

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

RODRIGO WERNER DA SILVA

**ESTUDO DE CENÁRIO ENVOLVENDO INCÊNDIO EM MATERIAL RADIOATIVO ORIENTADO À
RESPOSTA À EMERGÊNCIA**

**Rio de Janeiro
2017**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

RODRIGO WERNER DA SILVA

**ESTUDO DE CENÁRIO ENVOLVENDO INCÊNDIO EM MATERIAL RADIOATIVO ORIENTADO À
RESPOSTA À EMERGÊNCIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Prof. Edson Ramos de Andrade – D.Sc.

Rio de Janeiro

2017

c2017

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

621.48	Silva, Rodrigo Werner da
S586e	Estudo de cenário envolvendo incêndio em material radioativo orientado à resposta à emergência / Rodrigo Werner da Silva; orientado por Edson Ramos de Andrade – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2017. 68p.: il. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017. 1. Curso de Engenharia Nuclear – teses e dissertações. 2. Material radioativo. 2. Energia nuclear. I. Andrade, Edson Ramos de. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

RODRIGO WERNER DA SILVA

**ESTUDO DE CENÁRIO ENVOLVENDO INCÊNDIO EM MATERIAL RADIOATIVO
ORIENTADO À RESPOSTA A EMERGÊNCIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Prof. Edson Ramos de Andrade – D.Sc.

Orientador: Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior – D.Sc.

Aprovada em 05 de maio de 2017, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Edson Ramos de Andrade – D.Sc. do IME – Presidente

Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior – D.Sc. da UERJ

Prof. Helio de Carvalho Vital - PhD do CTEEx

Prof. Sérgio Gavazza– PhD do IME

Prof. Francisco de Assis Dourado da Silva - D.Sc da UERJ

Prof. Gladson Silva Fontes – D.Sc do IME

Rio de Janeiro

2017

Dedico este trabalho a Deus por todas as oportunidades que colocou em minha vida e me deu saúde e força de vontade para vencer todos os desafios, iluminando meu caminho em cada conquista. “Ainda que eu atravesse o vale escuro, nada temerei, pois estás comigo.” Salmo 22,4.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Elieze e Marly, por me educarem com carinho e compromisso de agregar valores criando as bases necessárias para minhas conquistas.

A minha esposa, Raquel pelo companheirismo, atenção e compreensão por todos os momentos em que abdiquei de nosso convívio para focar nos meus compromissos.

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 civis e militares do IME, que me instruíram e transferiram seus conhecimentos com muito zelo durante o curso.

Aos Coronéis Claudio, Gavazza e Karan por seus ensinamentos e contribuições para o aperfeiçoamento nos estudos.

Especial ao Cel QEM Walter Guimarães pela colaboração e apoio em todas as dificuldades encontradas, se dedicando de maneira fraterna, ajudando a me lapidar e encontrar o caminho correto a seguir.

Ao Ten Cel Montenegro pelo companheirismo e amizade, cujo incentivo foi fundamental ao alcance dos objetivos.

Aos companheiros de turma, que se esforçaram em formar um grupo unido e agregador.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, casa que me acolheu e permitiu grandes conquistas profissionais, pessoais e acadêmicas.

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

“Se quer viver uma vida feliz, amarre-se a uma meta, não às pessoas nem às coisas”.

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS.....	90
1. INTRODUÇÃO.....	123
1.1 Objetivos.....	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1516
2.1 Radiação Ionizante.....	16
2.2 Atividade.....	18
2.3 Meia Vida e Constante de Decaimento.....	18
2.4 Dose de Radiação.....	18
2.5 Dose Absorvida (D).....	18
2.6 Dose Equivalente (H _T).....	19
2.7 Dose Efetiva (E).....	Erro! Indicador não definido.19
2.8 Dose Efetiva Total (DET).....	Erro! Indicador não definido.
2.9 Dose Coletiva (SE).....	Erro! Indicador não definido.
2.10 Hotspot Health Physics Code - Versão 3.0.3.....	Erro! Indicador não definido.
2.10.1 Distribuição Gaussiana Aplicada ao Problema.....	Erro! Indicador não definido.1
2.11 Leucemia.....	23
2.12 Biological Effects of Ionizing Radiation: Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR V e VII).....	24
2.13 Probabilidade de Causa.....	26
2.14 Acidente, Acidente Radiológico, Emergência e Desastre - Definições.....	26
2.15 Prevenção de Desastres.....	27
2.16 Preparação para Desastre.....	27
2.17 Resposta aos Desastres.....	27
2.18 Mitigação.....	27
2.19 Incêndio.....	28
3. METODOLOGIA.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1 HotSpot.....	42
4.2 BEIR.....	50
4.3 Apoio à Tomada de Decisão.....	Erro! Indicador não definido.51
4.3.1 Prevenção.....	52
4.3.2 Mitigação.....	53
4.3.3 Preparação.....	54
4.3.4 Resposta.....	55
5. CONCLUSÃO.....	5658
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1 Espectro eletromagnético da radiação.....	16
FIG. 2.2 Categorização simplificada das radiações	17
FIG. 2.3 Curva temperatura-tempo de um incêndio real	29
FIG. 2.4 Curva temperatura-tempo do modelo de incêndio-padrão ISO 834 (1975).....	30
FIG. 2.5 Desempenho dos meios de proteção no comportamento do incêndio real	31
definido.	
FIG. 2.6.a Curvas-padrão para incêndio de materiais celulósicos mais usadas no meio técnico internacional.....	32
FIG. 2.6.b Curvas de incêndio americanas UL 1709 e ASTM E1529 e a curva européia “H” para materiais hidrocarbonetos.....	Erro! Indicador não definido.
FIG. 3.1 Área de Preservação do Ambiente Cultural	34
FIG. 3.2 Rosa dos Ventos (velocidades predominantes e frequência de ocorrência) da cidade do Rio de Janeiro.	36
FIG. 3.3 Resumo da metodologia utilizada	42
FIG. 4.1(a) Variação da máxima distancia de dose em função da velocidade da vento; (b) Variação da dose equivalente total efetiva em função da velocidade do vento e (c) Número de afetados por doses de até 0,001Sv em função da velocidade do vento.....	Erro! Indicador não definido.
FIG. 4.2 (a) Máxima distância de dose em função da altura da dispersão atmosférica, (b) Dose equivalente total efetiva em função da altura da dispersão atmosférica e (c) Afetados nas áreas de controle operacional interna, média e externa em função da altura da dispersão atmosférica	Erro!
Indicador não definido.	48
FIG. 4.3 Delimitação de raios das máximas distâncias de dose, para limite de controle operacional externo, por altura de dispersão atmosférica	Erro! Indicador não definido.
FIG. 4.4 Relação entre o excesso de risco relativo e a distância de máxima dose para homens e mulheres, tomando por base as variáveis a = Idade da exposição, T = tempo desde a exposição e para a radiação gama do Césio 137 e análise através do BEIR V ou VII	Erro! Indicador não definido.
	51

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1 Fatores de peso da radiação.....	Erro! Indicador não definido.	19
TAB. 2.2 Funções para o cálculo do ERR para a leucemia		25
TAB. 2.3 Curvas-padrão para incêndio de materiais celulósicos mais usadas no meio técnico internacional.....	Erro! Indicador não definido.	2
TAB. 3.1 Áreas de controle operacional.....	Erro! Indicador não definido.	37
TAB. 3.2 Apresentação das características dos ventos, segundo o HotSpot	Erro! Indicador não definido.	
TAB.3.3 Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A-F		39
TAB. 4.1 Variação de doses em função dos ventos característicos da região	Erro! Indicador não definido.	43
TAB. 4.2 Distribuição da dose em função da intensidade do vento		44
TAB. 4.3 Distribuição da dose em função dos tempos de queima e intensidades do vento	Erro! Indicador não definido.	46
TAB. 4.4 Valores calculados para a simulação do incêndio.....	Erro! Indicador não definido.	47
TAB. 4.5 Distribuição da dose em função da altura da dispersão atmosférica	Erro! Indicador não definido.	48
TAB. 4.6 Limites de doses para situações diversas.....	Erro! Indicador não definido.	49

RESUMO

Os avanços no emprego da energia nuclear proporcionam um elevado número de utilidades às necessidades da população mundial e diversas áreas são beneficiadas com o desenvolvimento de novas tecnologias. Os irradiadores de sangue, por exemplo, são equipamentos de fundamental importância nos centros de hemoterapia, atuando na redução de risco de Doença do Enxerto Contra Hospedeiro (DECH) e podem fazer uso de fontes radioativas, dentre as quais se destaca o Cs-137. O presente trabalho fundamenta-se no estudo de cenário envolvendo incêndio em irradiadores de sangue, tendo como base o HEMORIO, devido ao fato de possuir tal equipamento e estar situado em área densamente povoada. Embora o cenário seja hipotético, tentou-se aproximar ao máximo de uma situação realista, (muito embora o trabalho seja conservativo) por meio de curvas de incêndio padronizadas que forneceram dados de entrada para o *software HotSpot Health Physics code* para estimar as doses equivalentes efetivas totais (TEDE) para a população afetada pela dispersão do radionuclídeo na atmosfera. As doses, referidas distâncias, áreas das plumas produzidas em diferentes condições atmosféricas e número de pessoas afetadas foram extraídos dos resultados de cálculos do software e serviram para gerar dados e gráficos capazes de auxiliar nos processos decisórios dos órgãos de emergência. Os resultados também foram tratados e inseridos como entrada para análise de riscos de indução de leucemia por meios matemáticos com base nos relatórios sobre efeitos biológicos das radiações ionizantes (*BEIR V e VII*). O estudo do cenário permitiu analisar as consequências de um incêndio em irradiadores de sangue que façam uso de fontes de Cs-137 e auxiliar nas medidas de prevenção, mitigação, preparação e resposta, possibilitando a proteção das comunidades potencialmente em risco atual e futuro de desenvolvimento de câncer.

ABSTRACT

The advances in nuclear energy knowledge has been providing a number of utilities to the needs of the world's population with benefits to many fields ending up to development of new technologies. This study was based on the evaluation of a scenario involving fire in blood irradiation equipment, taking as a basis the HEMORIO, due to owning such equipment and be situated in densely populated area. Although the scenario is hypothetical, there was na effort to approach to reality by considering standardized fire curves which provide input data to the *HotSpot Software Health Physics* to estimate the population's Total Effective Dose Equivalent (TEDE) due to atmospheric dispersion. The doses, distances, dimensions of the plumes produced in different atmospheric conditions and number of affected individuals were estimated from the software and served to generate the collection data able to support in decision-making process. Results were also treated and inserted as input for risk evaluation of induction of leukemia by mathematical means based on reports of Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR V and VII) depending on the dose level. The study of the scenario allowed inferring the consequences of a fire in blood irradiators that use Cs-137 sources assisting in the prevention, mitigation, preparedness and response, enabling the protection of potentially at-risk communities.

INTRODUÇÃO

A energia nuclear e suas aplicações ofereceram avanços inquestionáveis para a sociedade nas mais diversas áreas, como: Medicina, Indústria, Arqueologia, Artes, Agricultura, Ciências Aeroespaciais, geração de eletricidade, entre outras. Particularmente na Medicina, os avanços em diagnósticos e terapias proporcionaram um movimento crescente no sentido de disponibilização da tecnologia, principalmente em centros urbanos populosos, como é o caso do Rio de Janeiro. Entretanto, a tecnologia nuclear aplicada à experiência social demanda observações especiais em segurança. Assim, é de fundamental importância que seja a oferta desta tecnologia acompanhada de esforços contínuos para que se garanta um ambiente seguro para suas operações seja em que campo se manifeste a necessidade da aplicação da energia nuclear.

Como foi comentado em relação ao uso difuso da energia nuclear na Saúde, por meio da Medicina, em áreas urbanas densas normalmente se encontram vários hospitais e clínicas realizando procedimentos envolvendo materiais radioativos que, caso sejam expostos a situações críticas de segurança, como um incêndio, podem contribuir para considerável aumento dos índices de degradação ambiental, o que inclui a real possibilidade de exposição ao perigo não só de trabalhadores como também do público em geral. Um cenário desta natureza é crítico, intrincado e de difícil solução, podendo acarretar em imensos prejuízos tanto sociais como econômicos (SANTOS, 2015). Entretanto, um cenário de acidente radiológico é normalmente pobre em informações, mas possibilita o desenvolvimento de estratégias para modelagem de consequências com vistas ao estudo e avaliação do risco e apoio ao processo decisório sobre a crise que se instala, uma vez que as ferramentas adequadas sejam utilizadas.

Cenários envolvendo incêndios em instalações que operam com materiais radioativos são pouco explorados na literatura, restringindo-se às normas de proteção e evacuação de pessoal em caso de acidentes em instalações nucleares e seus reflexos sobre o sistema de gestão integrada de segurança, e acidentes com produtos perigosos diversos (SANTOS, 2005). Não foram encontrados trabalhos de relevância para o tema incêndio em buscas utilizando a base de dados do *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) subgrupo *PubMed*. Há esforços da *National Fire Protection Association* (NFPA), norte americana, para estabelecer por suas normas e códigos de procedimentos um modelo de ação para este tipo de cenário. Entretanto, em nenhuma publicação foi encontrado teor que buscasse modelar consequência com base em riscos futuros à população decorrentes de incêndios em locais contendo materiais radioativos.

Desta forma, dispor de ferramentas metodológicas que permitam avaliar consequências resultantes das atividades humanas, de qualquer natureza, sobre os seres humanos e a biosfera pode ser um caminho para a garantia da segurança e da manutenção da vida. Estudos em modelagem computacional representam um campo aberto para novas descobertas e o uso desta poderosa metodologia no auxílio direto ao escalão de decisão em um estado de emergência configura-se um desafio importante. Este desafio emerge não só das consequências dos efeitos radioativos sobre seres humanos e o espaço físico, mas também da ignorância sobre este tipo de urgências. A escolha do cenário para os estudos propostos no presente trabalho foi feita tomando por base as pesquisas relativas ao material radioativo capaz de representar uma ameaça potencial em uma região densamente povoada no Estado do Rio de Janeiro. De acordo com, Suzane de Alencar Vieira (VIEIRA, 2015), o acidente com o Cs-137 em Goiânia no ano de 1987 foi considerado o maior acidente radiológico em área urbana do mundo, de modo a provocar o medo de novas ocorrências, tornar os efeitos danosos conhecidos e aprofundar os estudos relativos à prevenção, preparação, mitigação e resposta. O Cs-137 encontra-se, dentre outras aplicações, em irradiadores de sangue, com atividades consideradas de interesse para o presente estudo, cujas doses equivalentes efetivas totais (TEDE) geradas por sua queima podem ser estimadas, bem como os principais efeitos sobre uma população afetada.

O HEMORIO, localizado na região central do município da Cidade do Rio de Janeiro, destaca-se como um centro de referência em Hemoterapia, que apresenta em seus protocolos as indicações de hemocomponentes irradiados onde, para reduzir o risco de Doença do Enxerto Contra Hospedeiro (DECH), cuja dose de irradiação é de 25 Gy e deve ser realizada em irradiadores de células próprios para este fim.

Embora sejam verificadas medidas de segurança previstas legalmente em âmbito nacional e para os irradiadores de sangue, e sejam equipamentos selados, o histórico de eventos adversos mostra que deve sempre haver a preocupação com a violação, intencional ou não, de uma fonte e que as possibilidades devem ser aventadas, tais como um incêndio, consumindo este uma fonte já violada ou não.

Não há relatos de incêndios em material radiativo no Brasil. Porém em 2004, duas ampolas com material radioativo Criptônio 85 foram roubadas por saqueadores na fábrica de tecidos Poesi, na zona norte do Rio de Janeiro (REUTERS, 2004). A fábrica pegou fogo em abril daquele ano e desde então passou a ser saqueada por moradores do conjunto de comunidades carentes, hoje ocupando área conhecida como Complexo do Alemão. Segundo o Corpo de Bombeiros e a Defesa Civil, o Criptônio 85 era usado em uma máquina para medir a espessura de tecidos. O episódio não trouxe danos

conhecidos à população, mas mostrou a fragilidade do sistema de proteção e ameaça de incêndios envolvendo material radioativo, conforme publicado no site de notícias em 27 de abril de 2004 (<http://noticias.uol.com.br/ultnot/reuters/2004/04/27/ult27u41789.jhtm>).

O caráter inovador deste trabalho reside na análise, não apenas das ameaças, mas também das vulnerabilidades, permitindo um estudo dos desdobramentos e da antecipação das ações possíveis de serem realizadas tanto pelos órgãos de primeira resposta como aqueles dedicados ao acompanhamento da população afetada para verificação do desenvolvimento de morbidades que possam ser associadas ao evento.

