

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

RENATA PÉRISSÉ NOBILI FUNCKE

AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO OFERECIDA POR ESTRUTURAS URBANAS FRENTE
A DETONAÇÃO DE UM DISPOSITIVO NUCLEAR IMPROVISADO (IND)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências e Tecnologias Nucleares.

Orientadores:

Zelmo Rodrigues de Lima, D.Sc

Edson Ramos de Andrade, D.Sc

Rio de Janeiro

2019

FUNC Funcke, Renata Périssé Nobili

Avaliação da Proteção Oferecida por Estruturas Urbanas Frente a Detonação de um Dispositivo Nuclear Improvisado (IND) / Renata Périssé Nobili Funcke. - Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2019.

IX, 84f.: Il.; 31cm

Orientadores: Zelmo Rodrigues de Lima e Edson Ramos de Andrade

Dissertação (mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2019

1. Explosão Nuclear 2. Blindagens Urbanas 3. Ações Imediatas para IND

AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO OFERECIDA POR ESTRUTURAS URBANAS FRENTE
A DETONAÇÃO DE UM DISPOSITIVO NUCLEAR IMPROVISADO (IND)

Renata Périssé Nobili Funcke

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS E
TECNOLOGIA NUCLEARES

Aprovada por:

Prof. Zelmo Rodrigues de Lima, D.Sc – IEN

Prof. Edson Ramos de Andrade, D.Sc – IME

Prof. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D.Sc – IEN

Profa. Lidia Vasconcellos de Sá, D.Sc – IRD

Prof. Tercio Brum, D.Sc – IDQBRN / CTE_x

Rio de Janeiro

2019

RESUMO

A ampla e crescente utilização dos benefícios do setor nuclear desencadeia uma necessidade cada vez maior de aumentar a proteção e segurança da sociedade e dos trabalhadores no que tange a acidentes ou atos ilícitos com uso de material radioativo relacionado a estas atividades. Um destes atos é a detonação de um dispositivo nuclear improvisado (do inglês, IND), o qual pode levar à exposição da população e a desdobramentos de grande escala. Uma simulação computacional prévia pode, assim, vir a antecipar as consequências de um cenário real futuro, auxiliando na proteção dos indivíduos potencialmente expostos, gerando maior controle da situação de emergência. Para este trabalho foi considerada a simulação da detonação de um IND em um grande centro urbano por meio do código *Hotspot*. Para tal, foi realizado um estudo da blindagem oferecida por diversos tipos de estruturas urbanas (como prédios de concreto, casas de madeira ou tijolo, veículos etc) não afetadas por nenhum outro efeito que não fosse a radiação proveniente do IND. Desta forma, considerando distâncias similares ao epicentro de detonação entre as diversas blindagens estudadas, elencou-se as estruturas urbanas em ordem decrescente de proteção, a fim de servir de apoio ao gerenciamento da prioridade nos procedimentos de evacuação, abrigagem e triagem em um quadro de emergência. A seguir, com o objetivo de dar suporte às tomadas de decisão posteriores à detonação do IND e ainda, visando auxiliar no processo de triagem e minimização de injúrias e níveis de dose recebidos, foi utilizado o questionário sobre segurança do público contido no documento *“Improvised Nuclear Device Response and Recovery: Communicating in the Immediate Aftermath”* adaptado da Agência Federal de Gestão de Emergências dos EUA (Federal Emergency Management Agency ou FEMA). Desta forma, foram também relatadas orientações para o processo de decisão de forma a reduzir danos à saúde do público possivelmente afetado.

Palavras-Chave: Dispositivo Nuclear Improvisado (IND), Explosão Nuclear, Blindagens, Estruturas Urbanas.

ABSTRACT

The wide and crescent use of the benefits of the nuclear sector triggers a growing need to increase the protection and safety of society and workers regarding accidents or illicit acts with radioactive material related to these activities. One of these acts is the detonation of an improvised nuclear device (IND), which can lead to population exposure and unfold large-scale events. A previous computational simulation may anticipate the consequences of a future real scenario, assisting in the protection of potentially exposed individuals, and generating better emergencies control. This research project considers a simulation of the detonation of an IND in a large urban center by using the Hotspot code. The study was made considering the shielding offered by different urban structures (such as concrete buildings, wooden houses, vehicles, etc.) that are not affected by any other effect than IND radiation. Thus, considering similar distances to the detonation epicenter between the different structures studied, the urban shields were listed in decreasing order of protection, so that it can support the management of the priority in the screening of an emergency. Next, in order to support the decision making after the IND detonation and to assist in the process of screening and minimizing injuries and dose levels received, the questionnaire on public safety contained in the document "Improvised Nuclear Device Response and Recovery: Communicating in the Immediate Aftermath" from Federal Emergency Management Agency, FEMA) was used. In this way, guidelines for decision-making have also been reported in order to reduce damage to the health of the potentially affected public.

Keywords: Improvised Nuclear Device (IND), Nuclear Explosion, Shielding, Urban Structures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tela 1 do Hotspot com um exemplo da simulação do IND.....	38
Figura 2 - Tela 2 do Hotspot com um exemplo da simulação do IND.....	38
Figura 3 - Visão geral da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho.....	42
Figura 4 - Área de cada pluma de interesse no 1º dia, considerando cada uma das estruturas urbanas de blindagem.	44
Figura 5 - Plumas geradas pelo <i>Hotspot</i> para 1º dia.	45 a 49
Figura 6A a 6D - Tempo, em horas, para abrigagem, evacuação, emergência e SAR nas diversas estruturas urbanas e distâncias	53 e 54
Figura 7 - Período para evacuação em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.	58
Figura 8 - Período para emergência em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.....	59
Figura 9 - Período para possível desenvolvimento da SAR em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.....	60

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das estruturas urbanas consideradas	34
Tabela 2 - Principais características da simulação do IND	37
Tabela 3 - Efeitos de Radiação Imediata (Prompt) baseados na radiação de corpo inteiro em cGy-eq.	43
Tabela 4 - TEDE e percentual de blindagem total (S) para cada estrutura em função da distância e do tempo.	50
Tabela 5 - Fator de transmissão e percentual de blindagem Gama prompt e fallout para cada estrutura urbana, sem considerar resistência aos efeitos térmicos e mecânicos da explosão nuclear do IND.	51
Tabela 6 - Taxa de dose 1º dia / 4d Iniciais/ 1ª Semana para 4 e 6 km (Hotspot)	51
Tabela 7 - Taxa de dose 1º dia / 4d Iniciais/ 1ª Semana para 8 e 10 km (<i>Hotspot</i>).....	52

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEIR: *Biologic Effect of Ionizing Radiation* ou Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

CEDE: *Committed Effective Dose Equivalent* ou Dose Equivalente Efetiva Comprometida

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

EDE: *Effective Dose Equivalent* ou Dose Equivalente Efetiva

EPA: *Environmental Protection Agency* ou Agência de Proteção Ambiental

FEMA: *Federal Emergency Management Agency* ou Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos

FGR: *Federal Guidance Report* ou Relatório de Orientação Federal

GZ: *Ground Zero* ou Epicentro

IAEA: Agência Internacional de Energia Atômica

ICRP: *International Commission on Radiation Protection* ou Comissão Internacional de Proteção Radiológica

IND: *Improvised Nuclear Device* ou Dispositivo Nuclear Improvisado

LLNL: *Lawrence Livermore National Laboratory*

NCR: *Nuclear Regulatory Commission* ou Comissão Regulatória Nacional

NCRP: *National Council on Radiation Protection and Measurements* ou Conselho Nacional de Proteção Radiológica e Medidas

RAD RAT: *Radiation risk assessment tool for lifetime cancer risk projection* ou Ferramenta de avaliação de risco de radiação para projeção de risco de câncer ao longo da vida

RBE: *Relative biological effectiveness* ou Eficiência Biológica Relativa

RDD: *Radiological Dispersive Device* ou Dispositivo de Dispersão Radiológica

SAR: Síndrome Aguda da Radiação

TEDE: *Total Effective Dose Equivalent* ou Dose Equivalente Efetiva Total

UAE: Urânio Altamente Enriquecido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 RADIAÇÕES IONIZANTES	14
3.2 DIFERENÇAS ENTRE ARTEFATOS NUCLEARES E DISPERSÃO RADIOLÓGICA.....	17
3.3 DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL (<i>TOTAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT</i> – TEDE).....	20
3.4 CARACTERÍSTICAS DOS EFEITOS <i>PROMPT</i> E <i>FALLOUT</i> DA RADIAÇÃO IONIZANTE.....	21
3.5 OS PRODUTOS DE FISSÃO NA EXPLOSÃO NUCLEAR	22
3.6 O DECAIMENTO RADIOATIVO NA EXPLOSÃO NUCLEAR	23
3.7 BLINDAGEM	24
3.8 FATORES DE TRANSMISSÃO DE DOSE	26
3.9 SÍNDROME AGUDA DA RADIAÇÃO (SAR)	27
3.10 OS MODELOS DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	28
3.11 UNIDADES DE ENERGIA EXPLOSIVA.....	30
4. METODOLOGIA	31
4.1 A FUNÇÃO EXPLOSÃO NUCLEAR DO <i>HOTSPOT</i> E AS ESTRUTURAS URBANAS	31
4.2 CENÁRIO	35
5. RESULTADOS	42
6. DISCUSSÃO.....	54
7. CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXO	68

1. INTRODUÇÃO

No mundo contemporâneo são utilizados os benefícios do setor nuclear em várias áreas da economia, como na indústria, na medicina, na agricultura, ou na geração de energia em usinas nucleares. Tendo em vista tão ampla e crescente utilização, se fazem cada vez mais necessários mecanismos que garantam a segurança da sociedade e dos trabalhadores no que tange a acidentes ou atos ilícitos com o uso dos materiais radioativos provenientes destas atividades (GUIMARÃES, 2012).

Dentre os atos ilícitos possíveis consta o Dispositivo de Dispersão Radiológica (RDD - *Radiological Dispersive Device*), o Dispositivo Nuclear Improvisado (IND - *Improvised Nuclear Device*) ou roubo e posterior manipulação de material radioativo, como foi o caso do Césio do acidente de Goiânia (GUIMARÃES, 2012).

O RDD ou “bomba suja” é caracterizado como um dispositivo de dispersão relativamente simples, que não requer conhecimento profundo de tecnologia nuclear para sua montagem e uso. Uma pequena quantidade de material radioativo pode ser espalhada sobre uma área para causar danos, interrupção de atividades e contaminação ambiental. Em geral, a explosão de um RDD não tem por objetivo destruir as construções, entretanto, este cenário pode acontecer perto do ponto da explosão. Ainda, a área de contaminação provocada por esta explosão depende de fatores como o termo-fonte, a classe de estabilidade atmosférica local, além da quantidade e tipo do explosivo utilizado. As consequências de um dispositivo deste tipo abrangem impactos não só sociais, mas também políticos e econômicos em uma cidade ou estado (ROSOFF & VON WINTERFELDT, 2007).

Um IND, no entanto, é muito diferente de um RDD que simplesmente dispersa o material radioativo. Uma explosão nuclear proveniente da detonação de um IND de 10 kiloton é semelhante a uma bomba nuclear de cerca de três quartos do tamanho da bomba de Hiroshima. Um IND pode ser construído por indivíduos mal-intencionados a partir de componentes de uma arma nuclear roubada, ou construído desde o início utilizando material nuclear, podendo produzir uma explosão nuclear (FERGUSON E POTTER, 2006).

De acordo com Ferguson e Potter (2006), dois tipos de material físsil poderiam ser usados para esse propósito, urânio altamente enriquecido (UAE) ou plutônio, mas o primeiro seria muito mais fácil de ser transformado em um IND bem-sucedido. Esses

materiais foram produzidos em grande quantidade em programas de armas nucleares, tanto por militares quanto por civis, em todo o mundo. Grande quantidade (cerca de centenas de toneladas) de material físsil está atualmente dispersa em vários países no mundo, e nem sempre de forma segura. Segundo Goldenberg (1981), com 5 ou 6 kg de urânio enriquecido a 80%, ou quantidade equivalente de plutônio, é possível fazer uma bomba de poder explosivo equivalente a 10.000 toneladas de TNT, capaz de destruir uma cidade inteira, como em Hiroshima e Nagasaki.

De acordo com Davis e colaboradores (2014), um IND cria novas partículas radioativas de material não radioativo que é pulverizado em precipitação e tem níveis de radiação que são extremamente perigosos imediatamente após a detonação. Estes níveis decaem rapidamente em apenas poucas horas, depois menos rapidamente ao longo de alguns dias a duas semanas, e depois gradualmente ao longo de décadas. Assim, ainda de acordo com o autor, durante o período com os mais altos níveis de radiação, é mais seguro se abrigar dentro de uma estrutura urbana que agiria como uma espécie de blindagem, protegendo o indivíduo do material radioativo que está na área externa.

Desta forma, o estudo da blindagem oferecida por diversos tipos de estruturas urbanas, não afetadas por nenhum outro efeito que não seja a radiação proveniente da detonação de um IND, pode representar significativa redução do risco à saúde dos indivíduos potencialmente expostos à radiação. Para tal, segundo Homann (2013), as simulações computacionais são de grande valia pela capacidade de antecipar as consequências de um cenário real que venha a acontecer no futuro. Neste sentido, uma opção de código computacional para esse fim seria o *HotSpot Health Physics 3.0.3*, desenvolvido pelo laboratório americano *Lawrence Livermore National Laboratory* – LLNL, cujo acesso é livre, sendo também de uso recorrente pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Este foi concebido para prover uma ferramenta metodológica computacional rápida e portátil para avaliar incidentes envolvendo material radioativo. É gratuito, não havendo licença para sua utilização. O código *HotSpot* apresenta um modelo conservativo para estimar doses e concentração de radionuclídeos como resultado da liberação de materiais radioativos na atmosfera. Este *software*, por sua rapidez de cálculo e modelagem conservativa, também é utilizado para análise de segurança de instalações de manuseio de material nuclear. A adequação deste modelo para estimativas de dispersão e segurança nos piores cenários foi testada e verificada por muitos anos (HOMANN, 2013).

A exposição humana e ambiental a níveis muito intensos de radiação ionizante são uma ameaça à saúde pública e também aos trabalhadores (respondedores). O meio ambiente também fica altamente prejudicado e se poderá ter a interdição do local por tempos prolongados. Durante emergências radiológicas ou nucleares é comum que não se tenha muitas informações sobre o cenário logo após o acidente (FEMA, 2013).

