



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MEIO  
AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**RODRIGO VIEIRA MACHADO**

**IMPACTO DA BLINDAGEM URBANA NO RISCO RADIOLÓGICO APÓS UM  
EVENTO NUCLEAR HIPOTÉTICO**

Presidente Prudente - SP

2024



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MEIO  
AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**RODRIGO VIEIRA MACHADO**

**IMPACTO DA BLINDAGEM URBANA NO RISCO RADIOLÓGICO APÓS UM  
EVENTO NUCLEAR HIPOTÉTICO**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional – Área de concentração: Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional.

Orientador:  
Prof.Dr. Edson Ramos de Andrade

Coorientadora:  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Alves Favareto

Presidente Prudente - SP

2024

333.7  
M149i Machado, Rodrigo Vieira.  
Impacto da blindagem urbana no risco radiológico após um evento nuclear hipotético / Rodrigo Vieira Machado. –Presidente Prudente, 2024.  
81 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2024.  
Bibliografia.  
Orientador: Dr. Edson Ramos de Andrade

1. Blindagem Urbana. 2. Dispositivos Nucleares. 3. Proteção ambiental. I. Título.

Catálogo na Fonte: Maria Letícia Silva Vila Real – CRB 8/10699

**RODRIGO VIEIRA MACHADO**

**IMPACTO DA BLINDAGEM URBANA NO RISCO RADIOLÓGICO APÓS UM  
EVENTO NUCLEAR HIPOTÉTICO**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional - Área de concentração: Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional.

Presidente Prudente-SP, 15 de maio de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE Presidente Prudente – SP

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alba Regina Azevedo Arana

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE Presidente Prudente – SP

---

Prof. Dr. Tercio Brum

Estado Maior do Exército (EME) – Brasília – DF

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus; sem ele eu não teria capacidade para desenvolvê-lo, aos meus pais, a quem agradeço as bases que deram para me tornar a pessoa que sou hoje e ao meu orientador, sem o qual não teria conseguido concluir esta difícil tarefa.*

*Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.  
Provérbios 16:3.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Maria Helena (*in memoriam*) e Aldivino Vieira, por me educarem com carinho e compromisso de agregar valores criando as bases necessárias para minhas conquistas.

À Universidade e aos mestres que me acompanharam, me avaliaram, me ensinaram e se dispuseram a compartilhar seus conhecimentos de maneira tão amigável.

Ao meu orientador por seus ensinamentos, dedicação, paciência e parceria em dispor seu tempo para embarcar nos meus desafios pessoais e conseguir extrair boas ideias desse convívio.

Aos professores da Unoeste, que me instruíram e transferiram seus conhecimentos com muito zelo durante o curso.

E, sobretudo, a Deus por me iluminar com sua força e sabedoria, traçando os mais tortuosos caminhos que levam à virtude.

*“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”.*

*Albert Einstein*

## RESUMO

### **Impacto da Blindagem Urbana no Risco Radiológico após um Evento Nuclear Hipotético**

Eventos nucleares correspondem a uma ameaça para a sociedade e a possibilidade de utilização de armas nucleares táticas, menores e potentes, é uma causa de preocupação. Embora não existam registros de utilização destas armas, o seu potencial de destruição e danos não pode ser subestimado, sendo objeto de estudos publicados que envolvem cenários hipotéticos simulados computacionalmente. Este estudo simula cenários hipotéticos de ativação de dispositivos nucleares táticos em ambientes urbanos. O objetivo central do trabalho foi estimar ameaças e riscos decorrentes da exposição ambiental humana à radiação gama decorrente do acionamento de um dispositivo nuclear tático em zona urbana habitada. Tais riscos e ameaças são considerados também sob influência do potencial efeito mitigador de estruturas urbanas sobre os níveis de dose de radiação capazes de desencadear efeitos determinísticos sobre humanos. Trata-se de uma pesquisa básica utilizando o método hipotético dedutivo criado a partir de simulação computacional analítica e gerando os perfis de dose de radiação estimados de acordo com a simulação, a principal preocupação foi estabelecer a *isodose* limite para o aparecimento de efeitos determinísticos em um cenário que envolve um dispositivo tático nuclear de potência de 10 kT (quilotons). Para que os dados pudessem ser traduzidos em informação útil para tomadores de decisão, foi aplicado o conceito de *Margin of Safety* (MoS). Este conceito permite a organização das estruturas urbanas com base na sua capacidade de reduzir a exposição à radiação (fatores de redução), pode ser um aspecto crucial para garantir a segurança, compreender a capacidade de várias estruturas para mitigar a exposição e conseqüente elevação nos níveis de proteção. Estima-se que no caso de uma aplicação real a metodologia proposta facilite a classificação de estruturas distribuídas pela zona urbana afetada dando suporte à tomada de decisão, sobretudo quanto à priorização de áreas de atendimento. Os resultados mostraram ser útil discriminar estruturas urbanas segundo critérios condicionados às doses de radiação relacionadas a efeitos determinísticos. A incorporação da argumentação científica no aconselhamento e apoio à tomada de decisões proporciona elevação dos níveis de segurança, podendo resultar em otimizada alocação de recursos e mais

consistente gestão de crises.

**Palavras-chave:** Blindagem Urbana; Dispositivos Nucleares; Proteção ambiental.

## **ABSTRACT**

### **Impact of Urban Shielding on Radiological Risk After a Hypothetical Nuclear Event**

Nuclear events pose a significant threat to society, and the possibility of using smaller but more powerful tactical nuclear weapons has raised concerns. Although no known records of their use exist, their potential for destruction and damage cannot be underestimated. Studies have been conducted involving hypothetical scenarios simulated computationally. One study simulates hypothetical scenarios of activating tactical nuclear devices in urban environments. The study aimed to estimate the risks and threats arising from human environmental exposure to gamma radiation due to the activation of a tactical nuclear device in an inhabited urban area. The study considered the potential mitigating effect of urban structures on radiation dose levels that may trigger deterministic effects on humans. The study used basic research with the hypothetical deductive method, created from analytical computational simulation, and generated radiation dose profiles estimated according to the simulation. The study's primary objective was to establish the isodose limit for the appearance of deterministic effects in a scenario involving a nuclear tactical device with a power of 10 kT (kilotons). The concept of Margin of Safety (MoS) was applied to translate the data into useful information for decision-makers. The MoS concept allows the organization of urban structures based on their ability to reduce radiation exposure (reduction factors), which is crucial to ensuring safety. The study estimated the ability of various structures to mitigate exposure and the consequent increase in levels of protection. In the case of a real application, the proposed methodology will facilitate the classification of structures distributed throughout the affected urban area. This will support decision-making, especially regarding the prioritization of service areas. The study showed that it is useful to discriminate urban structures according to criteria conditioned on radiation doses related to deterministic effects. Incorporating scientific argumentation in advice and support for decision-making increases security levels, which can result in optimized resource allocation and more consistent crisis management.

**Keywords:** Urban Shielding; Nuclear Devices; Environmental Protection.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BEIR - *Biological Effects of Ionizing Radiation*
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- DNA - Ácido Desoxirribonucleico
- EMP - Pulso eletromagnético
- IAEA - *International Atomic Energy Agency*
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICRP - *International Commission on Radiological Protection*
- INCA - Instituto Nacional do Câncer
- ITDB - *Incident and Trafficking Database*
- LLNL - *Lawrence Livermore National Laboratory*
- RDD - *Radiological Dispersal Device*
- RERF - *Radiation Effects Research Foundation*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b>	Espectro eletromagnético da radiação .....	24
<b>Figura 2-</b>	Poder de penetração dos diferentes tipos de radiação .....	26
<b>Figura 3-</b>	apresenta uma categorização simples para radiação .....	27
<b>Figura 4-</b>	Esquema simplificado das ações diretas e indiretas de radiações no modelo clássico radiobiológico de interação com o DNA.....	50
<b>Figure 5-</b>	Esquema metodológico geral.....	54
<b>Figura 6-</b>	Gráfico de análise da distância, potência e alcance do pulso eletromagnético em relação a detonação do dispositivo.....	62
<b>Figura 7-</b>	Gráfico de análise da taxa de dose da radiação em relação a distância e a potência do dispositivo .....	63
<b>Figura 8-</b>	8A e 8B apresentam a razão de câncer sólido relacionado ao público masculino e feminino respectivamente .....	64
<b>Figura 9-</b>	9A apresenta a Margem de Segurança (MoS) e 9B o DP (desvio padrão) para cada estrutura .....	67

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1-** Fatores de transmissão de dose da estrutura de blindagem *HotSpot*..52
- Tabela 2-** Fatores de redução (FR) esperados para as estruturas urbanas selecionadas. Adaptado de Takahashi (Furuta; Takahashi, 2015). .....59

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1-</b> Efeitos esperados sobre a população e meio ambiente após acionamento no nível do solo de um dispositivo nuclear tático de 10 kT (surface burst) .....	61
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Breve Histórico da descoberta da radiação .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Radiação e suas interações com matéria .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Acidentes nucleares com maiores contaminações no mundo .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4</b>	<b>Grandezas dosimétricas de interesse .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5</b>	<b>Características gerais das armas nucleares táticas.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6</b>	<b>Estruturas urbanas (construções).....</b>	<b>38</b>
<b>2.7</b>	<b>A simulação computacional de eventos radiológicos e nucleares....</b>	<b>41</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Hotspot health physics codes v 3.1.2 .....</b>	<b>41</b>
<b>2.8</b>	<b>Caracterização de Risco .....</b>	<b>45</b>
<b>2.9</b>	<b>Os modelos epidemiológicos BEIR V e VII .....</b>	<b>47</b>
<b>2.10</b>	<b>Fator de Redução (FR) .....</b>	<b>51</b>
<b>2.11</b>	<b>Mitigação .....</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>54</b>
<b>3.1</b>	<b>Delimitação de escopo.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2</b>	<b>Simulação Computacional.....</b>	<b>55</b>
<b>3.3</b>	<b>Zonas de Efeito Determinístico .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4</b>	<b>Cálculo da estimativa de excesso de risco relativo para a população exposta.....</b>	<b>56</b>
<b>3.5</b>	<b>Blindagem Urbana como Fator de Redução de Risco .....</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## **APRESENTAÇÃO**

Ao longo do meu percurso acadêmico e profissional, formei-me com sucesso como Técnico em Agrimensura pelo Centro Paula Souza- ETEC, e Engenharia Civil pela Universidade Paulista-UNIP e especializei-me em Engenharia de Segurança do Trabalho Universidade Cruzeiro do Sul. Optei por estudar na área de ciências exatas por ser uma área pela qual sou fascinado e sempre busquei adquirir maiores conhecimentos. Decidi avançar na carreira acadêmica e conheci o programa de meio ambiente e desenvolvimento sustentável. Tive a oportunidade de participar do processo seletivo o qual fui aprovado. Meu orientador, Edson Ramos de Andrade, apresentou sua linha de trabalho de pesquisa sobre contaminação ambiental por radiação ionizante, onde ele propôs trabalhar a uma contaminação gerada devido ao acionamento de dispositivo tático nuclear. Este tópico novo e desafiador era completamente estranho para mim, mas eu estava ansioso para abordá-lo. Trabalhar com a contaminação por radiação foi uma tarefa difícil, dados os eventos catastróficos na história da humanidade que foram causados pela radiação. Mesmo assim, abracei o desafio e a experiência foi muito gratificante pois gerou muito aprendizado.

Hoje tenho orgulho dos resultados que alcancei até agora e sei que esse trabalho agregou muito em minha vida. Me tornei uma pessoa muito melhor estudando, frequentando aulas e palestras e participando de eventos. Estou confiante de que minha dedicação a esta pesquisa contribuirá para a evolução humana.

## 1 INTRODUÇÃO

A liberação de materiais radioativos para o meio ambiente representa uma classe especial de problemas ambientais pela proposta disruptiva que apresenta. Um ambiente radioativo não é necessariamente nocivo para a biota. A classificação como nociva ou não decorre dos níveis e tipos de radiação envolvidos e a capacidade de recuperação e equilíbrio dos organismos nas zonas contaminadas. Uma quantidade limitada de informação sobre a radioatividade ambiental já estava disponível antes da Segunda Guerra Mundial, mas havia pouca difusão deste conhecimento (Eisenbud; Gesell, 1997). Também o próprio conceito de contaminação deve ser pensado haja vista que a crosta terrestre se apresenta como uma massa material cujos constituintes se apresentam por vezes radioativos. O inventário mundial de materiais radioativos limitou-se aos separados de fontes naturais, com a insignificante exceção de relativamente poucos *milicuries* (mCi) de radioatividade artificial que foram produzidos em cíclotrons durante o final da década de 1930 (Eisenbud; Gesell, 1997). É possível ainda estimar a ocorrência de tais liberações tanto em ambientes naturais quanto em urbanos. A principal diferença em termos de consequências reside na forma como o campo radioativo interage com a vizinhança, sendo está uma preocupação de magnitude mais elevada em ambientes urbanos por conta de desdobramentos sobre infraestruturas críticas como sistemas de saúde pública, telecomunicações e transportes. Eventos radioativos urbanos são disruptivos e apresentam níveis de complexidade tais que exigem aplicação intensa de recursos e conhecimentos avançados para o enfrentamento das suas consequências (Florig; Fischhoff, 2007; Andrade *et al.*, 2022).

Dispositivos de Dispersão Radiológica (RDD – do inglês *Radiological Dispersal Device*) neste contexto da segurança nuclear, o termo “dispositivo de dispersão de radiação” pode referir-se a um dispositivo explosivo concebido para dispersar material radioativo numa área alvo. Estes dispositivos, são por vezes referidos como “bombas sujas” ou “bombas radiológicas”, estas armas tem um funcionamento que difere das armas nucleares no sentido tradicional porque não envolvem uma reação nuclear em cadeia. O RDD arquetípico é a combinação de um dispositivo explosivo convencional com materiais radioativos que podem ser obtidos em aplicações industriais, comerciais, médicas e de pesquisa (USA, 2014; Lee *et al.*, 2010). A efetividade de um RDD se dá em grande parte pelas condições do ambiente, onde a propagação da

poluição gerada pela liberação é influenciada pelas condições climáticas locais. O software utilizado nas simulações faz uso das classes Pasquill-Gifford como forma de quantificar efeitos de variação de classes de estabilidade atmosférica. Esses modelos geralmente incorporam as curvas Pasquill-Gifford-Turner (PGT) para estimar a propagação horizontal e vertical de uma pluma contaminada em escalas espaciais normalmente inferiores a 10 km (Venkatram, 1996). Tais condições atmosféricas locais desempenham um papel importante na determinação da propagação da contaminação, sejam eles patógenos, contaminantes ou produtos químicos nocivos. A interação complexa entre as variáveis ambientais pode variar de acordo com o tipo de contaminante e as características específicas do ambiente em questão. Portanto, sua compreensão é de vital importância para implementar medidas efetivas visando controle e prevenção da disseminação de contaminantes no ambiente.

Uma outra forma deliberada (não acidental) de provocar contaminação ambiental se dá por meio do acionamento de um dispositivo tático nuclear, por vezes denominado dispositivo nuclear improvisado (*Improvised Nuclear Device* – IND). Estes dispositivos não têm necessariamente o objetivo de demolir uma zona habitada, mas sim provocar algum dano material suficiente para ser percebido e também contaminação com maior capacidade disruptiva quando comparado a um RDD (Karam, 2021). O acionamento de um dispositivo tático nuclear em zona urbana provavelmente provocará desestabilização ou interrupção imediata dos serviços públicos e privados. Também pode ser esperado o colapso no campo social, da saúde pública, da segurança pública, da tecnologia (incluindo comunicações), da economia e da política podendo induzir caos sobretudo nos primeiros dias do evento (Andrade *et al.*, 2020).

Neste estudo o ambiente radioativo provocado pela detonação de um IND em zona urbana habitada é simulado computacionalmente por um código denominado *HotSpot Health Physics*. O HotSpot fornece aproximação de dados que permitem estimar consequências da liberação de materiais radioativos para a atmosfera (Silva *et al.*, 2015). Desta forma a simulação passa a ser uma ferramenta valiosa para prever possíveis resultados e avaliar o impacto da liberação de materiais radioativos no ambiente de forma conservadora, rápida e para curtos alcances, em torno de 10 km a partir do ponto de liberação, além do incentivo para o desenvolvimento de estudos concentrados no campo da simulação computacional (Bunn; Wier, 2006; Case Jr. *et al.*, 2018; Ellingsen, 2010; Glaser, 2015; Neuschatz, 2007; DTIC, 1987; Sorensen;

Shumpert; Vogt, 2004; UNSCEAR, 2018; Potter, 2010; Yeddapanudi *et al.*, 2020). O uso da simulação oferece algumas vantagens:

- (a) Segurança: A simulação de cenários de libertação radioativa permite aos investigadores e às autoridades avaliar riscos potenciais sem ter de realizar experiências reais potencialmente perigosas;
- (b) Economia: A realização de experimentos físicos envolvendo materiais radioativos pode ser cara e complicada e as simulações proporcionam uma abordagem mais económica para estudar o impacto destas emissões;
- (c) Acesso a situações extremas: As simulações podem ajudar a explorar situações extremas ou eventos improváveis que são difíceis ou impossíveis de replicar na realidade. Isso pode dar suporte ao entendimento e planeamento de respostas a situações de emergência.
- (d) Versatilidade: A simulação computacional analítica permite a manipulação de diversos parâmetros, como velocidade do vento, elevação e rugosidade do terreno, quantidade e tipo de material radioativo liberado, potência do dispositivo nuclear (IND) entre outros. Este acesso permite uma avaliação abrangente dos potenciais impactos.
- (e) Aplicação de modelos matemáticos podem ser usados para simular a propagação de materiais radioativos no ar, na água e no solo. Esta condição facilita o desenvolvimento da capacidade preditiva sobre as áreas potencialmente afetadas e a identificar medidas de mitigação;
- (f) Avaliação do impacto ambiental: A simulação ajuda a avaliar o impacto ambiental da libertação de substâncias radioativas, incluindo a poluição dos ecossistemas, a saúde dos organismos vivos e os riscos para a saúde humana.
- (g) Desenvolvimento de estratégias de resposta: Com base nos resultados das simulações, é possível desenvolver e aprimorar estratégias de resposta a emergências, incluindo evacuações, monitoramento ambiental e medidas de descontaminação;
- (h) Definição de zonas de exclusão: Simulações auxiliam no estabelecimento de zonas de exclusão ou restrição, ajudando as autoridades a tomar decisões informadas sobre a segurança das áreas afetadas.

Desta forma o trabalho tem como **objetivo geral** estimar a capacidade de

proteção dos edifícios urbanos (construções) na redução dos níveis de exposição à radiação ionizante.

Já os **objetivos específicos** são:

- a) apresentar uma simulação computacional da detonação de um dispositivo tático nuclear em uma zona urbana com a utilização do software *HotSpot* e estimar seus efeitos;
- b) gerar as estimativas dos perfis de dose de radiação, sendo a dose limite para o aparecimento de efeitos determinísticos considerando o valor de interesse para isodose específica em um cenário que considera um dispositivo de potência 10 kT;
- c) estimar os riscos biológicos da radiação na saúde humana, em especial relativos de desenvolvimento do câncer sólido, e
- d) estimar potenciais impactos da contaminação no meio ambiente.

Neste estudo se considera o acionamento de um dispositivo nuclear tático hipotético com potência equivalente (*yield*) de 10 kT (1 quiloton = 1000 toneladas de TNT) sobre zona urbana habitada e genérica (não identificada e também hipotética). O objetivo principal da proposta é gerar dados iniciais para prover assessoria científica à tomada de decisão em tempo curto ( $\approx 100$  horas) e de maneira conservadora. Esta assessoria se refere às zonas contaminadas com altas doses de radiação e com expectativa de registro de efeitos determinísticos na população impactada. Os resultados das simulações buscam contribuir para estabelecimento de regras de priorização do atendimento à população e mapeamento de zonas de alto risco. Tais regras podem ser definidas com base nas consequências imediatas esperadas em decorrência do desastre simulado dentro de período não maior que 4 dias ( $\approx 100h$ ) a contar do momento do evento ou de sua detecção. Por meio de simulação computacional analítica conservadora (pessimista) foi estudada a possível proteção oferecida contra radiações por estruturas urbanas para a população em geral. O reconhecimento da função protetiva de estruturas urbanas é dado por seus fatores de

redução de dose de radiação (FR) (Furuta; Takahashi, 2015), que podem gerar dados de valor para a criação de protocolos de priorização de zonas de atendimento preferenciais. Nesta perspectiva se espera impacto positivo sobre a otimização da aplicação dos recursos disponíveis. Como o objetivo central do trabalho não é estimar a resiliência de uma zona urbana específica, optou-se por não georreferenciar nenhuma região. Em linhas gerais a metodologia do trabalho se desenvolveu da seguinte forma:

- (a) simulação computacional analítica do evento nuclear;
- (b) estimativa das zonas de risco considerando efeitos radiológicos determinísticos;
- (c) estimativa do efeito mitigador de estruturas urbanas sobre a dose de radiação, e
- (d) geração de resultados de 1ª ordem que facilitem estabelecer consciência situacional e suporte à tomada de decisão.