A importância das ações de prevenção, além de preservação de vidas e bens, está relacionada aos elevados esforços e custos inerentes à recuperação dos cenários. Traçar um comparativo entre essas ações é relativamente difícil pelo fato de os investimentos em prevenção não serem constantes e os desastres não possuírem frequência definida, nem magnitude regular. Porém, fica fácil entender que a necessidade de investimento em prevenção quando se analisam historicamente os custos realizados. De acordo com a Confederação Nacional de Municípios (CNM), em 2012 foram gastos pelo governo federal brasileiro com proteção e defesa civil o equivalente a 25,6% em prevenção contra 74% para remediar estragos. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), divulgado na 3ª Sessão da Plataforma Global para a Redução de Riscos de Desastres, cada dólar investido em prevenção poupa sete dólares gastos em reconstrução (GPDRR, 2012).

O estudo de cenário envolvendo incêndio em local contendo material radioativo permite, por meio da identificação dos possíveis riscos primários e secundários da combustão, sugerir efetiva orientação aos procedimentos a serem adotados por diversas agências normalmente envolvidas nas ações de prevenção, mitigação, preparação e resposta, identificando-se as ameaças e vulnerabilidades imediatas com efeito sobre futuros comprometimentos e fragilidades.

1.1 OBJETIVOS

Estudar possíveis consequências de um incêndio em edificação que abrigue material radioativo, um centro médico neste trabalho, permitindo a análise de procedimentos e comprometimentos futuros.

Além do objetivo principal, foram objetivos secundários:

- a) Simular um cenário de incêndio em irradiador de sangue humano operando com fonte de Cs-137 e estudar o risco de leucemia induzido pela exposição radiológica ambiental da população vizinha;
- b) Verificar as variáveis que influenciam na distribuição de doses e população afetada em caso de incêndios na fonte; e
- c) Identificar os efeitos secundários do incêndio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RADIAÇÃO IONIZANTE

Radiação pode ser definida como a propagação de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas subatômicas no espaço livre ou em um meio material (VALVERDE, LEITE, MAURMO, 2010). Entende-se por processos radioativos os ajustes ocorridos no núcleo atômico ou em camadas eletrônicas, ou ainda as interações que demandem subprocessos de estabilização com emissão de energia (TAUHATA et al., 2013).

Didaticamente, em radioproteção, as radiações podem ser divididas em não ionizantes e ionizantes. Radiações não ionizantes são aquelas com frequências iguais ou abaixo daquelas dos raios ultravioleta ($\approx 10^{15}$ a 10^{16} Hz), enquanto que as radiações ionizantes possuem frequências mais elevadas. As radiações ionizantes podem ainda ser definidas como aquelas que apresentam energia entre 10 e 33 eV (KNOLL, 1999). A partir dessa faixa de energia, experimentos mostram que a maior parte dos átomos ou moléculas simples (compostos elementares de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio, abundantes em meio biológico) podem ter seus elétrons, de camadas mais externas, ejetados (BIRAL, 2002). A energia de ionização da molécula de água, principal constituinte biológico da vida na Terra é de, aproximadamente, 12,4 eV (TAUHATA et al., 2013). Na figura 2.1, pode-se ver um esboço da distribuição de frequências de acordo com o tipo de radiação.

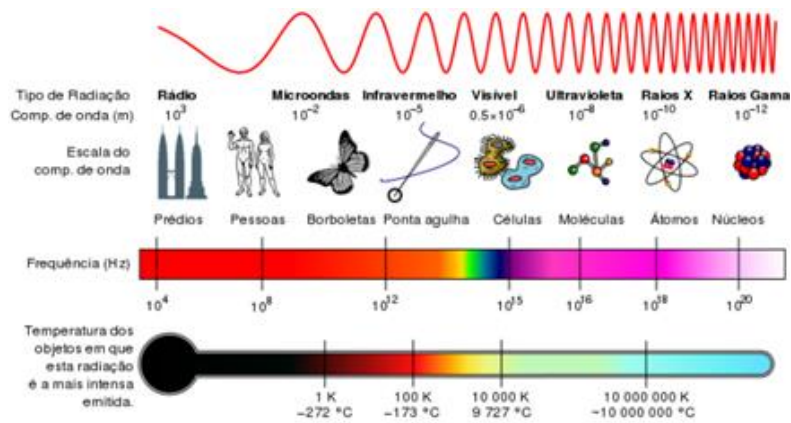


FIG. 2.1 Espectro eletromagnético da radiação.

(Fonte: VILLATE, 2013)

O termo ionizante se dá pela produção de íons no meio de propagação, logo, é possível dizer que a radiação ionizante é capaz de produzir íons em um meio, diferentemente da radiação não ionizante.

A radiação ionizante pode ser ainda subdividida em direta e indiretamente ionizante. Durante o processo em que a energia é transferida de uma radiação incidente para a matéria, as radiações que possuem carga elétrica, como no caso de elétrons, fragmentos de fissão e partículas alfa, têm sua atuação dada, principalmente, por seu campo elétrico, transferindo sua energia para diversos átomos do meio simultaneamente, sendo assim denominadas radiações diretamente ionizantes. As radiações que não apresentam carga elétrica associada (nêutrons e fótons) têm forma distinta de interação com a matéria e são denominadas radiações indiretamente ionizantes. Ao interagirem, transferindo energia para os elétrons do meio, provocam ionizações (TAUHATA et al., 2013). O esquema da figura 2.2 mostra uma categorização simplificada das radiações.

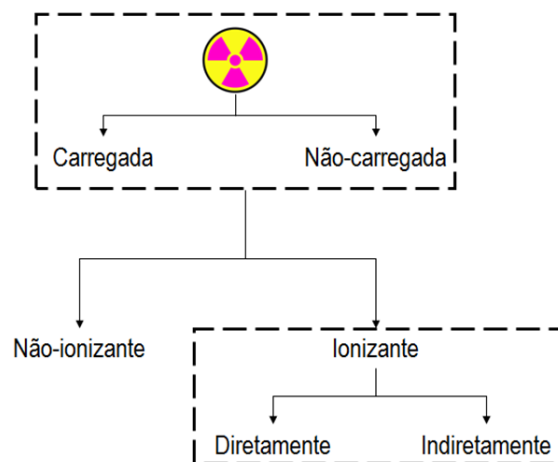


FIG. 2.2 Categorização simplificada das radiações.

2.2 ATIVIDADE

A atividade (A) de determinado material radioativo pode ser definida como o número de desintegrações nucleares por unidade de tempo, grandeza dada por $A = dN/dt$, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt (CNEN, 2011). A unidade no Sistema Internacional de Unidades (SIU) é denominada becquerel (Bq) e representa uma desintegração por segundo (dps). Anteriormente, a unidade histórica estabelecida para a atividade de um radionuclídeo era o curie (Ci). Por definição, o curie é igual a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo em 1,0 g de Ra-226. Portanto, tem-se que: $1,0 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

2.3 MEIA-VIDA E CONSTANTE DE DECAIMENTO

Entende-se por meia-vida (λ) o período necessário para que 50% dos átomos inicialmente presentes em uma amostra representativa de um radionuclídeo decaia. A constante de decaimento pode ser descrita como a probabilidade de decaimento por unidade de tempo. No entanto, há estudos que apontam a possibilidade de λ não ser constante (FISCHBACH et al., 2012).

2.4 DOSE DE RADIAÇÃO

No Brasil, a norma CNEN-NN-3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica (CNEN, 2011) define o conceito de dose e dá subclassificação. As definições mais importantes para este trabalho de pesquisa são: (a) dose absorvida, (b) dose equivalente, (c) dose efetiva, (d) dose total efetiva e (e) dose coletiva, além do (f) conceito de exposição.

2.5 DOSE ABSORVIDA (D)

É definida como a energia média ($d\epsilon$) depositada pela radiação em uma unidade de volume de matéria com massa (dm), ou seja, $D = d\epsilon/dm$ (CNEN, 2011). De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SIU), sua unidade é o joule por quilograma (J/kg), denominada gray (Gy).

2.6 DOSE EQUIVALENTE (H_T)

Grandeza expressa por $H_T = D_T w_R$, sendo D_T a dose absorvida média em determinado órgão ou tecido e w_R o fator de ponderação da radiação. De acordo com o SIU, a unidade de medida para dose equivalente é o sievert (Sv). O fator de ponderação da radiação obedece a regras pré-estabelecidas e possui valores fixos para diferentes tipos de radiações. A TAB 2.1 fornece os valores dos fatores de peso das radiações, de acordo com a Posição Regulatória 3.01/002:2011 da CNEN.

TAB. 2.1 Fatores de peso da radiação.

Tipo e faixa de energia ^[a]	Valores de w_R ^[b]
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e muons, todas as energias ^[c]	1
Nêutrons ^[d] , energia:	
< 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Prótons, exceto de recuo, energia: > 2 MeV	5
Partículas α , fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

(Fonte: CNEN: Posição Regulatória 3.01/002, 2011).

[a] Valores para outras radiações podem ser obtidos pelo Anexo A da ICRP-60.

[b] Todos os valores se relacionam à radiação incidente no corpo ou, para fontes internas, emitida pela fonte.

[c] Excluindo elétrons Auger, para os quais se aplicam considerações especiais de microdosimetria.

2.7 DOSE EFETIVA (E)

É definida como a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos. Matematicamente, é caracterizada pela relação $E = \sum_T w_T H_T$, sendo H_T a dose equivalente no tecido ou órgão e w_T o fator de ponderação do tecido ou órgão. Sua unidade pelo SIU é o sievert (Sv).

2.8 DOSE TOTAL EFETIVA (TOTAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT– TEDE)

A TEDE pode ser definida como a soma das doses efetivas (exposições externas) e a dose equivalente comprometida (exposições internas) (U.S. NRC, 2014).

2.9 DOSE COLETIVA

Representa o produto do número de indivíduos expostos pelo valor médio da distribuição de dose efetiva nesses indivíduos. A dose coletiva é expressa em pessoa x sievert (Sv). De acordo com a CNEN (CNEN, 2011), nas avaliações quantitativas de otimização, o valor do coeficiente monetário por unidade de dose coletiva não deve ser inferior, em moeda nacional corrente, ao valor equivalente a US\$ 10.000,00 (dez mil dólares americanos) por unidade de dose coletiva por indivíduo, ou seja US\$ 10.000,00/pessoa.Sv.

2.1 2.10 HOTSPOT HEALTH PHYSICS CODES – VERSÃO 3.0.3 (2017)

Desde 1988, o código HotSpot vem sendo distribuído pelo *National Atmospheric Release Advisory Center*, do *Lawrence Livermore National Laboratory*, Califórnia, Estados Unidos da América. O programa fornece aproximação dos efeitos da radiação ionizante quando materiais radioativos são liberados para a atmosfera. Foi criado como recurso de apoio na definição de uma resposta rápida em situações de emergência, provendo equipes técnicas e de planejamento, num conjunto portátil de ferramentas computacionais para avaliar o cenário. É também utilizado para a análise de segurança em instalações de manuseio de material radioativo, avaliações de impactos de incidentes radiológicos e/ou nucleares, e análise de possíveis efeitos e estudos sobre potenciais desdobramentos de ações envolvendo um incêndio em instalações contendo ou abrigando materiais radioativos.

Em relação às condições do terreno, os modelos de dispersão atmosférica utilizados neste trabalho são projetados para estudar liberações na superfície, considerando uma liberação radioativa

em terreno desobstruído e condições meteorológicas classificadas na categorização de Pasquill (HOMANN, 2013), incluindo velocidade e direção do vento, chuva, temperatura, presença de nuvens, etc. Estes modelos fornecem meios rápidos, embora conservativos, para a estimativa dos efeitos da radiação associados ao cenário.

Os algoritmos utilizados no HotSpot se utilizam de modelos gaussianos semi-empíricos para simular a dispersão de radionuclídeos no ambiente e calcular as doses, geralmente superestimadas, portanto, trata-se de um método conservativo (HOMANN, 2013). Para estudos realistas, onde se dispõe de mais tempo para computação e discussão, modelos não-gaussianos são mais adequados.

2.10.1 DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA APLICADA AO PROBLEMA

A distribuição gaussiana (distribuição de Gauss), também chamada de Normal, é considerada uma das principais distribuições contínuas estatísticas, sendo utilizada em diversos ramos da Estatística, Economia e Física. O modelo possui utilidade em outras aplicações, como a descrição de fenômenos físicos e de comportamento do setor financeiro.

Probabilidades em geral podem ser determinadas a partir de distribuições gaussianas, quando conhecidos parâmetros como média e desvio-padrão das variáveis. A distribuição gaussiana pode ser definida, a partir de um conjunto de variáveis, da seguinte forma (LANDIM, 2003):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

onde:

x = Variável aleatória;

μ = Média do conjunto de variáveis;

σ = Desvio-padrão do conjunto de variáveis.

O modelo gaussiano tem sido amplamente utilizado e testado, e ainda é a ferramenta básica para os cálculos iniciais de dispersão atmosférica (HOMANN, 2009; JEONG et al., 2010; RESHETIN, 1995). A origem do modelo gaussiano para esse fim remonta ao ano de 1932 e é descrita por Sutton (SUTTON, 1932). Esse modelo geralmente produz resultados que concordam razoavelmente com dados experimentais (YVES et al., 2012), podendo determinar a concentração atmosférica de um gás ou um aerossol em qualquer ponto do espaço, sendo apresentado em forma algébrica pelo programa HotSpot:

$$C(x,y,z,H)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]+\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\}\exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right]DF(x) \quad (2)$$

Sendo, (a) C, a concentração atmosférica integrada no tempo (Ci.s)/(m³); (b) Q, a atividade da fonte (Ci); (c) H, a altura efetiva de lançamento (m); (d) λ, a constante de decaimento radioativo (s⁻¹); (e) x, a distância percorrida na direção do vento (m); (f) y, a distância perpendicular à direção do vento (m); (g) z, a distância do eixo vertical (m); (h) σ_y, o desvio padrão da distribuição de concentração integrada na direção perpendicular à do vento (m); (i) σ_z, o desvio padrão da distribuição de concentração integrada na direção vertical (m); (j) u, a velocidade média do vento na altura de liberação efetiva do material (m/s); e; (k) DF (x), o fator de depleção da pluma.

Nas rotinas do HotSpot, a origem de coordenadas está localizada ao nível do solo, com as coordenadas de liberação do radionuclídeo em (x = 0, y = 0, z = 0). A equação utilizada pelo HotSpot para o cálculo do fator de depleção da pluma (DF (x)) é a seguinte:

$$DF(x)=\left[\exp\int_0^x\frac{1}{\sigma_z(x)\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z(x)}\right)^2\right]}dx\right]^{\frac{v}{u}\sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad (3)$$

onde (a) v é a velocidade de deposição (m/s) do material radioativo e (b) σ_z (x) é o desvio padrão da distribuição de concentração de ar na direção vertical (eixo z) para qualquer terreno padrão (ajustado para a altura de rugosidade da superfície, se for o caso) ou terreno da cidade em análise, as demais variáveis estão em conformidade com a equação 2.

Como o modelo gaussiano comumente produz resultados que, apesar de serem geralmente apresentados de forma conservativa, concordam com dados experimentais, sendo aceito pela Agência de Proteção Ambiental (EPA, 1978). A origem do modelo gaussiano é encontrada em trabalhos realizados por Pasquill (1961, 1974), e Gifford (1975).

O código HotSpot 3.0.3 calcula a TEDE para inalação, submersão, ressuspensão e exposição a material radioativo suspenso na atmosfera, utilizando os valores dos coeficientes de dose a partir dos documentos *Federal Guidance Report* (FGR) 11, 12 e 13, onde: FGR-11 (1988) fornece os coeficientes de dose integrada para inalação aguda de radionuclídeos e baseia-se nos modelos dosimétricos da ICRP-30 (1981); o FGR-12 (1993) fornece coeficientes de dose para a exposição externa a radionuclídeos em ar, água ou solo e o FGR-13 (1999) fornece coeficientes de dose usando a ICRP-66

(1994) e metodologias da ICRP 60/70 (1991) (HOMMAN, 2013). Como arquivos de saída, o HotSpot 3.0.3 fornece resultados na forma de tabelas e plumas de isodoses.

2.11 LEUCEMIA E EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO IONIZANTE

O câncer é uma doença crônica e multicausal, causada pelo crescimento descontrolado de células (GARÓFOLO et al., 2004). Em crianças, o câncer representa em média 2% das morbidades, afetando principalmente as células do sistema hematopoiético e os tecidos de sustentação, sendo a leucemia o tipo de neoplasia mais comum em crianças (SILVA et al., 2002). Segundo o Instituto Nacional de Câncer (INCA), no Brasil, durante o ano de 2013, ocorreram 6.316 óbitos por leucemia, sendo 3.439 homens e 2.877 mulheres. Para o ano de 2017, estimou-se 10.070 novos casos de leucemia, sendo 5.540 em homens e 4.530 em mulheres, correspondendo a um risco estimado de 5,20 novos casos para cada 100 mil homens e de 4,24 novos casos para cada 100 mil mulheres (INCA, 2017).