Assim, é de grande valia uma metodologia que tenha a capacidade de prover informações básicas e rápidas para as primeiras horas, com o mínimo de variáveis do cenário possível, para que os respondedores, demais equipes de emergência e governo possam tomar medidas decisórias estruturadas durante o processo de triagem, comunicação e salvamento das pessoas possivelmente afetadas nas 24 horas iniciais. Dessa forma, com o objetivo de embasar as tomadas de decisão posteriores à detonação do IND e fazendo uso das informações e dados obtidos pelo código *Hotspot*, será utilizado também o questionário sobre segurança do público contido no documento “*Improvised Nuclear Device Response and Recovery: Communicating in the Immediate Aftermath*” (FEMA, 2013), elaborado por técnicos americanos especialistas em radiação e comunicação da Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos.

Um trabalho futuro em continuidade a este, poderá abordar o cálculo de riscos de desenvolvimento de câncer nos indivíduos potencialmente afetados pela detonação de um IND, utilizando as equações do BEIR (BEIR VII, 2006; Gonzalez, 2012).

2. OBJETIVOS

- a) Objetivo Geral: Avaliar metodologia de suporte para redução de fatores de risco radiológico para o processo de decisão voltado para medidas de proteção urgentes em cenário IND;

- b) Objetivos Específicos:
 - b.1) avaliar os efeitos de blindagem oferecida por tipo de estruturas urbanas íntegras, após a detonação de um IND em um centro urbano, e

 - b.2) avaliar alterações nos fatores de risco (taxas de dose de radiação) em função da blindagem oferecida pelas estruturas urbanas estudadas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. RADIAÇÕES IONIZANTES

Radiações são ondas eletromagnéticas ou partículas que se propagam com uma determinada velocidade. Contêm energia, carga elétrica e magnética. Podem ser geradas por fontes naturais ou por dispositivos construídos pelo homem. Possuem energia variável desde valores pequenos até muito elevados (BITELLI, 2006).

Exemplos de radiações eletromagnéticas são: luz, microondas, ondas de rádio, radar, laser, raios X e radiação gama. Algumas radiações sob a forma de partículas, com massa, carga elétrica, carga magnética são: feixes de elétrons, feixes de prótons, radiação beta, radiação alfa (TAUHATA, 2003).

Uma radiação pode ser não ionizante ou ionizante, dependendo da quantidade de energia. Radiações não ionizantes possuem relativamente baixa energia. Exemplos de radiações não ionizantes são: ondas eletromagnéticas como a luz, calor e ondas de rádio (TAUHATA, 2003).

As radiações ionizantes apresentam altos níveis de energia e são originadas do núcleo de átomos. Podem alterar o estado físico de um átomo, assim como causar a perda de elétrons, tornando-os eletricamente carregados, processo esse denominado "ionização" (BITELLI, 2006).

Um átomo pode se tornar ionizado quando a radiação colide com um de seus elétrons. Se na colisão o elétron for arrancado do átomo, este deixa de ser neutro, já que, com um elétron a menos, o número de prótons é maior. Desta forma, o átomo torna-se um "íon positivo" (BITELLI, 2006).

Caso um isótopo esteja em uma configuração instável, este emitirá radiação para atingir um estado estável, pois esta é a tendência dos isótopos dos núcleos atômicos. Um átomo pode liberar energia e se estabilizar por meio de:

- * emissão de partículas do seu núcleo;
- * emissão de fótons de alta frequência.

* "decaimento radioativo" ou processo no qual um átomo espontaneamente libera energia de seu núcleo (TAUHATA, 2003).

Energia e partículas emitidas de núcleos instáveis são capazes de causar ionização. Quando um núcleo instável emite partículas, as partículas são, tipicamente, na forma de partículas alfa, partículas beta ou nêutrons. No caso da emissão de energia, a emissão se faz por uma forma de onda eletromagnética muito semelhante aos raios X : os raios gama (TAUHATA, 2003).

Partículas Alfa:

As partículas Alfa são constituídas por 2 prótons e 2 nêutrons, isto é, o núcleo de átomo de hélio (He). Quando o núcleo as emite, perde 2 prótons e 2 nêutrons. Quando um radionuclídeo emite uma partícula Alfa, seu número de massa diminui 4 unidades e, seu número atômico, diminui 2 unidades. Ao perder 2 prótons o radionuclídeo X se transforma no radionuclídeo Y com número atômico igual a $(Y = X - 2)$ (VALVERDE, 2010).

As partículas Alfa, por terem massa e carga elétrica relativamente maior, podem ser facilmente detidas, seja por uma folha de papel ou por camadas externas de células mortas da pele de uma pessoa. Entretanto podem ocasionalmente, penetrar no organismo através de um ferimento ou por incorporação, provocando nesse caso lesões graves. Apresentam baixa velocidade comparada a velocidade da luz (20 000 km/s) (BITELLI, 2006).

Partículas Beta:

As partículas Beta são elétrons emitidos pelo núcleo de um átomo instável.

Ao emitir uma partícula Beta, o núcleo tem a diminuição de um nêutron e o aumento de um próton. Desse modo, o número de massa permanece constante. Quando um radionuclídeo emite uma partícula beta, seu número de massa permanece constante e seu número atômico aumenta 1 unidade:

$X \rightarrow \beta + \bar{\nu}_e + Y$ (com 1p a mais)

Ao ganhar 1 próton (p) o radionuclídeo X se transforma no radionuclídeo Y com número atômico igual a ($Y = X + 1$) (VALVERDE, 2010).

As partículas Beta são capazes de penetrar cerca de um centímetro nos tecidos, ocasionando danos à pele, mas não aos órgãos internos, a não ser que sejam ingeridas ou inaladas. Têm alta velocidade, sendo esta de aproximadamente 270 000 km/s (BITELLI, 2006).

Radiação Gama:

Ao contrário das radiações Alfa e Beta, que são constituídas por partículas, a radiação Gama é formada por ondas eletromagnéticas emitidas por núcleos instáveis logo em seguida à emissão de uma partícula Alfa ou Beta. A emissão de uma onda eletromagnética (radiação gama) ajuda um núcleo instável a se estabilizar no caso de não eliminar toda a energia necessária para tal ao emitir uma partícula Alfa ou Beta (VALVERDE, 2010).

Considerando as várias ondas eletromagnéticas (radiação gama, raios X, microondas, luz visível etc) constata-se que apenas os raios gama são emitidos pelos núcleos atômicos (VALVERDE, 2010).

As radiações Alfa, Beta e Gama possuem diferentes poderes de penetração, isto é, diferentes capacidades para atravessar os materiais (BITELLI, 2006).

Os raios gama são extremamente penetrantes, sendo detidos somente por uma parede de concreto ou metal. Têm altíssima velocidade, sendo esta igual à velocidade da luz (300 000 km/s) (BITELLI, 2006).

Raios X:

Os raios X não vêm do centro dos átomos como os raios Gama. Para se obter raios X, uma máquina acelera elétrons e os faz colidir contra uma placa de chumbo, ou outro material. Na colisão, os elétrons perdem energia cinética, ocorrendo uma transformação quase total em calor e pequena fração de raios X (BITELLI, 2006).

Estes raios penetram corpos e por isso, utilizando estes, é possível obter uma fotografia dos órgãos internos do homem, tanto dos ossos do esqueleto quanto diferentes deformações dos tecidos. A grande capacidade de penetração dos raios X se deve ao fato destes terem um comprimento de onda muito pequeno (BITELLI, 2006).

Aplicações:

A radiação ionizante tornou-se muito importante para os seres humanos, apresentando aplicações em várias áreas: da medicina até a utilização para armas bélicas. Citando a medicina, é muito benéfica, por exemplo, tanto em tratamentos quanto em diagnóstico. Entretanto, os riscos e os benefícios devem ser ponderados pois os efeitos da radiação não podem ser considerados inócuos, podendo levar até à morte em casos extremos. Os benefícios devem ser maiores que os riscos, os quais precisam ser ponderados (TAUHATA, 2003).

3.2. DIFERENÇAS ENTRE ARTEFATOS NUCLEARES E DISPERSÃO RADIOLÓGICA

Um IND é uma arma nuclear comprada ilicitamente, roubada de um país que tenha atividades nucleares, ou fabricada por um grupo terrorista de material de armas nucleares obtido ilegalmente (por exemplo, plutônio ou urânio altamente enriquecido) (OSTP, 2010).

Há dois tipos de material físsil que podem ser utilizados para produzir um IND: Urânio Altamente Enriquecido (UAE) ou plutônio. Entretanto, segundo Ferguson e Potter (2006), o primeiro é mais facilmente utilizado no processo de produção de uma arma nuclear. Uma explosão IND na superfície produz os mesmos efeitos físicos e biológicos dos observados ao se detonar uma arma nuclear no ar, similar às bombas de hidrogênio lançadas durante a Segunda Guerra Mundial. Um IND de 10 kiloton é cerca de três quartos do tamanho da bomba de Hiroshima. De acordo com Davis e colaboradores (2014), uma explosão nuclear envolve uma grande explosão que produz uma intensa onda de calor, luz, ar e radiação. Qualquer coisa imediatamente perto da explosão, incluindo

edifícios, estradas e carros, pode ser destruída. A poeira e os detritos resultantes serão puxados para cima e formarão uma nuvem acima da explosão.

Após uma detonação nuclear, o material na nuvem explosiva esfriará e se depositará no solo; isso é conhecido como precipitação (*fallout*). Segundo Davis e colaboradores (2014), o *fallout* é perigoso porque contém material radioativo. O material radioativo em precipitação pode ser transportado por longas distâncias pelo vento, antes de cair de volta a terra. As partículas de precipitação se parecem com poeira, com areia ou cinzas, e podem ser vistas quando caem do céu após uma detonação IND. Assim, uma explosão convencional produz, inicialmente, uma onda de choque ao implodir. Esta empurra pedaços de plutônio para dentro de uma esfera central que abriga os elementos Berílio / Polônio, criando uma “massa crítica”, isto é, material físsil suficiente para sustentar uma reação nuclear em cadeia, liberando vários milhões de vezes mais energia do que poderia ser produzido por uma reação química que ocorresse nessa mesma massa material (DAVIS et al, 2014).

Um IND não deve ser confundido com um dispositivo de dispersão radiológica (RDD), informalmente conhecido como “bomba suja”. Segundo o palestrante Brooke Buddemeier, do Laboratório Nacional Lawrence Livermore, um RDD é uma arma que combina explosivos com material radioativo (BUDDEMEIER, 2011). A explosão vaporiza ou aerosoliza o material radioativo, expelindo-o para o ar. No entanto, a explosão não desencadeia uma reação de fissão que libera quantidades gigantescas de energia ou produtos de fissão associados a uma detonação nuclear.

Dillon (2009) relata ainda que os efeitos de um RDD podem se estender por vários quarteirões, enquanto as consequências de uma detonação IND se estendem por quilômetros. A maior parte do perigo nuclear de um ataque com RDD se deve à respiração da poeira radioativa pelos indivíduos (embora haja alguma radiação externa), enquanto que com um ataque IND, a maior parte do perigo nuclear é de precipitação (*fallout*) que emite radiação suficiente para queimar ou penetrar na pele e cavidades do organismo, podendo desencadear a síndrome aguda da radiação (SAR).

De acordo com o Conselho Nacional de Radiação, Proteção e Medida dos Estados Unidos (NCRP, 2010), a precipitação é gerada por milhares de toneladas de detritos provenientes de prédios desmoronados e de outras estruturas destruídas pela explosão, combinados com produtos de fissão radioativa e catapultados para cima pelo calor extremo da detonação. A nuvem repleta de detritos radioativos ascende rapidamente

pela atmosfera até aproximadamente 8 km de altura para um dispositivo de 10 kiloton (kT). Partículas altamente radioativas se aglutinam e caem de volta a terra enquanto esfriam para formar partículas radioativas. Dentro de cerca de 16 a 40 km da detonação, as partículas de precipitação são do tamanho do sal de mesa ou da areia quando caem de volta à terra, contaminando todas as superfícies, incluindo roupas, pele e cabelos. As partículas emitem radiação penetrante - principalmente radiação gama e beta - que pode ferir pessoas dentro de carros ou em abrigos inadequados (NCRP, 2010).

O *fallout* depende das condições meteorológicas, como a direção e a velocidade do vento, além de fatores ambientais, tal como o tipo de terreno. A radioatividade de *fallout* diminui com a distância e decai rapidamente com o tempo, tendo as primeiras horas após a detonação como o período mais crítico (NCRP, 2010). Entretanto, a altura da detonação também é um fator relevante. O *fallout* é a principal fonte de exposição à radiação após a detonação de um IND e, segundo Buddemeier (2011), o melhor método de reduzir a exposição à radiação neste caso, é remover a roupa exterior e retirar as partículas do cabelo ao entrar em um abrigo seguro.

O IND é o material radioativo que, ao ser disperso, tem níveis de emissão que oferecem maior capacidade de provocar dano imediatamente após a detonação. Esta capacidade diminui muito rapidamente em poucas horas, depois menos rapidamente ao longo de alguns dias a duas semanas, e depois gradualmente ao longo de décadas, com taxas de decaimento que dependem dos radionuclídeos envolvidos. Durante o tempo com os mais altos níveis de radiação, é mais seguro ficar dentro, protegido do material radioativo do lado de fora (HOMANN, 2013).

As armas nucleares são semelhantes às dos tipos mais convencionais, pois sua ação destrutiva se deve principalmente aos efeitos da explosão. Segundo Homann (2013), existem várias diferenças entre armas nucleares e convencionais de alto poder explosivo:

1. Explosões nucleares podem ser milhões de vezes mais poderosas do que as maiores detonações convencionais (aumento de mil vezes na força explosiva via bomba atômica e aumento de milhões de vezes via bomba de hidrogênio).
2. Para uma liberação similar de energia, a massa do explosivo nuclear é muito menor que a do explosivo convencional.
3. As temperaturas atingidas em uma explosão nuclear são muito maiores do que em uma explosão convencional, e uma grande proporção da energia em uma explosão nuclear é emitida na forma de calor, geralmente referida como "radiação térmica". Essa radiação

térmica é capaz de causar queimaduras na pele, iniciar incêndios e causar danos aos olhos a distâncias consideráveis da explosão.

4. A explosão nuclear é acompanhada por radiação ionizante altamente penetrante.

5. As substâncias remanescentes após a explosão nuclear são radioativas, emitindo radiação ionizante por um longo período de tempo.