Espera-se que por meio de aplicação de metodologia simples e com tecnologia acessível se possa assessorar cientificamente aos escalões tomadores de decisão. Os resultados sugerem que com base na simulação computacional analítica e na distribuição espacial do mobiliário urbano é possível reconhecer e priorizar zonas de atenção imediata com relação a níveis de dose ambiental e seus efeitos deletérios determinísticos sobre uma população afetada.

O presente trabalho de pesquisa busca **questionar**: a qualidade das construções e edifícios públicos e residenciais “infraestrutura crítica” frente a ameaça do acionamento de um dispositivo nuclear, e estimar a capacidade das estruturas urbanas para fornecer um fator de proteção contra os efeitos da radiação ionizante sobre seres humanos devido a contaminação do ambiente por elementos radioativos liberados a partir da detonação de um dispositivo tático nuclear.

A **hipótese** central do estudo considera que a simulação computacional destaca a importância das estruturas urbanas como fator de proteção a saúde humana contra os efeitos da radiação ionizante, implicando em redução de risco de desenvolvimento de câncer sólido na população exposta.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizada uma pesquisa básica

desenvolvida por meio de método hipotético dedutivo criado a partir de simulação computacional analítica e gerado os perfis de dose de radiação estimados de acordo com a simulação. A principal preocupação foi estabelecer a isodose limite para o aparecimento de efeitos determinísticos em um cenário que envolve um dispositivo tático nuclear de potência de 10 kT (quilotons) e aos níveis de proteção oferecidos pelas barreiras físicas típicas de zonas urbanas.

A pesquisa está situada na Linha 1 - Avaliação e Análise de Impacto Ambiental - Printer Saúde: Avaliação da contaminação do meio ambiente por elementos radioativos, a fim de demonstrar que as estruturas podem produzir um fator de mitigação de efeitos a radiação ionizante. O presente trabalho contempla alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), sendo eles ODS3- saúde e bem estar, ODS7-energia limpa e acessível e ODS9- indústria, inovação e infraestrutura.

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos. Neste primeiro denominado Introdução foram apresentados a caracterização do tema, a formulação dos problemas e das hipóteses, a descrição dos objetivos geral e específicos, a justificativa da pesquisa e a estrutura do texto. O *capítulo dois* aborda os fundamentos teóricos que dá embasamento a pesquisa. Posteriormente o *capítulo três* trata da metodologia e procedimentos aplicados de forma de pesquisa básica utilizando o método hipotético dedutivo, onde foi simulado o acionamento de um dispositivo tático nuclear em uma área urbana onde será analisada os efeitos para área afetada pela radiação ionizante aplicada ao problema da pesquisa abordada. No *capítulo quatro* são discutidos os resultados e discussões gerada após análise dos dados gerados a partir da simulação. O *capítulo cinco* traz as considerações finais e análises conclusivas, de maneira a evidenciar a consequências da contaminação e os efeitos aos indivíduos afetados e como as estruturas podem exercer um fator de mitigação dos efeitos da radiação ionizante.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O capítulo em questão traz a fundamentação teórica que gerou a pesquisa desenvolvida no estudo, foi abordado em uma revisão literária sobre radiações ionizantes desde sua descoberta até o desenvolvimento de aplicações. Utilizações podem ser exemplificadas como armas, fontes de energia, aplicações e saúde e indústria em geral. Também são tratados desastres envolvendo usinas nucleares que ocasionaram extensas contaminações, estudos sobre doses de radiação a que os indivíduos podem estar expostos, construções urbanas oferecendo fatores de redução de doses de radiação e efeitos de mitigação. A simulação também foi apresentada como uma alternativa de valor para avaliar um evento disruptivo como o acionamento de um dispositivo tático nuclear em um ambiente urbano, onde se conseguiu uma quantidade de dados suficiente para avaliação de nível de protetivo e considerar construções com uma forma de proteção contra a radiação ionizante.

### 2.1 Breve Histórico da descoberta da radiação

Em 1895 o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen fez um avanço significativo no campo da Física Atômica. A partir de seus estudos detectou uma classe de radiação ainda não registrada, produzida pela passagem de uma corrente elétrica por um tubo de vidro sob vácuo, e que possuía a singular qualidade de, embora invisível a olho nu, produzir fluorescência ao incidir sobre um papel impregnado por cianureto de bário e platina (Arruda, 1996). A descoberta de Roentgen de uma forma única de radiação - mais tarde chamada de raios X, revolucionou o mundo médico, culminando no prestigioso reconhecimento, a academia decidiu conferir o prêmio somente a uma pessoa: WC. Roentgen, que o recebeu no dia 10 de dezembro de 1901 (Arruda, 1996). Um ano após a descoberta de Roentgen, um cientista francês chamado Henri Becquerel conduziu um experimento acidentalmente ao guardar filmes fotográficos juntamente com papel de cor preta em gavetas onde já continham sal sulfato duplo de potássio e urânio, dado  $K_2(UO_2)(SO_4)_2$ . Após alguns dias notou-se que os filmes apresentavam algumas manchas e após revelá-los, deduziu que os filmes foram afetados pelo mineral.

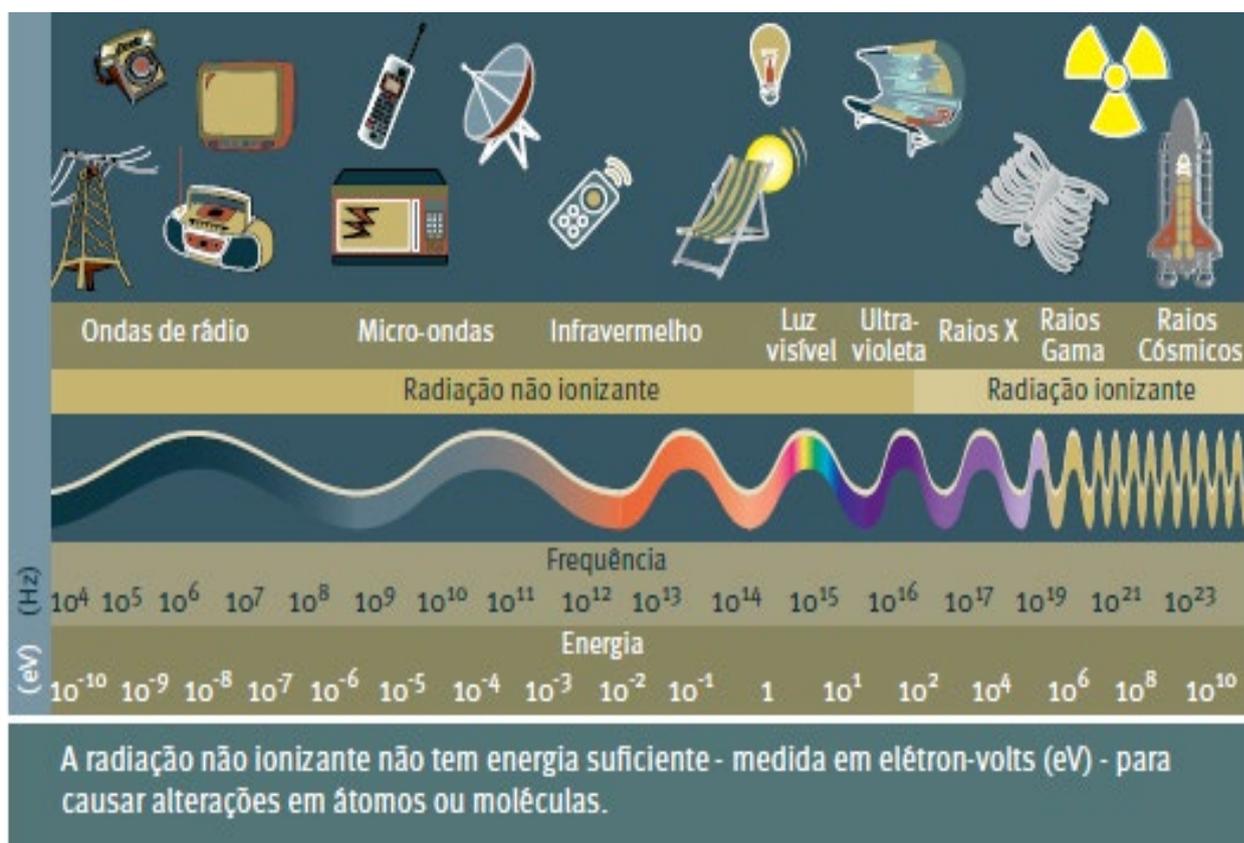
Em 1896, Henri Becquerel detectou uma radiação penetrante emitido por alguns sais de urânio deparando-se com um fenômeno que atualmente se denomina

radioatividade (Martins, 2021), e em homenagem pela descoberta a unidade de medida foi batizada com seu sobrenome Becquerel (Bq). O fenômeno da radioatividade trouxe vários questionamentos levando a química, Marie Sklodowska-Curie, juntamente com seu marido Pierre Curie a avançar nas pesquisas. Os Curie deram o salto à frente e pesquisaram outros elementos e, ao descobrirem primeiramente o polônio e o rádio, prepararam poderosas fontes que revolucionaram completamente a nova ciência da radioatividade (Segrè, 1987). Uma interessante informação disposta na página do Prêmio Nobel é acerca da família mais laureada: Pierre e Marie Curie dividiram com Henri Becquerel o Prêmio Nobel de Física de 1903 (Cordeiro; Peduzzi, 2010).

## **2.2 Radiação e suas interações com matéria**

A radiação ionizante é uma característica detectável em todo o universo conhecido, desde os raios cósmicos exógenos até à radioatividade mineral intrínseca de uma região habitável, e as suas influências no surgimento e persistência da vida são amplas e profundas (Dartnell, 2011). Em 1899, os físicos Ernest Rutherford e Paul Villard separaram a radiação em três tipos, eventualmente denominada alfa, beta e gama por Rutherford, com base na penetração de objetos e na deflexão por um campo magnético (Karmaker *et al.*, 2021), incluindo radiação eletromagnética (como luz visível, raios-X e micro-ondas) e radiação de partículas (como partículas alfa, beta e nêutrons). A fim de discutir de forma abrangente os níveis, efeitos e perigos da exposição à radiação, é essencial primeiro esclarecer alguns conceitos fundamentais relativos à ciência da radiação, radiação é energia em trânsito, da mesma forma que calor é energia térmica em trânsito (Okuno; Yoshimura, 2010). Ondas eletromagnéticas são caracterizadas por frequência, velocidade, período de vibração e comprimento de onda (Sowa *et al.*, 2012). Já uma reação nuclear, por sua vez, provoca alterações no núcleo do átomo, fazendo com que ele emita radiação na forma de ondas eletromagnéticas ou partículas (Dafre; Maris, 2013). A Figura 1 refere-se ao espectro eletromagnético. Ondas eletromagnéticas apresentam características variáveis, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e frequência ( $\nu$ ), abrangendo desde as ondas de rádio de baixa frequência até os raios gama de alta frequência. O espectro eletromagnético inclui, em ordem crescente de frequência, ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama.

**Figura 1-** Espectro eletromagnético da radiação



**Fonte:** Unep (2016)

Para efeito de estudos no campo da radiologia e ciências nucleares, as radiações são normalmente classificadas em quatro categorias gerais de interesse imediato: alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), gama ( $\gamma$ ) e nêutrons. A radiação alfa é composta por núcleos de hélio, que contêm dois prótons e dois nêutrons. Essas partículas são carregadas positivamente e têm uma massa relativamente grande. Possuem baixa capacidade de penetração e podem ser facilmente absorvidos por materiais como papel ou pele. Entretanto, a ingestão a inalação de radionuclídeos emissores de partícula alfa pode trazer sérias consequências ao organismo humano, uma vez que ela produz alta densidade de ionização localmente em tecidos dentro do **organismo** (Okuno; Yoshimura, 2010).

A radiação beta pode assumir duas formas: beta negativo ( $\beta^-$ ), que é composto de elétrons, e beta positivo ( $\beta^+$ ), que é composto de pósitrons. As partículas betas, compostas de elétrons carregados negativamente, carregam menos carga e são, portanto, mais penetrantes que as partículas alfas (Unep, 2016), mas ainda podem

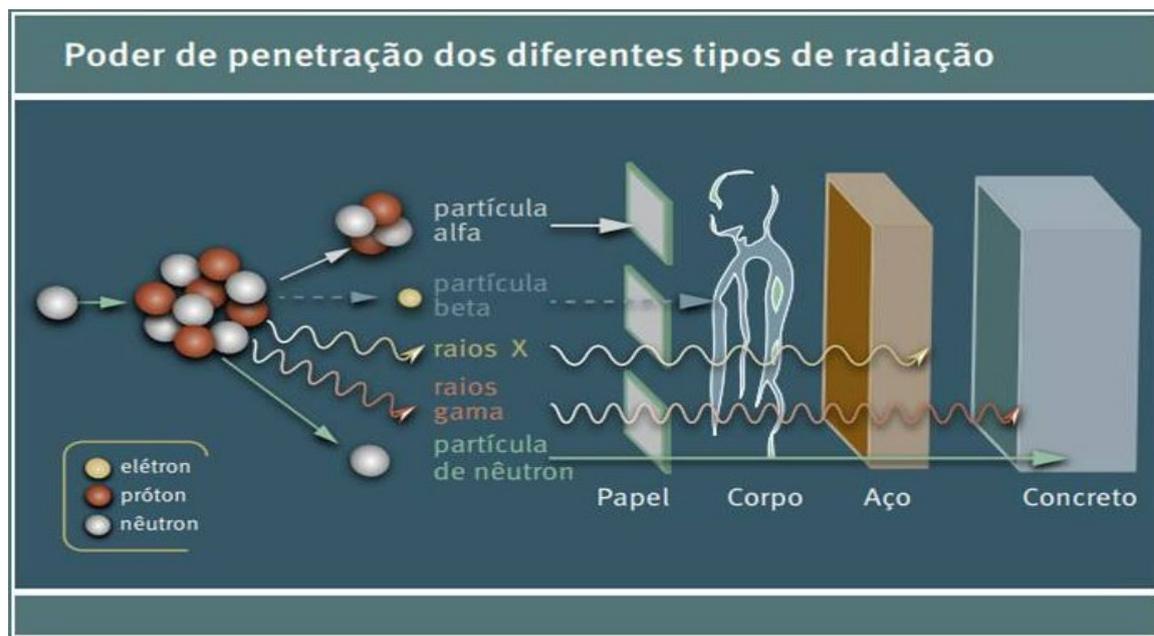
ser interrompidas por materiais como plástico ou vidro. Podem ser mais prejudiciais à saúde do que as partículas alfas, as partículas betas podem atravessar um ou dois centímetros de tecido vivo se forem absorvidos pelo organismo (Unep, 2016).

A radiação gama é uma radiação eletromagnética de alta energia semelhante aos raios X, mas geralmente mais penetrante. Os raios gama e os raios X são extremamente penetrantes e, a depender da energia, podem atravessar qualquer material menos denso do que uma chapa de aço (Unep, 2016). Os materiais radioativos geralmente emitem radiação gama durante o decaimento radioativo.

Os nêutrons são partículas subatômicas neutras liberadas durante determinados processos nucleares, como a fissão nuclear. Por serem partículas eletricamente neutras, os nêutrons possuem um alto poder de penetração quando interagem com um material ou tecido (Unep, 2016), causando danos aos materiais leves e aos organismos vivos. Eles estão frequentemente associados a reações nucleares em usinas e armas nucleares.

É importante compreender as propriedades físicas e biológicas destas diferentes formas de radiação, uma vez que a exposição a elas pode ter efeitos variados na saúde humana e no ambiente. Portanto, devem ser tomadas medidas adequadas para se proteger da exposição a estas formas de radiação, quando necessário. A Figura 2 ilustra o poder de penetração dos principais tipos de radiação.

**Figura 2-** Poder de penetração dos diferentes tipos de radiação

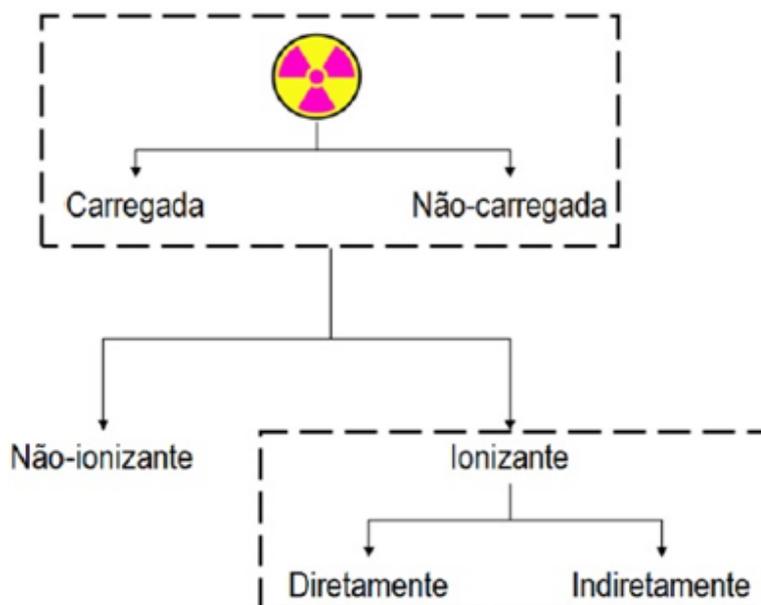


Fonte: Unep (2016)

A radiação ionizante relaciona-se à radiação na qual a energia contida é capaz de promover uma mudança na estrutura e possui energia suficiente para remover elétrons fortemente ligados aos átomos, o que leva à criação de íons. A ionização é a maneira como um átomo ou molécula assume carga positiva ou negativa ao ganhar ou perder elétrons. Quando a radiação ionizante interage com a matéria pode causar a ejeção de elétrons dos átomos resultando na formação de íons positivos (átomos que perderam elétrons) e elétrons livres (os elétrons ejetados).

As principais etapas da ionização causada pela radiação ionizante são as seguintes: absorção de energia, ejeção de elétrons, formação de íons e de pares de íons. A radiação ionizante é amplamente utilizada em aplicações médicas (imagens de raios X e tratamento de câncer), processos industriais e pesquisas científicas. No entanto, a exposição à radiação ionizante é prejudicial aos organismos vivos porque danifica as células por meio do processo de ionização, danificando assim tecidos e células. Portanto, as precauções e regras de segurança são muito importantes quando se trabalha com radiação ionizante. A Figura 3: representa a subdivisão da radiação ionizante, a radiação diretamente ionizante é que apresenta partículas elétricas carregadas, que inclui nêutrons, raios gama e raios X, e a radiação ionizante indireta e a que não possui carga elétrica associada (fótons e nêutrons).

**Figura 3-** apresenta uma categorização simples para radiação



**Fonte:** Andrade e Bauermann (2010)

A radiação ionizante pode ser ainda dividida em duas categorias distintas, a saber, ionizante direta e indiretamente. Durante o processo de transferência de energia da radiação incidente para a matéria, a radiação que carrega carga elétrica, como elétrons, fragmentos de fissão e partículas alfa, tem um impacto significativo devido ao seu campo elétrico. Ela transfere sua energia para vários átomos simultaneamente no ambiente, portanto chamada de radiação diretamente ionizante. Por outro lado, as radiações que não possuem carga elétrica associada, como nêutrons e fótons, exibem um método distinto de interação com a matéria e são conhecidas como radiação indiretamente ionizante.

### 2.3 Acidentes nucleares com maiores contaminações no mundo

**Kyshtym (Ozyorsk - 1957)** O desastre de Kyshtym, ocorrido perto da cidade de Ozyorsk (anteriormente conhecida como Chelyabinsk-40), na Rússia, em 1957, foi um dos acidentes nucleares mais graves da história. Aconteceu na Mayak Production Association, uma instalação dedicada à produção de plutônio para armas nucleares. O desastre de Kyshtym foi a explosão de um tanque de armazenamento de resíduos nucleares no complexo nuclear Mayak, perto da cidade de Chelyabinsk, na Rússia

(Greenberg, 2019).