A leucemia é uma doença que afeta os glóbulos brancos com origem desconhecida na maioria das vezes. Tem como principal característica o acúmulo de células jovens anormais na medula óssea, que substituem as células sanguíneas normais. Na medula óssea são encontradas as células precursoras para os elementos do sangue (MACHADO, 2003).

Apenas alguns fatores são reconhecidos como possíveis causas de leucemia. Eles parecem estar ligados ao surgimento da morbidade, dentre os quais figuram o tabagismo, herança genética e exposição à radiação ionizante (ABC.MED.BR, 2012).

Os primeiros indícios de que a exposição à radiação ionizante ocasionava o desenvolvimento de leucemia foram objetos de estudos realizados com sobreviventes dos bombardeios atômicos de Hiroshima e Nagasaki durante a 2ª Guerra Mundial. Também é notável maior incidência em pacientes expostos à radioterapia, podendo ser considerada potencial efeito secundário ao tratamento (PRESTON et al., 1994; PRESTON et al., 2004).

A leucemia pode ser dividida em tipos e subtipos, onde a velocidade de evolução da doença no indivíduo e o tipo de células envolvidas são fatores para sua classificação (GUIMARÃES, 2012). Sob esse aspecto, a doença pode ser do tipo crônica, com agravamento lento, ou aguda, com agravamento rápido (LEAL, FILHO, 2002).

A leucemia é agrupada em subtipos, dividindo-se em linfóides e mielóides, dependendo do tipo de célula afetada (HAMERSCHLAK, 2008; LEAL, FILHO, 2002).

2.12 O DOCUMENTO BEIR (*BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION: HEALTH EFFECTS OF EXPOSURE TO LOW LEVELS OF IONIZING RADIATION* - BEIR V e VII)

Os relatórios BEIR V e VII são modelos de análise de risco para cânceres que dependem da dose efetiva, gênero, idade e período de latência de morbidades para indivíduos expostos à radiação ionizante. Toma como princípio o *Life Span Study* (LSS), um estudo epidemiológico desenvolvido sobre sobreviventes dos bombardeios nucleares sobre o Japão no fim da 2ª Guerra Mundial. Em geral, o comitê BEIR considera resultados padronizados para a população americana, mas que para estudos como este que enfatizam a metodologia, podem ser aproximados.

As funções matemáticas envolvidas possuem incertezas associadas elevadas. Isso ocorre porque não há como se determinar elementos fundamentais para um estudo epidemiológico, dentre outros, como: (a) étnicos e biológicos dos sobreviventes, (b) tipo de alimentação que mantinham e (c) históricos médicos e familiares.

O relatório BEIR VII apresenta um modelo geral para o cálculo do risco de cânceres ($y(d)$), representado na equação 4:

$$y(d)=y_0[1+f(d)g(\beta)] \quad (4)$$

Onde y_0 é a linha de base para ocorrência da morbidade em estudo; $f(d)$ é um modelo matemático que mostra relação com a dose (d), sendo $f(d) = \alpha_1 d$ um modelo linear e $f(d) = \alpha_2 d + \alpha_3 d^2$ um modelo linear-quadrático.

O que determina o modelo a ser utilizado é a morbidade a ser estudada. A função $g(\beta)$ é o excesso do risco relativo (*Excess Relative Risk – ERR*) e indica o percentual acima da linha de base, para a população exposta à radiação. Contudo, a leucemia foi utilizada como exemplo para o cenário escolhido, por apresentar um dos menores períodos de latência, em torno de 2,5 anos. O relatório BEIR V apresenta as seguintes funções generalizadas $f(d)$ e $g(\beta)$ para o cálculo de risco relativo para a leucemia:

$$f(d)=\alpha_2 d+\alpha_3 d^2 \quad (5)$$

$$g(\beta)= \begin{cases} \exp[\beta_1 I(T \leq 15) + \beta_2 I(15 < T \leq 25)] & \text{se } E \leq 20 \\ \exp[\beta_3 I(T \leq 25) + \beta_4 I(25 < T \leq 30)] & \text{se } E > 20 \end{cases} \quad (6)$$

Sendo: $\alpha_2 = 0,243 \text{ Sv}^{-1}$, $\alpha_3 = 0,271 \text{ Sv}^{-1}$, $\beta_1 = 4,885$, $\beta_2 = 2,380$, $\beta_3 = 2,367$, $\beta_4 = 1,638$, T o período de latência em anos e E a idade em que o indivíduo foi exposto. Entretanto, a IAEA divide tais funções de acordo com a faixa etária, período de latência e gênero, em conformidade com o relatório TECDOC 870 (IAEA, 1996). A TAB 2.2 apresenta funções específicas para cada gênero e faixa etária para determinação do ERR referentes à leucemia.

TAB. 2.2 Funções específicas para o cálculo do ERR para a leucemia utilizadas neste estudo.

<u>Gênero Masculino</u>		
$ERR(D,t,e,s)=F(D)\beta(t,e,s)=0,33(D+0,79D^2)\exp[-0,17(t-25)]$	para $e < 20$	(7)
$ERR(D,t,e,s)=F(D)\beta(t,e,s)=0,48(D+0,79D^2)\exp[-0,13(t-25)]$	para $20 \leq e < 40$	(8)
$ERR(D,t,e,s)=F(D)\beta(t,e,s)=1,31(D+0,79D^2)\exp[-0,07(t-25)]$	para $e \geq 40$	(9)
<u>Gênero Feminino</u>		
$ERR(D,t,e,s)=F(D)\beta(t,e,s)=0,66(D+0,79D^2)\exp[-0,07(t-25)]$	para $e < 20$	(10)
$ERR(D,t,e,s)=F(D)\beta(t,e,s)=0,97(D+0,79D^2)\exp[-0,03(t-25)]$	para $20 \leq e < 40$	(11)
$ERR(D,t,e,s)=F(D)\beta(t,e,s)=2,64(D+0,79D^2)\exp[0,03(t-25)]$	para $e \geq 40$	(13)

(Fonte: IAEA, 1996).

onde: (a) $ERR(D,t,e,s)$ é o Excesso de Risco Relativo, em função da dose total efetiva (D, em sieverts), latência (t, em anos), idade em que foi exposto (e, em anos) e gênero do indivíduo (s); (b) $F(D)$ é a Função linear-quadrática (leucemia) em função da dose equivalente; (c) $\beta(t,e,s)$ é o Risco Relativo (RR) em função da latência, idade em que foi exposto à radiação e gênero do indivíduo.

2.13 PROBABILIDADE DE CAUSA (PC)

A Probabilidade de Causa (PC) refere-se à fração do risco que um indivíduo apresenta de desenvolver determinada morbidade em decorrência da exposição à radiação ionizante, ou seja, o percentual de causa devido à exposição sofrida. Na prática, o valor PC mede a correlação estatística entre o aparecimento de uma morbidade e a exposição à radiação ionizante anterior. Matematicamente, o BEIR V determina a PC em função do valor do ERR, segundo a função:

$$PC = \frac{ERR(D,t,e,s)}{1+ERR(D,t,e,s)} \quad (13)$$

2.14 ACIDENTE, ACIDENTE RADIOLÓGICO, EMERGÊNCIA E DESASTRE- DEFINIÇÕES

Acidente é um evento definido ou sequência de eventos fortuitos e não planejados, que dão origem a uma consequência específica e indesejada, em termos de danos humanos, materiais ou ambientais. (Glossário de Defesa Civil, MI, 2013)

Acidente radiológico é qualquer evento não intencional, incluindo erros de operação e falhas de equipamento, cujas consequências reais ou potenciais são relevantes sob o ponto de vista de proteção radiológica (CNEN, 2012).

Emergência é uma situação de alteração intensa e grave das condições de normalidade em um determinado Município, Estado ou região de interesse, decretada em razão de desastre, comprometendo parcialmente sua capacidade de resposta. (Normativa 01, MI, 2013).

Desastre é o resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem sobre um cenário vulnerável, causando grave perturbação ao funcionamento de uma comunidade ou sociedade envolvendo extensivas perdas e danos humanos, materiais, econômicos ou ambientais, que excede a sua capacidade de lidar com o problema usando meios próprios (Normativa 01, MI, 2013).

2.15 PREVENÇÃO DE DESASTRE

Conjunto de ações destinadas a reduzir a ocorrência e a intensidade de desastres naturais ou humanos, por meio da avaliação e redução das ameaças e/ou vulnerabilidades, minimizando os prejuízos socioeconômicos e os danos humanos, materiais e ambientais.

A prevenção compreende: a Avaliação e a Redução de Riscos de Desastres, por meio de medidas estruturais e não estruturais. Baseia-se em análises de riscos e de vulnerabilidades e inclui também legislação e regulamentação, zoneamento urbano, código de obras, obras públicas e planos diretores municipais. (Glossário de Defesa Civil, MI, 2013)

2.16 PREPARAÇÃO PARA DESASTRE

Conjunto de ações desenvolvidas pela comunidade e pelas instituições governamentais e não governamentais, para minimizar os efeitos dos desastres, por meio da difusão de conhecimentos científicos e tecnológicos e da formação e capacitação de recursos humanos para garantir a minimização de riscos de desastres e a otimização das ações de resposta aos desastres e de reconstrução.

O Programa de Preparação compreende: (a) atualização da legislação pertinente; preparação de recursos humanos e interação com a comunidade; (b) educação e treinamento das populações vulneráveis; (c) organização da cadeia de comando, das medidas de coordenação das operações e da logística, em apoio às operações. (Glossário de Defesa Civil, MI, 2013)

2.17 RESPOSTA AOS DESASTRES

Conjunto de ações desenvolvidas imediatamente após a ocorrência de desastre e caracterizadas por atividades de socorro e de assistência às populações vitimadas e de reabilitação do cenário do desastre, objetivando o restabelecimento das condições de normalidade. (Glossário de Defesa Civil, MI, 2013)

2.18 MITIGAÇÃO

É a diminuição ou a limitação dos impactos adversos das ameaças e dos desastres afins. Frequentemente, não é possível prevenir todos os impactos adversos das ameaças, mas é possível diminuir consideravelmente sua escala e severidade mediante diversas estratégias e ações. Como nem sempre é possível evitar por completo os riscos dos desastres e suas consequências, as tarefas preventivas acabam por se transformar em ações mitigatórias (de minimização dos desastres), por essa razão, algumas vezes, os termos prevenção e mitigação (diminuição ou limitação) são usados indistintamente. (Glossário de Defesa Civil, MI, 2013)

2.19 INCÊNDIO

A ação térmica em um incêndio é descrita pelos fluxos de calor radiativo e convectivo. O primeiro é gerado pelas chamas e pela superfície aquecida dos elementos estruturais e de compartimentação. O segundo, pela diferença de densidade entre os gases do ambiente em chamas: os gases quentes são menos densos e tendem a ocupar a atmosfera superior, enquanto os gases frios, de densidade menor, tendem a se movimentar para e a atmosfera inferior do ambiente (SILVA, 2004).

O incêndio é modelado por meio de curvas temperatura-tempo; elas associam a elevação da temperatura em função do tempo de duração do incêndio, permitindo estimar a máxima temperatura dos gases quentes no ambiente em chamas. O incêndio real apresenta três estágios básicos: (a) Ignição, (b) Fase de aquecimento e (c) Fase de resfriamento

(a) Ignição: região que representa o início da inflamação ($t = 0$), com crescimento gradual de temperatura, quase sem influência das características do compartimento (aberturas, material da compartimentação, etc.) e sem risco à vida humana ou ao patrimônio, por colapso estrutural. Esse estágio é também conhecido como *pre-flashover* (PURKISS, 1996) e termina no instante conhecido por *flashover* (instante de inflamação generalizada).

(b) Fase de aquecimento: região caracterizada por uma mudança súbita de crescimento da temperatura. Nesse estágio, todo o material combustível no compartimento entra em combustão; a temperatura dos gases quentes é superior a 300°C e de crescimento veloz (WALTON & THOMAS, 1995) até atingir o pico da curva – a temperatura máxima do incêndio, correspondente a máxima temperatura dos gases do ambiente.

(c) Fase de resfriamento: região que representa a redução gradativa da temperatura dos gases no ambiente, após a completa extinção do material combustível durante a fase de aquecimento (SILVA, 2001).

Deve-se notar que devido à inércia térmica, a temperatura no elemento estrutural continuará a aumentar por alguns minutos durante o período de resfriamento, havendo, portanto, um pequeno atraso no início do resfriamento (PURKISS, 1996).

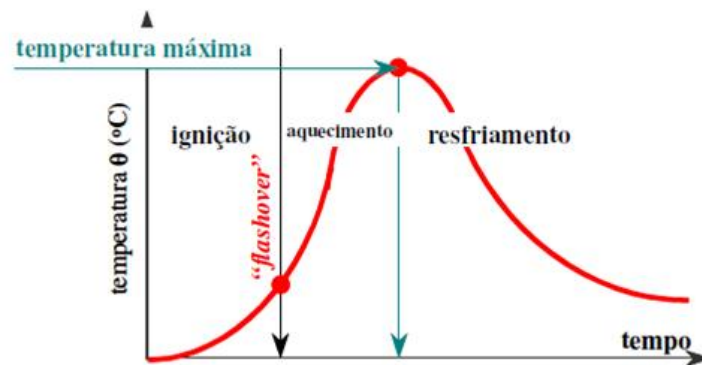


FIG. 2.3 Curva temperatura-tempo de um incêndio real.

(Fonte: Costa & Silva, 2003)

O incêndio-padrão é o modelo de incêndio idealizado para análises experimentais, admitindo-se que a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedeça às curvas padronizadas. Na ausência de dados realísticos, as curvas padronizadas podem ser consideradas como a função temperatura da atmosfera do ambiente compartimentado.

As curvas padronizadas descrevem o incêndio cujo material combustível é composto por celulósicos. Para materiais a base de hidrocarbonetos, a curva “H” – uma abreviação de *hydrocarbon curve* – é a mais citada na literatura técnica. As curvas-padrão possuem apenas o ramo ascendente (Figura 2.4), com a temperatura crescendo em relação ao tempo, independente da influência da carga de incêndio e das propriedades térmicas dos materiais da compartimentação. Portanto, as curvas-padrão não representam uma situação real de incêndio, uma vez que as características do cenário do incêndio podem variar de um compartimento para o outro (COSTA, 2002, COSTA & SILVA, 2003, SILVA 2004); contudo, elas são usadas para facilitar os ensaios em elementos construtivos para avaliar a sua resistência a fogo.

Em busca pela solução do problema, diversos pesquisadores estudaram métodos para associarem a curva-padrão, recomendadas em diversas normas internacionais às curvas mais realísticas. O método mais citado na literatura técnica internacional é o Método do Tempo Equivalente, o qual considera a influência das características térmicas dos elementos de vedação, da ventilação horizontal e vertical, da altura do compartimento e ainda, os coeficientes de ponderação associados ao risco de incêndio e suas consequências e a medidas de proteção (COSTA & SILVA, 2005a, SILVA et al. 2005).

Em face da subjetividade envolvida, o Método do Tempo Equivalente ainda é pouco usado no Brasil, restringindo-se ao Estado de São Paulo ((CB-PMESP, 2004). COSTA & SILVA, 2005a) apresentam uma revisão histórica do método, sua adaptação às normas brasileiras de projeto estrutural e tabelas de uso imediato para facilitar os cálculos.

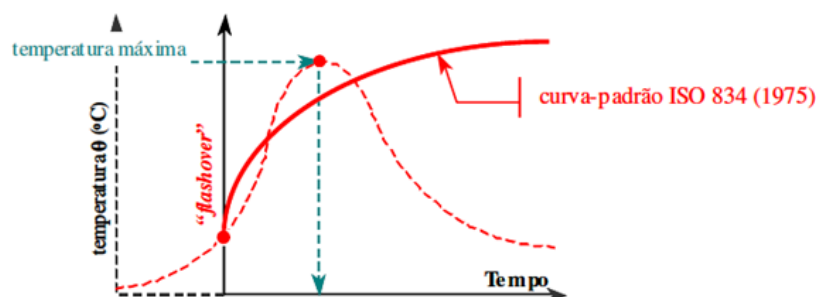


FIG. 2.4 Curva temperatura-tempo do modelo de incêndio-padrão ISO 834 (1975) – adaptada de *Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction*. (Fonte: COSTA & SILVA, 2003)

Com base nas curvas apresentadas, pode-se identificar a elevação acentuada da temperatura após atingir o *flashover* e, conforme se observa na FIG. 2.5, as medidas preventivas desempenham um papel relevante na elevação da temperatura, diminuindo a velocidade desta e limitando as temperaturas alcançadas, o que tende a reduzir as consequências dos danos e prejuízos gerados pelo incêndio.