Concluindo, um IND é muito diferente de um RDD, que simplesmente dispersa o material radioativo. Segundo o *Department of Homeland Security* (2018), os perigos relacionados com explosões nucleares podem ser resumidos como descrito a seguir:

- Luz altamente brilhante- pode causar cegueira temporária por menos de um minuto.
- Explosão- pode causar morte, ferimentos e danos a estruturas de várias milhas para fora da explosão.
- Radiação- pode danificar as células do corpo. Grandes exposições podem causar doença de radiação.
- Fogo e calor- podem causar morte, queimaduras e danos a estruturas de várias milhas para fora.
- Pulso eletromagnético (EMP)- pode danificar equipamentos de energia elétrica e eletrônica várias milhas para fora da detonação e causar interrupções temporárias.
- *Fallout* ou precipitação- material radioativo, chuva de sujeira visível e detritos até várias milhas, podendo causar doença para aqueles indivíduos que estão em áreas mais distantes.

3.3. DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL (TOTAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT – TEDE)

A Dose Equivalente Efetiva Total ou “*Total Effective Dose Equivalent*” (TEDE) pode ser definida como a soma das doses efetivas (exposições externas) e a dose equivalente comprometida (exposições internas) (HOMANN, 2013).

O material radioativo que produz a dose equivalente pode ser externo ao corpo (por exemplo, quando o material está no solo ou no ar ao redor do indivíduo) ou interno (como quando o indivíduo ingeriu ou inalou e reteve o material) (HOMANN, 2013).

Assim a TEDE é a soma da Dose Equivalente Efetiva ou EDE (causada pelo material externo) com a Dose Equivalente Efetiva Comprometida ou CEDE (causada pelo material interno). A TEDE é a expressão mais completa da dose combinada de todas as vias de entrega aplicáveis e pode ser representada pela equação (1).

$$\text{TEDE} = \text{CEDE (inalação)} + \text{EDE (submersão)} \quad (1)$$

A EDE (submersão) é o componente de dose relativo à radioatividade presente no ar que o indivíduo está imerso. Ainda, pode-se incluir o fator *Ground Shine* (radiação produzida por materiais radioativos depositados no solo) (HOMANN, 2013). Assim, a equação acima é representada conforme a equação (2):

$$\text{TEDE} = \text{CEDE (inalação)} + \text{EDE (submersão)} + \text{EDE (ground shine)} \quad (2)$$

3.4. CARACTERÍSTICAS DOS EFEITOS *PROMPT* E *FALLOUT* DA RADIAÇÃO IONIZANTE

Os efeitos da radiação ionizante são provenientes da radiação nuclear imediata (*prompt radiation*) e da precipitação radioativa (*fallout*). A *prompt radiation* consiste de raios X, radiação gama e nêutrons produzidos no primeiro minuto após a explosão nuclear (HOMANN, 2013).

Quanto às radiações ionizantes de efeitos retardados, estas são produzidas por produtos de fissão e por radionuclídeos nêutron-induzidos em materiais externos, como: solo, ar, estruturas e detritos de artefatos nucleares. Estes produtos radioativos são dispersados a favor do vento com a nuvem de fogo e os detritos. A nuvem carrega o material radioativo e deixa um rastro no solo com esta substância, que se deposita (*fallout*). A exposição ao *fallout* é a fonte dominante de radiação em locais sujeitos aos efeitos imediatos (*prompt*) da detonação nuclear (HOMANN, 2013).

3.5. OS PRODUTOS DE FISSÃO NA EXPLOSÃO NUCLEAR

Explosões por fissão englobam certos isótopos dos elementos urânio e plutônio. O urânio na natureza consiste principalmente de dois isótopos: o urânio-235 (cerca de 0,7%) e o urânio-238 (cerca de 99,3%). O urânio-235 é a espécie fissionável comumente usada em armas nucleares. Outro isótopo, o urânio-233, não ocorre naturalmente, mas também é facilmente fissionável e pode ser obtido artificialmente a partir do tório-232. Dado que apenas quantidades insignificantes do elemento plutônio são encontrados na natureza, o isótopo fissionável usado em armas nucleares, o plutônio-239 é produzido artificialmente a partir do urânio-238. Quando um nêutron livre entra no núcleo de um átomo fissionável, pode fazer com que o núcleo se divida em duas partes menores. Este é o processo de fissão, que é acompanhado pela liberação de grande quantidade de energia. Os núcleos menores (ou mais leves) resultantes são chamados de “produtos de fissão”. “A fissão completa de 1 libra ou 0,45 kg de urânio ou plutônio libera tanta energia explosiva quanto a explosão de cerca de 8000 toneladas de TNT (GLASSTONE, 1977).

Muitos núcleos de produtos de fissão são formados quando os núcleos de urânio ou plutônio capturam nêutrons e se dividem. Existem cerca de 40 formas diferentes nas quais os núcleos podem se dividir quando ocorre a fissão, produzindo aproximadamente 80 diferentes fragmentos. A natureza e as proporções dos fragmentos de fissão variam e dependem da substância específica e da energia dos nêutrons causadores da fissão. Por exemplo, quando o urânio-238 sofre fissão como resultado da captura de nêutrons de energia muito alta liberada em certas reações de fusão, os produtos são um pouco diferentes, especialmente em suas quantidades relativas, daqueles formados a partir de urânio-235 por nêutrons de fissão (GLASSTONE, 1977).

Independentemente da sua origem, praticamente a totalidade dos cerca de 80 fragmentos de fissão são núcleos de radioisótopos mais conhecidos e mais leves. A radioatividade é geralmente manifestada pela emissão de partículas beta carregadas negativamente, e na maioria das vezes vem acompanhado por radiação gama, liberando o excesso de energia. Em alguns casos especiais, apenas a radiação gama é emitida (GLASSTONE, 1977).

Como resultado da expulsão de uma partícula beta, o núcleo de uma substância radioativa é transformado em outro elemento, o que é denominado “produto de decaimento”. No caso dos fragmentos de fissão, os produtos de decaimento são geralmente também radioativos, e estes, por sua vez, podem decair com emissão de partículas beta e radiação gama. Em média, existem cerca de quatro estágios de radioatividade para cada fragmento de fissão antes que um núcleo estável (não radioativo) seja formado. Devido ao grande número de maneiras pelas quais a fissão pode ocorrer e os vários estágios de decaimento envolvidos, a mistura dos produtos de fissão se torna complexa (HOMANN, 2013).

3.6. O DECAIMENTO RADIOATIVO NA EXPLOSÃO NUCLEAR

Mais de 300 isótopos diferentes de 36 elementos leves, do zinco ao térbio, foram identificados entre os produtos de fissão. A taxa de emissão de partículas beta e radiação gama é usualmente expressa pela "meia-vida" do radionuclídeo envolvido, ou seja, o tempo necessário para que a radioatividade de uma determinada quantidade de um radionuclídeo decaia para metade de seu valor original. Cada radionuclídeo tem uma meia-vida definida, independente de seu estado ou de sua quantidade (HOMANN, 2013).

As meias-vidas dos produtos de fissão podem variar de uma pequena fração de segundo a cerca de um milhão de anos. Embora todo radionuclídeo presente entre os produtos de fissão seja conhecido por ter uma meia-vida definida, a mistura formada após uma explosão nuclear é tão complexa que não é possível representar a decomposição como um todo em termos de meia-vida. No entanto, verificou-se que a diminuição na intensidade total de radiação dos produtos de fissão pode ser calculada aproximadamente por meio de uma fórmula bastante simples. A radioatividade residual dos produtos de fissão em 1 hora após uma detonação nuclear é considerada como 100 e a diminuição subsequente com o tempo indica que 7 horas após a explosão, a atividade do produto de fissão terá diminuído para cerca de um décimo da quantidade existente na primeira hora. Em aproximadamente 2 dias, a atividade terá diminuído para 1% do valor da primeira hora (GLASSTONE, 1977).

Além da atividade de partículas beta e radiação gama devido aos produtos de fissão, há outro tipo de radioatividade residual que deve ser mencionada, que é a atividade

do material fissionável, parte da qual permanece após a explosão. Os isótopos fissionáveis de urânio e plutônio são radioativos e sua atividade consiste na emissão das “partículas alfa”. Essas são formas de radiação nuclear, uma vez que são expelidas dos núcleos atômicos; mas diferem das partículas beta, que surgem dos produtos de fissão, por serem muito mais pesadas e carregarem uma carga elétrica positiva. As partículas alfa são idênticas aos núcleos dos átomos de hélio (HOMANN, 2013).

Devido à sua maior massa e carga, as partículas alfa são muito menos penetrantes que as partículas beta ou radiação gama de mesma energia. Assim, muito poucas partículas alfa de fontes radioativas podem viajar mais de 1 a 3 polegadas no ar antes de serem paradas. É duvidoso que essas partículas possam atravessar a pele intacta, e elas certamente não podem penetrar nas roupas. Conseqüentemente, o urânio (ou plutônio) presente nos resíduos de armas não constitui um perigo se estes últimos estiverem fora do corpo. No entanto, se o plutônio entrar no corpo por ingestão, por abrasões na pele, ou particularmente por inalação, os efeitos podem ser sérios (GLASSTONE, 1977).

3.7. BLINDAGEM

Blindagem para Nêutrons

Nêutrons rápidos são atenuados de forma aproximadamente exponencial, onde o coeficiente de atenuação é denominado Seção de Choque Macroscópica, que pode ser avaliado pelo Comprimento de Relaxação descrito na equação (3) (TAUHATA, 2003):

$$\phi(x) = \phi(0) \cdot e^{-\Sigma x} = \phi(0) \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (3)$$

Onde:

x é a espessura de material atenuador;

ϕ é o fluxo ou intensidade do feixe de nêutrons;

Σ é a seção de choque macroscópica (cm^{-1});

λ é o comprimento de relaxação.

Os materiais utilizados para blindagem de nêutrons normalmente são de baixo número atômico Z , para evitar o espalhamento elástico que, ao invés de atenuar, espalharia nêutrons em todas as direções. Os materiais de alto Z utilizados são aqueles que absorvem nêutrons nas reações, como o cádmio e o índio. Os materiais mais utilizados são a água, a parafina borada, o grafite e o concreto. O projeto de blindagem para nêutrons em uma instalação envolve um aparato matemático muito complexo, e normalmente a equação de difusão ou de transporte são solucionadas numericamente por meio de códigos de computação. Nesses códigos são levados em conta todos os tipos de reações nucleares, em todas as faixas de energia, inclusive nas regiões de ressonância, onde o valor da seção de choque varia abruptamente (TAUHATA, 2003).

Blindagem para partículas carregadas

Partículas carregadas dissipam energia nas colisões com as partículas dos átomos do material de blindagem, até que sua velocidade entra em equilíbrio com a velocidade das demais partículas do meio. Quando a massa da partícula é pequena (como na partícula beta), a forma da trajetória pode ser irregular e conter mudanças significativas de direção de propagação. Já se a partícula tem massa elevada (como na partícula alfa ou fragmentos de fissão), a trajetória é quase retilínea, só mudando de direção (o que é raro) quando ocorre uma colisão com um núcleo pesado. Por haver um alcance para cada tipo de partícula carregada em função da energia e do material, é possível chegar à absorção total de um feixe de partículas. Dessa forma, pode-se construir uma blindagem eficiente desde que a espessura de material seja superior ao alcance ou ao poder de penetração da partícula, reduzindo as interações com emissão de radiação de freamento. Para blindar essas partículas utiliza-se material de baixo número atômico e com consistência mecânica, como polietileno, teflon, PVC, acrílico, chumbo e concreto. O chumbo não é indicado para blindagem de feixes de elétrons devido à produção de radiação de Bremsstrahlung, já que pioraria os níveis de radiação e penetrabilidade (TAUHATA, 2003).

Blindagem para raios X e gama

Devido ao fato de fótons X e γ atravessarem o material absorvedor, sua blindagem é determinada pela energia da radiação, pela natureza do material absorvedor e sua espessura. Para determinação da espessura de material necessário para atenuar feixes de

fótons X e γ , pode-se fazer uso da equação (4) que é a lei de atenuação exponencial (TAUHATA, 2003).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} = I_0 \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho x} \quad (4)$$

onde μ é o coeficiente de atenuação total do material para a energia E;

μ/ρ é o coeficiente de atenuação total em massa;

ρ é a densidade do material;

x é a espessura da blindagem.

O coeficiente de atenuação linear pode ser obtido pela média ponderada para o caso de materiais constituídos de uma mistura ou composição de diversos elementos químicos, de acordo com a equação (5) (TAUHATA, 2003):

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (5)$$

onde w_i é a participação percentual do elemento químico no composto.

3.8. FATORES DE TRANSMISSÃO DE DOSE

Além das complexidades introduzidas pela chegada de nêutrons em um alvo, vindo de várias direções, a distribuição da energia nas diversas direções torna difícil o cálculo da eficácia de proteção de estruturas simples, sem recorrer a códigos computacionais complexos. Assim, as estimativas da blindagem oferecida pelas várias estruturas são apresentadas em termos de um “fator de transmissão de dose”, a qual seria a relação entre a dose recebida atrás da proteção e a dose no mesmo local, na ausência de proteção (GLASSTONE, 1977).

Os fatores de transmissão são obtidos por medições em testes bélicos ou são extrapolações de tais medições. Uma porcentagem destes são obtidas por cálculos relativamente detalhados, enquanto outras ainda, são meras estimativas. Os fatores de transmissão de dose constam de faixas de valores por apresentarem incertezas nas

próprias estimativas e também, por variações no grau de proteção que pode ser obtido em diferentes pontos dentro de uma estrutura (HOMANN, 2013).

3.9. SÍNDROME AGUDA DA RADIAÇÃO (SAR)

A síndrome aguda da radiação (SAR) é o efeito biológico mais imediato da exposição à radiação. Aparece após a exposição radioativa de corpo inteiro ou parcial do indivíduo com mais de 1 Gy, a uma taxa de dose relativamente alta (WASELENKO et al., 2004).

Segundo Donnelly e colaboradores (2010), a radiação provoca a degradação celular devido a danos ao DNA e a outras estruturas moleculares fundamentais das células em vários tecidos; esta destruição em particular afeta a capacidade de reprodução das células. Os sintomas podem começar dentro de uma ou duas horas, e podem durar vários meses.

De acordo com Bitelli (2010), o efeito das radiações ionizantes em um indivíduo depende basicamente da dose absorvida, da taxa de exposição (crônica/aguda) e da forma de exposição (corpo inteiro/localizada).