Um incidente devastador ocorreu quando um tanque de armazenamento, contendo resíduos radioativos em níveis elevados, explodiu. As consequências da explosão levaram a uma dispersão generalizada de material radioativo na atmosfera, causando uma contaminação significativa da área circundante. Felizmente, nenhuma vida foi ceifada, mas cerca de 270.000 pessoas foram expostas a níveis perigosos de radiação (Greenberg, 2019). As consequências de tal contaminação tiveram efeitos de longo alcance tanto na saúde humana como no ambiente. Devido à tendência do regime soviético para o sigilo, as informações relativas ao desastre foram suprimidas e as pessoas afetadas não foram adequadamente informadas sobre os riscos associados à exposição à radiação. Só anos depois do colapso da União Soviética e da divulgação de informações anteriormente confidenciais é que a extensão total do desastre se tornou conhecida.

A catástrofe de Kyshtym teve consequências graves para a população local, resultando numa série de problemas de saúde, como doenças causadas pela radiação, câncer e mutações genéticas. A área afetada, conhecida como Traço Radioativo dos Urais Orientais, permaneceu contaminada durante muitos anos, representando riscos contínuos significativos para a saúde humana e para o ambiente. Os produtos químicos e materiais radioativos envolvidos no incidente foram nitrato de sódio, sais de acetato, urânio, plutônio, estrôncio-90 e cézio-137 (Greenberg, 2019).

**Windscale (1957) – Reino Unido** - O incêndio Windscale, que ocorreu na instalação nuclear Windscale (agora conhecida como Sellafield) em Cumbria, Reino Unido, Em 10 de outubro de 1957, durante uma dessas operações de recozimento, parte do núcleo da Pilha Número 1 superaqueceu, de modo que o combustível e o grafite naquela parte queimaram no refrigerante de ar (Garland; Wakeford, 2007), foi um dos acidentes nucleares mais graves da história britânica. O incidente começou quando ocorreu um incêndio em um dos dois reatores nucleares da instalação, conhecido como Pilha 1. A nuvem resultante posteriormente dispersou-se e radionuclídeos puderam ser detectados em Inglaterra, País de Gales e partes do norte da Europa (Crick; Linsley, 1984). O incêndio começou devido a uma combinação de falhas de projeto e erros operacionais durante uma troca rotineira de barras de combustível. Além dos produtos de fissão que escaparam, foram liberados radionuclídeos de materiais irradiados na pilha no momento do incêndio (Crick; Linsley, 1984). As

atividades de iodo-131 ( $^{131}\text{I}$ ), césio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) e polônio-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) dominaram as emissões radioativas e há evidências ambientais suficientes para que as liberações desses radionuclídeos sejam estimadas dentro de um fator de cerca de dois (Garland; Wakeford, 2007). O compromisso coletivo de dose equivalente efetiva resultante da liberação foi estimado em  $2 \times 10^3$  man-Sv (Crick; Linsley, 1984).

**Three Mile Island em 1979** - O acidente de Three Mile Island em 1979 foi um momento crucial na história da energia nuclear. Ocorreu na Estação Geradora Nuclear de Three Mile Island, perto de Harrisburg, Pensilvânia, EUA. No dia 28 de março de 1979, um defeito no sistema de resfriamento secundário quase causou o derretimento de um reator nuclear em Three Miles Island, nas imediações de Harrisburg, na Pensilvânia (EUA) (Swuste *et al.*, 2018). O acidente foi resultado de uma combinação de falhas mecânicas, falhas de projeto e erros humanos. O Relatório da comissão presidencial sobre este acidente afirmava que o acidente se deveu a falhas técnicas e a erro humano (Swuste *et al.*, 2018). Embora nenhuma morte ou ferimento imediato tenha sido atribuído ao acidente, ele gerou medo e desconfiança generalizada na energia nuclear.

**Chernobyl 1986**" refere-se ao catastrófico acidente nuclear ocorrido em 26 de abril de 1986, ocorreu um acidente nuclear catastrófico na Usina Nuclear de Chernobyl, em Pripyat (CNPP), localizada na RSS ucraniana da União Soviética. Este infeliz acontecimento é considerado um dos desastres nucleares mais graves da história. Pelas consequências geradas ao ambiente após "a liberação sem precedentes de vários radioisótopos diferentes levou à contaminação radioativa de grandes áreas ao redor do local do acidente" (Saenko *et al.*, 2011). O acidente foi causado por uma combinação de falhas no projeto do reator e erros do operador durante um teste de segurança. Os chefes de operação da planta decidiram realizar um teste de segurança, cuja premissa era verificar se, em uma situação de desligamento do reator, as turbinas em movimento isso resultou em uma explosão massiva e na liberação de materiais radioativos na atmosfera. As emissões radioativas do CNPP foram caracterizadas por um amplo espectro de formas e composições físico-químicas: gasosas, aerossóis de vapor, misturas de aerossóis, partículas de combustível, partículas minerais com radionuclídeos aprisionados, agregados de diferentes partículas minerais e compostos orgânicos (Saenko *et al.*, 2011). Após o incidente,

numerosos indivíduos de regiões próximas foram evacuados e realocados, enquanto foram tomadas medidas para restringir a propagação da radiação. Lamentavelmente, o acidente ou na mitigação das consequências, os indivíduos que residiam nas proximidades do local do CNPP e foram evacuados após o acidente e os que continuaram a residir nas áreas contaminadas mais afastadas do CNPP (Saenko *et al.*, 2011).

**Goiânia Césio-137 (Cs-137)** ao qual você se refere ocorreu em Goiânia, Brasil, em setembro de 1987. Foi um dos acidentes radiológicos mais significativos da história. O incidente começou quando dois catadores descobriram uma máquina de radioterapia descartada em um hospital abandonado. Sem saber dos perigos, desmontaram a máquina e retiraram a fonte, a substância radioativa usada no tratamento de doenças havia escapado da cápsula protetora e se transformara em uma terrível fonte de contaminação (Vieira, 2013), uma pequena cápsula contendo Cs-137. Os metais e a cápsula de césio foram retirados do hospital abandonado e vendidos para um ferro-velho, o material da sua descoberta apresentava um brilho azul que o fascinou, a partir daí ele divulgou sua descoberta e distribuiu o material para vizinhos e parentes, a substância radioativa usada no tratamento de doenças havia escapado da cápsula protetora e se transformara em uma terrível fonte de contaminação (Vieira, 2013). Nos dias seguintes, o pó radioativo dentro da cápsula se espalhou por vários locais da cidade, contaminando residências, ruas e pessoas que tiveram contato com o material. Somente em outubro de 1987, a contaminação foi constatada e o episódio do rompimento da cápsula foi assimilado como ponto inicial de uma tragédia divulgada como o "acidente radioativo com o césio-137" (Vieira, 2013). Eventualmente, as autoridades foram alertadas para a situação e foram tomadas medidas de emergência para conter a contaminação e mitigar os danos causados e tratar as pessoas afetadas. No primeiro momento a conduta determinada foi "identificar, monitorar, descontaminar e tratar a população envolvida; as áreas consideradas como focos principais de contaminação foram isoladas (Schumann; Berwig, 2019).

**Tokaimura (1999)** - O acidente nuclear de Tokaimura em 1999 foi um grave incidente de radiação que ocorreu em Tokaimura, no Japão. Foi um dos acidentes nucleares mais significativos da história do Japão e levantou preocupações sobre a segurança

das instalações nucleares, pois uma equipe de trabalho tinha a função de misturar e homogeneizar o urânio. eventualmente, era natural que a ênfase dos impulsos “kaizen” na JCO tivesse sido com enriquecimento de 18,8% no balde de aço inoxidável de 10 litros com água nítrica e pura para produzir nitrato de uranila (Tsuchiya *et al.*, 2001). O procedimento adotado pelos trabalhadores era contrário as normas aprovadas pelo governo, “como consequência destas ações, a solução de nitrato de uranila no tanque de precipitação atingiu um nível crítico e os alarmes soaram” (Tsuchiya *et al.*, 2001), A adição do sétimo contêiner desencadeou uma reação em cadeia autossustentável e o flash azul resultou da radiação Cherenkov emitida quando ocorre a fissão nuclear (Rozlaimi; Othman, 2019). Como resultado do acidente de criticidade, uma explosão de radiação foi liberada na área circundante. no qual cerca de trezentos empregados foram contaminados por radiação e dois deles vieram a falecer (Hukai, 2013).

**Fukushima Daiichi (2011)** – Japão - O acidente nuclear de Fukushima , que foi causado por um enorme tsunami após um terremoto submarino de magnitude 9 em Março de 2011, foi extraordinário em termos dos seus danos significativos e extensos e do seu efeito negativo nos ambientes locais e globais (Kim; Kim; Kim, 2013).

Foi o acidente nuclear mais grave desde o desastre de Chernobyl em 1986 e teve consequências de longo alcance para o Japão e para o mundo. indústria nuclear. De acordo com o relatório do Fórum Industrial Atômico do Japão, cerca de 15.000 terabecquerels de cézio-137 foram liberados do reator 1–3 da usina nuclear Fukushima Dai-ichi, 168,5 vezes o da bomba atômica lançada sobre Hiroshima. Materiais radioativos do acidente de Fukushima (Kim; Kim; Kim, 2013).

Devido ao terremoto, os reatores nucleares das usinas foram imediatamente desligados para garantir a segurança do entorno. No entanto, explosões de hidrogénio e derretimentos do núcleo de combustível, ou “*melt-throughs*”, nos reatores de Fukushima ocorreram em poucos dias porque não havia energia para acionar as bombas para resfriá-los (Aoki; Rothwell, 2013). O desastre nuclear de Fukushima ocorreu como resultado de explosões em três dos seis reatores situados na usina. A magnitude das explosões fez com que uma quantidade significativa de material radioativo fosse lançada no meio ambiente, causando impactos profundos na saúde pública, no meio ambiente e na economia.

O desastre foi classificado como acidente nuclear de Nível 7, o nível mais alto

na Escala Internacional de Eventos Nucleares, igual ao do desastre nuclear de Chernobyl (Kim; Kim; Kim, 2013). A magnitude das explosões fez com que uma quantidade significativa de material radioativo fosse lançada no meio ambiente, causando impactos profundos na saúde pública, no meio ambiente e na economia. As liberações atmosféricas para a terra e o oceano ocorreram principalmente durante a primeira semana após o acidente, enquanto a liberação contínua do combustível danificado na água (Song, 2018).

A catástrofe teve consequências de longo alcance, destacando a necessidade de medidas de segurança rigorosas na indústria da energia nuclear. Isso levou à contaminação generalizada da terra, da água e dos alimentos por radiação. O impacto social também é uma grande preocupação; estima-se que haja um aumento do risco de câncer de tireoide de início tardio devido à exposição à radiação com liberação de iodo, bem como diminuição da taxa de natalidade (Clau *et al.*, 2019).

#### **2.4 Grandezas dosimétricas de interesse**

A dosimetria de radiação trata de métodos para determinação quantitativa da energia depositada em um determinado meio por radiações ionizantes direta ou indiretamente (Adlienê; Adlyté, 2017).

##### **a) Dose Radiação**

Dose, ver Equação (1), é uma métrica estabelecida para dimensionar a consequência energética da exposição, ou seja, é uma medida que quantifica, podendo ser utilizada para a avaliação e análise de risco. Por meio de diferentes áreas foram desenvolvidas duas formas de quantificar esse risco, uma desenvolvida pelos toxicologistas e outra por físicos. Os toxicologistas normalmente quantificam uma dose química como uma massa de contaminante por unidade de massa corporal (isto é, miligramas de contaminante por quilograma de peso corporal) (Fjeld *et. al.*, 2007).

No campo da proteção radiológica, os físicos da saúde estabeleceram duas grandezas diferentes para expressar a dose radiológica: dose equivalente e dose efetiva. Estas duas quantidades são medidas usando a mesma unidade especial, o *sievert* (Sv). A dose equivalente é usada para calcular o dano biológico causado pela radiação ionizante, enquanto a dose eficaz é usada para estimar o risco global de desenvolver cancro ou outras doenças relacionadas com a radiação. Ao medir doses

equivalentes e eficazes, os físicos da saúde podem compreender melhor os riscos e efeitos potenciais da exposição à radiação ionizante. Independentemente de se referir a uma exposição química ou radiológica.

$$D_t = \int_0^{t_e} \dot{D}(t) dt \quad (1)$$

onde, a taxa de dose ( $\dot{D}$ ) é a dose por unidade de tempo, e a dose total ( $D_t$ ) é o tempo integral da taxa de dose durante todo o período de exposição: (Fjeld *et. al.*, 2007).

Indivíduos podem receber doses de radiação externamente, como em uma máquina de raios X, ou internamente, por inalação, ingestão ou por absorção através da pele intacta ou ferida, como uma ferida (Homann, 2014).

#### b) Dose absorvida (D)

Dose absorvida, apresentada na Equação (2), refere-se à quantidade de energia absorvida por um material, frequentemente associada à exposição a radiações ionizantes, como raios X ou radiação nuclear. A unidade de medida da dose absorvida é o *gray* (Gy), que representa a absorção de um joule de energia por quilograma de massa do material. Representada pela equação 2:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (2)$$

onde, energia média ( $d\varepsilon$ ) depositada por unidade de matéria com massa ( $dm$ ).

#### c) Dose equivalente ( $H_T$ )

Dose equivalente refere-se à dose equivalente no contexto da exposição à radiação. É uma medida que leva em consideração os diferentes efeitos biológicos dos diferentes tipos de radiação ionizante. A unidade de dose equivalente é o sievert (Sv) ou o rem (*roentgen equivalente man*). Esta grandeza expressa pela equação por  $H_T = D_t W_r$ , é o produto da dose absorvida (D) em determinado órgão ou tecido por um fator de ponderação ( $W_r$ ) típico de cada tipo de radiação. A tradução correta seria

Equivalente de dose, pois o conceito definido foi de equivalência entre doses de diferentes radiações para produzir o mesmo efeito biológico (Tauhata *et.al.*, 2014).

d) Dose efetiva (E)

A dose efetiva (E) é uma medida usada em radiologia e proteção radiológica para determinar os danos causados pela radiação ionizante. Isto depende do tipo de radiação e da sensibilidade das diferentes tecidos e órgãos que fazem parte do corpo humano. A dose Efetiva é o somatório da dose efetiva devida à exposição externa e da dose efetiva comprometida durante qualquer período de tempo t, proveniente da incorporação de radionuclídeos (CNEN, 2011). esta grandeza é representada pela relação  $E = \sum_T H_T W_T$ , sendo  $H_T$  é a dose equivalente no tecido ou órgão e  $W_T$  o fator de ponderação do tecido ou órgão. A unidade de medida utilizada é o sievert (Sv).

e) Dose Efetiva Total (*total effective dose* – TED)

A TED (*Total Effective Dose*) é definida como a soma do equivalente de dose eficaz (para exposições externas) e do equivalente de dose eficaz comprometido (para exposições internas). Avaliar os valores da Dose Efetiva Total (do inglês TED) recebida pelos indivíduos ao redor do local do acionamento do RDD é muito importante após o início de um acidente (Fairuz; Sahadath, 2020). As doses recebidas pela população determinarão que tipo de ações de proteção deverá ser acionadas. Já a Dose Coletiva (pessoa-Sv) = Dose Média por Indivíduo (Sv)×Número de indivíduos expostos.

A noção de dose coletiva é uma ferramenta crucial para medir o impacto total da radiação numa população. É particularmente útil em situações em que muitos indivíduos estão expostos à radiação, como em procedimentos médicos, atividades industriais ou acidentes nucleares. Ao calcular a dose coletiva, os especialistas podem avaliar os potenciais riscos à saúde da população como um todo, o que auxilia na determinação de medidas de segurança e orientações adequadas para proteger a saúde pública. É essencial notar que a dose coletiva, que é uma medida da exposição total à radiação sofrida por uma população, é apenas um fator que precisa de ser considerado na avaliação dos potenciais riscos para a saúde da exposição à radiação ionizante. Não é uma medida direta do risco ou danos aos indivíduos da população.

Ao considerar os potenciais riscos para a saúde decorrentes da exposição às radiações ionizantes, é crucial ter em conta vários fatores. Em primeiro lugar, o tipo de radiação envolvida é um fator crítico. Alguns tipos de radiação, como as partículas alfa, são mais ionizantes e, portanto, mais prejudiciais do que outros tipos, como as partículas beta ou os raios gama. Em segundo lugar, a duração da exposição à radiação também é crucial, uma vez que a exposição prolongada pode aumentar o risco de danos. Finalmente, a susceptibilidade individual é também um fator na determinação dos potenciais riscos para a saúde decorrentes da exposição à radiação, uma vez que algumas pessoas podem ser mais vulneráveis aos efeitos da radiação ionizante do que outras. Em comparação com doses mais elevadas, os riscos de doses baixas de radiação são provavelmente mais baixos, e são necessários estudos epidemiológicos progressivamente maiores para quantificar o risco com um grau útil de precisão (Brenner *et al.*, 2003).

Portanto, embora a dose coletiva forneça uma medida da exposição total à

radiação sofrida por uma população, é importante considerar a complexa relação entre a exposição à radiação e o risco para a saúde. A compreensão dessa relação requer uma consideração cuidadosa do tipo de radiação, da duração da exposição e da suscetibilidade individual.

## **2.5 Características gerais das armas nucleares táticas**

Armas nucleares não estratégicas ou táticas referem-se a armas nucleares projetadas para serem usadas em um campo de batalha em situações militares (Kristensen; Korda, 2019). Dirigido contra um ou mais de uma série selecionada de alvos inimigos com o propósito de destruição progressiva e desintegração da capacidade bélica do inimigo e da vontade de guerrear (Woolf; Foreign, 2006). As ogivas menores eram mais adequadas para armas não estratégicas porque procuravam atingir objetivos mais limitados e discretos no campo de batalha do que as armas nucleares estratégicas maiores (Woolf; Foreign, 2006). Esta categorização abrange uma gama de armas que podem ser utilizadas em múltiplas plataformas, incluindo navios, aviões e sistemas terrestres. A utilização de tais armas está sujeita a protocolos e regulamentos rigorosos, a fim de garantir que quaisquer riscos potenciais sejam eficazmente geridos e mitigados.

Além dos vários métodos de lançamento de armas nucleares que muitas vezes diferem do sistema de lançamento de armas nucleares, este tipo de arma inclui diferentes tipos de artefatos explosivos atômicos (Woolf; Foreign, 2006) O rendimento dessas gamas de armas é normalmente esperado ser inferior ao das armas nucleares estratégicas. O rendimento potencial de uma arma nuclear tática pode variar significativamente, desde uns relativamente baixos 0,1 quilotons (kT) até rendimentos que variam de 10 a 15 kT. Num cenário de denotação de um dispositivo nuclear tático de 10 kT em um raio de menos de 800 metros da detonação, espera-se que o impacto da explosão resulte em choque e calor severos, acompanhados por incêndios extensos, além de radiação e desativação de sistemas elétricos pela emissão de pulso eletromagnético (PEM) que se estende até aproximadamente 4 km.

É possível que alguns indivíduos sobrevivam ao evento, particularmente aqueles que se refugiaram em estruturas de concreto armado. Num raio de 1 km da zona de detonação, uma poderosa onda de choque gerada pela explosão teria um impacto adverso nas estruturas de madeira e tijolo. A uma distância de pouco mais de

um quilômetro da detonação causaria significativos danos a casas de estrutura de madeira e tijolos. A detonação gera aumento de temperatura e pressão, de modo que todos os materiais presentes sejam convertidos em gases quentes e comprimidos (Glasstone, 1964). Como esses gases estão em temperaturas e pressões muito altas, eles se expandem rapidamente e assim iniciam uma onda de pressão, chamada de "onda de choque, "no meio circundante - ar, água ou terra (Glasstone; Dolan, 1977), onda de energia térmica e cinética, provocando incêndios generalizados e danos estruturais potencialmente devastadores. A explosão pode provocar na estrutura alguns tipos de danos; tipo físico (causando trincas e fissuras), danos do tipo físico (perda de resistência do aço, movimento devido à dilatação estrutural, movimento de retração brusca após o incêndio) e problemas do tipo químico (modificam as características do concreto) (Valente, 2014).