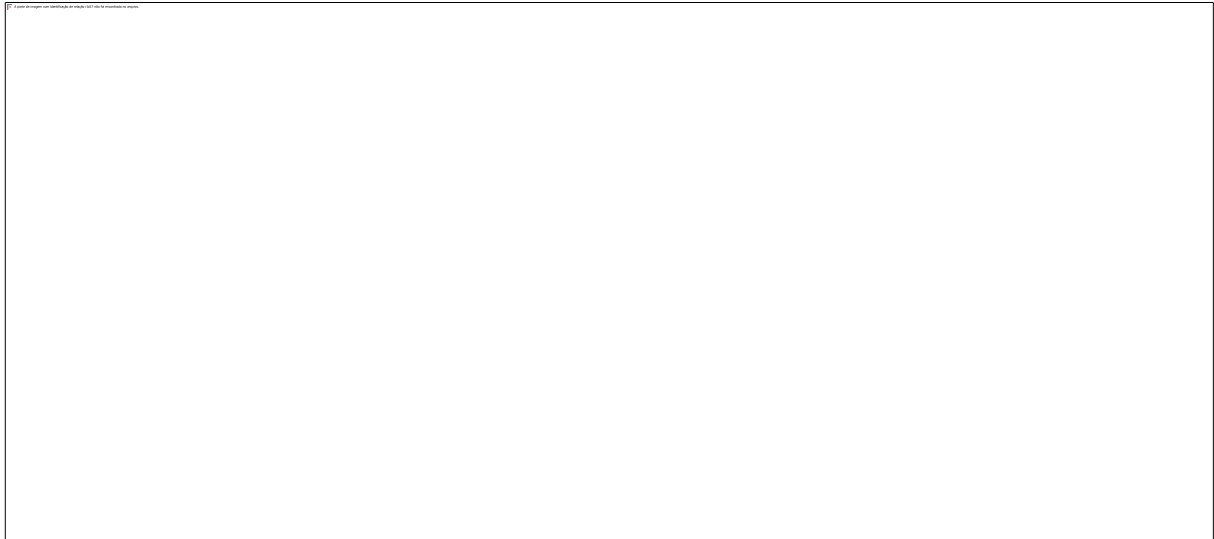


FIG. 2.5 Desempenho dos meios de proteção no comportamento do incêndio real.

(Fonte: COSTA & SILVA, 2003)

Outros países também possuem curvas padronizadas nacionais, para ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos. Em alguns, as curvas padronizadas baseiam-se na ISO 834, por exemplo, a AS 1530 (1994) da Austrália; em outros, as curvas baseiam-se na ASTM E119, por exemplo, a ULC S101 (1989) do Canadá (BUCHANAN (2001)) e a JIS A 1304 (1994) do Japão (PHAN (1996)). A Tabela 2.3 mostra que essas curvas não apresentam diferenças significativas entre si.

TAB, 2.3 Curvas-padrão para incêndio de materiais celulósicos mais utilizadas internacionalmente.



(Fonte: Costa e Silva, 2006)

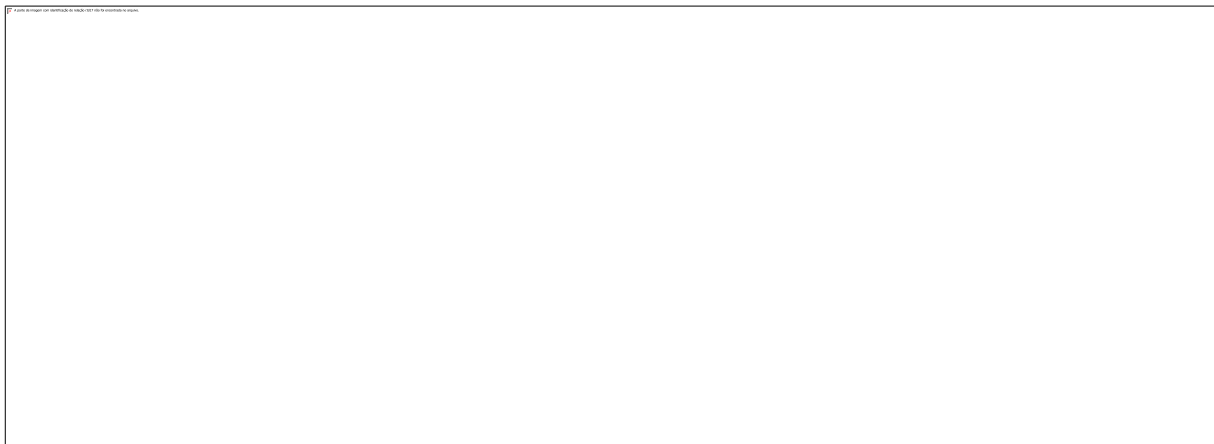


FIG. 2.5 (a) Curvas-padrão para incêndio de materiais celulósicos mais usadas no meio técnico internacional e (b) Curvas de incêndio americanas UL 1709 e ASTM E1529 e a curva européia "H" para materiais hidrocarbonetos. (Fonte: Adaptadas de COSTA, 2002)

A carga incêndio é a soma das energias térmicas possíveis de serem liberadas na combustão completa de todos os materiais combustíveis contidos em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes, divisórias, pisos e tetos. A carga incêndio específica é o valor da carga incêndio dividido pela área de piso do espaço considerado, expresso em MJ/m². Por meio do cálculo da carga incêndio é possível estimar a severidade do incêndio na edificação (IT 15 CB-PMESP, 2004).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada fundamentou-se na escolha de um material radioativo que, submetido à um incêndio, seria dispersado para atmosfera, de maneira a serem evidenciadas doses na população de região densamente povoada na cidade do Rio de Janeiro.

Para a escolha do material foi efetuada uma pesquisa histórica de casos de incêndio em materiais radioativos, sendo encontrados poucos casos e, em sua maioria, evidenciados em incêndios em centrais nucleares.

O Brasil guarda consigo a marca do acidente radiológico ocorrido em setembro de 1987 em Goiânia/GO, que mesmo passados quase trinta anos parece permanecer mantendo a população local receosa de acidentes envolvendo o Cs-137 (VIEIRA, 2015).

O critério de escolha da fonte tem amparo no TECDOC-1344 da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003), que trata da categorização de fontes radioativas e apresenta no seu apêndice II, as fontes em seus relativos usos, atividades e riscos atribuídos. Deste documento foi verificado que o Cs-137 é utilizado na irradiação de sangue, tem atividades entre 440 e 37 TBq, e classe de risco 1, em que se observa a relação $A/D \geq 1000$, onde A é a atividade da fonte e D o potencial de fontes para causar efeitos determinísticos, de modo a esse equipamento se apresentar de maneira satisfatória para as expectativas do presente estudo.

Os irradiadores para bolsas sangue fazem uso da fonte radioativa de Cs-137 para atender diversas necessidades em Saúde, dentre elas a desativação dos linfócitos transfundidos, sendo um dos métodos mais eficazes na prevenção da doença, enxerto versus hospedeiro, associada à transfusão de sangue (DEVH). É considerado equipamento essencial nos casos de serviços de tratamento de hemoderivados que fornecem para Hospitais de Transplante de Órgãos e para o controle de qualidade eficiente em bolsas irradiadas (*Yale University School of Medicine*, 1996).

Em consulta à Comissão Nacional de Energia Nuclear, foi identificado o Instituto Estadual de Hematologia – HEMORIO, como um dos locais que atendam às características interessantes para o estudo, pois encontra-se em região central do município do Rio de Janeiro, com entorno composto por prédios de baixa altura, o que facilita a dispersão atmosférica e, principalmente, por abrigar um irradiador de sangue cuja fonte é o Cs-137.

O Edifício localiza-se na Avenida Frei Caneca na esquina com a Rua Praça da República, região central da cidade do Rio de Janeiro. Possui a Praça da República e o Hospital Souza Aguiar como importantes pontos de referência. Está inserido em uma Área de Preservação do Ambiente Cultural – APAC, de acordo com o Decreto 118883/92; apresentando restrições quanto à ocupação, gabarito de

altura e demolição de edifícios (SMU, 1992). A Figura 3.1 apresenta delineada em vermelho a APAC assim como o lote onde está localizado o HEMORIO (delineado em azul).

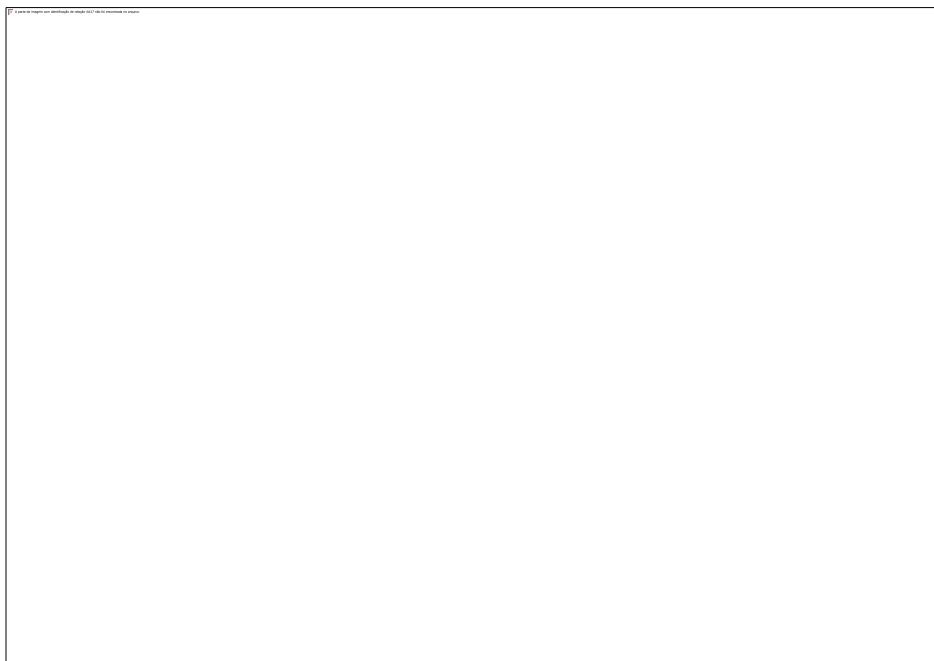


FIG. 3.1 Área de Preservação do Ambiente Cultural – APAC (em vermelho), lote onde está localizado o HEMORIO (em azul). (Fonte: Projeto Hemorrede Sustentável, 2012)

O estudo da dispersão atmosférica do Cs-137, provocada por um incêndio, não se limitou a estudar as causas do evento, mas buscou estudar possíveis consequências, possibilitando a análise de eventos futuros potenciais que justifiquem medidas protetoras imediatas.

Para a simulação de um incêndio, procurando-se aproximar de um incêndio real, é necessário conhecer com detalhes os materiais combustíveis existentes no interior da edificação e assim quantificar a carga incêndio desejada.

Devido à falta de acesso ao interior da edificação e inviabilidade de inventariar os materiais que poderiam queimar, caso o ambiente em que se encontra o irradiador fosse incendiado, a carga incêndio foi calculada por meio da Instrução Técnica de número 15 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (CB/PMESP, 2015) que define um cenário típico para o tipo de edificação e atividade tratada neste trabalho.

Outro fator limitante, pela falta de conhecimento dos ambientes internos da edificação, é o cálculo da compartimentação, fator importante para o conhecimento da evolução do incêndio, meios de propagação, temperatura máxima observada, tempo de extinção e demais aspectos.

Por estes motivos, na ausência de dados que pudessem conferir maior realidade ao trabalho,

as curvas padronizadas foram consideradas como a função temperatura da atmosfera do ambiente compartimentado e assim, por meio das tabelas e gráficos de incêndio-padrão, de modelos idealizados para análises experimentais, admitindo-se que a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedeça às curvas padronizadas, viabilizando conhecer a evolução temporal do incêndio.

Os parâmetros relacionados às características locais da edificação e do local onde se encontra, da fonte e da queima do material foram inseridos no código *HotSpot*, que, como mencionado, apresenta um modelo conservativo para estimar a dose e a concentração de radionuclídeos como resultado da liberação de materiais radioativos (SHIN and KIM 2009; THIESSEN et al, 2009).

O *HotSpot* apresenta opções de dispersões por meio de explosões e queima de radionuclídeos específicos como Urânio, Plutônio e Césio. O presente trabalho foi desenvolvido com base na opção *fogo geral*, uma vez que não se tratava de uma modelagem específica para o incêndio e sim para um radionuclídeo de interesse, o Cs-137.

Por não conhecer o modelo exato do equipamento utilizado e, considerando a possibilidade de troca de aparelhos ao longo do tempo e visando não restringir o estudo especificamente ao HEMORIO, permitindo que sejam analisadas consequências possíveis para qualquer irradiador de sangue que utilize o Cs-137, a atividade da fonte inserida no Código foi de $4,4E+14$ Bq, apresentada no TECDOC-1344, como a normalmente utilizada nos equipamentos desta natureza.

Os valores de velocidade de deposição e fração respirável, de 0,3 cm/s e 5% respectivamente, são padrão do software e levou-se em conta a queima total do material radioativo.

Para melhor entender a influência dos parâmetros variáveis do código, como as informações relativas à queima e meteorológicas, sobre as doses de radiação e sua distribuição geográfica, foi feita uma simulação inicial com os dados de queima apresentados pelo *HotSpot* e as condições meteorológicas (vento) foram alteradas em quatro direções, nas velocidades prevalentes na região central do município do Rio de Janeiro.

A Figura 3.2 apresenta a Rosa dos Ventos com os dados de velocidades predominantes (m/s) e frequência de ocorrência (%) dos ventos; destacando os ventos predominantes Sul – Sudeste durante o ano, com média de velocidade de 6m/s e nas demais direções com 3m/s.

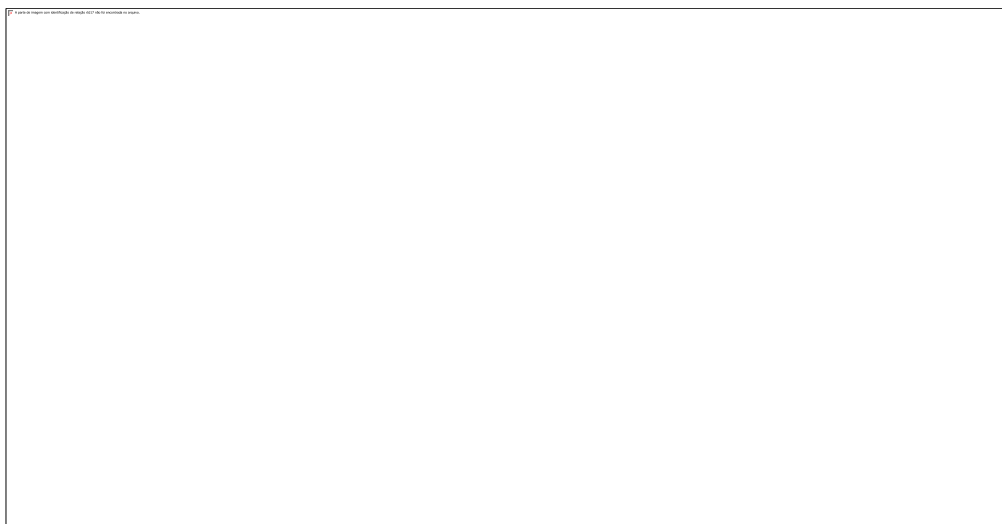


FIG. 3.2 Rosa dos Ventos (velocidades predominantes e frequência de ocorrência) da cidade do Rio de Janeiro. (Fonte: Projeto Hemorrede Sustentável, 2012)

Estas velocidades e direções foram inseridas no software, tendo como dados de saída a distribuição das doses, em sievert (Sv), de acordo com a distância em quilômetros e a área da pluma de dispersão atmosférica, a qual permite estudar a população afetada, uma vez que na configuração do cenário são distribuídos vinte receptores, a 1,5m de altura e distâncias entre 30m e 80Km.

As condições de contorno foram escolhidas com base na RESOLUÇÃO CNEN Nº 027, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2004, onde são descritas as DIRETRIZES BASICAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA, por meio da NORMA CNEN-NN-3.01, sendo verificados os seguintes aspectos:

- 100 mSv Limite de dose em situações de emergência para executar ações para prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas.
- 50 mSv Nível de ação para evacuação de população em situações de emergência.
- 1 mSv Limite anual para público em situação em operação normal.

Deste modo, foi possível extrair dos resultados gerados pelo código três linhas de contorno para as áreas de controle operacional chamadas de interna, média e externa, sendo, a cada uma, atribuído um limite de dose, com as respectivas cores:

TAB. 3.1 Áreas de Controle Operacional.