De acordo com Waselenko e colaboradores (2004), existem três grupos principais de sintomas: gastrointestinais (náuseas, vômitos, falta de apetite), hematopoiéticos (queda no número de células sanguíneas) e neurovasculares (tontura, dor de cabeça, diminuição dos níveis de consciência). Há também a síndrome cutânea, causada por queimaduras térmicas ou por radiação. A dose de radiação determina a extensão, a gravidade e o tempo dos sintomas. Quanto maior a dose, mais rápido o início dos sintomas.

Ainda, estudos conduzidos por Waselenko e colaboradores (2004) relatam existirem quatro estágios de SAR:

- (1) uma fase prodrômica com sintomas gastrointestinais que duram de alguns minutos a vários dias;
- (2) um estágio latente em que o paciente não apresenta sintomas por algumas horas a algumas semanas;

- (3) um estágio de doença manifesta (com apresentações clínicas diferentes e normalmente imunossupressão intensa) com duração de várias semanas;
- (4) recuperação ou morte

3.10. OS MODELOS DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A dispersão do ar poluído pode ser numericamente simulada por várias técnicas, as quais são divididas em duas categorias:

- Modelos Eulerianos
- Modelos Lagrangianos

A diferença básica entre as duas resoluções é que o sistema de referência Euleriano é fixo com respeito à Terra, enquanto que o sistema de referência Lagrangiano segue o movimento atmosférico médio (ZANNETI, 1990).

Os modelos de dispersão gaussianos podem ser vistos como Eulerianos e Lagrangianos. Constituem a maioria dos modelos de dispersão atmosférica e são baseados em uma equação simples que descreve um campo de concentração tri-dimensional, gerado por uma fonte puntual sobre condições de emissão e meteorológicas estacionárias (ZANNETI, 1990).

O modelo de dispersão gaussiano é a abordagem mais aceita para explicar o comportamento da pluma de dispersão atmosférica e o procedimento de cálculo do modelo é baseado nos princípios gaussianos de dispersão em que a pluma sofre dispersão em planos horizontais e verticais tomando a forma de uma curva de Gauss com o máximo no centro da pluma. A distribuição da concentração da pluma ao redor do eixo central pode ser considerada uma gaussiana com os valores de distribuição sendo considerados afastamentos do eixo da pluma (LISBOA, 2007).

O modelo Gaussiano é amplamente aceito para uso em atividades de avaliação radiológica e determina a concentração do dispersante em determinado ponto do espaço. A direção de transporte é dada pela direção do vento que prevalece no ponto de liberação, e assume-se que as condições atmosféricas, uma vez determinadas, são constantes ao longo da modelagem. Os fenômenos de dispersão meteorológica e atmosférica que

influenciam os padrões de contaminação são tratados de forma resumida neste texto (HOMANN, 2013). As equações do modelo Gaussiano estimam a concentração de um gás, ou um aerossol, em qualquer ponto do espaço seguindo a equação (6):

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (6)$$

Onde:

C = concentração atmosférica integrada no tempo (Ci-s)/(m³);

Q = atividade da fonte (Ci);

H = altura efetiva de liberação (m);

λ = constante de decaimento radioativo (s⁻¹);

x = distância na direção do vento (m);

y = distância na direção perpendicular ao vento (m);

z = distância no eixo vertical (m);

σ_y = desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção perpendicular ao vento (m);

σ_z = desvio padrão da distribuição da concentração integrada na direção vertical (m);

u = média da velocidade do vento na altura efetiva de liberação (m/s);

L = altura da camada de inversão (m);

$DF(x)$ = fator de depleção da pluma.

Se a distância no eixo vertical (z) exceder a altura da camada de inversão (L), a equação a ser utilizada, com os mesmos parâmetros apresentados para a equação (6), teria a configuração da equação (7):

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y L u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (7)$$

Para evitar a diferença de valores entre as equações (6) e (7), a transição entre estas duas equações é iniciada quando σ_z corresponder a 70 % de L , e finalizada quando σ_z e L forem iguais. No intervalo desta transição os valores das duas equações são

interpolados linearmente para fornecer um valor mais realista, evitando variações abruptas em pequenos intervalos (HOMANN, 2013).

O modelo gaussiano é utilizado para simular a dispersão de material radiológico na atmosfera mesmo em códigos computacionais de simulação, como é o caso do *HotSpot Health Physics Codes*. O *Hotspot* é preferencial para este tipo de trabalho por conta da facilidade de operação e utilização do modelo gaussiano, se fazendo necessário pouco tempo de computação. Assim, se permite obter resultados significativos para uma primeira aproximação no desenho de uma resposta inicial a um cenário radiológico ou nuclear (HOMANN, 2013).

3.11. UNIDADES DE ENERGIA EXPLOSIVA

A quilotonelada (kT) e a megatonelada (MT) do explosivo trinitrotolueno (TNT) têm sido tradicionalmente usadas para classificar a libertação de energia e, portanto, o poder destrutivo de armas nucleares. As unidades de energia explosiva (megatons, kilotons etc) são derivadas de tentativas de comparar a força explosiva de uma bomba com explosivos convencionais; a intenção original era equipará-la a toneladas de TNT. A tonelada (ou ton) de TNT é uma unidade de energia igual a 4,184 gigajoules, aproximadamente a quantidade de energia libertada pela detonação de uma tonelada de TNT. Um grama de TNT libera aproximadamente 1000 calorias ao explodir. Para definir uma tonelada de TNT, este valor foi arbitrariamente padronizado ao definir-se que 1000 calorias termoquímicas = 1 grama de TNT = 4184 J (exatos). Esta definição é uma convenção (CARDOZO, 2018).

4. METODOLOGIA

Para a simulação do cenário radiológico utilizou-se o *software HotSpot Health Physics Codes* (HOMANN, 2013) que estima as doses recebidas por indivíduos expostos e a contaminação ambiental no local do evento por deposição no solo. O código *HotSpot*, de forma conservativa e utilizando o modelo gaussiano, avalia a contaminação de uma área e estima a Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE) sobre indivíduos e o meio ambiente, que corresponde à dose absorvida combinada considerando todas as vias de exposição (externa e interna).

Neste trabalho optou-se por simular um IND a fim de realizar um estudo dos efeitos das estruturas urbanas frente a uma explosão nuclear proveniente da detonação de um IND de 10 kiloton, e não por uma simples dispersão de material radioativo.

4.1. A FUNÇÃO EXPLOSÃO NUCLEAR DO *HOTSPOT* E AS ESTRUTURAS URBANAS

A função Explosão Nuclear do *HotSpot* estima os efeitos de uma arma nuclear com explosão de superfície. Estes incluem efeitos imediatos (neutrons e gama, explosões e térmicas) e informações de precipitação (*fallout*), as quais incluem o tempo de chegada da precipitação, a taxa de dose na hora de chegada e os contornos de dose integrados por vários períodos de tempo, por exemplo, primeiras 6 horas, primeiro dia, primeira semana etc (HOMANN, 2013).

Para contabilizar os efeitos determinísticos da exposição à radiação geralmente se utiliza o fator de ponderação RBE (*Relative Biological Effectiveness* ou Eficácia Biológica Relativa), produzindo um parâmetro frequentemente tratado como Gray-equivalente. Esta unidade Gy-eq permite a adição de doses em Gray de diferentes tipos de radiações, como fótons, nêutrons etc. A dose absorvida ponderada por RBE é o produto da dose absorvida em um órgão ou tecido e a eficácia biológica relativa de cada componente de radiação (HOMMAN, 2013). Esta dose absorvida ponderada é utilizada neste trabalho para explicar as diferenças de RBE na produção de efeitos determinísticos associados à exposição aguda, normalmente obtidos nos primeiros 30 dias. A unidade para a dose absorvida ponderada pela RBE é rad-equivalente ou Gray-equivalente (unidade SI).

A exposição à radiação é considerada como exposição de corpo inteiro apenas à radiação gama e nêutrons. No cálculo da TEDE, a dose absorvida correspondente a todas as possíveis vias de exposição (externas e internas) é adicionada como resultado da exposição a uma mistura de todos os radionuclídeos liberados pela detonação de um IND.

As TEDE foram estimadas para indivíduos potencialmente expostos considerando diversas blindagens urbanas, que são:

- (a) Sem construção;
- (b) 1m abaixo do solo;
- (c) Frame house (casa unifamiliar);
- (d) Porão;
- (e) Andares Superiores;
- (f) Andares Baixos;
- (g) Concreto, parede 9 polegadas (=22,86 cm);
- (h) Concreto, parede de 12 polegadas (=30,48 cm);
- (i) Concreto, parede de 24 polegadas (=60,96 cm);
- (j) Veículo.

O *Hotspot* não descreve cada tipo de blindagem, entretanto, tomando-se por base as estruturas descritas no documento do *U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory: "Summary of Building Protection Factor Studies for External Exposure to Ionizing Radiation"* de Dillon e colaboradores (2016), assumiu-se no presente trabalho as seguintes características:

Tabela 1 – Descrição das estruturas urbanas consideradas (DILLON et al 2016)

Blindagens Urbanas		Descrição
A	Sem Construção	nenhuma blindagem
B	1m abaixo do solo	1 metro abaixo da superfície do solo; rodeada por vasta porção de terra.
C	Frame house/casa unifamiliar	pequena casa unifamiliar com o térreo e no máximo mais 1 andar. As paredes exteriores podem ser de madeira ou tijolo e conter janelas grandes.
D	Porão	porão de casas, prédios, ou qualquer construção abaixo do nível do solo.
E	Andares superiores	prédios de apartamento ou escritórios, considerando andares acima do 3º
F	Andares inferiores	prédios de apartamento ou escritórios, considerando os andares térreo (1º) e o 2º.
G	Concreto parede 9 pol	construções com paredes de concreto de 9 polegadas (= 22,86 cm).
H	Concreto parede 12 pol	construções com paredes de concreto de 12 polegadas (= 30,48 cm).
I	Concreto parede 24 pol	construções com paredes de concreto de 24 polegadas (= 60,96 cm).
J	Veículos	Veículos em geral (carros, caminhões, ônibus, etc)

Os valores de dose e posteriores cálculos de taxa de dose associados, são indispensáveis para realizar uma triagem efetiva da população potencialmente afetada indicando o tempo necessário de abrigagem, evacuação, caracterização de situação emergencial e desenvolvimento da Síndrome Aguda da Radiação (SAR), segundo a NORMA CNEN-3.01/006 (2011).

As distâncias consideradas a partir do Ponto Zero (*Ground Zero - GZ*), local da explosão, foram além de 4 km, pois abaixo desta distância o ambiente está sujeito aos efeitos mecânicos da explosão. Lesões associadas a fragmentos de vidro espalhados na

pluma podiam ocorrer para este cenário, representando um quadro potencial de injúria combinada para lesões mecânicas e provenientes da exposição radiológica, aspecto que foge ao escopo deste trabalho.

Assim, as distâncias do GZ consideradas para os cálculos não incluem efeitos: (a) térmicos, (b) pulso eletromagnético e (c) choques mecânicos. Desta forma, todos os cálculos e avaliações dos efeitos das blindagens oferecidas pelas estruturas urbanas foram efetuados nessas condições.

O cenário é então tratado de forma a selecionar pontos de localização que estejam fora do alcance dos efeitos mecânicos e térmicos da explosão, o que poderia destruir as estruturas urbanas que oferecem blindagem para sobreviventes, objeto principal deste estudo. A blindagem oferecida por estruturas urbanas como veículos, construções e porões determinam taxas de doses distintas de radiação, permitindo o cálculo do tempo no qual indivíduo exposto em cada tipo de blindagem poderia atingir o nível que define a necessidade de abrigo (10 mSv), de evacuação (50 mSv), emergência (100 mSv) e de possível desenvolvimento da Síndrome Aguda da Radiação (SAR- 700 mSv) (NORMA CNEN-3.01/006, 2011).

Com o objetivo de embasar as tomadas de decisão posteriores à detonação do IND e fazendo uso das informações e dados obtidos no código *Hotspot*, foi utilizado o questionário sobre segurança do público contido no documento “*Improvised Nuclear Device Response and Recovery: Communicating in the Immediate Aftermath*” (FEMA, 2013), elaborado por técnicos americanos especialistas em radiação e comunicação da Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos. Este documento consiste de perguntas-chave a serem respondidas de acordo com o cenário em questão e visam auxiliar no processo de triagem e minimização de injúrias e níveis de dose recebidos após a detonação de um IND.

Com a seleção de nível de blindagem de cada estrutura urbana e posteriores ações possíveis dependendo da localização dos indivíduos do público em relação às estruturas urbanas, se espera poder contribuir para otimização dos processos de triagem de indivíduos para recepção pelos serviços de saúde. Espera-se também um impacto positivo tanto na primeira resposta à emergência quanto na efetividade da abrigagem, evacuação e consequente diminuição da dose recebida pelos indivíduos. Foram também relatadas orientações para o processo de decisão de forma a reduzir danos à saúde do público possivelmente afetado, assim como minimizar prováveis desperdícios de recursos

disponíveis, normalmente escassos por conta da urgência das ações de proteção necessárias à solução do cenário.

4.2. CENÁRIO

Por meio do código *Hotspot*, foi simulada uma explosão nuclear. Os parâmetros utilizados pelo *software* foram definidos de forma a se obter um cenário conservativo típico de detonação deste tipo de artefato.

A metodologia deste trabalho foi dividida em 4 fases:

- Fase 1 = simulação no *Hotspot*;
- Fase 2 = geração dos dados de saída do *Hotspot*;
- Fase 3 = cálculo dos fatores de transmissão de radiação gama imediata e *fallout* pelas estruturas urbanas;
- Fase 4 = avaliação da proteção oferecida pelas estruturas urbanas e ações de resposta imediata.

Fase 1

Dados de entrada no Hotspot para simulação

A tabela 2 apresenta as principais características utilizadas no *Hotspot* para a simulação do IND de 10 kT e contém um conjunto de parâmetros que apresentam a melhor condição para comparação com a realidade de um evento desse tipo (HOMANN, 2013).

Tabela 2 - Principais características da simulação do IND (HOMANN, 2013).

Variável	Valor
Rendimento	10,0 kT
Altura Máxima Nuvem	8200 m
Raio Nuvem	2300 m
Altura Mínima Nuvem	5100 m
Velocidade Efetiva Vento	6,8 m/s
Nêutron Imediato RBE	3,0
Direção do Vento	270
Fator de Correção Rugosidade do Solo	0,7

O código *Hotspot* não explicita quais radionuclídeos considera em uma explosão nuclear, porém, segundo Ferguson e Potter (2006), há dois tipos de material físsil que podem ser usados para produzir um IND: Urânio Altamente Enriquecido (UAE) ou plutônio, sendo o primeiro mais fácil de ser utilizado no processo de produção de uma arma nuclear, e portanto, utilizado no presente estudo.