Contudo, os edifícios de concreto armado podem proporcionar uma medida de proteção a um número limitado de indivíduos na vizinhança. Espera-se que num raio de um quilômetro a partir do ponto de explosão, os edifícios sofram danos significativos, enquanto danos menores são previstos para além deste intervalo. É importante notar que a intensidade dos danos é inversamente proporcional à distância do epicentro (local de detonação).

Os indivíduos que permanecem em ambientes fechados podem mitigar efetivamente o risco de exposição a níveis perigosos de radiação, em comparação com aqueles ao ar livre. É aceito que as armas nucleares táticas possuem menor rendimento de explosão em comparação com as armas nucleares estratégicas. O uso tático de armas nucleares é marcadamente diferente do uso de armas convencionais, independentemente do rendimento. Mesmo uma explosão atômica de baixo rendimento pode gerar efeitos altamente destrutivos que excedem os de uma explosão convencional (trinitrotolueno – TNT, por exemplo) do mesmo tamanho. É imperativo reconhecer que a utilização de armas nucleares táticas merece uma consideração cuidadosa devido ao seu impacto. Este cuidado na modelagem de consequências da detonação de um dispositivo nuclear tático (em comparação a um convencional) se dá pelo fato de que não apenas efeitos mecânicos ocorrem e estes podem não ser prioritários.

## 2.6 Estruturas urbanas (construções)

O termo *estrutura urbana* se refere às diversas estruturas, edifícios e elementos físicos que constituem uma área urbana. Estas estruturas desempenham um papel essencial na funcionalidade e estética da cidade. A análise do comportamento de estruturas de concreto tem o objetivo de avaliar sua efetividade na blindagem contra os riscos potenciais de contaminação. Esta investigação é crucial porque pode ajudar a determinar o nível de proteção oferecido por estas estruturas em caso de tal ocorrência. O fator de proteção do edifício é útil em aplicações para consequências radiológicas e análises de resposta a emergências que adotam uma abordagem de dose absorvida e coeficiente de risco para estimar os efeitos sobre a saúde (Dickson; Hamby; Eckerman, 2015).

As cidades são caracterizadas por uma variedade diversificada de tipologias habitacionais construídas a partir de uma variedade de materiais de construção, sujeitas a uma série de fatores contextuais, tais como localização geográfica, disponibilidade regional, normas regulamentares e as preferências das partes interessadas envolvidas, tais como construtores e proprietários de casas. Alguns dos materiais mais comumente utilizados para a construção de residências urbanas incluem tijolo, concreto, madeira, aço e pedra (dentre outros). Cada material tem suas vantagens e desvantagens exclusivas, e os construtores devem considerar cuidadosamente todos os fatores antes de escolher um material para seu projeto de construção de moradia urbana. Materiais de construção civil são elementos de naturezas diversas, que devem desempenhar papéis específicos e previsíveis de maneira a possibilitar e garantir a existência de um determinado ambiente construído (Ribeiro; Pinto; Starling *et al.*, 2019).

Segundo (Dickson; Hamby; Eckerman, 2015) o fator de blindagem do edifício é um parâmetro crucial que quantifica o grau de proteção oferecido por um determinado tipo de edifício aos seus ocupantes contra os efeitos nocivos das radiações ionizantes. Este tipo de radiação é geralmente emitido por uma pluma de material radioativo e pode potencialmente contaminar o terreno e o telhado circundantes. O fator de blindagem considera uma variedade de fatores, como materiais de construção do edifício, espessura e *layout*, sendo utilizado para avaliar a segurança geral no caso de um evento radiológico. Também atua como escudo para instrumentos e aparelhos para salvaguardar instrumentos eletrônicos e dispositivos eletromagnéticos.

## a) Concreto

Este composto específico é amplamente utilizado para evitar o vazamento de radiação de instalações nucleares. As definições dadas ao concreto por vários autores podem ser resumidas da seguinte forma: concreto é o produto da mistura de aglomerantes, agregados, água e aditivos (Alves, 1982). O concreto é um material indispensável ao progresso humano, utilizado em diversas construções que melhoram nossa qualidade de vida. O concreto é o principal material de construção utilizado na atualidade e quando associado a uma estrutura essa importância torna-se maior ante as diversas aplicações e da resistência que passa a adquirir (Couto *et al.*, 2013).

O parâmetro de medição do consumo de concreto per capita enfatiza o seu papel crucial no avanço das nações. Com exceção da água, o concreto é o material mais consumido no mundo em massa. Com um consumo anual estimado em cerca de 30 mil milhões de toneladas, o concreto ultrapassa a produção per capita de qualquer outro material (Monteiro; Miller; Horvath, 2017).

Para garantir que o concreto atenda às exigências das construções modernas, novas metodologias estão sendo adotadas e recursos de tecnologia, A melhoria da sustentabilidade também pode ser alcançada tornando o ciclo de vida das estruturas de concreto mais resiliente através de um melhor desempenho dos materiais (Monteiro; Miller; Horvath, 2017). da concepção estrutural integrada com modelação de durabilidade baseada no risco e de métodos de construção otimizados.

A melhoria recente no desempenho do material inclui o uso de reforço de fibra multiescala, aço com melhor resistência à corrosão, aditivos químicos avançados para melhorar a reologia do concreto fresco, criação de concreto auto curável (Monteiro; Miller; Horvath, 2017). O concreto é um material altamente eficaz para proteção contra radiação e, como resultado, é amplamente utilizado em usinas nucleares. É empregado principalmente nas paredes dos vasos dos reatores, onde atua como barreira para evitar que a radiação gerada no interior dos reatores escape para o ambiente circundante. As propriedades de blindagem do concreto resultam da sua elevada densidade, o que lhe permite absorver e atenuar eficazmente a radiação.

Tem certas vantagens, como baixa permeabilidade para proteger o reforço de aço embutido, durabilidade contra o fogo, materiais onipresentes para formar concreto e flexibilidade para formar qualquer formato moldado (Abdullah *et al.*, 2022). Para produzir um concreto de alta densidade existe uma variedade de técnicas utilizadas

na produção de concreto de proteção, mas geralmente envolvem a inclusão de agregados de alta densidade para absorver eficazmente a radiação. Alguns materiais comuns adicionados ao concreto para aumentar suas capacidades de proteção contra radiação são: agregados de Bário: O bário, elemento denso com boas propriedades de absorção de radiação, é frequentemente utilizado na blindagem de concreto, Os íons de bário podem proteger diferentes tipos de radiação, portanto, pela incorporação de íons de bário no sistema de clínquer Portland, um aglutinante com propriedades de proteção pode ser produzido (Zezulová; Staněk; Opravil, 2016).

A adição de agregados de bário ao concreto aumenta sua densidade e eficácia na atenuação da radiação, agregados de Hematita: A hematita é um mineral natural rico em ferro e é conhecido por sua capacidade de absorção de radiação. A inclusão de agregados de hematita no concreto pode melhorar suas propriedades de proteção contra radiação, concreto de bário: O concreto de bário é um tipo específico de concreto que contém uma alta concentração de sulfato de bário. Este tipo de concreto é particularmente eficaz na absorção de radiação devido à sua alta densidade e à presença de bário, aditivos Especiais: Junto com agregados de alta densidade, aditivos especiais podem ser incorporados ao concreto para melhorar sua capacidade de proteção contra radiação. Esses aditivos podem consistir em produtos químicos que aumentam a absorção de radiação ou diminuem a permeabilidade do concreto, ” construção com alta resistência à radiação e propriedades mecânicas e de durabilidade aprimoradas, um novo concreto antirradiação de alto desempenho foi projetado (Yajun *et al.*, 2022).

O tipo e a quantidade de agregado no concreto são componentes importantes para as propriedades de proteção radiológica dos concretos (Akkurt *et al.*, 2006). Tais agregados devem ser caracterizados por alta densidade ou alto teor de água cristalina (Masoud *et al.*, 2020). A inclusão de outros agregados pesados ao concreto evidenciou a sua melhora como blindagem (Akkurt *et al.*, 2006). O tipo e a quantidade de agregado no concreto são componentes importantes para as propriedades de proteção radiológica dos concretos (Akkurt *et al.*, 2006).

O uso de concreto pesado carregado de barita é uma das formas alternativas na construção civil para fornecer proteção contra radiação, usar barita (BaSO<sub>4</sub>) na construção civil certamente seria uma boa escolha para proteção contra radiação, mas isso não é viável porque não há reservas suficientes de barita no mundo (Akkurt *et al.*, 2006). Como tal, são comumente utilizados na produção de concreto para aplicações

onde a proteção radiológica é fundamental, como em usinas nucleares, hospitais e outros ambientes onde a exposição à radiação é uma preocupação.

## **2.7 A simulação computacional de eventos radiológicos e nucleares**

A Simulação Computacional é uma ferramenta com um campo de aplicação muito grande e que permeia por diversas áreas do conhecimento (Bonfim *et al.*, 2020).

### *2.7.1 Hotspot health physics codes v 3.1.2*

O laboratório americano *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) os códigos *Hotspot Health Physics* é um código computacional desenvolvido para simular a dispersão de matérias radioativos, que fornece dados para análise e avaliação e riscos. Ele faz estimativas confiáveis dos efeitos da dispersão da radiação. Os códigos dos modelos de dispersão atmosférica *HotSpot* são uma aproximação de primeira ordem dos efeitos de radiação associados à liberação atmosférica de materiais radioativos de curto prazo (menos de algumas horas) (Homann, 2014).

O código *HotSpot* utiliza o modelo de dispersão gaussiana para fornecer liberações próximas à superfície, dispersão de curto alcance e liberações de curto prazo (Zubair; Ahmed; Hartanto, 2022). O modelo gaussiano geralmente produz resultados que concordam bem com dados experimentais em condições meteorológicas e de terreno simples (Homann, 2014).

#### a) Modelo Gaussiano

Modelo gaussiano ou distribuição gaussiana é uma função matemática que descreve a distribuição de variáveis aleatórias. Também chamada de curva gaussiana ou curva normal. Este modelo é importante em estatística e probabilidade e é usado em muitos campos, desde a teoria da probabilidade até o aprendizado de máquina. A movimentação do ar é o principal parâmetro para a dispersão do poluente em uma pluma gaussiana, tanto pelo movimento médio do ar carregando os poluentes quanto pela difusão turbulenta no espaço tridimensional (Martins; Fortes; Lessa, 2015).

#### b) Dose de Passagem da Pluma

A "dose de passagem da pluma" refere-se à quantidade de radiação a que um indivíduo ou objeto é exposto ao atravessar uma pluma radioativa em uma área específica. Uma pluma radioativa é um conjunto de substâncias radioativas que podem ser dispersas pelo vento ou pela água, normalmente causada por um desastre nuclear, testes de armas nucleares ou outro incidente que libere elementos radioativos no ambiente. A taxa de dose gama ambiente é a principal quantidade de observação para o gerenciamento de emergências nucleares devido à sua alta frequência de aquisição e densa implantação espacial (Zhang *et al.*, 2017). Para avaliar o impacto da radiação num local específico, é importante determinar o momento exato em que uma nuvem radioativa passa sobre a área. O(s) intervalo(s) de tempo da(s) passagem(s) da pluma, juntamente com as coordenadas do(s) local(is) de observação, capturarão as características temporais e espaciais da nuvem radioativa (Zhang *et al.*, 2017).

A extensão da exposição à radiação resultante de uma pluma pode variar com base em vários fatores, incluindo o tipo e a quantidade de material radioativo dentro da pluma, a distância de indivíduos ou objetos da fonte, a direção e velocidade do vento e as condições climáticas locais.

### c) Dispersão ambiental de material radioativo

As usinas nucleares têm procedimentos de proteção e segurança em vigor e são monitoradas de perto pela autoridade reguladora Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), que transcreveu normas mais rígidas após acidente Chernobyl," enviou precipitação radioativa por toda a Europa Oriental e Ocidental, um número crescente de Estados passou a reconhecer os enormes riscos transfronteiriços que são inerentes ao desenvolvimento do poder nuclear" (Washington, 1997).

Um acidente em uma usina nuclear, embora seja incomum, pode liberar níveis perigosos de radiação sobre uma área. As mais graves e imediatas consequências da exposição à radiação nuclear proveniente de uma liberação ambiental, seja ela acidental ou deliberada, são as decorrentes da exposição à radiação ionizante residual. Em comum com explosões nucleares decorrentes de ações bélicas (Glasstone; Dolan, 1977), a distribuição dos efeitos sobre a saúde humana dependem

de alguns fatores como o (a) inventário nuclear liberado para o meio ambiente, (b) altura efetiva de liberação, (c) regime de liberação, se contínuo, em pulsos ou instantâneo, (d) condições atmosféricas locais, (e) proteção oferecida pelo abrigo onde se encontra e (f) natureza geral do terreno sobre o qual a pluma evolui e deposita o material contaminante (Glasstone; Dolan, 1977; Homann, 2019; Meit *et al.*, 2011). Estas são possíveis vias que adicionam complexidade ao cenário de tomada de decisão pela prontidão especializada necessária e nem sempre disponível para operar de forma integrada em um evento QBRNe (Químico, Biológico, Radiológico, Nuclear e Explosivo) (Greenawald *et al.*, 2020; Neumeister; Gray, 2020; Patel *et al.*, 2020).

A radiação imediata consiste basicamente de raios-X e  $\gamma$ . Indivíduos em espaço livre (sem barreiras físicas de proteção) podem receber mais do que a dose de radiação ionizante necessária para produzir 50% de letalidade a distâncias relativamente curtas. Conforme a pluma de contaminação radioativa viaja na direção do vento, o material radioativo que se depositou e se assentou no solo cria um rastro do material depositado (precipitação radioativa) (Glasstone; Dolan, 1977; Harwell; Grover, 1985). A dose de radiação recebida depende do tempo que um indivíduo permanece na área contaminada. Uma vez que as taxas de dose são a variável principal de interesse para estudos de dispersão radioativa ambiental, indivíduos assentados nessas posições dentro da pluma representam alta prioridade dentro das primeiras 100 horas da resposta. A dispersão dos radionuclídeos liberados por uma planta nuclear é um fenômeno sofisticado e a sua descrição e detalhamento teórico transcendem os objetivos deste estudo, cuja atenção está centrada nas consequências de uma liberação desta natureza.

#### d) Partículas Balísticas

Ao abordar as partículas geradas pelas detonações de explosivos nucleares, deverá ser adotada uma abordagem abrangente que tenha em conta as características físicas e radioativas do material, indicam que detonações envolvendo a liberação de uma grande variedade de substâncias podem resultar em partículas que variam em tamanho desde alguns  $\mu\text{m}$  de diâmetro aerodinâmico (AD) a mil  $\mu\text{m}$  ou mais (Homann, 2014).

Uma caracterização adequada da distribuição do tamanho das partículas é uma necessidade absoluta para compreender o seu impacto potencial na exposição

humana, no meio ambiente, no solo e na vegetação, estudos também indicam que partículas maiores que aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  AD não são arrastadas pela nuvem quente de gases, mas separam-se da pluma ascendente e seguem trajetórias balísticas independentes dos efeitos de fluatibilidade produzidos pela detonação (Homann, 2014). A morfologia das partículas é um fator crucial que rege suas características aerodinâmicas, comportamento de deposição e transporte dentro do ambiente. Partículas com dimensões mais finas exibem propriedades de suspensão superiores e podem percorrer distâncias maiores. Como tal, o estudo da forma das partículas é fundamental para a compreensão do destino e transporte de aerossóis em vários meios ambientais. As partículas maiores normalmente caem na superfície dentro de algumas dezenas a algumas centenas de metros do local de detonação. (Homann, 2014).

#### e) Ressuspensão

O fator de ressuspensão serve como um parâmetro vital para medir a quantidade de material particulado que se torna transportado pelo ar a partir do solo. É determinado medindo a concentração de matéria presente no ar em relação à encontrada no solo e convencionalmente expressa em ( $\text{m}^{-1}$ ). Este número significa a quantidade de partículas por unidade de distância e é uma ferramenta crítica na avaliação da qualidade do ar e dos potenciais riscos para a saúde. Segundo Homann (2014) o fator de ressuspensão pode ser determinado calculando os níveis de contaminação do solo, normalmente medidos como atividade por unidade de área ( $C_i/\text{m}^2$ ), ou observando a concentração de radionuclídeos no ar, expressa como atividade por unidade de volume ( $C_i/\text{m}^3$ ), acima do local de medição do solo. Ao compreender a correlação entre a contaminação do solo e a concentração do ar, podemos obter informações valiosas sobre como a contaminação do solo afeta a qualidade do ar e, em última análise, a exposição humana a substâncias contaminadas.

O fator de ressuspensão desempenha um papel importante nos estudos ambientais de material particulado transportado pelo ar. É uma medida da fração da massa de partículas previamente depositada que provavelmente será novamente arrastada no ar. Para determinar este fator com precisão, a medição é realizada a uma altura de 2 metros do nível do solo, com velocidade média do vento de 2 m/s, o que é

considerado padrão. No entanto, se a velocidade do vento exceder 3 m/s, o fator de ressuspensão é ajustado para levar em conta o efeito dos ventos fortes na ressuspensão das partículas. Este ajuste é feito para garantir a precisão das medições e para levar em conta quaisquer alterações nos fatores ambientais que possam afetar o fator de ressuspensão.

A determinação do fator de ressuspensão (FR) é um parâmetro crítico na avaliação do impacto ambiental do material particulado transportado pelo ar. É definido como a razão entre a massa de partículas novamente arrastadas na atmosfera e a massa de partículas depositadas no solo. O valor do fator de ressuspensão, RF, é determinado na altura de 2 m do solo (em uma velocidade média de 2 m/s). Caso a velocidade do vento seja acima de 3 m/s, tal fator é ajustado conforme equação 3 (Homann, 2014).

$$RF(u) = RF * (u/3)^2 \quad (3)$$

onde, RF é o fator de ajuste e  $u$  é a velocidade do vento.

## 2.8 Caracterização de Risco

A caracterização de risco refere-se ao processo de avaliação e descrição dos riscos potenciais ou efeitos adversos que podem resultar da exposição a um perigo ou condição específica. No domínio da avaliação de riscos, caracterizar a natureza e a magnitude dos riscos para a saúde humana ou para o ambiente é sem dúvida o passo mais importante no processo analítico (Williams; Paustenbach, 2002).

Ao avaliar o impacto de determinados fatores, é importante usar a métrica apropriada para garantir uma análise precisa, o risco é visto como um fenômeno calculável na lógica e na matemática, uma realidade objetiva na ciência e na medicina, como um fenômeno social na sociologia e como um conceito na linguística (Aven, 2012).

Algumas definições são baseadas em probabilidade, “ao estudar as tendências de desenvolvimento, serão estudadas tais definições de risco, mas também definições de risco baseadas em interpretações de probabilidade baseadas no conhecimento ou epistêmicas” (Aven, 2012), algumas em eventos indesejáveis ou perigos, e outras em

incertezas nos casos em que um efeito limite está presente, uma métrica de margem de segurança é normalmente utilizada. Por outro lado, quando um efeito sem limite está sendo avaliado, uma métrica de resposta fracionária é frequentemente empregada. Esta abordagem ajuda a garantir que a análise seja precisa e confiável. No contexto das práticas contemporâneas de avaliação e gestão de riscos, é geralmente aceito que os efeitos determinísticos e estocásticos, “os efeitos diretos da radiação são mais rigorosamente definíveis como não estocásticos e os segundos como efeitos estocásticos” (Rueff, 2019).

O Comitê BEIR define; o risco de cancro decorre de modo linear a baixas doses de radiação e sem limiar de dose; ou seja, qualquer dose de radiação, mesmo que baixa, tem o potencial de conduzir a um aumento de risco de câncer” (Rueff, 2019).

A toxicidade de um determinado material radioativo e as doses associadas aos órgãos. Segundo Homann (2014) é importante considerar vários fatores ao avaliar os efeitos da exposição a substâncias radioativas. Esses fatores incluem o tipo de radiação e sua energia, a meia-vida física do radionuclídeo e de seus radionuclídeos filhos, a via de ingestão, a distribuição do tamanho das partículas transportadas pelo ar e a solubilidade dos radionuclídeos inalados, bem como as características químicas e biocinéticas. do elemento. Quando uma partícula ionizante remove um elétron de um dos átomos de uma molécula do organismo, pode causar sua desestabilização que resulta em quebra da molécula (Okuno, 2013). Esta quebra da molécula do ser irradiado parte da energia absorvida pelo corpo. Levando esses fatores em consideração, podemos entender melhor como o radionuclídeo é retido e distribuído no corpo, bem como a taxa e a(s) via(s) de excreção. Esse conhecimento é crucial para uma avaliação precisa dos efeitos da exposição a substâncias radioativas.