ÁREAS DE CONTROLE	DOSE (mSv)
INTERNA	100
MÉDIA	50
EXTERNA	1

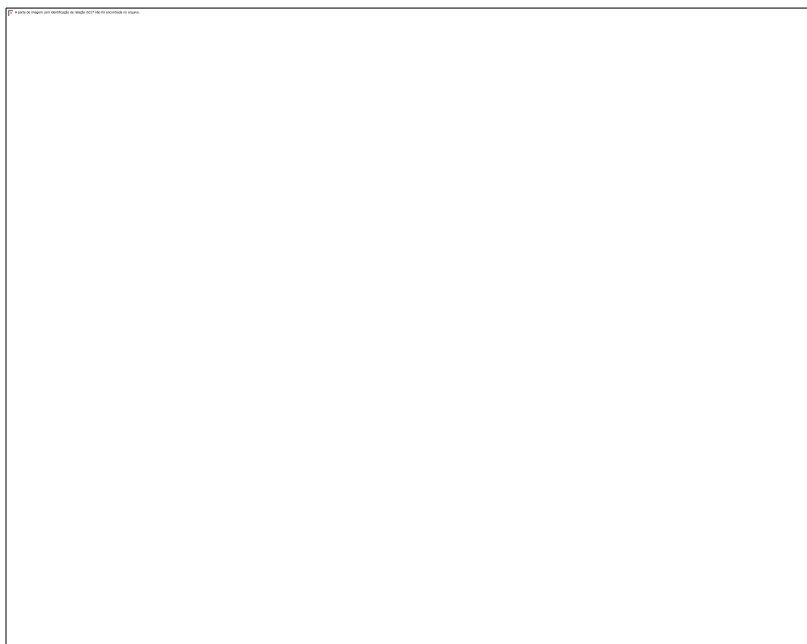
As áreas de controle operacional permitem conhecer a população submetida às doses predefinidas nas condições de contorno multiplicando-se o valor das áreas delimitadas pela densidade demográfica média da população do município tomando-se por base o Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, onde se verifica a menor densidade de 9.794 habitantes/km² na zona sul e a maior 10.185 habitantes/km² na zona norte.

Os dados de saída do código foram tabelados comparativamente, de maneira que sua análise incluisse a influência da direção dos ventos prevalentes da região, sendo feitas simulações com dispersões nas direções norte, sul, leste e oeste.

Para identificar a influência da velocidade do vento na distribuição das doses, fixou-se a direção do vento e as características do incêndio, distribuindo-se as intensidades desde o mínimo aceito pelo código até um valor alto com baixa probabilidade de ocorrência, mantendo-se os valores característicos da região e os agrupando na região identificada como crítica, isto é, entre 0,1 e 1m/s. Para se majorar a quantidade de pessoas afetadas, foi considerada a maior densidade populacional, isto é, a da região norte, o que confere aspecto de estimativa de segurança e caráter conservativo da simulação.

As condições meteorológicas determinam as classes de estabilidade (classes de Pasquill-Guilford), que podem também ser predefinidas pelo HotSpot. Como o objetivo do trabalho é o estudo de um cenário orientado à resposta à emergência, considerou-se situações críticas e factíveis, escolhendo-se as condições meteorológicas possíveis e capazes de apresentar maiores danos à população quando aplicadas ao cenário.

TAB. 3.2 Apresentação das características dos ventos, segundo o HotSpot.



(Fonte: Homann, 2013).

TAB. 3.3 Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A à F (classes de Pasquill-Guilford).

Velocidade do vento (m/s)	Alta insolação no céu	Baixa insolação no céu ou nublado	Noturno
< 2	A	B	F
2 – 3	A	C	E
3 – 4	B	C	D
4 – 6	C	D	D
> 6	C	D	D

(Fonte: Homann, 2013)

Para se verificar a influência do tempo de queima e, conseqüentemente, o volume de material queimado, parâmetros estes sugeridos pelo código, foram adotados os tempos de 2, 4, 24 e 241 min, com volumes de 10, 100 e 1000 galões respectivamente, variando-se as classes de estabilidade, sendo observável variações na distribuição das doses no ambiente.

Com o objetivo de aproximar um cenário realístico em uma situação de incêndio, compatível com as curvas observadas em um incêndio-padrão para materiais celulósicos, material predominante nos

mobiliários e nas divisórias, foi adotado o tempo de 15 minutos, onde se observam temperaturas superiores a 700°C e em que a taxa de calor começa a diminuir e então, com base nessas tabelas e gráficos, foram calculados os parâmetros relativos ao incêndio que alimentaram o código.

Foram realizadas simulações variando a altura da pluma, mantendo-se fixa a velocidade do vento em 0,5m/s, pois foi observada nas demais simulações como sendo a velocidade em que se verificavam as maiores intensidades das doses de radiação. As alturas utilizadas variaram entre a mínima e a máxima aceita pelo código, permitindo analisar sua influência na distribuição de doses de radiação e a fração da população afetada nas condições de contorno definidas no cenário.

As tabelas extraídas das simulações do HotSpot permitiram estabelecer cenários críticos, tanto em relação aos níveis de doses observados, quanto no número de pessoas afetadas, viabilizando a análise de potenciais consequências e orientação à resposta à emergência, sendo possível, utilizando as equações BEIR V e/ou VII, avaliar as probabilidades do desenvolvimento de câncer na população afetada e permitindo que os órgãos de saúde pública estabeleçam medidas que venham a minimizar essas consequências que podem ter impactos catastróficos na economia local no futuro quando se considera tratamentos e indenizações solicitadas por via judicial.

A avaliação de exposições às radiações ionizantes tem sido o objetivo de relatórios publicados por várias organizações internacionais. A grande maioria desses estudos aborda a estimativa de risco de indução de câncer pelo uso da radiação ionizante e foram realizados por meio de dados coletados dos sobreviventes das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki. [BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION VII (BEIR VII), Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase 2. National Academy of Science, Washington, DC, 2006].

O câncer é uma das maiores causas de morbidade e mortalidade do mundo. É bem conhecido e difundido que o câncer possui várias causas e diferentes tipos de carcinogênese são atualmente estudados. Entre alguns dos muitos fatores que podem induzir o câncer estão radiação ionizante e ultravioleta, cigarro, consumo de álcool, bem como agentes químicos, entre outros (BEIRV 1990).

O documento BEIR V (Efeitos Biológicas das Radiações Ionizantes) cita vários estudos que mostram o aumento de casos de leucemia e taxas de incidência de câncer para baixas doses devido a testes de armas e acidentes em usinas nucleares. Tal como ocorre para raios x diagnósticos, estes aumentos foram muito acima do esperado, conforme os estudos de sobreviventes da bomba nuclear.

Para doses absorvidas agudas de 1E-1 Gy ou maiores, o BEIR V deriva um modelo linear quadrático para a estimativa em leucemia e um modelo linear para a estimativa de todos os outros cânceres. Este documento possibilita a obtenção do excesso de risco relativo (ERR) e probabilidade de causa (PC) de detrimento para radiações de baixa Transferência Linear de Energia (LET) (BEIRV

1990).

O relatório *Biological Effects of Ionizing Radiation VII* (BEIR VII, 2006) apresenta os materiais de pesquisa mais atualizados e completos, contemplando estimativas de risco para indução de câncer e efeitos que podem afetar a saúde, resultantes da exposição da radiação ionizante a baixas doses. O BEIR VII proporciona uma profunda análise dos efeitos à saúde humana pela exposição a baixos níveis de radiação ionizante no radiodiagnóstico, abrangendo os que podem ocorrer para radiações ionizantes de baixa transferência linear de energia (*Low Linear Energy Transfer - low-LET*).

Para este trabalho, os modelos usados para estimativa de risco de leucemia foram baseados no BEIR V (BEIR-V 1990) e no BEIR VII (BEIR-VII 2014) que consideram um modelo de risco relativo linear-quadrático. Os dados foram obtidos por ajustes dos dados japoneses de mortalidade por leucemia LSS (CID9 204-207).

Não é simples correlacionar o desenvolvimento de câncer e a exposição à radiação como fenômenos de causa e efeito. Em estudos radioepidemiológicos a exposição à radiação é o fator de maior interesse e epidemiologistas procuram relacionar o risco de doenças (principalmente câncer) a diferentes níveis e padrões de exposição. Embora inconclusivos, os estudos epidemiológicos têm sido de especial importância na avaliação do potencial risco para a saúde humana associado à exposição à radiação ionizante. Desta forma, o conceito de probabilidade de causalidade (PC) foi adotado e desenvolvido como a fração do risco para ocorrência da morbidade.

O risco individual de desenvolvimento de câncer depende não só do sexo e da idade de uma pessoa, mas também de outras características individuais, tais como os antecedentes genéticos e estilo de vida, que são fatores não facilmente quantificáveis. As taxas de câncer estão normalmente disponíveis a partir de dados demográficos tabulados por idade e sexo. Esta situação implica que o cálculo seja baseado nos parâmetros sexo e idade no momento da exposição e qualquer outra característica individual é ignorada.

Com isso, foram calculados os excessos de risco relativos (ERR) e as probabilidades de causa (PC) para toda a população afetada e para ambos os sexos, conforme as equações mencionadas para idades da exposição menores que vinte anos e tempos de exposição abaixo de quinze anos, entre quinze e vinte cinco anos, e acima de vinte e cinco anos, e para idades de exposição superiores a vinte anos, e tempos de exposição menores que vinte e cinco anos, entre vinte e cinco anos e trinta anos, e acima de trinta anos.

A figura 3.3 ilustra a metodologia empregada, desde a identificação do cenário até as orientações aos órgãos de decisão com base nos resultados da simulação e modelagem de consequências, que serão abordadas no próximo capítulo.



FIG 3.3: Resumo da metodologia utilizada

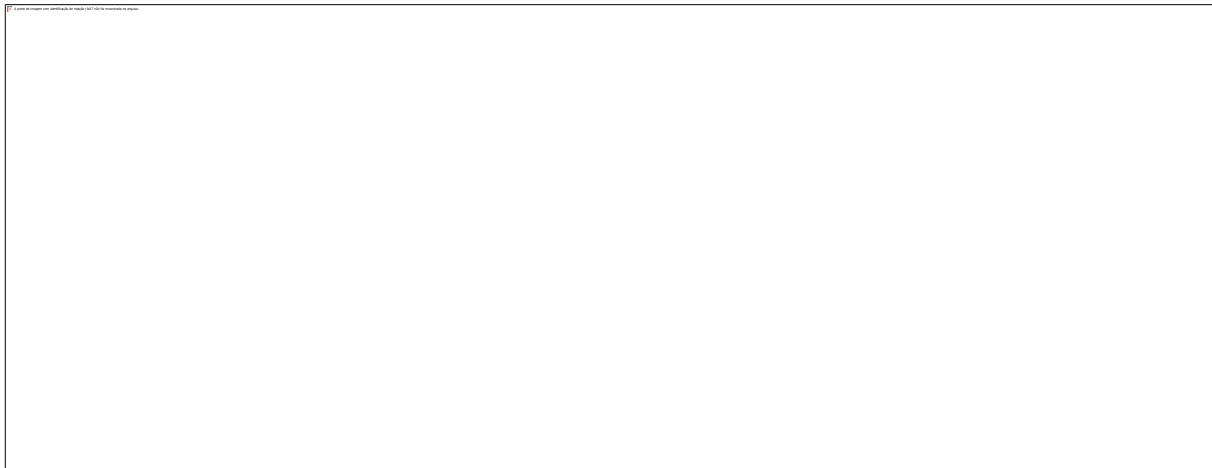
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 HOTSPOT

O código foi alimentado no sentido de serem conhecidos os possíveis cenários, suas variações e consequências, e então os dados de saída foram inseridos em tabelas comparativas que permitissem a análise dos fatores de influencia nas doses e populações afetadas para cada cenário, sendo possível estabelecer situações críticas.

A tabela 4.1 sugere que a variação da direção do vento não interfere na máxima dose, na distância da máxima dose e nas áreas definidas nas condições de contorno, uma vez que os resultados são inalterados quando se mantém a intensidade e variam-se as direções, o que facilmente se entende pela falta de definição de condições topográficas, sendo o terreno tratado como plano. Porém evidencia-se a influência direta da variação da intensidade do vento na distribuição das doses e consequentemente na população afetada, destacando-se que para ventos de sul para norte a multiplicação da densidade demográfica foi correspondente à da zona sul, enquanto nas demais a densidade da zona norte.

TAB 4.1: Variação de doses em função dos ventos característicos da região.

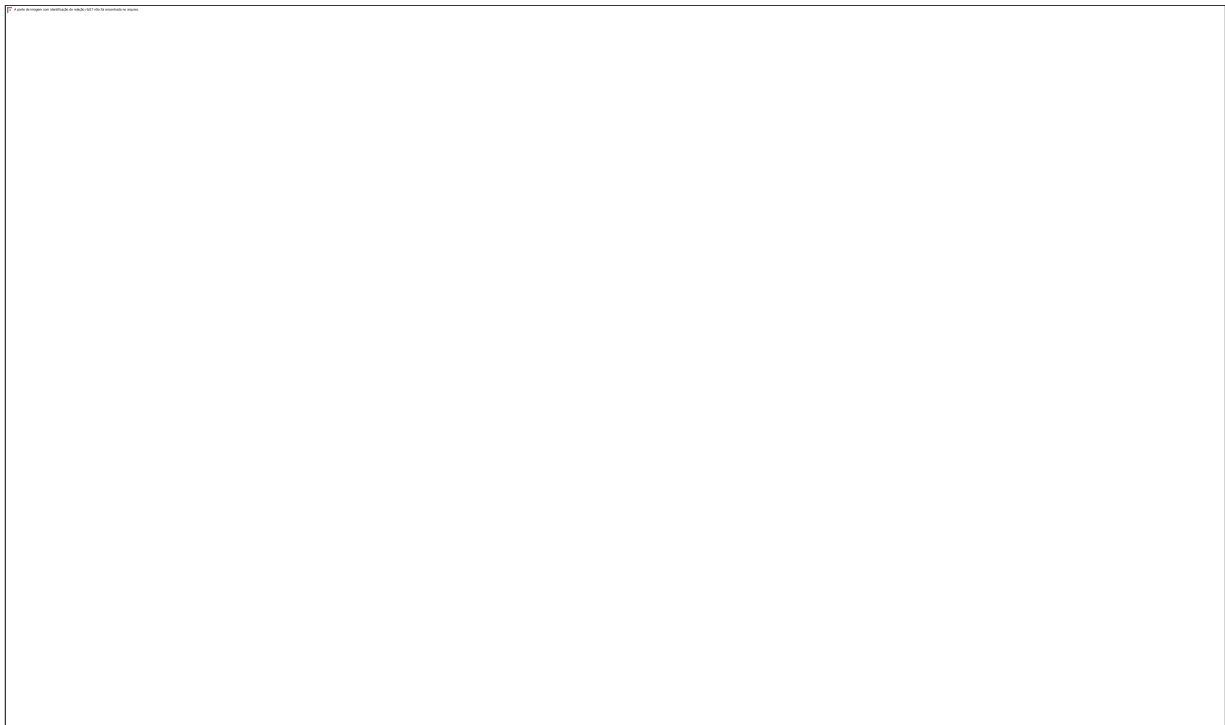
The table content is missing from the page. It is represented by a large empty rectangular box.

Para identificar a possível influência da velocidade do vento na distribuição das doses, fixou-se a direção do vento e as características do incêndio, distribuindo-se as intensidades desde o mínimo aceito pelo código até um valor com baixa probabilidade de ocorrência, mantendo-se os valores característicos da região e agrupando valores na região identificada como crítica, isto é, entre 0,1 e 1 m/s, tanto na intensidade das doses quanto na população afetada considerando a maior densidade

populacional, ou seja, a da região norte com $1,01E+4$ habitantes/ Km^2 .

A análise da tabela 4.2 permite observar que a distribuição da dose em função da intensidade do vento tende a se elevar com a velocidade até 0,5 m/s e após 0,75 m/s, as doses começam a decrescer com o aumento da velocidade do vento. O mesmo comportamento também é verificado no número de afetados e distância da máxima dose nas áreas de controle operacional externas, os quais tem valores máximos na mesma faixa de velocidades. As áreas de controle operacional internas e médias não tiveram os valores estabelecidos para as condições de contorno superadas, levando-se em consideração os parâmetros definidos para o incêndio simulado.

TAB 4.2: Distribuição da dose em função da intensidade do vento.



A figura 4.1(a) permite concluir que há um decréscimo na distância em que se observa a máxima dose (DMD) conforme são aumentadas as velocidades do vento, isto é, as maiores doses, para cada dispersão, se tornam mais próximas da fonte quanto maior a intensidade do vento, o que não significa dizer que quanto maior a intensidade do vento, maior a dose.