As figuras 1 e 2 apresentam a tela do *Hotspot* com a simulação do cenário de detonação do IND com diferentes estruturas urbanas, utilizando a função “explosão nuclear” na superfície.

Como valores para as condições atmosféricas foram utilizadas o default do Código *Hotspot* uma vez que estas grandezas não influenciam na comparação relativa de proteção entre as estruturas urbanas.

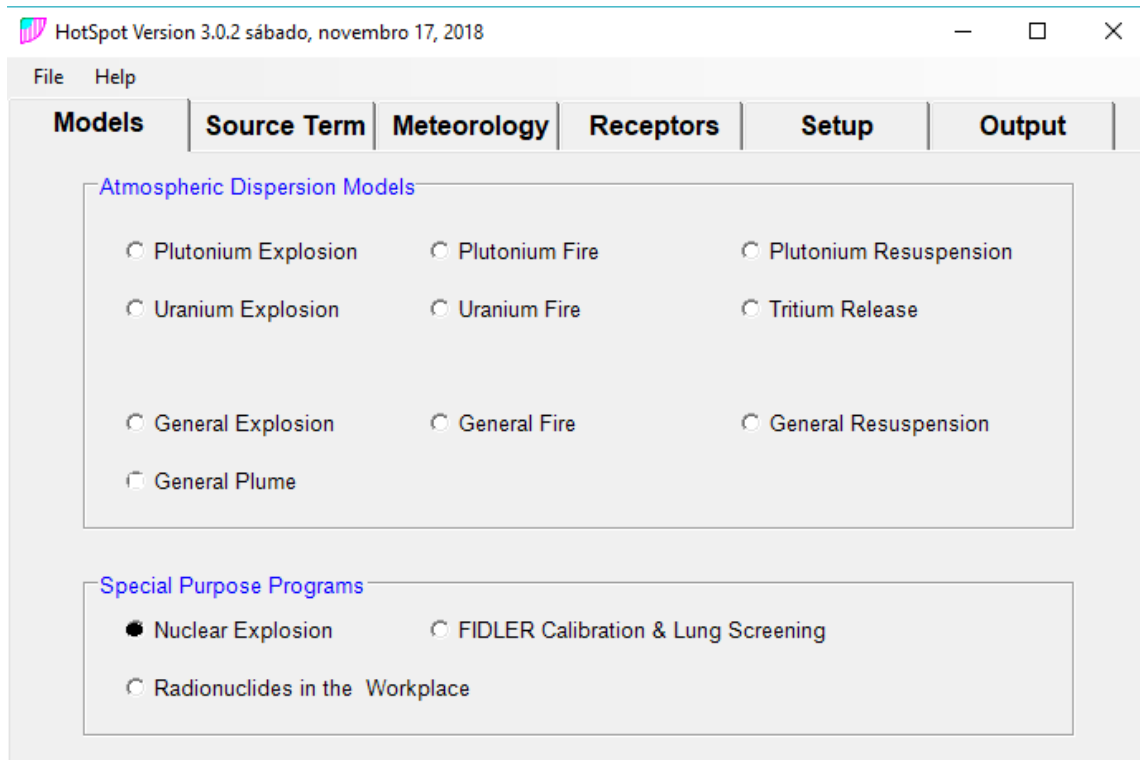


Fig. 1 -Tela 1 do Hotspot com um exemplo da simulação do IND

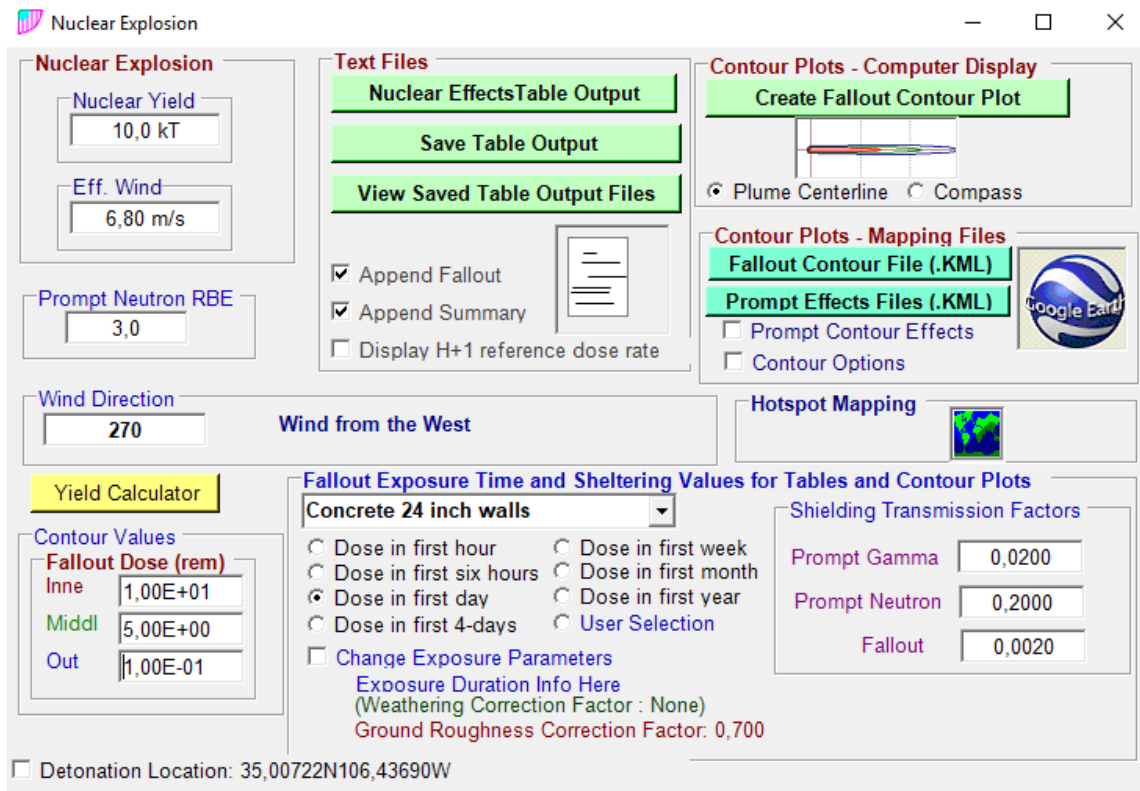


Fig. 2 -Tela 2 do Hotspot com um exemplo da simulação do IND

Plumas de contaminação (isodoses) são linhas em um mapa, traçadas de forma a unir todos os pontos nos quais a taxa de dose de radiação em um determinado momento é a mesma. Os níveis de dose de radiação dentro do contorno são mais altos que o valor da linha de contorno, e os níveis de dose de radiação fora do contorno são mais baixos do que o valor do contorno (HOMANN, 2013).

As isodoses são divididas em 3 regiões distintas de interesse: (a) *inner*, (b) *middle* e (c) *outer*, as quais foram escolhidas com base na RESOLUÇÃO CNEN Nº 027, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2004, onde são descritas as diretrizes básicas de proteção radiológica, por meio da NORMA CNEN-3.01/006 (2011), sendo verificados os seguintes aspectos:

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

O sistema assume todas as estruturas urbanas como isoladas, de forma que não foram considerados efeitos causados pela proximidade de construções adjacentes, o que torna o cenário mais conservativo.

Fase 2

Dados de saída do Hotspot

O código *Hotspot* 3.0.3 calcula a TEDE para inalação, submersão, ressuspensão e exposição ao 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: o FGR11 (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 FGR13 (1999) fornece coeficientes de dose usando a ICRP 66 (1994) e metodologias da ICRP 60/70 (1991) (HOMANN, 2013). Como arquivos de saída, o *HotSpot* 3.0.3 fornece resultados na forma de tabelas e plumas de isodoses.

Para cada estrutura urbana considerada no trabalho foi calculada a área da pluma gerada no primeiro dia, que é consequência da poeira radioativa que atinge cada uma das estruturas urbanas, visto que o interesse do trabalho é restrito às primeiras 24 horas, ou seja, tem-se como objetivo analisar apenas medidas de proteção urgentes em cenário IND.

As TEDE para as distâncias 4 km (distância mínima sem efeitos que não sejam radiológicos), 6 km, 8 km e 10 km a partir do GZ para cada estrutura urbana foram determinadas pelo *Hotspot* para a primeira hora e para o primeiro dia do cenário. Cabe ressaltar que as distâncias consideradas foram as de valor acima de 4 km, já que abaixo dessa medida existem efeitos mecânicos da explosão, conforme detalhado neste trabalho anteriormente.

Fase 3

Cálculo dos fatores de transmissão de radiação gama imediata pelas estruturas urbanas.

A relação [transmissão = 1 – blindagem] foi aplicada para se calcular os fatores de blindagem das estruturas urbanas a partir dos fatores de transmissão de radiação imediata fornecido pela simulação.

Foi também realizada nesta fase a análise da distância mínima do GZ onde não há outros efeitos que não sejam radiológicos, assim como, o cálculo das taxas de doses distintas de radiação e a estimativa do tempo em cada tipo de blindagem para atingir as doses limites para abrigo (10 mSv), evacuação (50 mSv), emergência (100 mSv) (CNEN-3.01/006) e possibilidade de desenvolvimento da SAR (700 mSv) (CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 2018).

Fase 4

Avaliação da proteção das estruturas urbanas e ações de segurança

Com o objetivo de embasar as tomadas de decisão posteriores à detonação do IND e fazendo uso das informações e dados obtidos no código *Hotspot*, foi utilizado um questionário norte americano que consiste de perguntas-chave a serem respondidas de acordo com o cenário em questão. Estas auxiliam no processo de salvamento e minimização de injúrias após a detonação e estão contidas no documento “*Improvised*

Nuclear Device Response and Recovery: Communicating in the Immediate Aftermath” da Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos (FEMA, 2013).

Este guia foi elaborado por técnicos especialistas em radiação e comunicação. Desde 2010 o conteúdo de todas as versões vem sendo revisado e testado por respondedores locais e federais dos Estados Unidos, da mesma forma que por órgãos como: *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC), *Food and Drug Administration* (FDA), dentre outros. Assim, o documento atual incorporou todos os *feedbacks* recebidos nestas revisões e testes.

As questões deste documento que serão utilizadas neste trabalho correspondem à segurança do público nas doze primeiras horas após a detonação do IND ou à atualização do cenário depois das 12 horas iniciais e seguem descritas a seguir:

- a) O que os indivíduos devem fazer para se protegerem? Quais as ações de proteção necessárias?
- b) Os indivíduos necessitarão evacuar a área afetada? Há necessidade de evacuação?
- c) Que áreas são seguras para os respondedores da emergência atuarem?
- d) Como estão sendo tomadas as decisões de evacuação?
- e) Haverá abrigo para evacuados?

Na figura 3 pode-se observar o aspecto geral da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

ASPECTO GERAL DA METODOLOGIA DO TRABALHO

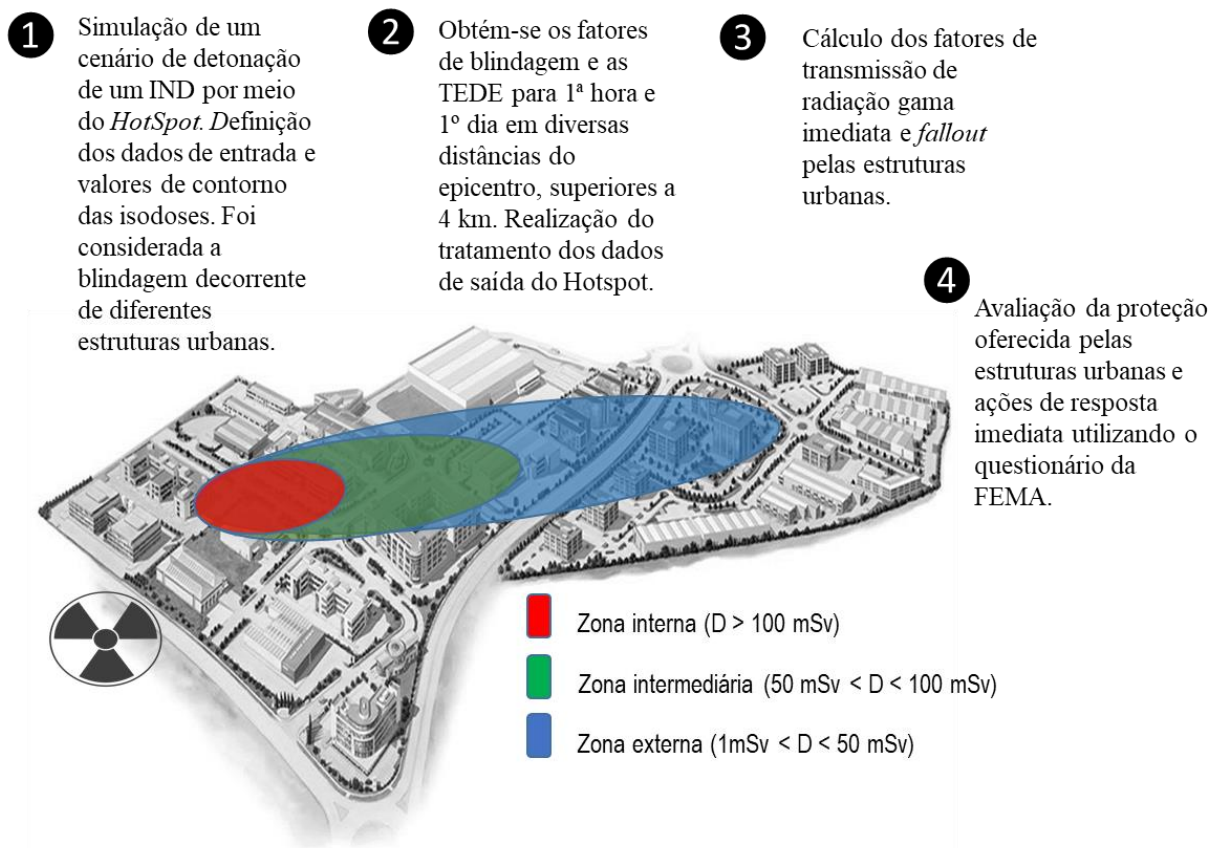


Figura 3. Visão geral da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho.