Compreender o comportamento dos materiais radioativos no corpo humano é de extrema importância uma vez que a retenção destes materiais é influenciada pelas suas propriedades químicas que os radionuclídeos detêm. Uma vez estes inalados, alguns materiais radioativos são absorvidos pela corrente sanguínea e depositados em vários órgãos. O nível de retenção também é afetado pela composição química do material e sua interação com o corpo humano. Um dos principais efeitos é a morte celular: se poucas células morrerem, o efeito pode nem ser sentido, mas para grande número de células atingidas, o funcionamento pode ser prejudicado (Okuno, 2013).

Quando se trata fator biológico humano e da proteção radiológica é calculada pela quantidade de material absorvido pela ingestão, O termo "dose" aqui utilizado

pode ser entendido como dose absorvida, definida como a quantidade de energia cedida à matéria pelos fótons ou partículas ionizantes por unidade de massa, sendo sua unidade o joule por quilograma, que recebe o nome especial de gray (Gy) (Soares; Pereira; Flôr, 2011). A relação entre as unidades *gray* e *rad* é de tal forma que 1 gray é equivalente a 100 rad (1 Gy = 100 rad) (Andrade; Bauermann, 2010; Attix, 2007). Esta medida é formada pela relação da energia por grama da absorção dos órgãos no decorrer de um intervalo de tempo definido. Onde está dose está diretamente relacionada com danos biológicos a curto prazo, e risco de desenvolver câncer em futuro distante.

A avaliação a longo prazo da ingestão de radionuclídeos e danos agudos sofrido pelo organismo humano que receberam a radiação é relativamente curto de 30 a 60 dias, após a ingestão, na avaliação de proteção. Em contraste, na proteção radiológica ocupacional, as doses de radiação interna são mais comumente especificadas em termos da dose total recebida durante um período de 50 anos após a ingestão (Homann, 2014).

## **2.9 Os modelos epidemiológicos BEIR V e VII**

A radiação ionizante é composta por partículas materiais ou fótons de radiação eletromagnética que têm energia suficiente para ionizar átomos, removendo elétrons dos átomos afetados. No nível celular, os danos podem se manifestar pela morte celular ou pela alteração de suas informações citogenéticas (Havránková, 2020), no DNA o dano pode levar a mutações genéticas, rearranjos cromossômicos ou até morte celular se o dano não for reparado adequadamente. Os efeitos principais causados pela exposição à radiação ionizante são divididos: (a) Determinísticos e (b) Estocásticos.

**a)** Os efeitos determinísticos acontecem quando a irradiação no corpo, geral ou localizada, provoca mais morte celular do que é possível ser compensada pelo organismo (Navarro *et al.*, 2008). primeiros efeitos biológicos observados da radiação ionizante e incluem catarata do cristalino, danos não malignos à pele, depleção de células na medula óssea causando deficiências hematológicas e danos às células gonadais levando ao comprometimento da fertilidade (Homann, 2014).

b) A taxa de transmissão de energia específica é uma quantidade estocástica, que flutua de célula para célula e em cada célula flutua ao longo do tempo (Kellerer, 1985; Sachs; Hlatky, 1990), efeitos estocásticos são particularmente preocupantes quando os humanos são expostos a baixos níveis de radiação durante longos períodos de tempo, uma vez que os danos genéticos e o câncer podem aumentar com o tempo, no entanto, é importante notar que é possível uma relação entre a dose de radiação e os efeitos estocásticos é analisado de forma probabilística, em doses mais baixas, o desfecho de saúde preocupante é a indução de câncer (Homann, 2014).

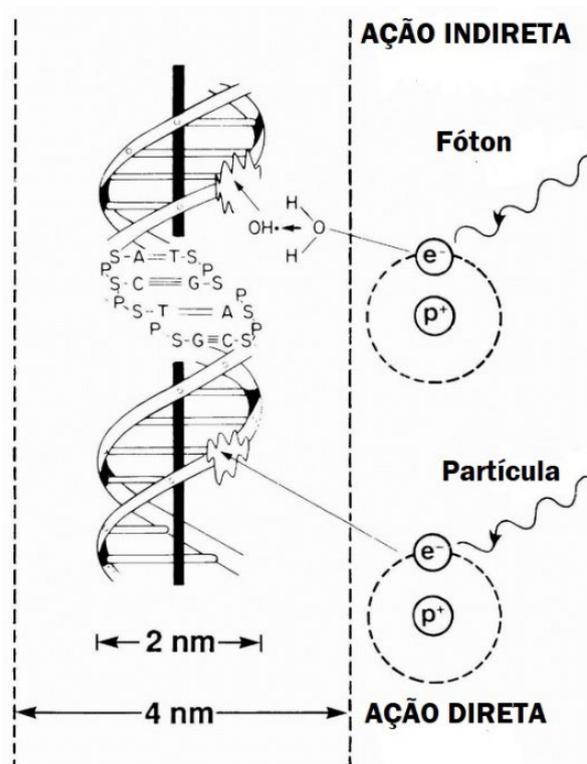
Radiação ionizante é a radiação eletromagnética ou partícula que, ao interagir com o meio absorvedor, tem a propriedade de transferir, integral ou parcialmente, energia para os átomos e moléculas deste meio, podendo resultar no fenômeno conhecido como ionização. A unidade de medida de dose de radiação, o gray (1 joule/quilograma) é moderna e substitui a unidade antiga *radiation absorbed dose* (rad), embora na prática médica ainda se encontrem referências que utilizam a unidade antiga. Os efeitos biológicos decorrentes da exposição à radiação são principalmente relacionados aos danos ao ácido desoxirribonucleico (DNA), que numa perspectiva clássica é o alvo biológico crítico. Em uma abordagem mais moderna, o meio celular citoplasmático aparece como alvo preferencial para efeitos somáticos, enquanto que danos ao DNA correspondem a efeitos genéticos (Andrade; Bauermann, 2010).

Para qualquer forma de radiação ionizante que interaja com material biológico, existe a possibilidade de que a interação seja direta ou indireta com os alvos críticos no ambiente intracelular. Os átomos do alvo podem ser ionizados ou excitados, iniciando assim uma cadeia de eventos que geram mudanças biológicas que podem terminar em processos de morte celular. Este processo é conhecido como ação direta da radiação, sendo o processo dominante se a radiação é de nêutrons ou partículas  $\alpha$ . Alternativamente, a radiação pode interagir com outros átomos ou moléculas na célula (particularmente a água) para produzir radicais livres ou outras espécies reativas que são capazes de se difundir pelo meio de propagação a ponto de alcançar e danificar alvos críticos. Por alvos críticos no citoplasma se podem tomar por exemplo estruturas de membrana celular e importantes organelas como as mitocôndrias, estas últimas responsáveis por processos de morte celular programada (apoptose). Este processo é denominado ação indireta da radiação sendo preferenciais para fótons

(Hall; Giaccia, 2012). A figura 4 apresenta um esquema das ações diretas e indiretas da radiação. A estrutura simplificada do DNA é mostrada esquematicamente em alusão ao modelo clássico de dano biológico. Na ação direta, um elétron secundário resultante da interação da radiação interage com o DNA para produzir algum efeito. Na ação indireta, o elétron secundário interage com uma molécula de água para produzir radicais hidroxila ( $\text{OH}\cdot$ ), que por sua vez produzem dano nas ligações da estrutura da molécula de DNA.

Diferentes tipos de radiação podem gerar efeitos biológicos diversos. Para ajustar essa diferença, foi criado o conceito fator de qualidade (Q) (Zapp; Cucinotta; Atwell, 2002). O fator de qualidade (Q) para a radiação  $\gamma$  e raios-X é a unidade por definição. Como exemplo, se pode considerar que para a radiação  $\alpha$  (núcleos de Hélio), o valor de Q se apresenta como 20, indicativo de que comparada aos fótons X ou  $\gamma$ , as partículas  $\alpha$  apresentam a capacidade de gerar danos 20 vezes mais intensos do que os fótons considerados para o mesmo tecido biológico (Andrade; Bauermann, 2010). Como já mencionado, a grandeza que considera o fator de qualidade da radiação também foi modernizada. A unidade antiga, *radiation equivalente man* (rem) para dose absorvida equivalente deve ser substituída pelo *sievert* (Sv), quando se trata de medidas considerando exposição a diferentes tipos de radiação. A Figura 4 apresenta um esquema simplificado das ações diretas e indiretas de radiações ionizantes no modelo clássico radiobiológico de interação com o DNA.

**Figura 4-** Esquema simplificado das ações diretas e indiretas de radiações no modelo clássico radiobiológico de interação com o DNA



Fonte: Adaptado de Agency IAE (2010)

Os Modelos BEIR (*Biological Effects of Ionizing Radiation V e VII*) (2006) para avaliação de risco à saúde humana tratam, por diversos fatores, de funções matemáticas referentes à estimativa de risco para desenvolvimento de cânceres, assim como sua probabilidade de causalidade (PC). Tomam como princípio o *Life Span Study* (LSS), que é um estudo epidemiológico realizado a partir de dados produzidos no acompanhamento dos sobreviventes dos bombardeios nucleares no Japão ao final da 2ª Guerra Mundial.

a) O documento BEIR V (IAEA, 1996) é a quinta edição de uma série de relatórios ou publicações do *National Research Council* (NRC). Essa publicação trata dos efeitos à saúde humana considerando exposição de corpo inteiro induzidos pelas radiações de baixa transferência linear de energia (*Low Linear Energy Transfer – Low LET*), como as radiações X e gama. Este documento faz estimativas quantitativas de riscos, com base em análises epidemiológicas quantitativas e modelos experimentais envolvendo animais. Os modelos para radiocarcinogênese apresentados pelo documento BEIR V consideram a exposição humana de corpo inteiro à radiação ionizante de baixo LET,

no intervalo de dose equivalente total efetiva de  $0,1 < D < 4\text{Sv}$ . O limite superior de  $4\text{Sv}$ , onde o Sievert (Sv) é a unidade de medida de dose equivalente, é considerada a dose letal média que leva a 50% de óbito em 30 dias para humanos (IAEA, 1996). A estimativa de risco radiológico foi realizada segundo as equações de base epidemiológica BEIR V inserindo as doses de radiação para avaliar o risco fatal de desenvolvimento de leucemia.

b) O relatório BEIR VII apresenta estimativas de riscos para desenvolvimento de câncer radioinduzido, devido à exposição a baixas doses de radiação ionizante. O BEIR VII define como baixas doses valores no intervalo  $1\text{mSv} < D < 100\text{mSv}$  para radiações de baixo LET (NRC, 2006), onde o valor de dose  $D = 1\text{mSv}$  é tomado como nível de radiação de fundo. Além disso, dá suporte a um modelo de risco linear sem limiar (*linear no-threshold* - LNT). Entretanto, a grande contribuição do BEIR VII tem sido relacionada ao desenvolvimento de modelos que permitam estimar os riscos de incidência e de mortalidade para cânceres, considerando a dose, o sexo e a idade no momento da exposição do indivíduo.

## 2.10 Fator de Redução (FR)

A hipótese de uma contaminação radioativa gerada pela precipitação de matérias radioativos torna de extrema importância estudarmos os fatores de redução que as construções podem oferecer aos indivíduos da área afetada pela pluma. Esses fatores de proteção são considerados estimativas pontuais da redução total na exposição que um ocupante receberia enquanto reside em sua residência principal após a passagem da pluma proveniente da deposição de contaminantes no telhado e no solo circundante (Dickson; Hamby; Eckerman, 2017).

Qualquer blindagem adicional devido à rugosidade do solo, efeitos do terreno e outras blindagens estruturais próximas é posteriormente considerada um desvio da posição desprotegida padrão e contabilizada como fatores de redução (Dickson; Hamby; Eckerman, 2015). O fator de blindagem do edifício quantifica a quantidade de proteção que um determinado tipo de edifício proporciona aos seus habitantes contra a radiação ionizante emitida por uma pluma de material radioativo e subsequente deposição nos terrenos circundantes e no telhado (Dickson; Hamby; Eckerman, 2017).

As condições meteorológicas que determinam a forma, a extensão e a

localização do padrão de precipitação radioativa da explosão nuclear são a altura da tropopausa, os ventos atmosféricos e a ocorrência de precipitação (Glasstone; Dolan, 1977). A dose tecidual fornecida na linha média é considerada como 70% da dose absorvida na superfície. É importante notar que os dados de dose são apresentados como dose tecidual na linha média, que se refere à dose média recebida pelo tecido localizado a meio caminho entre a superfície e o centro do corpo.

Além disso, um fator de redução de dose é assumido para precipitação radioativa. O nível de proteção contra a radiação gama da precipitação radioativa também é levado em consideração para diversas estruturas, como casas, apartamentos e terrenos. A atenuação da proteção varia em função da estrutura e da sua composição, bem como da espessura das paredes e da distância da precipitação radioativa. Portanto, é importante considerar esses fatores no cálculo da exposição potencial à radiação e seus efeitos. Encontra-se na Tabela 1 o fator de transmissão de dose para as estruturas de blindagem consideradas no *HotSpot*.

A Tabela 1 lista os fatores de transmissão de dose para radiação gama, gama imediata e radiação de nêutrons imediata no *HotSpot*. As estruturas adjacentes foram negligenciadas nos cálculos. A atenuação de proteção contra radiação gama de precipitação radioativa para diversas estruturas (casa, apartamento, terra, etc.) são opções selecionáveis para saída de tabela, gráficos de contorno de precipitação radioativa e arquivos de contorno (Homann, 2014).

**Tabela 1-** Fatores de transmissão de dose da estrutura de blindagem *HotSpot*

Estrutura de Blindagem	Fator de transmissão de dose		
	Gama Fallout	Gama	Nêutron
Sem Blindagem	1,0	1,0	1,0
Veículos (carros, caminhões, ônibus)	0,5	1,0	1,0
Porão	0,1	0,6	0,8
Piso inferior de vários andares	0,1	0,6	0,8
Paredes de concreto de 9 polegadas	0,09	0,2	0,5
Paredes de concreto de 12 polegadas	0,03	0,1	0,4
Piso superior de vários andares	0,01	0,9	1,0
Paredes de concreto 24 polegadas	0,002	0,02	0,2
1m subterrâneo	0,0002	0,004	0,01

## 2.11 Mitigação

A mitigação é um processo crítico que envolve a tomada de medidas para reduzir ou minimizar os efeitos negativos de uma situação, problema ou evento adverso. Cientistas sociais, cientistas e políticos estão a ser forçados a estudar e examinar as vulnerabilidades, a preparação e a resposta das sociedades a tais eventos, na tentativa de mitigar os efeitos e melhorar a resiliência das comunidades (Bailliff; Sholom; Mckeever, 2016). É um conceito importante em vários campos, como gestão de riscos, mudanças climáticas, desastres naturais e segurança. O objetivo da mitigação é prevenir ou diminuir a gravidade do impacto de uma ameaça ou perigo. As avaliações de risco proporcionam aos tomadores de decisão melhores informações para determinar quais medidas de mitigação e medidas de gestão de risco são mais críticas e para entender onde os diferentes tipos de ações são mais apropriados (CISA, 2019).

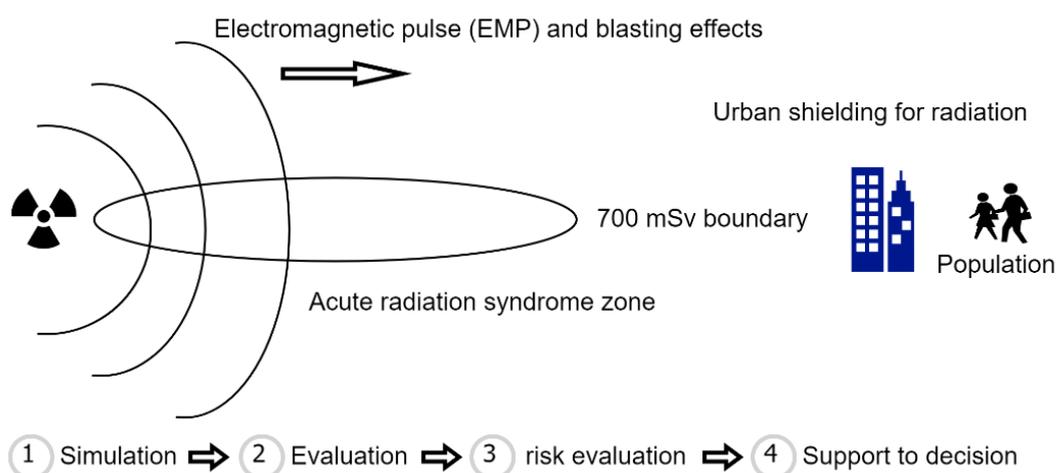
Isto pode ser alcançado por meio de vários meios, tais como planejamento, preparação e implementação de estratégias apropriadas. Medidas de mitigação eficazes podem ajudar a salvar vidas, proteger propriedades e minimizar perdas económicas. no planejamento de emergência e nas avaliações probabilísticas de risco de nível três para uma variedade de eventos radiológicos postulados nos quais uma avaliação realista é necessária para compreender melhor os riscos potenciais para a mitigação de acidentes e o planejamento de resposta a emergências (Dickson; Hamby; Eckerman, 2017). É um processo contínuo que requer avaliação e melhoria contínuas para garantir a sua eficácia. Os fatores de blindagem do edifício destinam-se ao uso no planejamento de emergência e nas avaliações probabilísticas de risco de nível três para uma variedade de eventos radiológicos postulados nos quais uma avaliação realista é necessária para compreender melhor os riscos potenciais para a mitigação de acidentes e o planejamento de resposta a emergências (Dickson; Hamby; Eckerman, 2017).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia empregada no estudo. Os dados necessários para determinar a área afetada e as isodoses a que os indivíduos estão expostos foram obtidos por meio de simulação computacional. A abordagem baseada em simulação foi considerada apropriada devido à sua capacidade de gerar grandes conjuntos de dados num curto espaço de tempo, permitindo-nos identificar com precisão áreas de preocupação. Os resultados da simulação foram analisados usando técnicas estatísticas avançadas para extrair significativos que apoiam nossos objetivos de pesquisa. Nossa abordagem nos permite obter uma compreensão profunda do impacto da exposição à radiação nos indivíduos e no meio ambiente.

A Figura 5 apresenta um modelo simplificado da metodologia aplicada ao trabalho, em que a simulação computacional foi adotada para o acionamento de um artefato tático militar, para estimar as consequências para área e a população exposta a radiação ionizante gerada pelo dispositivo.

**Figure 5-** Esquema metodológico geral



**Fonte:** De autoria própria.

### 3.1 Delimitação de escopo

É fundamental definir o escopo e realizar uma avaliação ambiental completa, seja o seu estudo experimental ou teórico. Nosso foco neste trabalho é estimar ameaças e riscos decorrentes da exposição ambiental humana à radiação gama decorrente de acionamento de um dispositivo nuclear tático em zona urbana habitada. Estes riscos e ameaças são considerados também sob influência do potencial efeito mitigador de estruturas urbanas sobre os níveis de dose de radiação capazes de desencadear efeitos determinísticos (Andrade *et al.*, 2020).

### 3.2 Simulação Computacional

As simulações foram realizadas pela aplicação do software *HotSpot Health Physics* versão 3.1.2 (Homann, 2020). O programa foi desenvolvido pelo Laboratório americano *Lawrence Livermore* (LLNL) sendo gratuito, de simples instalação e de interface amigável com o usuário. O modelo matemático aplicado se refere à solução de equações gaussianas de transporte de material radioativo no ambiente estimando concentrações do contaminante no espaço tridimensional.

O *HotSpot* oferece quatro programas gerais: (1) Pluma, (2) Explosão, (3) Fogo e (4) Ressuspensão, que estimam o impacto da liberação do material radioativo para o meio ambiente (Homann, 2020). O programa ainda trata especificamente do espalhamento de plutônio e urânio podendo realizar uma avaliação inicial de incidentes envolvendo armas nucleares. Conta ainda com um pacote especial (Explosão Nuclear) que estima os efeitos de um acionamento de um dispositivo nuclear improvisado (IND) ou arma nuclear estratégica. Isso inclui os efeitos imediatos (nêutrons e gama, onda de choque e térmica dentre outros) e informações da pluma de contaminação. A interação com o operador é feita por intermédio de telas amigáveis com informações a serem preenchidas ou selecionadas de forma simples.