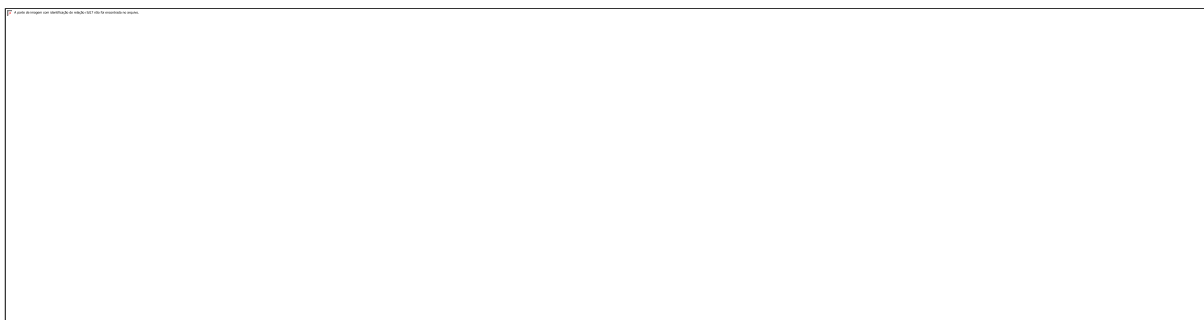


FIG. 4.1 - (a) Variação da máxima distancia de dose em função da velocidade do vento; (b) Variação da dose equivalente total efetiva em função da velocidade do vento e (c) Número de afetados por doses de até 1 mSv em função da velocidade do vento.

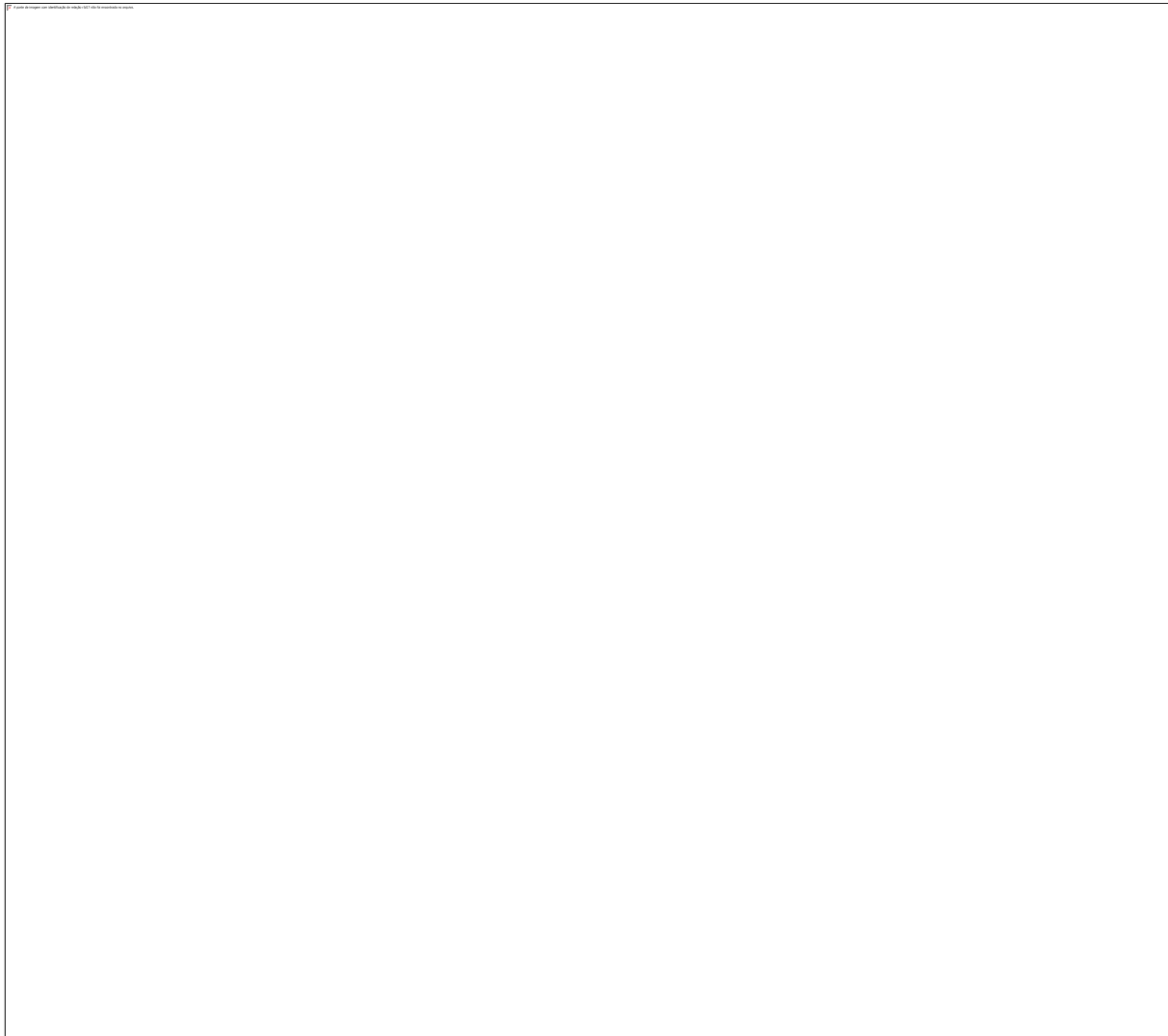
Observa-se na figura 4.1 (b) que entre as velocidades de $2,5E-1$ m/s e 3m/s as doses tendem a se manter em valores mais elevados comparativamente com as demais velocidades características da cidade do Rio de Janeiro. Após os 3m/s há um decréscimo das doses até 6m/s e em seguida uma tendência de elevação para altas velocidades, as quais são pouco frequentes no município.

Analisando as figuras 4.1 (b) e 4.1 (c), observa-se que, embora haja a elevação das doses para ventos de intensidade acima de 6m/s, a população afetada continua em declínio, de modo que número de habitantes afetados tem seus valores máximos a baixas intensidades de vento, em aproximadamente entre $2E-1$ m/s e $6E-1$ m/s, e que após esse valor tende a decrescer, podendo concluir-se que quanto maior a velocidade do vento, menos pessoas receberão doses de radiação.

Para se verificar a influência do tempo de queima e, conseqüentemente, do volume de material queimado, parâmetros estes diretamente informados no código, foram adotados e inseridos na TAB. 4.3 os tempos de 2,4 min, $2,4E+1$ min e $2,4E+2$ min, com volumes de 10, 100 e 1000 galões respectivamente, variando-se os ventos em diferentes classes de estabilidade. Foi possível observar que a distribuição da dose não depende do tempo de queima e volumes queimados, para uma mesma velocidade de vento. Este resultado encontra apoio no fato de que o código foi configurado para computar a queima total do combustível utilizado.

É possível, ainda, verificar que mesmo não havendo alteração dos dados de saída em função da variação do tempo e volume do material queimado, os valores relativos às distâncias de máxima dose (DMD), máximas doses equivalentes totais efetivas (DETE) e o número de habitantes afetados concordam com as tendências registradas nos gráficos elaborados em função da variação da intensidade do vento.

TAB 4.3: Distribuição da dose em função dos tempos e intensidades do vento.



Para se alcançar o tempo de 15 minutos no software, tempo considerado crítico para as ações de resposta ao incêndio, foi necessário o uso de $2,7E+3$ galões de material combustível, com taxa de calor de $2,6E+7$ Cal/s e calor específico de $4,0E+3$ Cal/g, valores estes calculados com base na literatura.

O calor emitido foi estimado segundo a Instrução Técnica N15/2015 (IT 15), do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, onde é possível observar, na atividade de serviços de saúde, uma taxa de liberação de calor de $5E+2$ KW/m², o que equivale a dizer que a liberação de calor se dá em $5E+2$ KJ/s.m². Para inserção de dados no Software foi feita a conversão de unidades, levando em conta que 1KJ equivale a $2,3E-1$ Kcal, chegando-se a um valor de $1,2E+2$ Kcal/s/m².

Tomando-se a taxa de propagação do fogo variando de $2,5E-1$ a $4m^2/s$ (COUTO, 2004), e negligenciando a compartimentação dos ambientes, utilizou-se menor valor, sendo possível

estabelecer as áreas queimadas, a taxa de calor, o calor total e a taxa de queima para o tempo predefinido para a pesquisa conforme a tabela 4.3.

Os valores calculados para área queimada, calor específico, calor total emitido, massa de material queimado e taxa de queima, tomando por base a IT 15, foram inseridos na TAB. 4.4 e usados como parâmetros que se aproximassem de um incêndio real.

TAB 4.4: Valores calculados para a simulação do incêndio.

TEMPO (min)	ÁREA (m ²)	CALOR ESPECÍFICO (cal/s)	CALOR TOTAL EMITIDO (cal)	MASSA DE MATERIAL QUEIMADO (Kg)	TAXA DE QUEIMA (cal/g)
1,5E+1	2,25E+2	2,6E+7	2,4E+10	5,9E+3	4,1E+3

Encontrados os valores que se aproximem de um incêndio real, foram feitas simulações e criada a TAB. 4.5. Pode-se verificar a influência da altura da dispersão atmosférica na distribuição das doses, mantendo-se a velocidade do vento em 0,5 m/s. As alturas de dispersão atmosférica foram inseridas linearmente até 100 m e após esse valor distribuídas por *default* do código até atingir a máxima altura aceita pelo *software*, de modo a surgir evidencia de uma tendência. Verificou-se que as distâncias de máxima dose aumentam com o aumento da altura de dispersão, enquanto as máximas doses apresentam comportamento inverso em relação à temperatura.

A população afetada nas áreas de controle operacional verificada na TAB. 4.5 apresentou a mesma característica para as três condições de contorno, porém com valores distintos, sendo os números máximos de habitantes afetados encontrados nas áreas relativas às alturas de dispersão atmosféricas de 50, 60 e 150m para as áreas interna, média e externa respectivamente.

TAB 4.5: Distribuição da dose em função da altura da dispersão atmosférica.



A TAB. 4.5 também permite verificar que as condições atmosféricas que se referem a menores alturas de dispersão provocam maiores doses próximas à fonte e que as doses tendem a diminuir e se afastar da fonte com o aumento da altura.

Os gráficos da FIG. 4.2 ilustram as tendências de distribuição das doses de radiação em função das alturas de dispersão atmosférica, onde se pode observar que as máximas distâncias de dose tendem a aumentar com a altura (a), diferentemente das doses de radiação, que tendem a diminuir com o aumento da altura (b). As três condições de contorno que delimitam as áreas de controle operacional internas, médias e externas (c) apresentam comportamento semelhante, crescente até atingir seu ponto máximo e decresce até deixar de registrar doses referentes aos limites impostos, porém atingindo números de pessoas afetadas diferentes, de acordo com as áreas apresentadas na distribuição de doses de radiação.

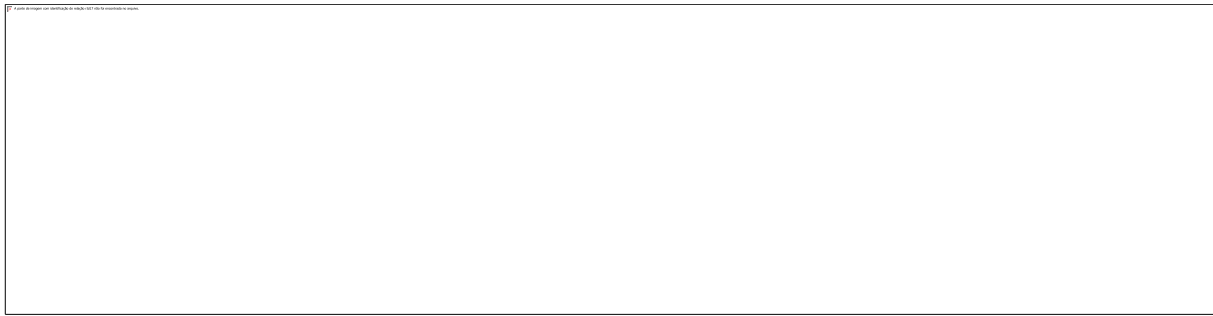


FIG. 4.2 (a) Máxima distância de dose em função da altura da dispersão atmosférica, (b) Dose equivalente total efetiva em função da altura da dispersão atmosférica e (c) Indivíduos afetados nas áreas de controle operacional interna, média e externa em função da altura da dispersão atmosférica.

A TAB. 4.6 mostra os limites de doses para situações diversas, descrevendo, de acordo com as Normas vigentes, os parâmetros aos quais as pessoas podem ser submetidas, servindo de base para definir as condições de contorno para as áreas de controle operacional.

TAB 4.6: Limites de doses para situações diversas.

(Fonte: CNEN, 2011)

Uma vez conhecidos os possíveis cenários desencadeados por um acidente e suas consequências, estimáveis a partir das tabelas e figuras até aqui apresentadas, pode-se, após a ocorrência de um acidente real, estimar os danos relacionados às máximas doses, máximas distâncias de dose, áreas atingidas por cada condição de contorno e a população afetada, podendo-se identificar

informações relevantes para a tomada de decisão, tais como:

- Alcance da pluma com dose de 1mSv em até 27Km, podendo chegar a expor mais 346.000 indivíduos ao limite de doses para público em situação operacional normal;
- Aproximadamente 3.900 indivíduos afetados por doses superiores a 50mSv, considerado o nível de ação para evacuação da população em situação de emergência;
- Cerca de 1.800 indivíduos afetados por doses superiores a 100mSv, considerado o limite de dose em situações de emergência para executar ações para prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas;
- Excesso de Risco Relativo em até 15 indivíduos a 200m da fonte para doses agudas, mostrando a necessidade de preocupação com a população fixa do prédio e com os respondedores à emergências;
- Maior vulnerabilidade para indivíduos que receberem doses com idade inferior a 20 anos para doses agudas, de modo a se identificar com sendo a composição adequada de equipes de resposta compostas por indivíduos de idade mais elevada;
- Excesso de Risco Relativo em até 45 indivíduos para baixas doses, isto é para a população fluminense dentro do raio de alcance da pluma;
- Maior vulnerabilidade para mulheres que receberem baixas doses;

A partir da TAB. 4.5 também é possível conhecer as distâncias em que foram evidenciadas as doses delimitadas nas áreas de controle operacional, permitindo estimar e localizar geograficamente as áreas e a população afetada, conforme se pode observar na FIG. 4.3, onde são mostradas circunferências que delimitam raios das máximas distâncias de dose externa relativas às respectivas alturas de dispersão atmosféricas, facilitando na tomada de decisão pós-desastre ou prevenção, mitigação e preparação para possíveis ocorrências. As marcações são estimadas e fora de escala.



FIG 4.3: Delimitação de raios das máximas distâncias de dose, para limite de controle operacional externo, por altura de dispersão atmosférica.

4.2 BEIR V e VII

Considerando-se que o risco relativo parte da observação de que nem todos os indivíduos têm a mesma probabilidade de sofrer um mesmo dano, mas que para alguns esta probabilidade é maior do que para outros, e que não é possível conhecer as características de uma população, seus hábitos e demais fatores que influenciam na probabilidade de causa para desenvolvimento de câncer, foi considerado o excesso de risco relativo (leucemia), tomando-se por base o acréscimo de fator de risco para a população, isto é, a dose de radiação gerada pela queima com liberação do Cs-137.

As análises estatísticas e tratamento dos dados foram feitos baseados nos documentos BEIR V, para doses absorvidas agudas de $1E-1$ Gy ou maiores, e BEIR VII, contemplando estimativas de risco para indução de câncer e efeitos que podem afetar a saúde, resultantes da exposição da radiação ionizante a baixas doses.

As tabelas extraídas do HotSpot permitiram conhecer informações relativas as distâncias das doses referentes aos limites de doses das áreas de controle operacional e assim analisar, conforme

FIG. 4.4, por meio do BEIR V (gráficos de índice 1) o excesso de risco relativo em função da distância no alcance da pluma radioativa para doses agudas e do BEIR VII (gráficos de índice 2) para baixas doses.

Comparando-se as figuras 4.4 A1, B1, C1, D1 e E1, com relação ao excesso de risco relativo (ERR) em função da distância, observa-se o seu aumento até os 0,2 Km, isto é, mais próximo da fonte, e em seguida o decréscimo exponencial com o aumento da distância, ou seja, quanto mais afastado da fonte, menor o ERR, como era de se esperar e garante consistência aos cálculos. Observa-se também que os maiores excessos de risco relativos encontram-se na população com idade menor ou igual a 20 anos no momento da exposição e tempo desde a exposição menor ou igual a 15 anos e que esses valores de ERR vão diminuindo conforme o aumento da idade na ocasião da exposição e o tempo de exposição, aproximando-se do zero a uma distância de 1 Km.

Nas figuras A2, B2, C2, D2 e E2, pode-se observar que, para baixas doses, as distâncias relativas ao cálculo de excesso de risco relativo são maiores, chegando aos 10 Km, que os maiores ERR concentram-se na população feminina e mantêm valores próximos, com baixa dispersão, independentemente da idade na exposição ou do tempo desde a exposição e que esses riscos alcançam distâncias mais elevadas se comparadas às doses agudas (das figuras A1, B1, C1, D1 e E1), as quais atingem baixos valores próximo à 1 Km.