5. RESULTADOS

De acordo com os resultados de saída do Código *Hotspot* (Anexo 1) e sabendo-se que os efeitos da radiação ionizante são provenientes da radiação nuclear imediata (*prompt radiation*) e da precipitação radioativa (*fallout*), indivíduos desprotegidos podem receber dose proveniente de *prompt radiation* suficiente para 50% de letalidade (em semanas) até uma distância de 1,4 km. Outro efeito imediato existente é a explosão. Esta é 100 % letal até 0,27 km. Ainda, a respeito das lesões associadas aos estilhaços de janelas de vidro, estas podem ocorrer até uma distância de aproximadamente 4 km.

Pode-se também avaliar na tabela 3 as distâncias radiais para os efeitos imediatos ou *prompt effects* (no primeiro minuto após a detonação de um IND) para efeitos imediatos de radiação ionizante baseados na radiação de corpo inteiro em cGy-eq.

Tabela 3 – Efeitos de Radiação Imediata (*Prompt*) baseados na radiação de corpo inteiro em cGy-eq. (HOMANN, 2013)

Radiação (cGy-eq)	Distância do GZ	Efeito Esperado/ Tempo para o efeito (HOMANN, 2013)
10 000	0.83 km	100% óbito, < 1 dia
1 000	1.18 km	100% óbito, dias
460	1.30 km	95% óbito, semanas
400	1.33 km	85% óbito, semanas
300	1.37 km	50% óbito, semanas
200	1.44 km	15% óbito, anos
140	1.51 km	5% óbito, anos

Já a figura 4 apresenta a área da pluma, no 1º dia, considerando dose externa proveniente do *fallout* depositado no solo, sendo uma para cada estrutura urbana. As plumas (isodoses) foram geradas no código *Hotspot* e podem ser visualizadas nas figuras 5A até 5J. Estas são divididas em 3 regiões distintas neste trabalho: (a) *inner* (100 mSv), (b) *middle* (50 mSv) e (c) *outer* (1 mSv), de acordo com o que já foi especificado anteriormente. Assim, analisando a figura 5A, por exemplo, para 10 kT, velocidade do vento de 6,8 m/s e estrutura “Sem construção”, obtém-se as áreas: 434 km² para Inner, 670 km² para Middle e 3000 km² para Outer. De forma similar, na figura 5B, com os mesmos parâmetros, mas com a estrutura “1 m abaixo do solo”, os resultados diferem significativamente, sendo: 0,081 km² para Inner, 0,13 km² para Middle e 14 km² para Outer, demonstrando a proteção gerada pela segunda estrutura em comparação com a

primeira, onde havia ausência de blindagem. Desta maneira, seguem-se as demais plumas (Fig. 5C a 5J), podendo-se analisar uma área maior nos casos de estruturas com menor poder de blindagem.

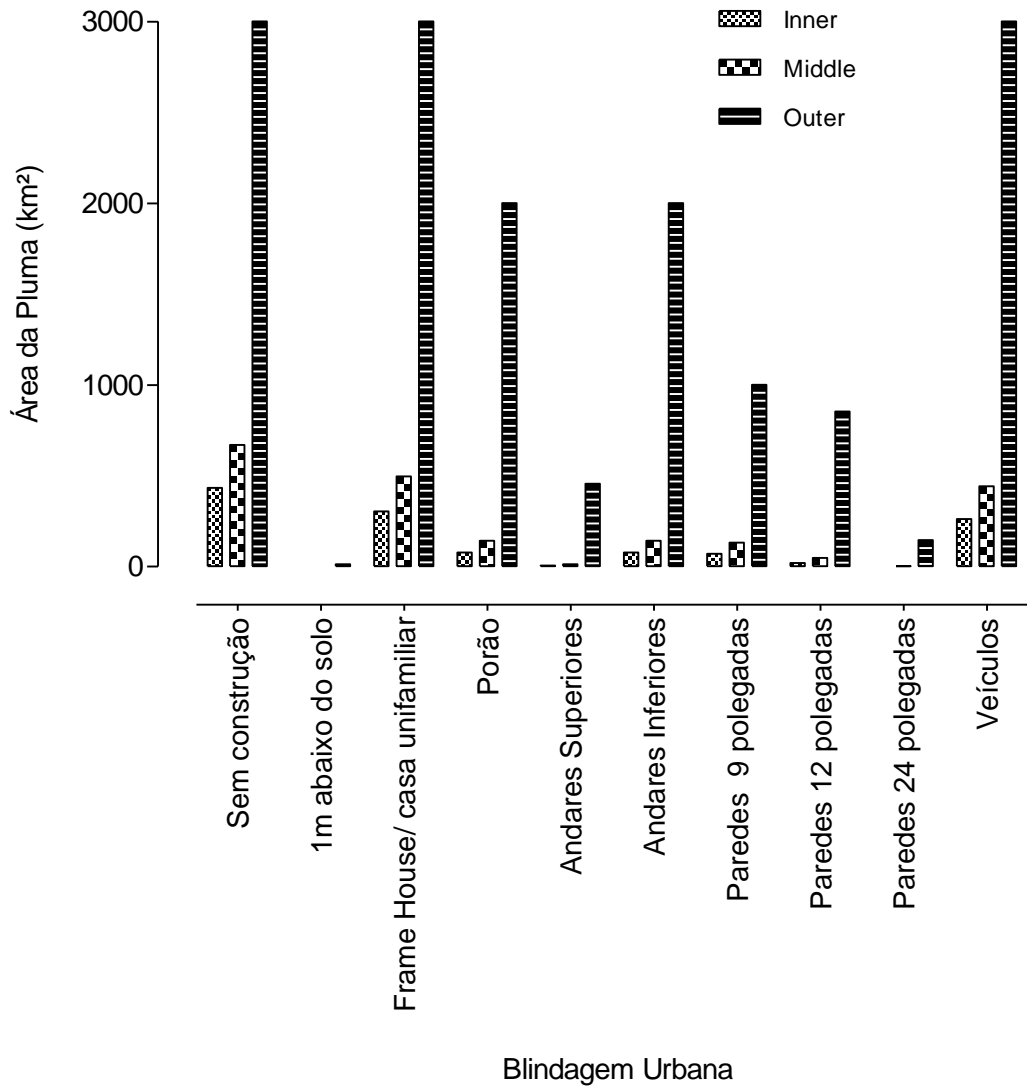


Figura 4- Área de cada pluma de interesse no 1º dia, considerando cada uma das estruturas urbanas de blindagem.

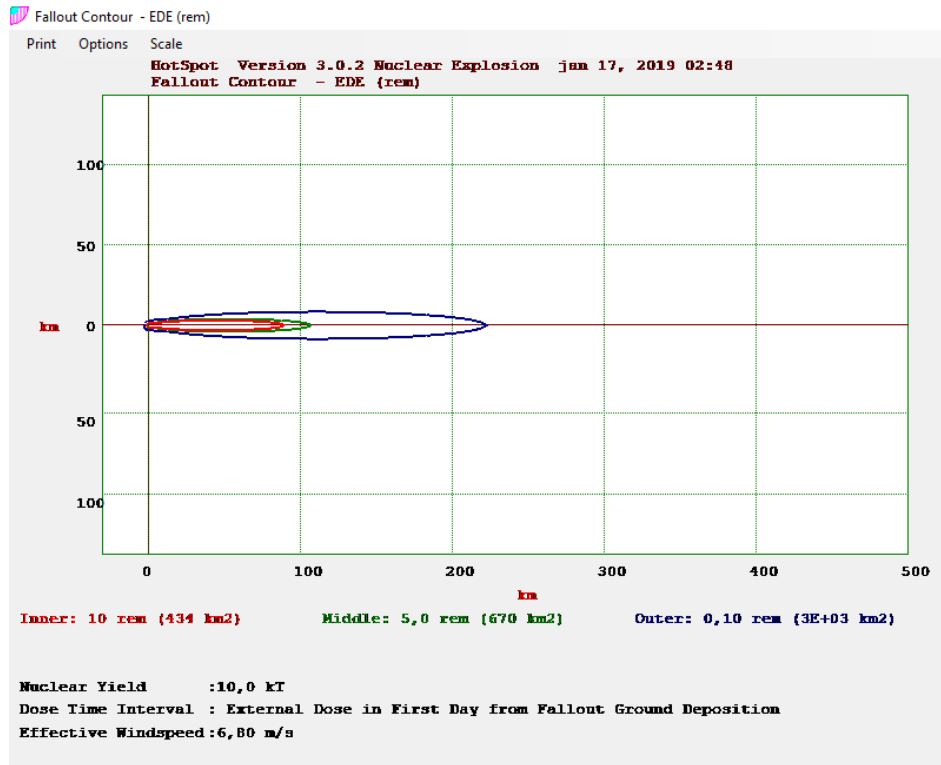


Figura 5A- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Sem construção”.

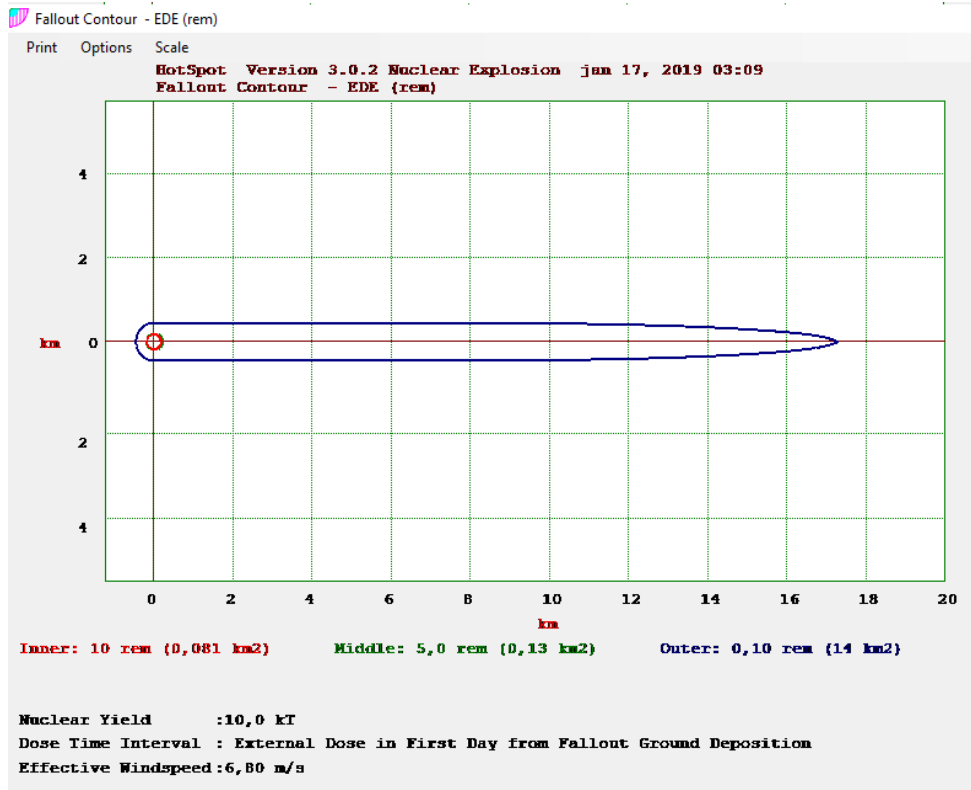


Figura 5B- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “1 m abaixo do solo”

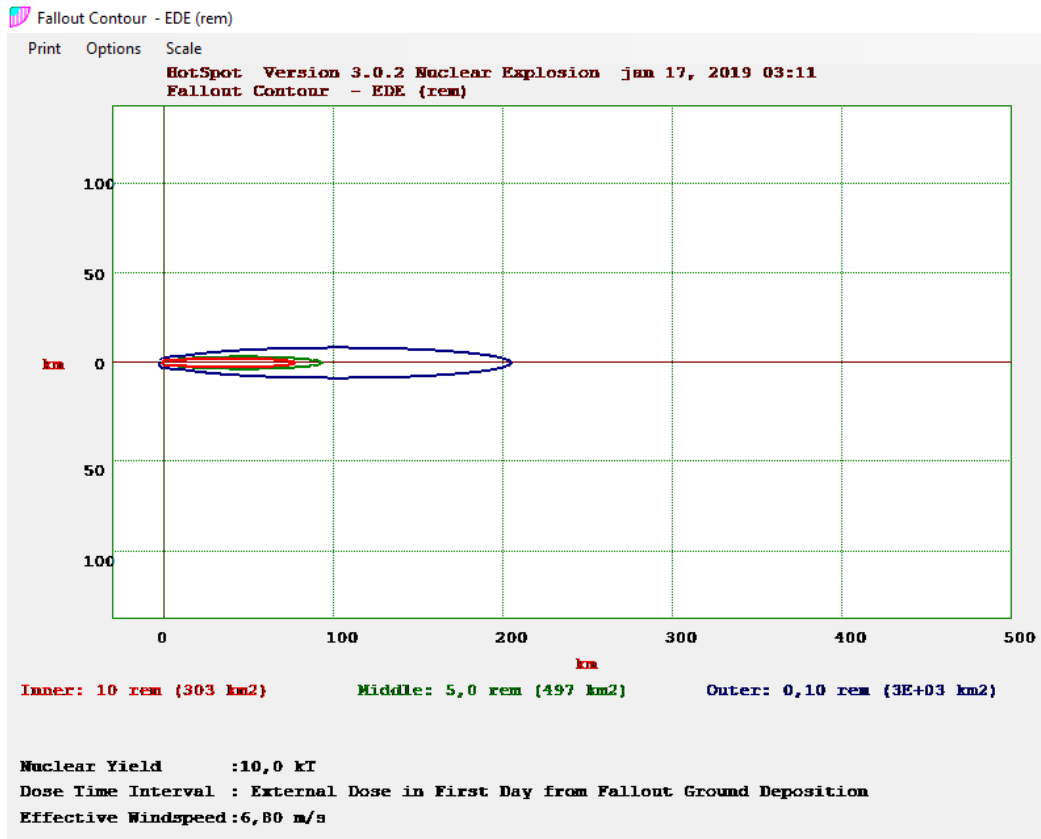


Figura 5C- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Frame house/casa unifamiliar”