A simulação considerou o acionamento de um dispositivo tático nuclear (tecnologia de fissão) e por isso foi aplicada a função especial do *HotSpot* denominada “explosão nuclear”. Nesta função foi escolhido um dispositivo de rendimento (*yield*) 10 kT (*surface burst*), cujos resultados incluem principalmente informações sobre:

- (a) distribuição de doses de radiação ambiental;
- (b) efeitos mecânicos da explosão;
- (c) raios de letalidade para efeitos mecânicos e radioativos;
- (d) níveis de dose de radiação (*Total Effective Dose* - TED) integradas para o intervalo de observação tomado para diferentes distâncias, e
- (e) alcance do pulso eletromagnético (PEM) gerado.

### **3.3 Zonas de Efeito Determinístico**

As tabelas geradas pelas simulações do *HotSpot* permitem selecionar manualmente resultados de interesse e tratá-los por métodos gráficos auxiliares. Para atender ao objetivo central do estudo, o nível de dose de radiação selecionado foi o de 700 mSv. Este valor de dose de radiação decorrente de exposição ambiental aguda de corpo inteiro e de curta duração é relacionado com o aparecimento dos primeiros sintomas e efeitos fisiológicos observáveis (Thaul, 1999). Assim, os valores de dose gerados pelo *HotSpot* foram associados à distância do ponto de acionamento sobre o eixo maior da elipse gerada na simulação da contaminação. Esta elipse representa a pluma de contaminação radioativa sobre determinada área e pode ser georreferenciada.

### **3.4 Cálculo da estimativa de excesso de risco relativo para a população exposta**

A estimativa do excesso de risco relativo (ERR) foi determinada utilizando a equação 4 do modelo RERF. O modelo considera doses de radiação de até 4 Sv e é baseado em modelos e equações radioepidemiológicas distintas (IAEA, 1996). Para doses superiores a 100 mSv, a equação 4 pode ser aplicada para calcular o ERR para câncer sólido.

$$ERR = \alpha_s D e^{\beta(e-25)} \quad (4)$$

onde  $\alpha_s$  é o excesso de risco relativo linear específico da idade por Sv considerado 0,45 e 0,77 ( $\text{Sv}^{-1}$ ) para o sexo masculino e feminino respectivamente, D é a dose de radiação, TED (Sv), e  $e$  é a idade (anos) e  $\beta$  é o coeficiente que determina o efeito modificador da idade, tanto na exposição quanto considerado como  $-0,026$  ( $\text{y}^{-1}$ ) para ambos os sexos.

O modelo RERF avalia o risco de câncer sólido induzido por radiação em áreas contaminadas. O modelo BEIR VII (doses baixas) é utilizado para estimativa do risco de câncer. O cálculo do ERR varia para indivíduos expostos à radiação antes e depois dos 30 anos. A Equação 5 é apresentada de forma adaptada para doses de radiação menores, abaixo de 100 mSv.

$$ERR = \beta_s D \exp(\gamma e^*) \left(\frac{a}{60}\right)^\eta \quad (5)$$

onde D é a dose de radiação (TED) (Sv),  $\beta_s$  é a taxa de incidência dependente do sexo (0,33 e 0,57 para homens e mulheres respectivamente), e é a idade de exposição (anos),  $e^*$  é  $[(e - 30) / 10]$  para  $e < 30$  e zero para  $e \geq 30$ , a é a idade atingida (anos),  $\gamma$  é o aumento por década na idade no fator de exposição tomado como  $(-0,30)$  e  $\eta$  é o índice da incidência de doenças para a idade atingida  $(-1,4)$ .

### 3.5 Blindagem Urbana como Fator de Redução de Risco

Este estudo aproveita e adapta metodologia de caracterização de risco proveniente de estudos destinados a contaminação ambiental por agentes químicos. Uma limitação enfrentada por estudos que buscam caracterizar riscos decorrentes de exposição humana a agentes tóxicos recai sobre limites para detecção de efeitos determinísticos. Para este estudo o limite para caracterização de riscos com base em efeitos determinísticos é a dose de radiação de 700 mSv de corpo inteiro e em curto espaço de tempo. Several methods in toxicological risk assessment are based on the observation of thresholds for deterministic human health effects. Diferentemente, este estudo considera o *threshold for deterministic effects* como ponto de partida para

caracterizar o risco radiológico decorrente da exposição. Utilizando uma aproximação sugerida por Lehman and Fitzhugh (Lehman, 1954) na qual se incluem fatores de segurança, este estudo aplica fatores de redução (RF) oferecidos pelos diversos tipos de estruturas urbanas. A equação 6 apresenta adaptação do modelo sugerido por Lehman and Fitzhugh. Neste estudo se deseja conhecer o efeito de cada estrutura urbana estudada sobre o que se chamou originalmente Margem de Segurança (*MoS* – *Margin of Safety*).

$$MoS = \frac{\textit{threshold dose estimate (0,7 Sv)}}{\textit{actual dose (no shielding) x reduction factors}} \quad (6)$$

A *MoS* estima quanto uma determinada estrutura urbana pode contribuir para reduzir riscos ou mitigar efeitos deletérios decorrente da exposição à radiação ambiental. As estruturas consideradas no estudo e respectivos fatores de redução (RF) estão de acordo com o que é apresentado na Tabela 1 (Furuta; Takahashi, 2015). Embora *no shielding* seja apenas uma condição de exposição à radiação ambiental e não uma estrutura urbana, esta condição é apresentada na Tabela 1 por representar o caso de maior exposição radiológica, sendo a referência de comparação para as demais estruturas. Os RF na verdade informam a que valores os níveis de dose foram reduzidos, ou seja, um RF = 0.58 indica que a dose foi reduzida a 58% de seu valor inicial sem a blindagem. Assim, um RF = 0.10 na verdade está reduzindo 90% do valor da dose de radiação incidente pelo exterior da construção. Os dados originais indicados por Takahashi (Furuta; Takahashi, 2015) apresentam intervalos esperados para valores de RF em vez de um valor específico. Em uma perspectiva conservadora foram considerados os valores de RF dentro do intervalo considerado com menor efetividade na redução da dose para cada estrutura urbana (Tabela 1). Encontram-se na Tabela 2 as características do fator de redução das estruturas urbanas efetivamente utilizadas neste estudo (Furuta; Takahashi, 2015).

**Tabela 2-** Fatores de redução (FR) esperados para as estruturas urbanas selecionadas. Adaptado de Takahashi (Furuta; Takahashi, 2015).

	Estrutura	Fator de Redução (RF) (conservador)
<b>A</b>	Sem blindagem	0
<b>B</b>	Casa tradicional-urbana	0.58
<b>C</b>	Casa pré-fabricada	0.53
<b>D</b>	Casa de concreto leve	0.47
<b>E</b>	Casa de concreto	0.19
<b>F</b>	Apartamento de madeira	0.50
<b>G</b>	Apartamento de concreto	0.14
<b>H</b>	Edifícios escolares	0.16
<b>I</b>	Hospital	0.10
<b>J</b>	Shopping center	0.17
<b>K</b>	Supermercado	0.31

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta as descobertas e discussões sobre os dados gerados por meio de uma análise de simulação computacional. O objetivo é obter o fator de redução de diversas estruturas e demonstrar quais estruturas podem proporcionar melhor blindagem contra radiações ionizantes.

Como forma de destacar algumas variáveis como a importância da distância ao ponto de acionamento do dispositivo tático nuclear, e conseqüentemente da dose de radiação integrada no período de observação ( $\approx 4$  dias), foi calculado e aplicado o desvio-padrão (SD – *Standard Deviation*) com relação à variável de destaque, como a MoS para cada estrutura urbana apresentada na Tabela 1. Quanto menor o valor de SD para uma determinada variável, menor a importância desta variável. Considera-se que o acionamento do dispositivo nuclear tático implica necessariamente em conseqüências físicas que podem ser limitadoras ou impeditivas tanto para ações de resposta quanto para a infraestrutura crítica local, como comunicações, transportes, atendimento médico e geração e distribuição de energia. Desta forma, a resiliência urbana fica comprometida e pode ser avaliada segundo parâmetros que sejam determinados localmente e de maneira específica para cada localidade.

Os resultados alcançados no evento simulado apontam para uma expectativa de 100% de óbitos em menos de 1 dia para indivíduos localizados em um raio de aproximadamente 900 m do ponto de acionamento. As estimativas para efeitos imediatos vão se atenuando como esperado para distâncias progressivamente maiores em relação ao epicentro (ponto de acionamento do dispositivo nuclear tático). Os achados apontam para efeitos disruptivos sobre populações e infraestrutura crítica até um raio de 4 km, distância a partir da qual as avaliações são tomadas em maior detalhe no estudo com relação à proteção de sobreviventes. A partir dos 4km está localizado a zona de dano leve, a maior parte dos danos é causada pela poderosa onda de choque, como a de um trovão, mas com substancialmente mais força (FEMA, 2023). Nesta área os danos serão menores: A maioria das janelas da localizado na zona de dano leve quebrará, muitas delas com força suficiente para causar ferimentos causados por vidros e detritos (FEMA, 2023), esta área é de interesse do estudo pois as estruturas sofreram uma menor influência mecânica da explosão

A Tabela 3 apresenta importantes conseqüências esperadas sobre a população e meio ambiente em diferentes distâncias ao epicentro. Nela se encontram as

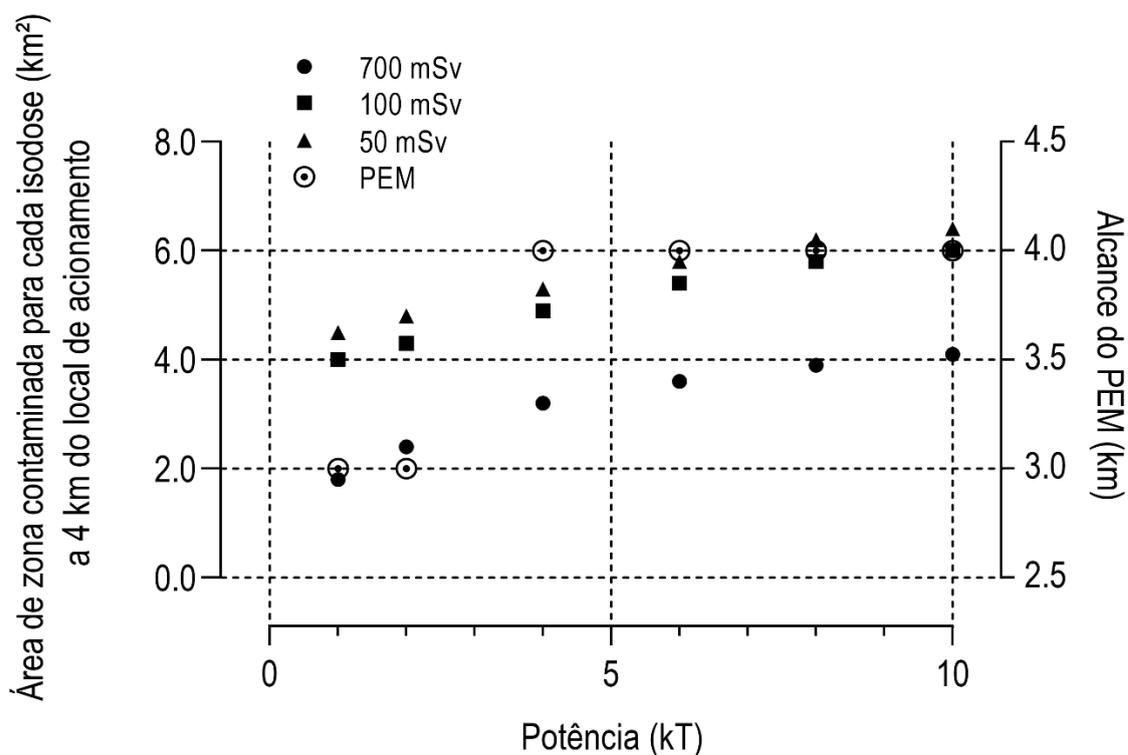
características dos efeitos da radiação sobre a população após o acionamento do dispositivo nuclear tático de 10 kT, simulado neste trabalho.

**Quadro 1- Efeitos esperados sobre a população e meio ambiente após acionamento no nível do solo de um dispositivo nuclear tático de 10 kT (surface burst)**

Assunto	Efeito esperado (distâncias radiais)
<b>Radiação ionizante</b>	Efeitos imediatos da radiação ionizante:  a) dose para todo o organismo incluindo radiação gama e nêutrons, e b) 100% de óbitos dentro de 1 dia, 870 m
<b>Explosão</b>	a) 100% letal dentro de 270 m; b) dano grave ao pulmão dentro de 480 m; c) ruptura do tímpano (50% de chance) dentro de 540 m, e d) lesão de fragmentos de vidro quebrado ( <i>shattered windows</i> ) dentro de 4 km de raio
<b>Radiação térmica</b>	a) cegueira instantânea e queimaduras na retina são esperadas a uma distância de cerca de 20 km para aqueles sem proteção, e b) além disso, os indivíduos podem ser expostos à dose de radiação térmica suficiente para queimaduras de terceiro grau, a uma distância de 1,4 km.
<b>Pulso eletromagnético (PEM, do inglês EMP)</b>	O pulso eletromagnético (PEM) gerado tem efetividade até 4 km para a potência simulada neste estudo.

A Figura 6 apresenta as estimativas para os tamanhos das áreas das zonas contaminadas considerando cada isodose (700, 100 e 50 mSv), e também para o alcance do pulso eletromagnético (PEM) em relação à potência do dispositivo nuclear tático simulado.

**Figura 6-** Gráfico de análise da distância, potência e alcance do pulso eletromagnético em relação a detonação do dispositivo

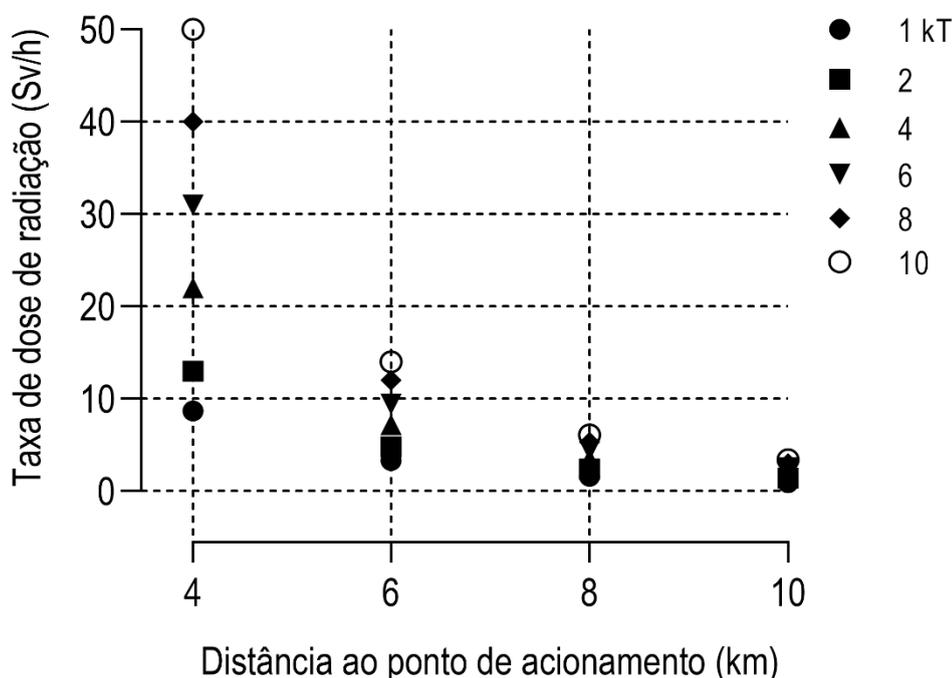


**Fonte:** De autoria própria.

Os achados apresentados na Figura 6 permitem inferir que as áreas das zonas contaminadas evoluem de maneira similar independentemente da isodose observada. Este comportamento é esperado por se tratar de uma simulação com suporte em uma distribuição gaussiana, na qual os dados de distribuição atmosférica não são atualizados a cada passo como ocorre em simulações numéricas. Entretanto, os resultados, embora menos realistas, são mais conservadores e adequados para suporte à tomada de decisão em tempos mais imediatos em relação ao evento. As pessoas não são diretamente afetadas pelo pulso eletromagnético (EMP); no entanto, as comunicações e outros equipamentos eletrônicos podem ser danificados (Knebel *et al.*, 2011). Para o comportamento do pulso eletromagnético são percebidas diferenças na escala de evolução de seu módulo. Para detonações até 2 kT se pode observar um alcance de raio de 3 km a partir da potência de 4 kT, estabilizando em 4 km para detonações até 10 kT. O alcance de dano EMP para uma detonação de 10 kT é de aproximadamente 4 km (Knebel *et al.*, 2011).

A Figura 7 apresenta as taxas de dose de radiação em função da localização do indivíduo (distância ao ponto de acionamento do dispositivo nuclear tático).

**Figura 7-** Gráfico de análise da taxa de dose da radiação em relação a distância e a potência do dispositivo



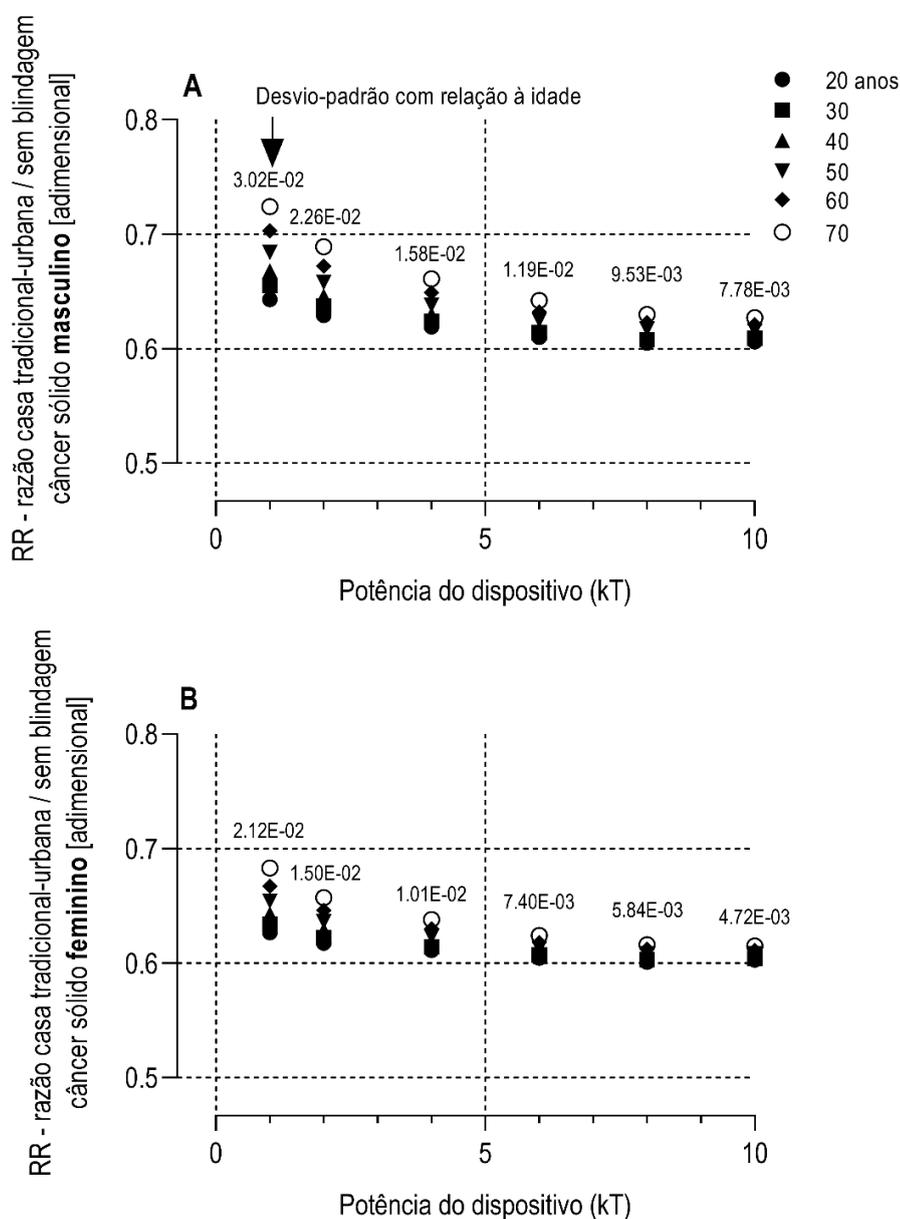
**Fonte:** De autoria própria.