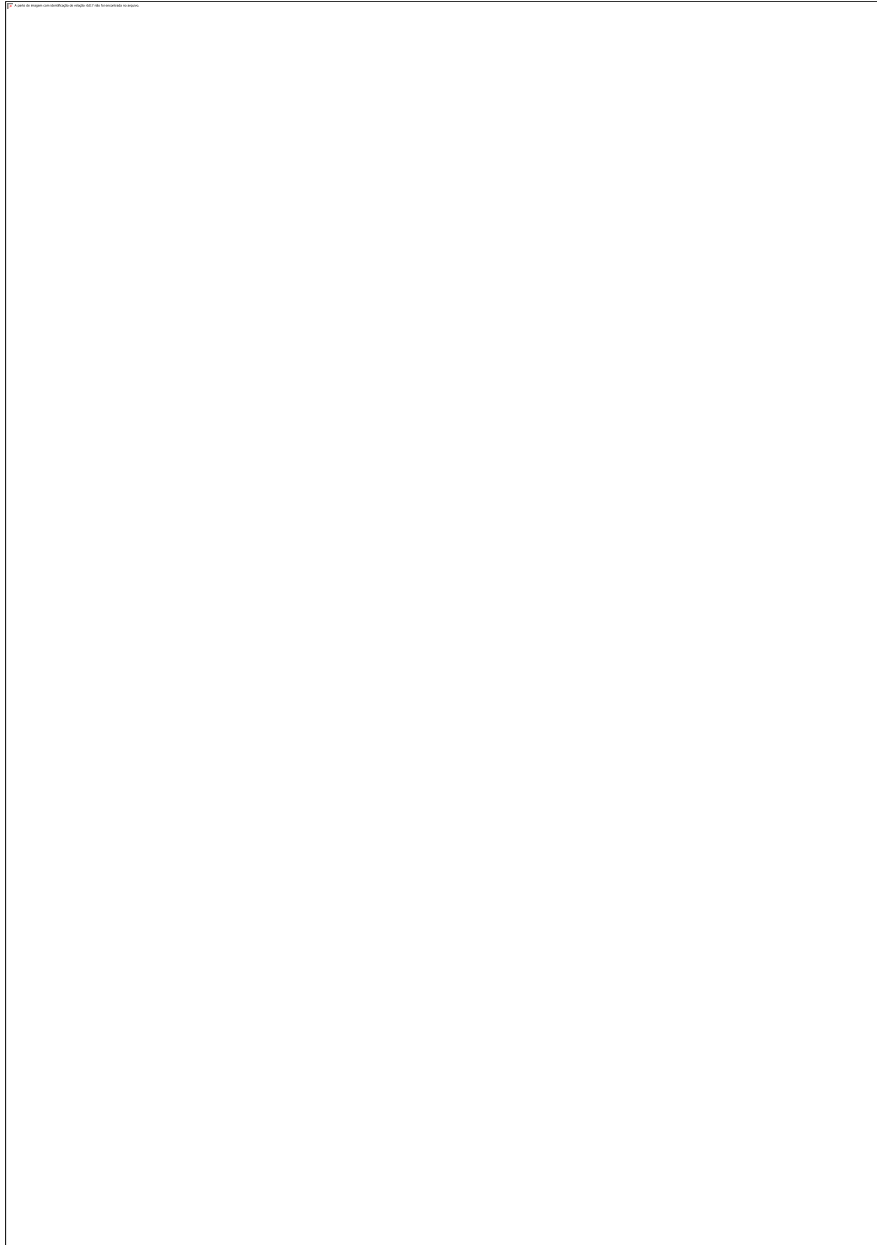


FIG. 4.4 Relação entre o excesso de risco relativo e a distância de máxima dose para homens e mulheres, tomando por base as variáveis a = Idade na exposição, T = tempo desde a exposição e para a radiação gama do Césio 137 e análise através do BEIR V ou VII: (A1) $a \leq 20$, $T \leq 15$ e BEIR V, (A2) $a \leq 20$, $T \leq 15$ e BEIR VII, (B1) $a \leq 20$, $15 < T \leq 25$ e BEIR V, (B2) $a \leq 20$, $15 < T \leq 25$ e BEIR VII, (C1) $a \leq 20$, $T > 25$ e BEIR V, (C2) $a \leq 20$, $T > 25$ e BEIR VII, (D1) $a > 20$, $T \leq 25$ e BEIR V, (D2) $a > 20$, $T \leq 25$ e BEIR VII, (E1) $a > 20$, $25 < T \leq 30$ e BEIR V, (E2) $a > 20$, $25 < T \leq 30$ e BEIR VII.

Os gráficos apresentados na FIG. 4.4 permitem também estudos para a redução de risco absoluto e análises estatísticas de números necessários a tratar, evitando-se o tratamento de toda a população

e facilitando a triagem dos afetados além de servir de apoio à tomada de decisão, uma vez que lista possíveis cenários que podem ser comparados em uma situação de emergência real futura, bem como investigações de relação causal das eventuais enfermidades que afetem a população exposta.

4.3 APOIO À TOMADA DE DECISÃO

As análises feitas por meio do Código HotSpot, dos *Reports* BEIR V (1990) e BEIR VII (2014), permitem apoiar os órgãos de resposta nas tomadas de decisão, não apenas nas ações de resposta, como também nas ações de prevenção, mitigação e preparação.

4.3.1 PREVENÇÃO

As ações de prevenção aos desastres oriundos da queima do Cs-137 em irradiadores de sangue podem se basear na elevada necessidade da proteção da fonte, uma vez que as consequências de sua exposição descritas no presente trabalho mostram que o número de indivíduos afetados e as doses podem atingir números expressivos.

É necessária a correta gestão da segurança patrimonial de modo aos acessos serem controlados, permitindo-se apenas que pessoas devidamente identificadas tenham acesso ao equipamento, pois, embora o mesmo disponha de dispositivos de proteção, o histórico de casos terrorismo e ação humana para fins bélicos no planeta mostra a importância do controle de fontes de radiação.

Ainda considerando a possibilidade de violação proposital da fonte e a necessidade de segurança patrimonial adequada, os sistemas de monitoramento por imagens podem ser considerados como uma boa opção de melhoria nos padrões de segurança atuais, visto que podem ser verificados os acessos das pessoas no interior do ambiente em que se encontra o equipamento, suas devidas autorizações para manuseio e condições de operação e manutenção da fonte.

Segundo o historiador Leandro Carvalho "Com o desenvolvimento da ciência e tecnologia no século XX, as ações terroristas passaram a ter um maior alcance e poder, através de conexões globais sofisticadas, uso de tecnologia bélica de alto poder destrutivo, redes de comunicação (internet) etc".

A limitação de acesso à fonte deve se estender às manutenções corretivas e preventivas do equipamento, uma vez que a legislação permite que empresas terceirizadas as façam e que esses profissionais não necessariamente frequentemos hospitais que possuam irradiadores de sangue.

Considerando que a blindagem pode ser violada por ocasião de um evento adverso, como por exemplo um incêndio, é importante que as medidas de prevenção contra incêndio e pânico previstas no

Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico (COSCIP) do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ) sejam tomadas e até mesmo majoradas.

Segundo (SILVA, 2001), se as medidas de proteção ativa forem eficientes, o fogo é extinto rapidamente, isto é, antes de atingir *flashover* e, portanto, não há necessidade de verificação estrutural. Essa informação mostra a importância da utilização adequada das medidas preventivas em não permitir que sejam atingidas elevadas temperaturas, pois, de acordo com (PURKISS, 1996) em incêndio compartimentado, estima-se temperaturas máximas maiores que 1000 °C.

Essas medidas estão ligadas à orientação prévia dos usuários da edificação quanto às rotas de evacuação, medidas de prevenção a incêndios, operação de equipamentos extintores e sinalização de emergência, bem como aos dispositivos fixos e portáteis contra incêndio e pânico.

Os dispositivos fixos e portáteis são compostos por escadas enclausuradas, que impedem o contato dos usuários da edificação com a fumaça do incêndio, canalização preventiva, chuveiros automáticos, detecção e alarme, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, aparelhos extintores, e demais dispositivos que constarem no Laudo de Exigências emitido pelo CBMERJ da respectiva edificação.

Conforme descrito no presente trabalho, o tempo de extinção do incêndio e, conseqüentemente, as condições que permitem a violação da blindagem da fonte, causam grande preocupação, mostrando que o incêndio deve ser controlado rapidamente, de modo a evitar que o incêndio venha a gerar uma emergência radiológica ou mesmo um desastre.

Estima-se que a confiabilidade dos meios de proteção passiva, com a presença de *sprinklers*, seja de 99% no combate de incêndios (BURGESS, 2005). Dados históricos indicam que o *flashover* não ocorre na presença de *sprinklers*, quando bem dimensionados, devidamente instalados e com manutenção eficiente (GEWAIN et al, 2003).

Além de métodos de extinção automáticos que fazem uso de água como agente extintor, existem métodos que fazem uso de gases inertes que podem ser úteis na extinção de incêndios em materiais radioativos, uma vez que não há a dispersão hídrica e conseqüente carreamento de radionuclídeos para os cursos hídricos. Porém destaca-se a escassez de referências bibliográficas e estudos relacionados ao uso desses dispositivos que fundamentem o uso amplo em produtos perigosos, inclusive materiais radioativos.

Para que a extinção seja realizada em tempo favorável à preservação de vidas e bens são necessárias medidas de manutenção preventiva e corretiva dos dispositivos e o fiel cumprimento da legislação vigente, a qual cabe inclusive a análise mais profunda de especialistas frente às conseqüências aqui mostradas, garantindo sua eficiência.

Existem também documentos que podem ser elaborados de maneira preventiva pelos diversos órgãos públicos e privados que podem auxiliar na prevenção e reduzir as consequências do desastre tais como planos de contingências, planos de emprego, planos de operações, mapas de risco, programas de prevenção de riscos ambientais, e protocolos de procedimentos operacionais padrão.

4.3.2 MITIGAÇÃO

As ações de mitigação visam reduzir as consequências dos desastres, uma vez que o evento não tenha sido impedido. Por este motivo, com base nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.5 e figura 4.5, é possível estimar as doses e os públicos afetados nos possíveis casos de incêndio e consequente dispersão atmosférica de radionuclídeos, bem como o comportamento da dispersão em função da velocidade do vento e altura da pluma.

Uma vez que o tempo de extinção do incêndio, identificação da fonte, da dispersão atmosférica e verificação das doses podem ser elevados e ações de evacuação da população podem não virem a ser tomadas em tempo hábil, por diversos motivos, os órgãos de resposta podem verificar as condições meteorológicas e as circunstâncias em que se deram o desastre por meio das simulações realizadas previamente, sendo tabulados dados que podem servir de base na tomada de decisão, tais como relativas distâncias em que se verificaram as doses, máximas doses e a população afetada, tomando-se medidas mais eficientes na triagem seletiva e outras ações de prevenção.

É possível observar também que a altura da pluma tem grande influência nos danos e prejuízos causados à população, cabendo uma avaliação de especialistas quanto à altura adequada para a instalação de equipamentos irradiadores de sangue, de modo a minimizar as consequências indesejadas já mencionadas.

Considerando-se também o afetamento das populações a doses baixas e doses agudas, é possível estabelecer intervenções médicas que reduzam os riscos de evolução de quadros clínicos que elevem o risco de morbidade nessas populações.

4.3.3 PREPARAÇÃO

As medidas de preparação podem estar ligadas à operacionalização das medidas preventivas como capacitação das equipes de resposta, usuários da edificação e Comissão Interna de Prevenção de Acidentes.

Os diversos planos descritos na prevenção terão maior utilidade e resultados mais efetivos quando

embasarem simulados operacionais, multidisciplinares e interagências, permitindo serem conhecidos os pontos fortes e fracos de cada ator, garantindo a possibilidade de correto emprego de recursos e sucesso nas operações.

Cabe destacar que a correta e prévia organização da cadeia de comando, discussões quanto às medidas de coordenação das operações e da logística, em apoio às operações são muito importantes e precisam ser atualizadas frequentemente.

A definição de um sistema de comando de incidentes único a ser utilizado e testado por todas as agências que podem ser integradas em uma operação de resposta é fundamental para que não sejam observadas dificuldades de comunicação, de definição de responsabilidades, de estabelecimento de lideranças, de integração, de fluxos de informação e emprego de recursos.

Nos Estados Unidos da América, desde 2003, é empregado um sistema de comando de incidentes conhecido como *Incident Command System – ICS*, cujo sucesso tem motivado a adoção das metodologias por vários países, incluindo o Brasil, e tem por finalidade:

- utilizar recursos de gerenciamento incluindo terminologia comum e estrutura organizacional modular;
- enfatizar o planejamento ativo por meio do uso de por objetivos e plano de ação de incidentes;
- apoiar os socorristas respondedores por meio do gerenciamento efetivo de informações;
- utilizar os princípios de cadeia de comando, unidade de comando e transferência de comando;
- assegurar a utilização plena dos recursos mantendo um alcance de controle gerenciável, estabelecendo instalações pré-designadas, implementando práticas de gerenciamento de recursos e comunicações integradas.

4.3.4 RESPOSTA

As ações de resposta se iniciam imediatamente à eclosão do incêndio e vão até a reabilitação do cenário, ensejando o devido conhecimento dos riscos por parte de todos os órgãos, das ações de prevenção, mitigação, preparação e o restabelecimento das condições de normalidade.

Outro fator importante a ser destacado para os órgãos de resposta está ligado ao uso adequado de equipamentos de proteção individual, uma vez que são observadas doses capazes de provocar danos aos respondedores e equipes de assistência às vítimas.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul publicou os Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica, onde descreve que certos equipamentos e materiais devem ser levados em

consideração para proteger o indivíduo durante sua atuação em incêndios envolvendo materiais radioativos, tais como:

- monitores de radiação, dosímetros individuais e canetas dosimétricas;
- indumentária específica;
- agentes extintores especiais, em função das características físico-químicas dos materiais radioativos;
- máscaras autônomas.

Destaca ainda que nesses casos, as precauções contra a radiação, definidas para as condições normais de trabalho, já não são suficientes. Consequentemente, durante a formação desse pessoal, será necessário:

- insistir sobre o caráter específico e insidioso do perigo radioativo e, principalmente, sobre o fato de que o homem, na ausência de um equipamento de detecção, “não sabe” se está ou não em presença de radiação ionizante;
- frisar toda a importância da detecção e da dosimetria;
- especificar a diferença entre irradiação externa e contaminação;
- explicar porque o princípio de “limitação de dose” definido para as condições normais de trabalho pode não ser aplicável em caso de sinistro;
- informar o Corpo de Bombeiros sobre os efeitos biológicos associados a altas doses de radiação ionizante;
- enfatizar o problema primordial da contaminação durante a intervenção, bem como as técnicas de descontaminação;
- destacar que cada indivíduo deve aceitar voluntariamente os riscos aos quais pode ser exposto.

Considerando ainda que por, em sua fase inicial, não ser possível identificar a ameaça radiológica e sim apenas a ocorrência de um incêndio, os profissionais de primeira resposta, tendem a ser do Corpo de Bombeiros e precisam estar equipados corretamente e ser conhecedores das medidas adequadas quando da identificação de uma ameaça desta natureza.

Os objetivos da resposta inicial são os seguintes:

- Rápida evacuação do prédio;
- Rápida extinção do incêndio, protegendo vidas e bens;
- Aplicar com prontidão todas as medidas razoáveis para proteger a população, minimizando assim os efeitos radiológicos e não radiológicos (ex. psicológicos) na saúde;
- Proteger o pessoal de emergência durante as operações de resposta;
- Recolher e proteger a informação que possa ajudar a lidar com as questões de saúde, de segurança pública e a impedir que emergências semelhantes voltem a ocorrer no futuro;
- Criar e manter a confiança da população;
- Estabelecer uma base para uma ação de resposta ampliada.

4 CONCLUSÃO

Um cenário de incêndio envolvendo material radioativo pode provocar danos, não apenas às pessoas que estejam próximas à fonte, mas também à população que venha a ser submetida à pluma que é determinada em grande extensão pela dispersão atmosférica que sofre em função das condições climáticas representadas pelas classes de estabilidade de Pasquill.

Por não ter sido possível o acesso ao interior da instalação modelo para este trabalho, foi feita a modelagem do incêndio por meio das curvas padrão encontradas na literatura, com o objetivo de aproximar ao máximo as condições reais de um incêndio no local de interesse, aumentando, deste modo, a efetividade do estudo pela observação das temperaturas e tempos críticos em um evento com capacidade de se tornar um evento radiológico.