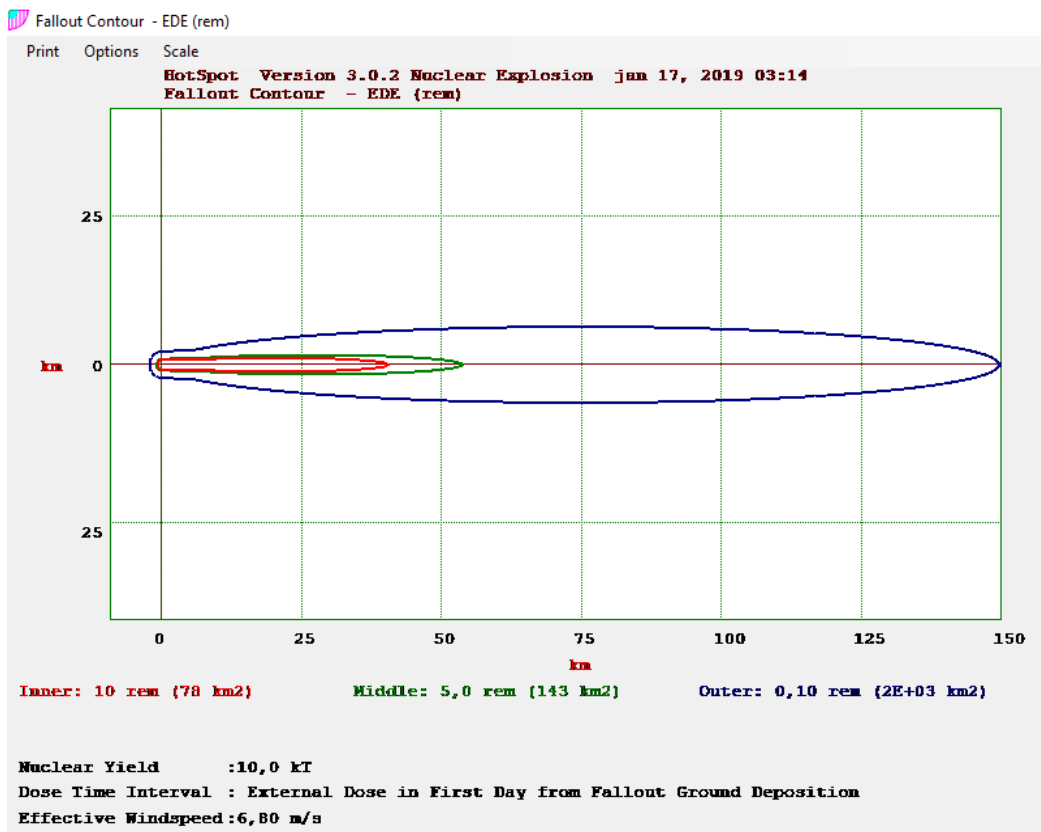


Figura 5D- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Porão”

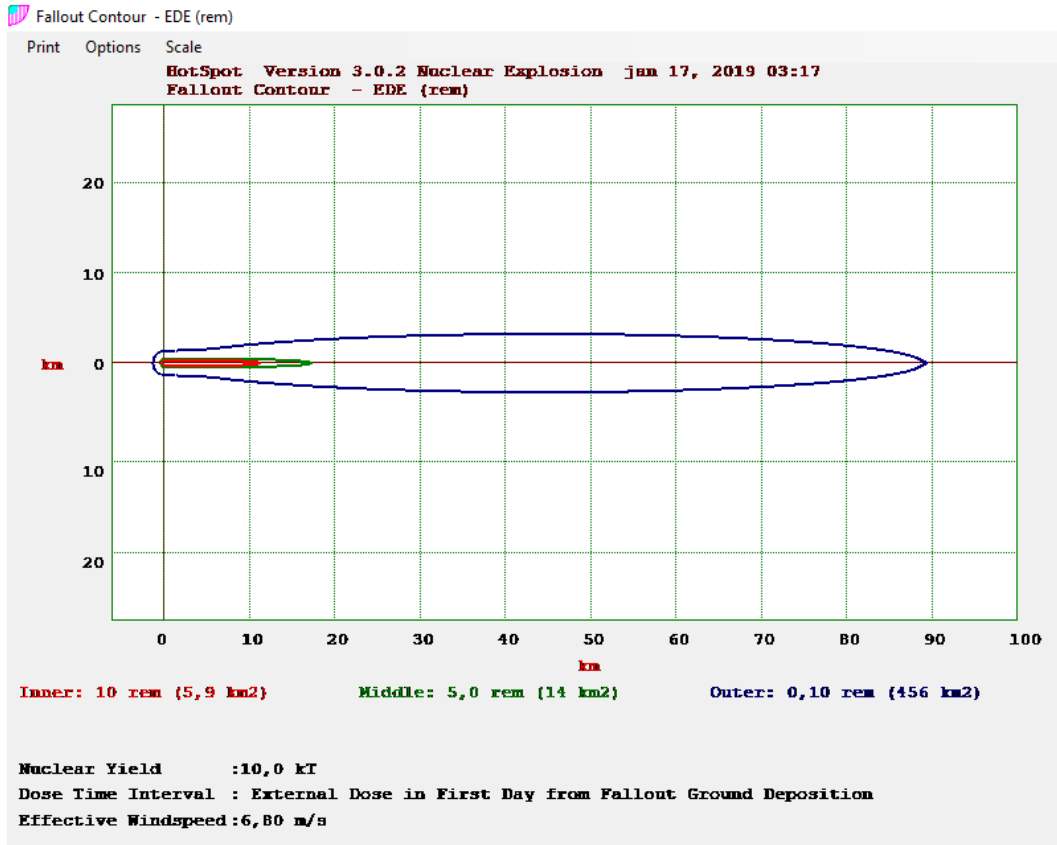


Figura 5E- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Andares Superiores”

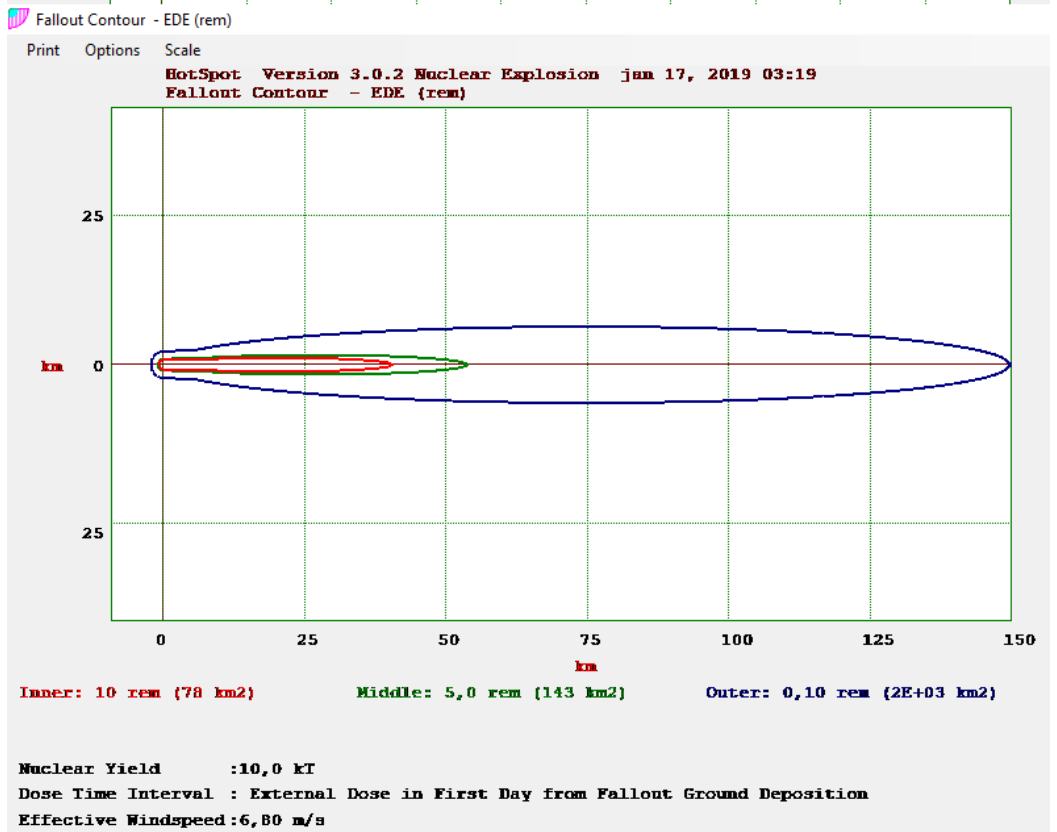


Figura 5F- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Andares Inferiores”

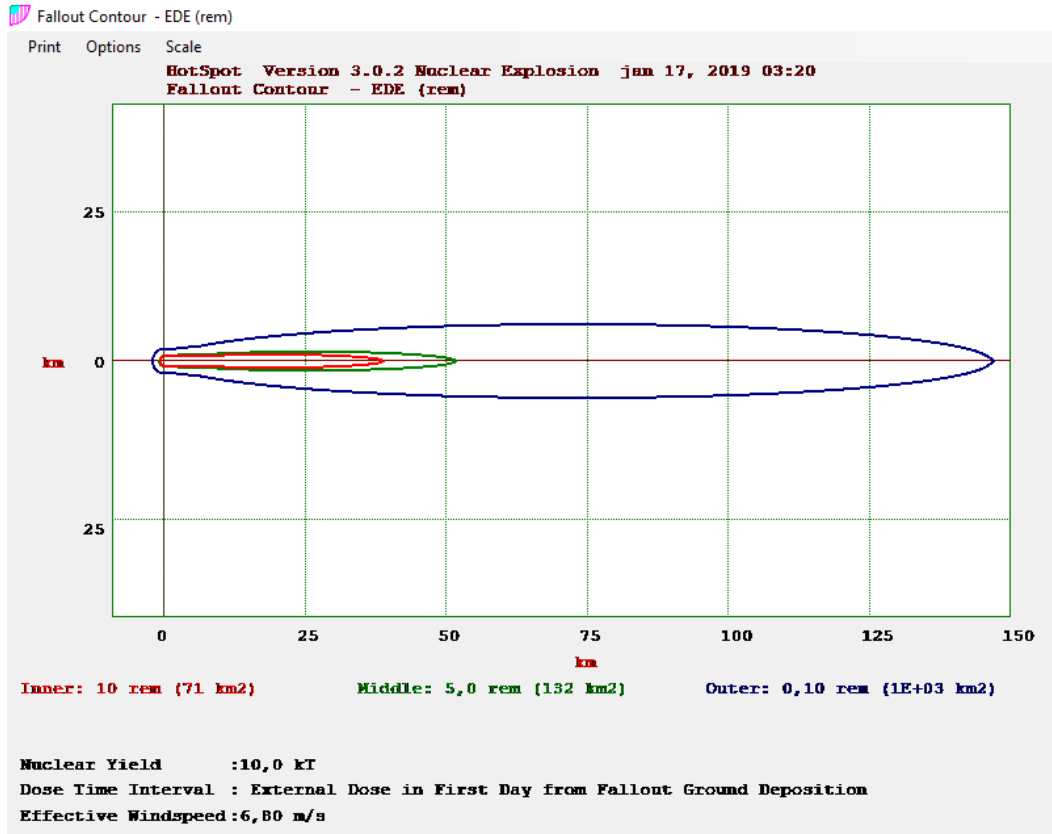


Figura 5G- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Concreto 9 pol”

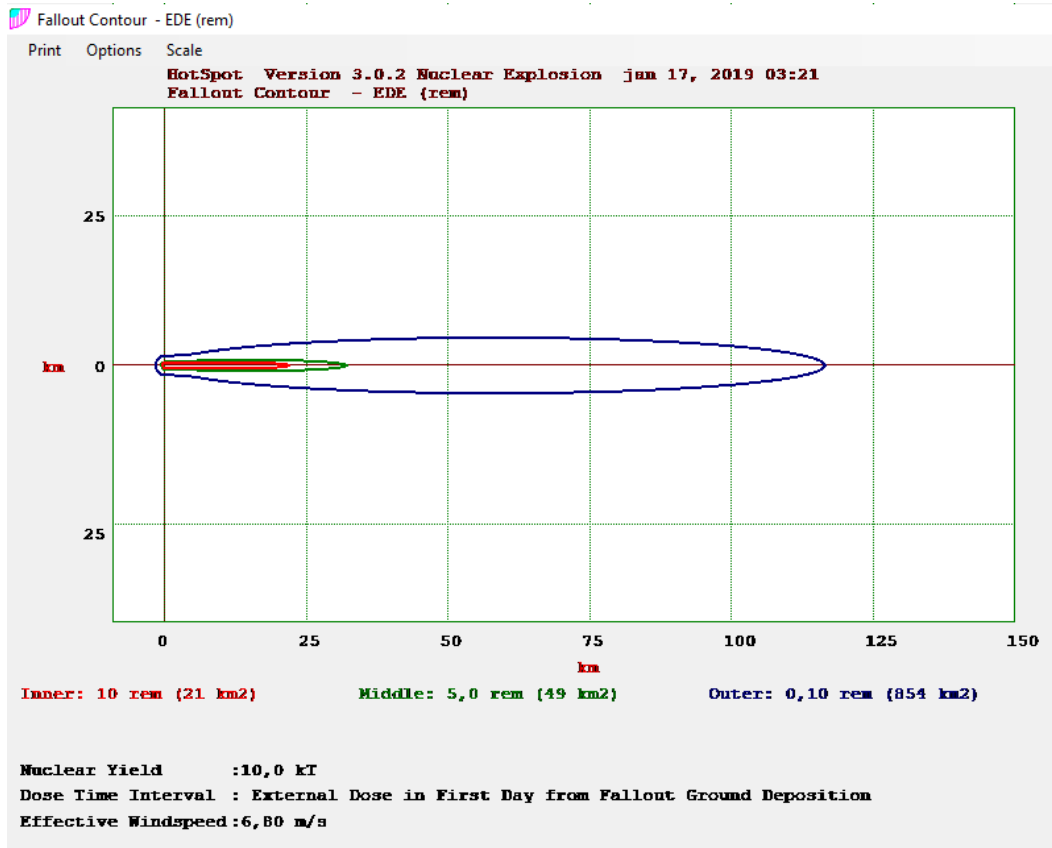


Figura 5H- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Concreto 12 pol”

