2004, “An Airborne Gamma-Ray Spectrometry Survey of Nuclear Sites in Belgium”, *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 72, pp. 213-224.
- SANTOS, P. S., 1989, *Ciência e Tecnologia de Argilas*, 2<sup>a</sup>. ed., v.1, 2v., São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blücher Ltda.
- SENGUPTA, D. et al., 2005, “Natural radioactivity in the high background radiation area at Erasama beach placer deposited of Orissa”. *International Congress Series*, v. 1276, pp. 210-211, India.
- SINGH, C. et al., 2004, “Energy and Chemical Composition Dependence of Mass Attenuation Coefficients of Building Materials”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 31, pp.1199-1205.
- STEINHÄUSLER, F., 1987, “The Effect of Fall-out Deposition on Indoor Gamma Radiation Levels in Single-Family Dwellings”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 21, pp. 103-105.
- THE GLASSWARE PLANET, 2005, “The Chemical Composition of Glass”, Disponível em: <http://www.the-glassware-planet.com/composition.html>, Acesso em 25 abr.
- UMISEDO, N. K. et al., 2001, “Recent evaluation of gamma radiation levels due to <sup>137</sup>Cs accident in Goiânia”. *V Regional Congress on Radiation Protection and Safety*, 5p, CD-ROM, Recife, Pernambuco, Brazil, April 29-May 04.
- WANG, Z., 2002, “Natural radiation environment in China”, *International Congress Series*, v. 1225, pp. 39-46.
- VINHAS, D. M. et al., 2005, “Modeling the dynamics of radionuclide concentration in food after an accident in tropical areas”. *Proceedings of the International Nuclear Atlantic Conference*, ABEN, ISBN: 85-99141-01-5 - CD-ROM, Santos, SP, Brazil, August 28 to September 2.

## **APÊNDICE A**

Effective density and mass attenuation coefficients for building material in Brazil















## **APÊNDICE B**

Gamma shielding factor for typical houses in Brazil













## **APÊNDICE C**

Effect of windows and doors on the gamma shielding factor for typical houses in Brazil

(Trabalho aceito na revista Health Physics em 14/09/06)

















