Os dados da fonte de radiação, do incêndio e das condições meteorológicas foram introduzidos no código *HotSpot Health Physics 3.0.3* cujas informações resultantes das distribuições das doses pela dispersão atmosférica, com as respectivas intensidades e distâncias, permitiu verificar as tendências nessas distribuições a partir dos fatores de influência como velocidade do vento e altura da pluma, que permitiram projetar as possíveis consequências na população. Com base nas equações dos modelos BEIR V e VII, cuja escolha do modelo é dependente das doses de radiação, a indução à leucemia pelo incremento de dose na população pode ser estimada, facilitando estabelecer critérios de evacuação, triagem e tratamento dos indivíduos do público potencialmente expostos à radiação. Esta abordagem do problema de estudo é prospectiva e não tem relação imediata com a resposta à emergência em tempo real, sendo de fundamental importância para se caracterizar e modelar consequências para estudos epidemiológicos de seguimento da população, principalmente para casos novos de leucemia.

Estudos envolvendo plataformas estanques de forma integrada representam uma tendência moderna de convergência de capacidades, sendo indicada pelos autores como metodologia de convergência, sendo ainda raros os trabalhos encontrados com este mote na literatura especializada.

O conhecimento das possíveis consequências de um desastre provocado pelo incêndio em um irradiador de sangue permite que os órgãos de resposta possam elaborar procedimentos de trabalho integrados, verificando as melhores práticas, procedimentos, equipamentos e técnicas capazes de proteger a população afetada e o meio ambiente e, sobretudo, o apoio aos órgãos de controle de doenças e estudos epidemiológicos na projeção de novos casos de doenças como a leucemia que podem ter conexão com o fato.

Adicionalmente, em caráter de resumo sobre alguns procedimentos que podem auxiliar a redução de riscos de desastres envolvendo incêndios em materiais radioativos, pode-se listar:

- a) Conhecimento e identificação prévia dos riscos;
- b) Controle de acesso à fonte;
- c) Capacitação específica de profissionais que habitem edificações que possuam irradiadores, mesmo que suas atividades não sejam diretamente relacionadas aos mesmos, quanto às medidas preventivas;
- d) Uso de medidas de orientação de evacuação de público;
- e) Utilização de dispositivos fixos e portáteis de combate a incêndios para primeira resposta, evitando-se atingir o *flashover*;
- f) Revisão de legislação relativa à prevenção e combate a incêndios, tratando especificamente materiais radioativos;
- g) Criação de Planos Operacionais padrão para operações integradas nas ações de combate a incêndios em materiais radioativos;
- h) Elaboração de planos de contingências específicos para a ameaça de incêndios em material radioativos; e
- i) Realização de simulados multiagências.

A leucemia foi utilizada como morbidade de referência. Entretanto, há equações para outros tipos de câncer que podem ser utilizadas para previsão do risco inclusive em sobreposição.

Esta abordagem não é simples, uma vez que projeta consequências sobre diversos setores da administração pública como a Saúde e Economia, que por exemplo, terão melhores condições de prever necessidades orçamentárias para atender possíveis demandas em termos de tratamento e prováveis indenizações respectivamente, provenientes de efeitos primários e secundários.

Essas são ideias que podem orientar futuros trabalhos envolvendo a modelagem de consequências em eventos relacionando incêndio e material radioativo, podendo ser úteis para o desenvolvimento de metodologias mais complexas sobre o enfrentamento desta classe de problemas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AbcMed. **Leucemias: o que são? Quais os tipos? Como é diagnosticada e tratada?** URL: <<http://www.abc.med.br/?act=search&q=causa+de+leucemia>>. Acessado em 20 de Junho de 2016.

AGENCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL- EPA. **Declaração Universal dos Direitos dos Animais.** UNESCO. 1978.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test methods for fire tests of building construction and materials.** ASTM E119. Philadelphia: ASTM, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações.** NBR 14432. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

AUTORIDADE NACIONAL DE PROTECÇÃO CIVIL-ANPC. **Manual de Intervenção em Emergências Radiológicas.** Cadernos Técnicos. Procif. 8. Carnaxide, Portugal. 2009.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Análise Energética e Dados Agregados.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética-EPE. 2013.

BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION V (BEIR V). **National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation.**Natl Acad. Press. Washington, DC. 1990.

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.**Natl Acad. Press. Washington, DC. 2014.

BIRAL, Antonio Renato. **Radiações ionizantes pra médicos, físicos e leigos.** Florianópolis, Insular, 2002.

BUCHANAN, A. H.. **Structural for design fire safety.** Chichester (U.K.): John Wiley & sons Ltd., 2001.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.** Norma CNEN-NN-3.01:2011. Rio de Janeiro: CNEN. Setembro de 2011.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica.** Posição Regulatória 3.01/002:2011. Rio de Janeiro: CNEN. 2011.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Medidas de Proteção e Critérios de Intervenção em Situações de Emergência.** Posição Regulatória 3.01/006:2011. Rio de Janeiro: CNEN. 2011.

CORPO DE BOMBEIROS – POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CB-PMESP). Segurança estrutural nas edificações – **resistência ao fogo dos elementos de construção.** Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros. IT 08:04. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2004.

CORPO DE BOMBEIROS – POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CB-PMESP). **Carga de Incêndio nas Edificações e Áreas de Risco.** Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros. IT 14:10. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2004.

CORPO DE BOMBEIROS – POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CB-PMESP). **Controle de Fumaça.** Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros. IT 15:04. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2004.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (CBMERJ). **Código de Prevenção Contra Incêndio e Pânico.** Rio de Janeiro: Secretaria de Estado de Defesa Civil, 2000.

COSTA, C. N.. **Estruturas de concreto em situação de incêndio.** São Paulo: PEF-EPUSP, 2002. [Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil – Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo]

COSTA, C. N.; SILVA, V. P.. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de**

incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais. In: V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. Anais. São Paulo: EPUSP, 2003.

COSTA, C. N; SILVA, V. P.. **O método do tempo equivalente para o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON, Olinda, 2005a.

COSTA, C. N; SILVA, V. P.. **A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio.** In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON, Olinda, 2005b.

COSTA, C. N; SILVA, V. P.. **Recomendações para o dimensionamento de elementos de concreto à flexão simples em situação de incêndio.** In: VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. Anais. EPUSP, São Paulo, 2006.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. **O fenômeno do lascamento ("spalling") nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio - uma revisão crítica.** In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

COSTA, J. M. **Sistema de Defesa Civil do Estado de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Planejamento e Gestão em Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2005.

DRYSDALE, D.. **An introduction to fire dynamics.** 2nd Ed. Chichester (U.K.): John Wiley & sons, 1999.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY –EPA. **Protection Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents.** Federal Guidance Report. Draft for Interim Use and Public Comment. USA. 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Eurocode 1: actions on structures - part 1.2: general actions – actions on structures exposed to fire.** ENV 1991-1-2. Brussels: CEN, 2002.

FISCHBACH, M. A., Bluestone, J. A. e Lim, W. A.. **Cell-based therapeutics: The next pillar of medicine**, *Science Translational Medicine*, 2013.

GARÓFOLO, Adriana, et al. **Nutrição e Metabolismo**, Departamento de Pediatria, Universidade Federal de São Paulo, Escola Paulista de Medicina, São Paulo, SP, 2004.

GIFFORD, F. A., Jr. **Atmospheric Dispersion Models for Environmental Pollution Applications, Lectures on Air Pollution and Environment Impact Analyses**, pp. 3558. American Meteorological Society, Boston, MA, 1975.

GREEN, M. **Fire safety engineering guidance - level 1 (Working Draft – Last update in 16.08.2001)**. London: The Institution of Structural Engineers, 2001. Disponível em: <<http://www.istructe.org.uk/technical/>> Acessado em 30 de abril de 2016.

GUIMARÃES, C. A., & Lipp, M. E. N.. **Um olhar sobre o cuidador de pacientes oncológicos recebendo cuidados paliativos**. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, SP, Brasil. 2012.

HAMERSCHLAK, Nelson. **Leucemia: fatores prognósticos e genética**. *Jornal de Pediatria*- vol. 84, nº 4. São Paulo-SP. P. 52- 57. 2008.

HOMANN, Steven G. **HotSpotHealth Physics Codes Version 2.07 User's Guide**. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA. 2009.

HOMANN, Steven G. **HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide**. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA–IBGE. Censo 2010. **População residente, total, urbana total e urbana na sede municipal, em números absolutos e relativos, com indicação da área total e densidade demográfica, segundo os municípios –Rio de Janeiro – 2010**. Tabela 2.1.19. IBGE; 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER-INCA. DA SILVA J. A. G.. **Incidência de Câncer no Brasil**. Ministério da Saúde. Rio de Janeiro. RJ. 2014.

INSTITUTO ESTADUAL DE HEMATOLOGIA DO RIO DE JANEIRO – HEMORIO. **Projeto de Adequação do Hemocentro Público. Avaliação Pós-Ocupação, Diagnóstico Energético e Etiquetagem do Nível de Eficiência Energética**. Brasília, 2012.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY–IAEA. **Categorization of Radioactive Sources**. IAEA –TECDOC –1344. 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY–IAEA. **Methods for Estimating the Probability of Cancer from Occupation Radiation Exposure**. TECDOC –870. 1996.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY–IAEA. **Categorization of radioactive sources**. TECDOC –1344. 2003.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION–ICRP. **Annals of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 30, Part 1, Volume 2, No. 3/4, Pergamon Press. New York, USA. 1981.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION –ICRP. **Annals of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 60, p.209. The International Commission on Radiological Protection. Oxford, UK. 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION–ICRP. **Annals of the International Commission on Radiological Protection**. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing**. ISO 834. Geneva: ISO/TC. 1990.

JEONG, H. J., HWANG, W. T., EUN, H. K. **Radiological risk assessment for an urban area:**

Focusing on an air contamination event.Annals of Nuclear Energy.2010.

KNOLL, Glenn F.. **Radiation Detection and Measurement.** 3ed. John Wiley & Sons, Inc. 1999.

LAWRENCE WEBSTER FORREST (LWF). **Fire resistance testing.** LWF Bulletin ARC06. London: Lawrence Webster Forrest Ltd., 2000.Disponível em: <<http://www.fireengineeringuk.co.uk/documents/Arc%206.pdf>>. Acessado em 12 de abril de 2016.

LEAL, C. H. S. FILHO, V. W. **Mortalidade por leucemias relacionada à industrialização.** Revista Saúde Pública, USP, São Paulo, v. 36, n.4, p.400-408, 2002.

MACHADO J. H.. **Câncer Relacionado ao Trabalho.** Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Editora MF. Brasília. DF. 2003.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL; Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Glossário de Defesa Civil, estudos de riscos e medicina de desastres.** Brasília: MI. 2007.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL; Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Conferência geral sobre desastres: para prefeitos, dirigentes de instituições públicas e privadas e líderes comunitários.** Brasília: MI. 2007.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL; Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Manual de planejamento em Defesa Civil.** (Volume I) (4ª ed.). Brasília: MI. 2007.

NATIONAL ATMOSPHERIC RELEASE ADVISORY CENTER-NARAC. **HOTSPOT Health Physics codes.** Lawrence Livermore National Laboratory Livermore, CA, USA. 2013.

NATIONAL CENTER FOR BIOTHECNOLOGY INFORMATION-NCBI. **PubMed.** URL: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>>. Acessado em 14 de julho de 2016.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION-NFPA.**List of NFPA codes & standards.** URL: <<http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards>>. Acessado em 18 de julho de 2016.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION-NRC. **Strategic Sustainability Performance Plan**. U.S.. 2014.

O'BRIEN, R.. **Um exame da abordagem metodológica da pesquisa de ação**. Teoria e Prática da Pesquisa de Ação. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa: 2001.

PASQUILL, F. **Atmospheric Diffusion**, 2nd. ed. John Wiley & Sons, New York, USA. 1974.

PASQUILL, F. **The Estimation of Dispersion of Windborne Material**, *Meteorology*, 90, pp. 3349. 1961.

PETERSON, John; MACDONELL, Margaret; HAROUN, Lynne; MONETTE, Fred. **Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas**. Argonne National Laboratory. Environmental Science Division. 2007.

PETERSON, John; MACDONELL, Margaret; HAROUN, Lynne; MONETTE, Fred. **Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas**. Argonne National Laboratory. Environmental Science Division. 2007.

PRESTON, D. L., KUSUMI, S., *et al.* **Cancer incidence in atomic-bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma, and multiple myeloma**. *Radiation Research*. 1994.

PRESTON, D. L., PIERCE, D. A., *et al.* **Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates**. *Radiation Research*. 2004.

PURKISS, J. A. **Fire safety engineering design of structures**. Oxford: Butterworth Heinemann, 1996.

RADIATION EFFECTS RESEARCH FOUNDATION. **Life Span Study-LSS**. Report Series. Cooperative Japan-US Research Organization.

ROCHEDO, E. R. R., AMARAL, E. C. S., GODOY, J. M. O., WASSERMAN, M. A. V.. **Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental**. Rio de Janeiro, Brasil, Instituto de Radioproteção e Dosimetria. 2005.

REUTERS. L., **Polícia procura cápsula radioativa roubada de fábrica no Rio**, site de notícias UOL, Rio de Janeiro, URL:<<http://noticias.uol.com.br/ultnot/reuters/2004/04/27/ult27u41789.jhtm>>. Acessado em 15 de julho de 2016.

SANTOS. J. R; QUALHARINE. E. L.. **Proteção Contra Incêndio em Instalações Nucleares - Fator de Integração da Segurança**. XII SIMPEP - Bauru, SP.2005.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: PEF-EPUSP. [Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1997.

SILVA, M.A.; ANJOS, A.R.; BORELLI, P. **Matriz extracelular e leucemia**. Rev Bras Hematol Hemoter, v. 22, n. 3, p. 404- 12, 2002.

SILVA, C. N. et al. **Estruturas de Concreto Armado em Situações de Incêndio**. USP, São Paulo. 2004.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. Reimpressão. São Paulo: Zigurate, 2004.

SILVA, V. P.; FAKURY, R. H.; RODRIGUES, F. C.; COSTA, C. N.; PANONNI, F. D.. **Resistência ao fogo para estruturas. Determinação do tempo requerido de resistência ao fogo pelo Método do Tempo Equivalente: uma contribuição à revisão da NBR 14432:2000**. Técnica. Vol. 104. PINI, São Paulo, 2005.

SILVA, V. P. et al. **A segurança Contra Incêndio e Pânico no Brasil**. Projeto Editora, São Paulo. 2008.

SILVA. C.. **Modelagem Lagrangeana da Dispersão Atmosférica de Radionuclídeos e Sistemas de Informação Geográfica como Ferramenta de Suporte ao Planejamento de Emergência na Área de**

Influência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis - RJ. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - UFRJ/COPPE. 2013.

SORIER, A. A. H. F.. **Radiological Dispersion Devices: are we prepared?.** Journal Environm. Radioactivity.2006.

SUTTON, O. G. **Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere.**Proceedings of the Royal Society, London, UK. 1932.

TAUHATA, Luiz; SALATI, Ivan P.A.; PRINZIO, Renato Di; PRINZIO, Antonieta R. Di. **Radioproteção e Dosimetria–Fundamentos.**Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear. 9ª revisão. 373 p. Rio de Janeiro: Novembro de 2013.

TAVARES, Odilon A. P. **Energia nuclear: ontem e hoje.**Vol. 50. 2011.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION–U.S. NRC.2014. **Glossary.** URL: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/total-effective-dose-equivalent-tede.html>>. Acessado em 20 de Outubro de 2016.

UNSCEAR. **Sources and Effects of Ionizing Radiation,** UNSCEAR, Report Volume 1. 2000.

VALVERDE, Nelson; LEITE, Teresa; MAURMO, Alexandre. **Manual de Ações Médicas em Emergências Radiológicas.**112 p. Fundação Eletronuclear de Assistência Médica. Eletrobras Eletronuclear. Rio de Janeiro: 2010.

VIEIRA, Suzane de A.. **Estudo sobre fatores causais, consequências e ações de resposta no acidente com Césio 137 em Goiânia/GO.** Revista Emergência. Edição 2/2015, Novo Hamburgo-RS, p. 10, fev. 2015. Entrevista concedida a Josué dos Santos.

WALTON, A. J.; THOMAS, P. L.. **College physical chemistry student’s conceptions of equilibrium and fundamental thermodynamics.** Journal of Research in Science Teaching. 1995.

WALTON, W. D; THOMAS, P. H. Section3/Chapter 6: **Estimating temperatures in compartment**

fires. In: DiNenno, P. J.; Beyler, C. L.; Custer, R. L. P.; Walton, W. D., (Eds.). Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd Edition. Quincy: NFPA, 1995.

YVES P.;BRUTSAERT H. **Working with Wilfried Brutsaert: some old and new results on radiative dissipation of temperature-uctuations and scalar similarity in the Surface Layer.** Hydrologic Discovery Through Physical Analysis . Ithaca NY. 2012.