Os achados apresentados na Figura 7 permitem avaliar que o comportamento da taxa de dose da radiação apresenta um máximo em 50 mSv/h e sua variação negativa conforme a distância do ponto do acionamento do dispositivo e a potência variam. É possível verificar que para a distância de 4 km do ponto de detonação as potências descritas possuem elevada influência sobre a variação da taxa de dose. Esta influência se apresenta de forma proporcional direta, portanto, quanto maior a potência do dispositivo maior a taxa de dose da radiação nesta distância. Para as demais localizações é possível perceber que para 6 km de distância do ponto inicial as taxas de dose apresentam variação menor, indicando que a influência da potência do dispositivo se reduz. Este comportamento se mantém até que para 10 km de distância a dependência da taxa de dose de radiação com a potência do dispositivo praticamente se torna irrelevante. O motivo aparente para este fenômeno é, em primeira ordem, a atenuação oferecida pelas barreiras urbanas ao longo do caminho da frente de onda radioativa no espaço. O terreno urbano perturbará significativamente a gama de danos devido aos efeitos das explosões, e os edifícios reduzirão a extensão global dos impactos das radiações térmicas e ionizantes (LLNL,

2013).

A Figura 8 apresenta as razões entre riscos relativos para câncer sólido considerando casa tradicional urbana e o ambiente livre (sem blindagem). Considera o público masculino e feminino em função da potência do dispositivo nuclear tático e a distância ao ponto de acionamento. Os rótulos dos dados em cada localização representam os valores do desvio padrão (SD) para as razões de riscos.

**Figura 8-** 8A e 8B apresentam a razão de câncer sólido relacionado ao público masculino e feminino respectivamente



**Fonte:** De autoria própria.

Primeiramente, os valores plotados na Figura 8 devem ser interpretados como uma comparação entre estar dentro de uma residência ordinária (casa tradicional urbana) ou em ambiente livre (sem blindagem) durante o evento radiológico. Quanto mais alto o valor da razão em direção à unidade (razão = 1), maior a equivalência entre os termos da razão. Por exemplo, para a Figura 8A um indivíduo com idade de 70 anos está mais próximo de experimentar o mesmo risco estando dentro de casa ou na rua, quando comparado a um indivíduo mais jovem e nas proximidades do local de acionamento do dispositivo tático nuclear. Este fato se deve provavelmente à menor susceptibilidade apresentada por idosos para o tipo de risco estudado (câncer sólido). Entretanto, é importante notar que a situação de equidade de riscos só pode ocorrer quando a razão for igual a 1.

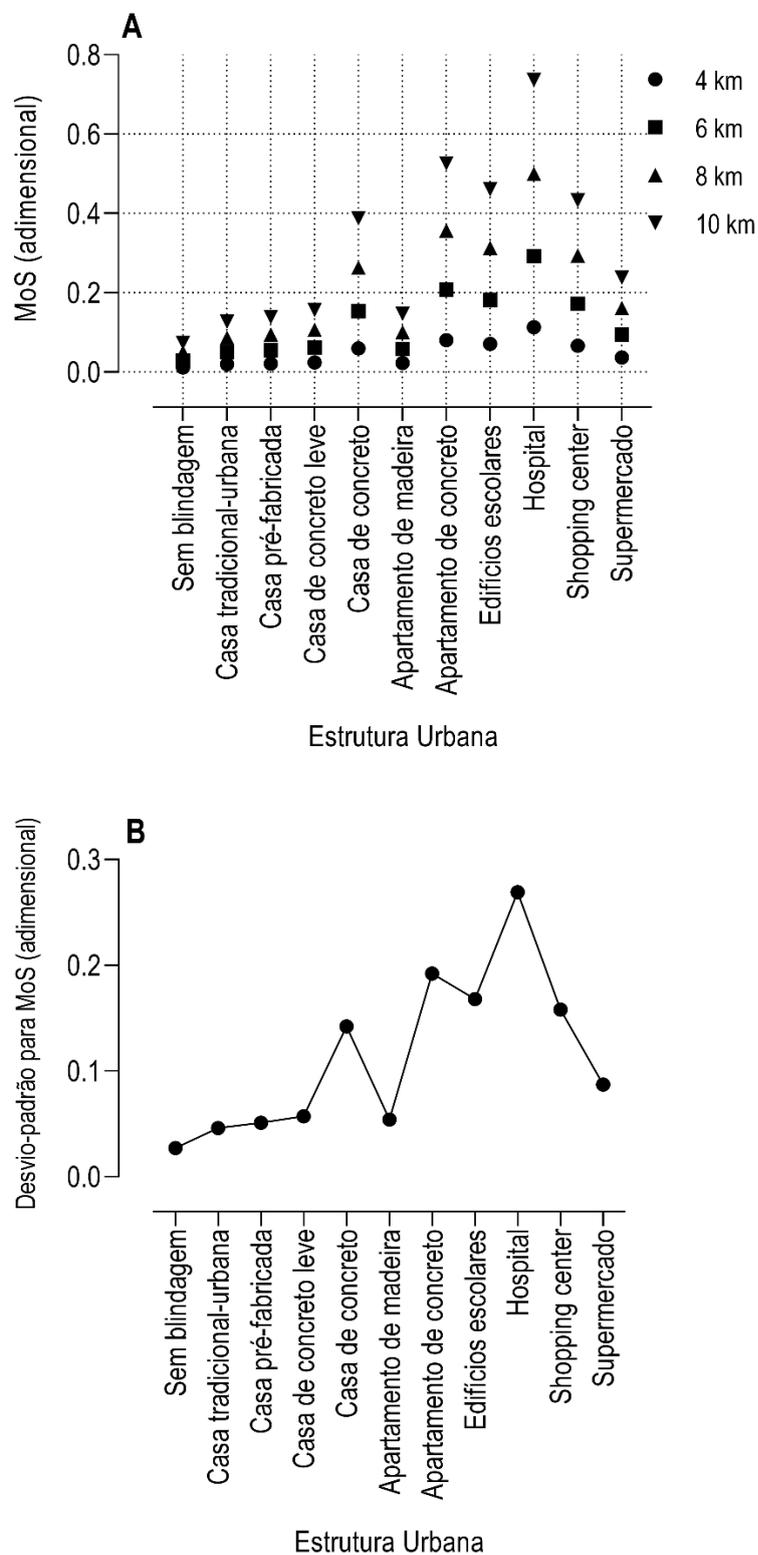
A Figura 8A apresenta resultados referentes ao sexo masculino, a Figura 8B ao feminino. Nelas se pode verificar uma decrescente importância do viés idade do indivíduo em relação à razão entre RR para as duas condições, independente do sexo. O envelhecimento está ligado ao aumento da incidência de câncer devido a diversas alterações fisiológicas relacionadas à idade (da Silva; da Silva, 2005). Embora o comportamento das curvas seja semelhante, o caráter absoluto das razões de risco sugere que se pode estimar maior ameaça para o sexo masculino, mais idoso e sujeito a uma potência menor do dispositivo tático nuclear. Pela avaliação dos valores de SD para o sexo masculino e feminino é possível inferir que o fator idade é recorrentemente mais importante para o sexo masculino quando se deseja comparar a condição de proteção do abrigo em relação à condição de ambiente livre. Acredita-se que o risco mais elevado nos homens para a maioria dos tipos de câncer reflete em grande parte uma maior exposição a fatores ambientais e comportamentais cancerígenos (Siegel *et al.*, 2023). Estudos recentes têm sido realizados sobre a incidência do câncer nas populações masculina e feminina, com o objetivo de obter uma melhor compreensão da doença e do seu desenvolvimento: homens surge de várias diferenças biológicas inter-relacionadas entre os sexos, incluindo mecanismos fisiológicos, imunológicos, genéticos, epigenéticos e genômicos (Clocchiatti *et al.*, 2016; Haupt *et al.*, 2021; Jackson *et al.*, 2021). Fisiologicamente, acredita-se que as diferenças nos hormônios esteroides sexuais, como a progesterona e o estrogênio, medeiam o menor risco de alguns tipos de câncer em mulheres (Clocchiatti *et al.*, 2016; Fish, 2008; Jackson *et al.*, 2021).

A potência crescente do dispositivo desempenha um papel de isotropia de risco

implicando na redução do viés idade e sexo para se estimar a proteção oferecida pelo abrigo em relação ao ambiente livre. É possível perceber redução dos valores de SD e decaimento assintótico em relação à razão 0,6 para ambos os sexos à medida que a potência se eleva para 10 kT.

A Figura 9, A e B, apresenta respectivamente os valores calculados para *MoS* (9A) e os desvios padrão (SD) para avaliação da influência da localização das blindagens urbanas listadas na Tabela 2 sobre a margem de segurança oferecida pelas estruturas urbanas (9B).

**Figura 9-** 9A apresenta a Margem de Segurança (MoS) e 9B o DP (desvio padrão) para cada estrutura



Fonte: De autoria própria.

A Figura 9A apresenta a contribuição das estruturas urbanas selecionadas, apresentadas na Tabela 2, sobre as margens de segurança (*MoS*). São considerados efeitos determinísticos (limite de 700 mSv) para diferentes distâncias em relação ao local de acionamento do dispositivo nuclear tático e para cada estrutura urbana. São apresentados dados sobre a proteção que as estruturas proporcionam aos indivíduos contra a exposição à radiação e conseqüentemente contra efeitos adversos como a Síndrome Aguda da Radiação (SAR). Os dados consideram indivíduos localizados a partir de 4 km do ponto de acionamento, pelas razões mencionadas anteriormente.

Embora todas as estruturas selecionadas apresentem algum fator de proteção (redução) contra a exposição radiológica decorrente do evento nuclear, o tamanho do edifício é um fator importante para estabelecer a redução de dose em edifícios de casas de madeira, edifícios de concreto em espaços abertos e edifícios de paredes finas (Furuta; Takahashi, 2015). A estrutura hospitalar, especificamente, é a que proporciona maior redução da exposição à radiação possivelmente devido à forma de construção utilizada, mesmo na posição de maior proximidade em relação ao ponto de detonação (4 km). O valor de SD para a estrutura hospitalar, apresentado na Figura 9B, destaca ainda que a variável distância ao ponto de acionamento exerce influência aumentada sobre o comportamento da blindagem quando comparada às outras estruturas. Este fato pode ser explicado pela complexidade da construção e diversidade de materiais aplicados que podem interagir de maneira não linear dependendo da energia e do tipo de radiação incidente na estrutura. Aparentemente as estruturas tipicamente com maior carga de concreto (casa de concreto, apartamento de concreto, edifícios escolares, hospitais e shopping centers) são mais sensíveis à distância ao ponto de acionamento, apresentando maiores variações da *MoS*. Tais variações são provocadas pela variável distância ao ponto de acionamento e podem ser verificadas na Figura 9B. Nela, o SD é destacado as estruturas urbanas utilizadas.

Dos resultados se pode inferir que a localização de algumas estruturas urbanas apresenta impacto específico sobre o nível de *MoS*. Pode-se verificar que para as estruturas casa tradicional urbana, casa pré-fabricada, casa de concreto leve, e apartamento de madeira a distância ao ponto de acionamento do dispositivo parece não ser relevante para avaliação do risco radiológico. Para estas estruturas urbanas a margem de segurança está no intervalo  $0 \leq MoS \leq 0.2$ , sugerindo que alta prioridade

deve ser atribuída a zonas afetadas que contenham este tipo de construção. Uma limitação que se impõe nesse caso é que por se tratar de estruturas habitacionais, estas podem estar distribuídas geograficamente de forma errática, obrigando o atendimento em todas direções e ao mesmo tempo. Para este caso o esforço logístico pode ser intenso e talvez seja necessário suporte externo.

Embora possam apresentar boa relação custo-benefício numa perspectiva econômica, esta vantagem não acompanha a perspectiva da segurança oferecida em caso de um evento radiológico urbano. Por outro lado, estruturas como casa de concreto, apartamentos, edifícios escolares, shopping center, e supermercados parecem sofrer maior influência da localização. Estas estruturas, cuja margem de segurança está no intervalo  $0.5 \leq MoS \leq 5.5$ , apresentam sensibilidade à localização e devem ser consideradas inicialmente pela proximidade ao ponto de acionamento, levando em consideração que à medida que se afastam das zonas de maior exposição assumem valores de segurança mais altos mais rapidamente quando comparadas a outras estruturas e podem perder prioridade por serem localmente consideradas proporcionalmente mais seguras.

Também é esperado que os materiais utilizados nessas construções ofereçam maiores impactos aos fatores de redução (RF). A condição de maior excepcionalidade neste estudo, como introduzido anteriormente, é verificada para estruturas hospitalares, cuja a margem de segurança está no intervalo  $1.0 \leq MoS \leq 7.5$ . Para estas estruturas a localização é de alto impacto na sua capacidade de resiliência. Usuários do sistema de saúde podem estar internados ou mesmo serem surpreendidos durante a execução de procedimentos cirúrgicos. Assim, as ações de evacuação devem ser organizadas obedecendo prioridades que podem ser determinadas com base em estudos mais avançados. Desta forma, e somente pelo critério da blindagem oferecida por estruturas urbanas e sua localização, seria indicada prioridade mais alta para as unidades hospitalares mais próximas do local de à população, os hospitais representam forte valor de resposta em caso de catástrofes como a considerada neste estudo.

A Figura 9B apresenta valores de SD que na verdade são auxiliares e servem para ajudar na avaliação mais atenta daqueles dados apresentados na Figura 9A. A variação do SD permite uma visualização organizada das variações da MoS indicando em primeira aproximação as estruturas urbanas mais susceptíveis a risco radiológico imediato. A avaliação realizada sobre dados simulados imediatos e tratados de forma

conservadora no campo apenas da exposição radiológica ambiental inicial, permitem organizar um procedimento rápido e relativamente simples para suporte na fase inicial do enfrentamento a um evento nuclear desta natureza.

É necessário destacar que a avaliação dos dados se deu em um intervalo de tempo inicial curto ( $\approx 4$  dias) quando intensa confusão e ausência de informações confiáveis é esperada. Também o evento tem origem assimétrica, potencialmente terrorismo, e qualquer informação que se acesse pode ser parte do projeto disruptivo em andamento e com mais de uma frente. Contudo, as zonas avaliadas apresentam alta probabilidade de entrega de consequências imediatas sobre a saúde pública, por conta de ser representativa de zonas contaminadas com altas doses de radiação integrando doses acima de 700 mSv. Priorizar essas zonas em primeira aproximação pode refletir positivamente sobre níveis de sobrevivência da população impactada.

Estudos adicionais estão em andamento de forma a incluir a sobreposição da pluma de contaminação esperada sobre uma área real e considerar importantes fatores de decisão como a interdição de zonas afetadas, impossibilidade de evacuação, seleção de áreas para realocação de indivíduos evacuados, cálculo de riscos radiológicos específicos e restabelecimento de comunicação dentro da zona afetada pelo pulso eletromagnético (EMP).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo examinar os efeitos de blindagem de estruturas urbanas contra radiações ionizantes após a simulação computacional da ativação de um IND de 10kT em ambiente urbano. Os resultados do estudo revelaram que os edifícios, independentemente da sua composição, oferecem uma redução significativa na exposição às radiações ionizantes em comparação com aqueles sem quaisquer medidas de proteção. No entanto, o estudo também constatou que diferentes construções proporcionam níveis variados de fatores de blindagem, o que implica que determinadas construções podem proporcionar proteção superior contra as repercussões da radiação ionizante, dependendo da área.

Descobriu-se que as simulações computacionais são uma ferramenta inestimável na avaliação do impacto potencial de uma explosão. Ao gerar dados precisos e críticos, essas simulações permitem determinar a extensão da área impactada e a influência da pluma, que é determinada pelas condições atmosféricas. Com essas informações conseguimos estimar as diversas regiões impactadas e traçar o perfil de isodose dos indivíduos que podem estar expostos nas áreas afetadas. A aplicação destes dados produz um apoio robusto à decisão e estimativas da resiliência das áreas urbanas.

Os resultados da nossa simulação permitiram a identificação dos efeitos biológicos que os indivíduos podem experimentar quando expostos à radiação ionizante. Nossos resultados indicam que indivíduos expostos a níveis de radiação superiores a 700mSv estão na zona determinística, o que pode ser prejudicial e levar à síndrome aguda da radiação SAR, uma condição potencialmente fatal. Além disso, o estudo identificou áreas com menor exposição à radiação que ainda podem representar risco de câncer, conhecidas como áreas de efeitos estocásticos. Embora o estudo tenha se concentrado principalmente em cânceres sólidos, é possível que outras formas de câncer possam se desenvolver devido à exposição à radiação ionizante.

A detonação do IND liberou na atmosfera uma quantidade substancial de material radioativo que foi depositado no solo durante a passagem da pluma. Com isso, tornou-se viável identificar as regiões afetadas e prever as prováveis consequências ambientais do material radioativo depositado no solo. Este material causa contaminação generalizada em todo o meio ambiente. Com estes dados, os

decisores políticos podem tomar decisões informadas para minimizar o impacto ambiental da contaminação.

De acordo com a investigação, a simulação é um instrumento crucial, apesar da tendência do *HotSpot* de errar por excesso de cautela ao assumir o pior cenário. No entanto, nas primeiras 100 horas após um incidente, o *HotSpot* fornece uma abundância de dados que podem ser inestimáveis na tomada de decisões críticas após o acionamento de um IND. Ao examinar minuciosamente o impacto da contaminação durante este período, o *HotSpot* pode servir como uma ajuda útil no processo de tomada de decisão.

Podem ser realizadas pesquisas mais aprofundadas para analisar os efeitos de outros tipos de poluentes e estruturas urbanas, bem como o seu potencial impacto na saúde pública. É digno de nota que a metodologia proposta neste estudo não se limita à indústria nuclear e pode ser adaptada para avaliar desastres em condições onde há informações iniciais limitadas em outras indústrias. Com os ajustes necessários, resultados semelhantes poderão fornecer um apoio valioso à tomada de decisões nestas áreas.

## REFERÊNCIAS

ABDULLAH, M. A. H.; RASHID, R. S. M.; AMRAN, M.; HEJAZII, F.; AZREEN, N. M.; FEDIUUK, R.; VOO, Y. L.; VATIN, N. I.; IDRIS, M. I. Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities: Materials and Properties. **Polymers**, v. 14, n. 14, p. 2830, 2022.

ADLIENÉ, D.; ADLYTÉ, R. Dosimetry principles, dose measurements, and radiation protection. **Applications of Ionizing Radiation in Materials Processing**, v. 1, p. 55, 2017.

AGENCY IAE. Radiation Biology : **A Handbokk for Teachers and Students**. Vienne, 2010.

AKKURT, I.; BASYIGIT, C.; KILINCARSLAN, S.; MAVI, B.; AKKURT, A. Radiation shielding of concretes containing different aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p. 153-157, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.006>.

ALVES, J. D. **Manual de tecnologia do concreto**. Goiania: Editora da Universidade Federal de Goiás, 1982.

ANDRADE, E. R. de; BAUERMANN, L. de F. **Introdução à radiobiologia**: conexões bioquímicas e biomoleculares. Santa Maria, RS: Ed. UFSM, 2010.

ANDRADE, E. R.; REIS, A. L. Q.; ALVES, D. F.; ALVES, I. S.; ANDRADE, E. V. S. L.; STENDERS, R. M.; FEDERICO, C. A.; SILVA, A. X. Urban critical infrastructure disruption after a radiological dispersive device event. **J Environ Radioact**, v. 222, p. 106358, 2020.

ANDRADE, E. R.; REIS, A. L. Q.; VITAL, H. C.; REBELLO, W. F.; STENDERS, R. M.; SILVA, A. X. Evaluating urban resilience in a disruptive radioactive event. **Progress in Nuclear Energy**, v. 147, p. 104218, 2022.

AOKI, M.; ROTHWELL, G. A comparative institutional analysis of the Fukushima nuclear disaster: Lessons and policy implications. **Energy Policy, Elsevier**, v. 53, p. 240-247, 2013.

ARRUDA, W. O. Wilhelm conrad röntgen 100 anos da descoberta do raios x. **Arq Neuropsiquiatr**, v. 54, n. 3, p. 525-531, 1996. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/anp/a/xqdrMP8fqDvqqSgSy9k8Dbn/?format=pdf&lang=em>

ATTIX, F. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. Alemanha: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007. p. 506-524.

AVEN, T. The risk concept—historical and recent development trends. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 99, p. 33-44, 2012.

BAILIFF, I.K.; SHOLOM, S.; MCKEEVER, S.W.S, Retrospective and emergency dosimetry in response to radiological incidents and nuclear mass-casualty events: A

review. **Radiation Measurements**, v. 94, p. 83-139, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.09.004>.

BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION VII (BEIR VII). **National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation**. Washington, DC: Natl Acad. Press, 2006.

BONFIM, C. E. S.; OUGANO, F. B.; CABRAL, P. A. de M.; BRUM, T. Aplicação da fluidodinâmica computacional pelo IDQBRN. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 3, p. 1469–1473, 2020. DOI: 10.34115/basrv4n3-057. Acesso em: 11 abr. 2024.

BRENNER, D. J.; DOLL, R.; GOODHEAD, D. T.; HALL, E. J.; LAND, C. E.; LITTLE, J. B.; LUBIN, J. H.; PRESTON, D. L.; PRESTON, R. J.; PUSKIN, J. S.; RON, E.; SACHS, R. K.; SAMET, J. M.; SETLOW, R. B.; Zaider, M. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 100, n. 24, p. 13761-13766, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2235592100>

BUNN, M.; WIER, A. Terrorist nuclear weapon construction: How difficult? *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, v. 607, 2006.

CASE JR., C.; COLEMAN, C. N.; BADER, J. L.; HICK, J.; HANFLING, D. Guidance, Training and Exercises for Responding to an Improvised Nuclear Device: First Receivers. **Public Health. Health Phys**, v. 114, n. 2, p. 165-172, feb. 2018.

CISA. Cybersecurity & Infrastructure Security Agency. **A Guide to Critical Infrastructure Security and Resilience**. United States of America: CISA, 2019.

CLAU, T. V.; FREITAS, O.B. de; DINIZ, R. M.; GONÇALVES, G.; ZACCHI, R.; BOLZAN, V.; FLÔR, R. de C.; ZOTTIS, A. D. Acidente nuclear de Fukushima e as consequências para o meio ambiente e a sociedade/ Fukushima nuclear accident and the consequences for the environment and society. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 2, n. 5, p. 4221-4231, 2019.

CLOCCHIATTI, A.; CORA, E.; ZHANG, Y.; DOTTO, G. P. SEXUAL DIMORPHISM IN CANCER. **Nat Rev Cancer**, v. 16, p. 330-339, 2016.

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Critérios para cálculo de dose efetiva, a partir da monitoração individual: posição regulatória 3.01 /005**, 2011. Disponível em: [http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301\\_05.pdf](http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_05.pdf).

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. de Q. As Conferências Nobel de Marie e Pierre Curie: a gênese da radioatividade no ensino. **Caderno Brasileiro De Ensino De Física**, v. 27, n. 3, p. 473–514, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27n3p473>

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. O concreto como material de construção. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT**, v. 1, n. 3, p. 49–58, 2013. Disponível em:

<https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/552>. Acesso em: 25 fev. 2024.

CRICK, M. J.; LINSLEY, G. S. An Assessment of the Radiological Impact of the Windscale Reactor Fire, October 1957. **International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine**, v. 46, n. 5, p. 479-506, 1984.

DA SILVA, M. M.; DA SILVA, V. H. Envelhecimento: importante fator de risco para o câncer. **Arquivos médicos do ABC**, v. 30, n. 1, 2005.

DAFRE, A. L.; MARIS, A. F. **Efeitos biológicos das radiações**. Florianópolis: UFSC, 2013. Disponível em: <https://antigo.uab.ufsc.br/biologia/files/2020/08/Efeitos-Biol%C3%B3gicos-das-Radia%C3%A7%C3%B5es.pdf>

DARTNELL, L. R. Ionizing Radiation and Life. **Astrobiology**, v. 11, n. 6, p. 551-582, 2011. Disponível em: <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/ast.2010.0528>

DICKSON, E. D.; HAMBY, D.; ECKERMAN, K. Contaminant deposition building shielding factors for US residential structures. **Journal of Radiological Protection**, v. 35, n. 2, p. 317, 2015.

DICKSON, E.; HAMBY, D.; ECKERMAN, K. Contaminant deposition building shielding factors for US residential structures. **J Radiol Prot. Published**, oct. 10, 2017. DOI:10.1088/1361-6498/aa922c

DTIC. Defense Technical Information Center. **DoD Response to Improvised Nuclear Device (IND) Incidents**: Directive. Washington, DC: DOD, 1987.

EISENBUD, M.; GESELL, T. F. **Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources: from natural, industrial and military sources**. Amsterdã: Elsevier, 1997.

ELLINGSEN, S. A. Deliberations of a Nuclear Terrorist: Patience or Opportunism? **Defense & Security Analysis**, v. 26, n. 4, p. 353-369, 2010.

FAIRUZ, A.; SAHADATH, M. H. Assessment of the potential Total Effective Dose (TED) and Ground Deposition (GD) following a hypothetical accident at the proposed Roopur Nuclear Power Plant. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 158, 2020.

FEMA. Federal Emergency Management Agency. **Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation**. United States of America: FEMA, 1. ed., 2023.

FISH, E. N. The X-files in immunity: sex-based differences predispose immune responses. **Nat Rev Immunol.**, v. 8, p. 737-744, 2008.

FJELD, R. A.; EISENBERG, N. A.; COMPTON K.L.; EISENBERG, N.A.; Compton K.L. **Exposure Assessment. Quantitative Environmental Risk Analysis for Human Health**. United States of America: John Wiley & Sons Inc, 2007. p. 199-218.

FLORIG, H. K.; FISCHHOFF, B. Individuals' Decisions Affecting Radiation Exposure

After A Nuclear Explosion. **Health Physics**, v. 92, n. 5, p. 475-483, 2007.

FURUTA, T.; TAKAHASHI, F. Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 52, n. 6, p. 897-904, 2015.

GARLAND, J. A.; WAKEFORD, R. Atmospheric emissions from the Windscale accident of October 1957. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 18, p. 3904-3920, 2007.

GLASER, Z. M. A. A. Nuclear Weapons and Fissile Material Stockpiles and Production. In: **NPT Review Conference**, 2015, New York. Disponível em: <http://fissilematerials.org/library/ipfm15.pdf>. Acesso em: 21 Jan 2016.

GLASSTONE, S. **The effects of nuclear weapons**. USA: US Atomic Energy Commission, 1964.

GLASSTONE, S.; DOLAN, P. J. **The Effects of Nuclear Weapons**. 1. ed. United States of America: N. p., 1977.

GREENAWALD, L. A.; KARWACKI, C. J.; PALYA, F.; BROWE, M. A.; BRADLEY, D.; SZALAJDA, J. V. Conducting an evaluation of CBRN canister protection capabilities against emerging chemical and radiological hazards. **J Occup Environ Hyg**, v. 17, n. 10, p. 480-494, oct. 2020.

GREENBERG, J. **The Kyshtym Nuclear Disaster**. USA: Stanford University, 2019.

HALL, E. J.; GIACCIA, A. J. **Radiobiology for the Radiologist**. USA: Wolters Kluwer Health, 2012.

HARWELL, M.; GROVER, H. Biological Effects of Nuclear War I: Impact on Humans. **Bioscience**, v. 35, 1985.

HAUPT, S.; CARAMIA, F.; KLEIN, S. L.; RUBIN, J. B.; HAUPT, Y. Sex disparities matter in cancer development and therapy. **Nat Rev Cancer**, v. 21, p. 393-407, 2021.

HAVRÁNKOVÁ, R. Biological effects of ionizing radiation. **Casopis lekaru ceskych**, v. 159, n. 7-8, p. 258-260, 2020.

HOMANN, S. G. **HotSpot Health Physics Codes Version 3.0**. USA: User's Guide. Lawrence Livermore National Laboratory, 2014.

HOMANN, S. G. **HotSpot Health Physics Codes Version 3.1.2** User's Guide. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2020.

HUKAI, R. Y. Lições do Japão sobre energia nuclear. **Estudos avançados**, v. 27, p. 273-276, 2013.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material**. Edition (Revised), IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1

(ST-1, Rev.), Vienna: IAEA, 1996.

JACKSON, S. S.; MARKS, M. A.; KATKI, H. A.; COOK, M. B.; HYUN, N.; FREEDMAN, N. D.; CHATURVEDI, A. K. Sex disparities in the incidence of 21 cancer types: Quantification of the contribution of risk factors. **Cancer**, v. 128, n. 19, p. 3531-3540, 2022.

KARAM, P. A. **Radiological and Nuclear Terrorism: Their Science, Effects, Prevention, and Recovery** Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Alemanha: Springer Nature, 2021.

KARMAKER, N.; MARAZ, K. M.; ISLAM, F.; HAQUE, M. M.; RAZZAK, M.; MOLLAH, M.; FARUQUE, M. R. I.; KHAN, R. A. Fundamental characteristics and application of radiation. **GSC Advanced Research and Reviews**, v. 7, n. 1, p. 64–72, 2021. DOI: 10.30574/gscarr.2021.7.1.0043. Acesso em: 2 apr. 2024.

KELLERER, A. M. Fundamentals of microdosimetry. *In*: KASE, K. R.; BENGT, B.; ATTIX, F. H. (eds.). **The Dosimetry of ionizing radiation**. Orlando, Fa: Academic Press, 1985. p. 78-162, v. 1.

KIM, Y.; KIM, M.; KIM, W. Effect of the Fukushima nuclear disaster on global public acceptance of nuclear energy, *Energy Policy*. **Elsevier**, v. 61, p. 822-828, 2013.

KNEBEL, A. R.; COLEMAN, C. N.; CLIFFER, K. D.; MURRAIN-HILL, P.; MCNALLY, R.; OANCEA, V.; Jacobs, j.; Buddemeier, B.; Hick, J. L.; Weinstock, D. M.; Hrdina, C. M.; Taylor, T.; Matzo, M.; Bader, J. L.; Livinski, A. A.; Parker, G.; Yeskey, K. Allocation of Scarce Resources After a Nuclear Detonation: Setting the Context. **Disaster Medicine and Public Health Preparedness**, v. 5, p. S20–31, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1001/dmp.2011.25>

KRISTENSEN, H. M.; KORDA, M. Tactical nuclear weapons, 2019. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 75, n. 5, p. 252-261, 2019.

LEE, S. D.; SNYDER, E. G.; WILLIS, R.; FISCHER, R.; GATES-ANDERSON, D.; SUTTON, M.; VIANI, B.; DRAKE, J.; MACKINNEY, J. Radiological dispersal device outdoor simulation test: Cesium chloride particle characteristics. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1, p. 56-63, 2010.

LEHMAN, A. F. 100-fold margin of safety. Quarterly Bulletin. **Association of Food & Drug Officials of the United States**, v. 18, n. 1, p. 33 -35, 1954.

LLNL. Lawrence Livermore National Laboratory. **Improvised Nuclear Device Technical Basis CalEMA RNER Framework Supplement**. USA: Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory, jun. 2013.

MARTINS, E. M.; FORTES, J. D. N.; LESSA, R. de A. Modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos: avaliação de modelos de dispersão de poluentes emitidos por veículos. **Revista Internacional de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 2–19, 2015. DOI: 10.12957/ric.2015.14498. Acesso em: 21 jan. 2024.

MARTINS, R. A. **Becquerel's experimental mistakes. Historical Essays on Radioactivity**. Extrema: Quamcumque Editum, 2021. Disponível em: <https://www.ghtc.usp.br/livros%20RM%202022/Studia-2-3-web.pdf> Acesso em: 19 fev. 2024.

MASOUD, M.A.; KANSOUH, W.A.; SHAHIEN, M.G.; SAKR, K.; ALAA, M.; RASHAD, A.M.; ZAYED, A. N. Experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes. **Progress in Nuclear Energy**, v. 120, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103220>.

MEIT, M.; REDLENER, I.; BRIGGS, T. W.; KWANISAI, M.; CULP, D.; ABRAMSON, D. M. Rural and Suburban Population Surge Following Detonation of an Improvised Nuclear Device: A New Model to Estimate Impact. **Disaster Medicine and Public Health Preparedness**, v. 5, n. S1, p. S143–S150, 2011. DOI:10.1001/dmp.2011.20

NAVARRO, M. V. T.; LEITE, H. J. D.; ALEXANDRINHO, J. da C.; COSTA, E. A. Controle de riscos à saúde em radiodiagnóstico: uma perspectiva histórica. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 15, n. 4, p. 1039-1047, 2008.

NEUMEISTER, S. M.; GRAY, J. P. The Strategic National Stockpile: identification, support, and acquisition of medical countermeasures for CBRN incidents. **Toxicol Mech Methods**, p. 1-33, 28 dez. 2020.

NEUSCHATZ, M. Can a nuclear weapon really be "safer"? **Science**, v. 316, n. 5825, p. 689, 4 mai. 2007.

NRC. **Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2**. Washington, DC: The National Academies Press, 2006. 422 p.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017.

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 185–200, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-401420130001000142013>.

OKUNO, E. YOSHIMURA, E. **Física das Radiações**. São Paulo, 2010.

PATEL, S. S.; GRACE, R. M.; CHELLEW, P.; PRODANCHUK, M.; ROMANIUK, O.; SKREBETS, Y.; RYZHENKO, S. A.; ERICKSON, T. B. Emerging Technologies and Medical Countermeasures to Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) Agents in East Ukraine. **Confl Health**, v. 14, p. 24, 2020.

POTTER, G. M. W. (ed.). **Forecasting Nuclear proliferation in the 21st Century**. Califórnia, EUA: Stanford University Press, 2010.

RIBEIRO, C.C.; PINTO, J.D.S.; STARLING T. **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2019.

ROZLAIMI, R. F. A.; OTHMAN, S. A. Tokaimura nuclear accident. **Radiation**

**Biophysics**, p. 86, 2019.

RUEFF, J. **Efeitos genéticos das radiações ionizantes**. 2019.

SACHS, R. K.; HLATKY, L. R. Dose-rate dependent stochastic effects in radiation cell-survival models. **Radiation and Environmental Biophysics**, v. 29, n. 3, p. 169-184, 1990.

SAENKO, V.; IVANOV, V.; TSYB, A.; BOGDANOVA, T.; TRONKO, M.; DEMIDCHIK, Y.; YAMASHITA, S. The Chernobyl accident and its consequences. **Clin Oncol (R Coll Radiol)**, v. 23, n. 4, p. 234-243, 2011. DOI: 10.1016/j.clon.2011.01.502.

SCHUMANN, B.; BERWIG, J. A. O desastre radiológico do Césio 137: lições após 30 anos da sua ocorrência. **Revista Direito, Estado e Sociedade**, v. 0, n. 54, 2019.

SEGRÈ, E. H. Becquerel, os Curie e a Descoberta da Radioatividade. *In: From x-rays to quarks: modern physicists and their discoveries*. USA: Dover Publications 1987. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/346753/mod\\_resource/content/1/SEGR%C3%89\\_CAPITULO%20II.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/346753/mod_resource/content/1/SEGR%C3%89_CAPITULO%20II.pdf)

SIEGEL, R. L.; MILLER, K. D.; WAGLE, N. S.; JEMAL, A. Cancer statistics, 2023. **Ca Cancer J Clin**, v.73, n. 1, p. 17-48, 2023.

SILVA, G.F.Q; ANDRADE, E.R.; REBELLO, W.F.; ARAÚJO, O.M.O. Modelagem e cenário radiológico utilizando o código hotspot e potenciais impactos financeiros para tratamento de câncer radioinduzido ao público. *In: Encontro Nacional de Modelagem Computacional, 18., Salvador. Anais eletrônicos [...]*. Salvador, 2015.

SOARES, F. A. P.; PEREIRA, A. G.; FLÔR, R. de C. Utilização de vestimentas de proteção radiológica para redução de dose absorvida: uma revisão integrativa da literatura. **Radiologia Brasileira**, v. 44, n. 2, p. 97-103, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-39842011000200009>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SONG, J. H. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 846-852, 2018.

SORENSEN, J. H.; SHUMPERT, B. L.; VOGT, B. M. Planning for protective action decision making: evacuate or shelter-in-place. **Journal Hazardous Material**, v. 109, n. 1- 3, p. 1-11, jun. 2004.

SOWA, P.; RUTKOWSKA-TALIPSKA, J.; SULKOWSKA, U.; RUTKOWSKI, K.; RUTKOWSKI, R. Electromagnetic radiation in modern medicine: Physical and biophysical properties. **Pol. Annals Medicine**, v. 19, p. 139–142, 2012.

SWUSTE, P.; GROENEWEG, J.; GULIJK, C. V.; ZWAARD, W.; LEMKOWITZ, S. Safety management systems from Three Mile Island to Piper Alpha, a review in English and Dutch literature for the period 1979 to 1988. **Safety Science**, v. 107, p. 224-244, 2018.

TAUHATA, L. S. I.P.A.; PRINZIO, R.D.; PRINZIO, A.R.D. **Radioproteção e Dosimetria – Fundamentos. Instituto de Radioproteção e Dosimetria.** 10. rev. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2014.

THAUL, S, O. M. H. **Potential Radiation Exposure in Military Operations: Protecting the Soldier Before, During, and After.** Washington, DC: National Academies Press, 1999.

TSUCHIYA, S. A.; TANABE, T.; NARUSHIMA, K. I. T. O.; YAMAZAKI, K. **An analysis of Tokaimura nuclear criticality Accident: A systems approach.** In **The 19th International Conference of The System Dynamics Society.** Atlanta, Georgia, USA: The System Dynamics Society, 2001.

UNEP. United Nations Environment Programme, **Radiation Effects and Sources: What is Radiation? What does Radiation do to us Where does Radiation Come from New York,** United Nations, 2016.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2017 Report.** 2018.

UNITED STATES OF AMERICA. Nuclear Regulatory Commission–U.S. NRC.2014. **Glossary,** 2014. Disponível em: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/total-effective-dose-equivalent-tede.html>. Acesso em: 14 jan. 2024.

VALENTE, L. da S. **Patologias Estruturais Causadas por Efeitos de Sismo, Explosão e Exposição ao Fogo.** Rio de Janeiro: UFF, 2014. Disponível em: <https://avantecengenharia.com.br/wp-content/uploads/2017/06/LEONAM-PUBLIC-2014-.pdf>

VENKATRAM, A. An examination of the Pasquill-Gifford-Turner dispersion scheme. **Atmospheric Environment,** v. 30, n. 8, p. 1283-1290, 1996.

VIEIRA, S. de A. Césio-137, um drama recontado. **Estudos avançados,** v. 27, p. 217-236, 2013.

WILLIAMS, P. R. D.; PAUSTENBACH, D. J. Risk characterization: principles and practice. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B,** v. 5, n. 4, p. 337–406, 2002. DOI: 10.1080/10937400290070161.

WOOLF, A. F.; FOREIGN, A. Nonstrategic nuclear weapons. *In: Congressional Research Service.* Library of Congress: Defense, and Trade Division, 2006.

WASHINGTON, M. J. The Practice of Peer Review in the International Nuclear Safety Regime. N. Y. Univ. **Law Rev.,** v. 72, p. 430-469, 1997.

YAJUN, L.; YIMING, Q.; JULIAN YY, W.; GUO-YING, L.; PUYANG, Z.; DANG, L.; ZHUANGMIN, X.; BIN, Y. L. Effect of incorporating hematite on the properties of ultra-high performance concrete including nuclear radiation resistance. **Construction and**

**Building Materials**, v. 327, p. 126950, 2022.

YEDDANAPUDI, N.; CLAY, M. A.; DURHAM, D. P.; HOFFMAN, C. M.; HOMER, M. J.; APPLER, J. M. Informing CONOPS and medical countermeasure deployment strategies after an improvised nuclear device detonation: the importance of delayed treatment efficacy data. **Int J Radiat Biol**, v. 96, n. 1, p. 4-11, jan. 2020.

ZAPP, N.; CUCINOTTA, F.; ATWELL, W. A comparison of quality factors and weighting factors for characterizing astronaut radiation exposures. **Advances in Space Research**, v. 30, n. 4, p. 965-974, 2002.

ZEZULOVÁ, A.; STANĚK, T.; OPRAVIL, T. The Influence of Barium Sulphate and Barium Carbonate on the Portland Cement. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 42-49, 2016.

ZHANG, X.; RASKOB, W.; LANDMAN, C.; TRYBUSHNYI, D.; HALLER, C.; YUAN, H. Automatic plume episode identification and cloud shine reconstruction method for ambient gamma dose rates during nuclear accidents. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 178-179, p. 36-47, 2017.

ZUBAIR, M.; AHMED, E.; HARTANTO, D. Estimation of public exposure during normal operation of unit-1 Barakah Nuclear Power Plant using GALE and HOTSPOT. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 41, p. 235-243, 2022.