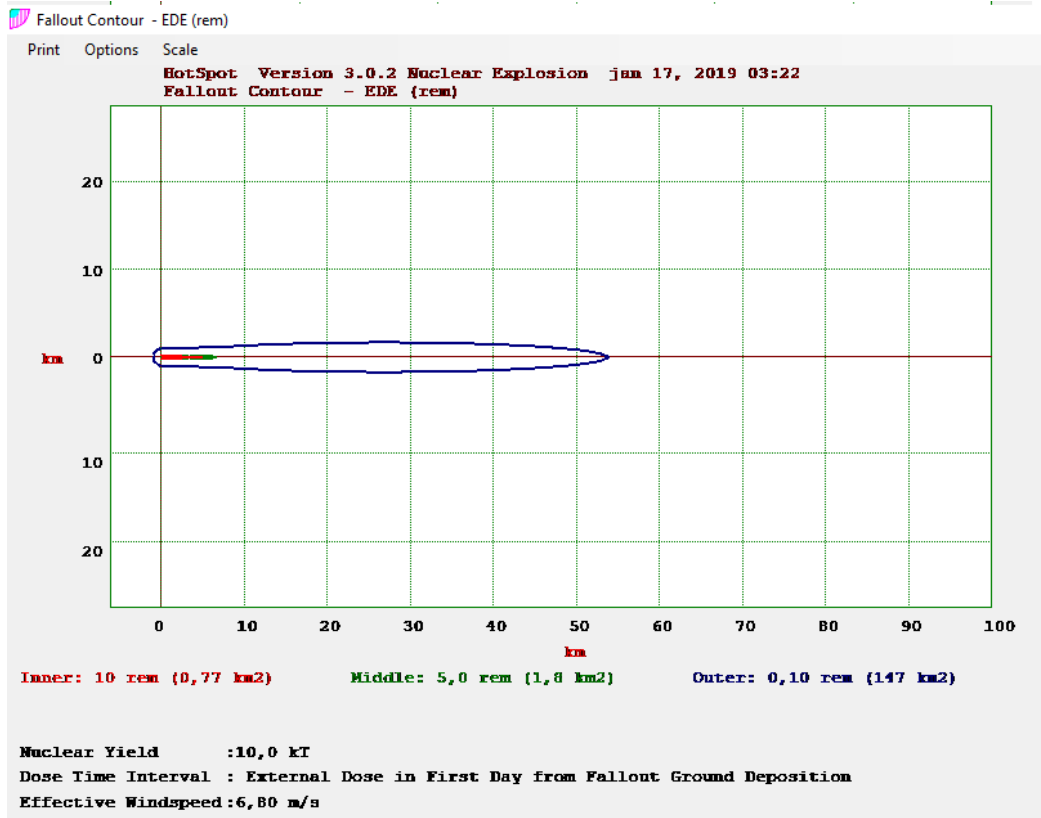


Figura 5I- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Concreto 24 pol”

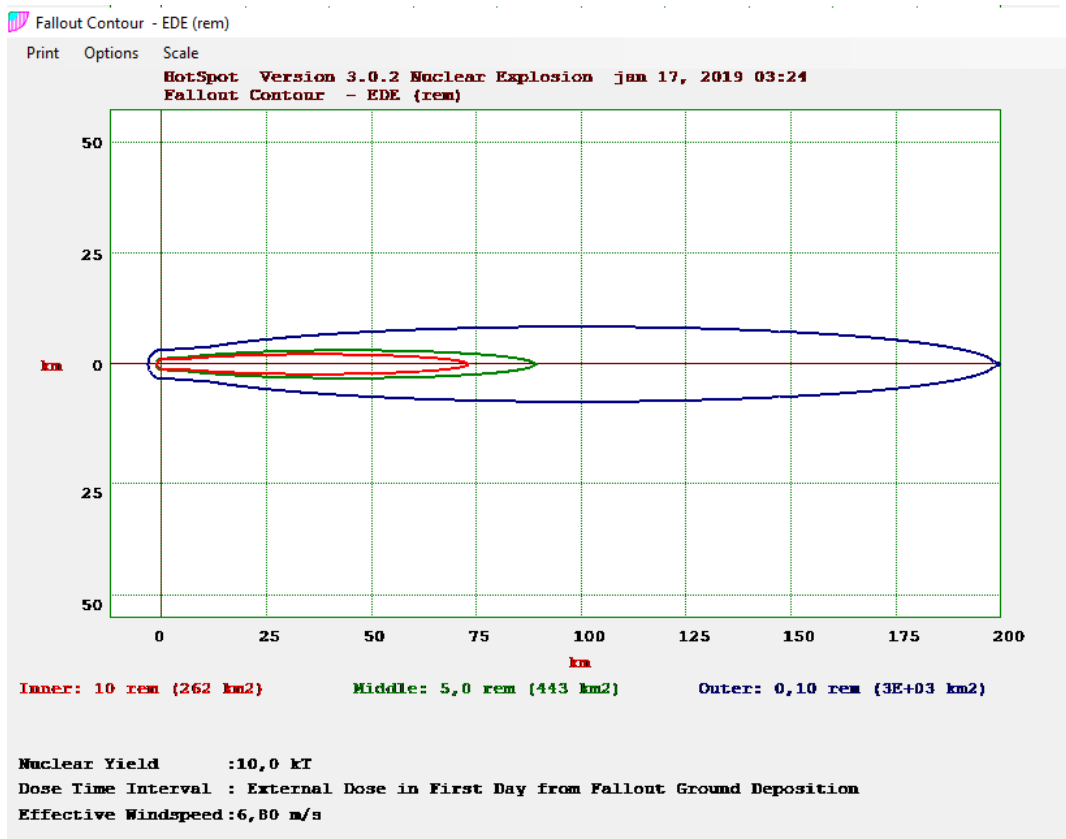


Figura 5J- Pluma gerada pelo *Hotspot* para 1º dia- “Veículos”

A tabela 4 apresenta cálculos para avaliação da TEDE e percentual de blindagem total (S) para cada estrutura em função da distância e do tempo. Ainda, a tabela 5 refere-se aos fatores de transmissão Gama para cada estrutura urbana e seus respectivos percentuais de blindagem (à radiação Gama) para os efeitos imediatos (*prompt*) e *fallout*, calculados separadamente, e sem considerar resistência aos efeitos térmicos e mecânicos da explosão nuclear do IND.

Tabela 4 – TEDE (mSv) e percentual de blindagem total (S em %) para cada estrutura em função da distância(km) e do tempo (dia ou hora).

Blindagens Urbanas		4 km TEDE (mSv)			6 km TEDE (mSv)			8 km TEDE (mSv)			10 km TEDE (mSv)		
		1ª h	1º dia	S (%)	1ª h	1º dia	S (%)	1ª h	1º dia	S (%)	1ª h	1º dia	S (%)
A	Sem Construção	3.9E+04	8.1E+04	0.0	1.3E+04	3.1E+04	0,0	6.2E+03	1.8E+04	0.0	3.6E+03	1.2E+04	0.0
B	1m abaixo do solo	7.8E+00	1.6E+01	100.0	2.6E+00	6.3E+00	100,0	1.2E+00	3.6E+00	100.0	7.1E-01	2.4E+00	100.0
C	Frame house/casa unifamiliar	2.3E+04	4.9E+04	39.5	7.7E+03	1.9E+04	40,8	3.7E+03	1.1E+04	38.9	2.1E+03	7.3E+03	39.2
D	Porão	3.9E+03	8.1E+03	90.0	1.3E+03	3.1E+03	90,0	6.2E+02	1.8E+03	90.0	3.6E+02	1.2E+03	90.0
E	Andares superiores	3.9E+02	8.1E+02	99.0	1.3E+02	3.1E+02	99,0	6.2E+01	1.8E+02	99.0	3.6E+01	1.2E+02	99.0
F	Andares inferiores	3.9E+03	8.1E+03	90.0	1.3E+03	3.1E+03	90,0	6.2E+02	1.8E+03	90.0	3.6E+02	1.2E+03	90.0
G	Concreto parede 9”	3.5E+03	7.3E+03	91.0	1.2E+03	2.8E+03	90,8	5.6E+02	1.6E+03	91.1	3.2E+02	1.1E+03	90.8
H	Concreto parede 12”	1.2E+03	2.4E+03	97.0	3.8E+02	9.4E+02	97,1	1.9E+02	5.4E+02	97.0	1.1E+02	3.6E+02	97.0
I	Concreto parede 24”	7.8E+01	1.6E+02	99.8	2.6E+01	6.3E+01	99,8	1.2E+01	3.6E+01	99.8	7.1E+00	2.4E+01	99.8
J	Veículo	1.9E+04	4.0E+04	50.6	6.4E+03	1.6E+04	50,8	3.1E+03	8.9E+03	50.6	1.8E+03	6.1E+03	49.2

Tabela 5 – Fator de transmissão e percentual de blindagem Gama *prompt* e *fallout* para cada estrutura urbana, sem considerar resistência aos efeitos térmicos e mecânicos da explosão nuclear do IND.

	Blindagem urbana	Fatores de Transmissão Gama		Blindagem Gama (%)	
		<i>Prompt</i>	<i>Fallout</i>	<i>Prompt</i>	<i>Fallout</i>
A	Sem construção	1.00E+00	1.00E+00	0.00	0.00
B	1m abaixo do solo	4.00E-03	2.00E-04	99.60	99.98
C	Frame house/casa unifamiliar	1.00E+00	6.00E-01	0.00	40.00
D	Porão	6.00E-01	1.00E-01	40.00	90.00
E	Andares superiores	9.00E-01	1.00E-02	10.00	99.00
F	Andares inferiores	6.00E-01	1.00E-01	40.00	90.00
G	Concreto parede 9”	2.00E-01	9.00E-02	80.00	91.00
H	Concreto parede 12”	1.00E-01	3.00E-02	90.00	97.00
I	Concreto parede 24”	2.00E-02	2.00E-03	98.00	99.80
J	Veículo	1.00E+00	5.00E-01	0.00	50.00

As tabelas 6 e 7 apresentam o cálculo da taxa de dose no primeiro dia, nos quatro dias iniciais e na primeira semana para as distâncias de 4 e 6 km, e, 8 e 10 km, respectivamente, medidos na direção do vento a partir do GZ.

Tabela 6- Taxa de dose 1º dia / 4 dias Iniciais / 1ª Semana para 4 e 6 km (*Hotspot*)

	Tipo de Construção	4 km- Taxa de dose (mSv/h)			6 km- Taxa de dose (mSv/h)		
		1º dia	4 dias Iniciais	1ª semana	1º dia	4 dias Iniciais	1ª semana
A	Sem construção	3375,0	958,3	571,4	1291,7	322,9	214,3
B	1m abaixo do solo	0,7	0,2	0,1	0,3	0,1	0,0
C	Frame House/casa unifamiliar	2041,7	572,9	345,2	791,7	229,2	136,9
D	Porão	337,5	95,8	57,1	129,2	37,5	22,6
E	Andares Superiores	33,8	9,6	5,7	12,9	3,8	2,3
F	Andares Inferiores	337,5	95,8	57,1	129,2	37,5	22,6
G	Paredes de concreto 9 pol	304,2	86,5	51,8	116,7	34,4	20,2
H	Paredes de concreto 12 pol	100,0	29,2	17,3	39,2	11,5	6,5
I	Paredes de concreto 24 pol	6,7	1,9	1,1	2,6	0,8	0,5
J	Veículos	1666,7	479,2	285,7	666,7	187,5	113,1

Tabela 7- Taxa de dose 1º dia / 4 dias iniciais/ 1ª Semana para 8 e 10 Km (Hotspot)

	Tipo de Construção	8 km- Taxa de dose (mSv/h)			10 km- Taxa de dose (mSv/h)		
		1º dia	4 dias Inic	1ª semana	1º dia	4 dias Inic	1ª semana
A	Sem construção	750,0	218,8	131,0	500,0	145,8	89,3
B	1m abaixo do solo	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
C	Frame House/casa unifamiliar	458,3	135,4	77,4	304,2	90,6	54,2
D	Porão	75,0	21,9	13,1	50,0	14,6	8,9
E	Andares Superiores	7,5	2,2	1,3	5,0	1,5	0,9
F	Andares Inferiores	75,0	21,9	13,1	50,0	14,6	8,9
G	Paredes de concreto 9 pol	66,7	19,8	11,9	45,8	13,5	8,3
H	Paredes de concreto 12 pol	22,5	6,6	3,9	15,0	4,5	2,7
I	Paredes de concreto 24 pol	1,5	0,4	0,3	1,0	0,3	0,2
J	Veículos	370,8	114,6	65,5	254,2	75,0	45,2

As figuras 6A a 6D representam o tempo, em horas, que as doses de 10 mSv, 50 mSv, 100 mSv e 700 mSv levam para atingir as distâncias a partir do GZ, aleatoriamente escolhidas, de 4, 6, 8 e 10 km na direção do vento. Na figura 6A tem-se o tempo em horas a partir do qual será necessário obter abrigo (no caso, permanecer somente dentro da estrutura) para os indivíduos nas diversas distâncias e construções. Na figura 6B, a situação é análoga, porém considerando a necessidade de evacuação. Na figura 6C, os dados são para caracterização de emergência e na figura 6D, determina-se o tempo no qual é possível manifestar-se a Síndrome Aguda da Radiação (SAR), já que 700 mSv é a dose estimada para a qual já é possível diagnosticar-se esta síndrome (CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 2018).

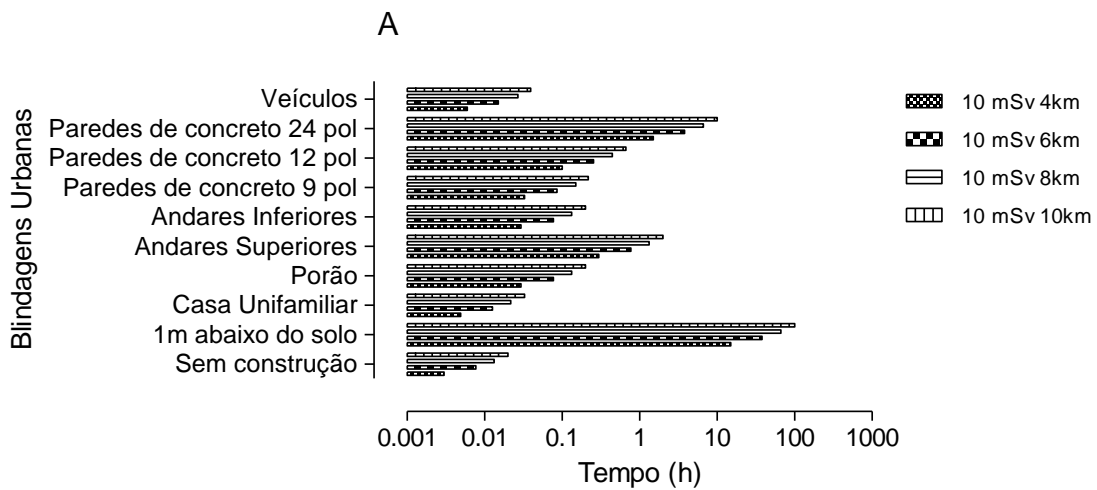


Fig.6A. Tempo, em horas, para abrigo nas diversas estruturas urbanas e distâncias.

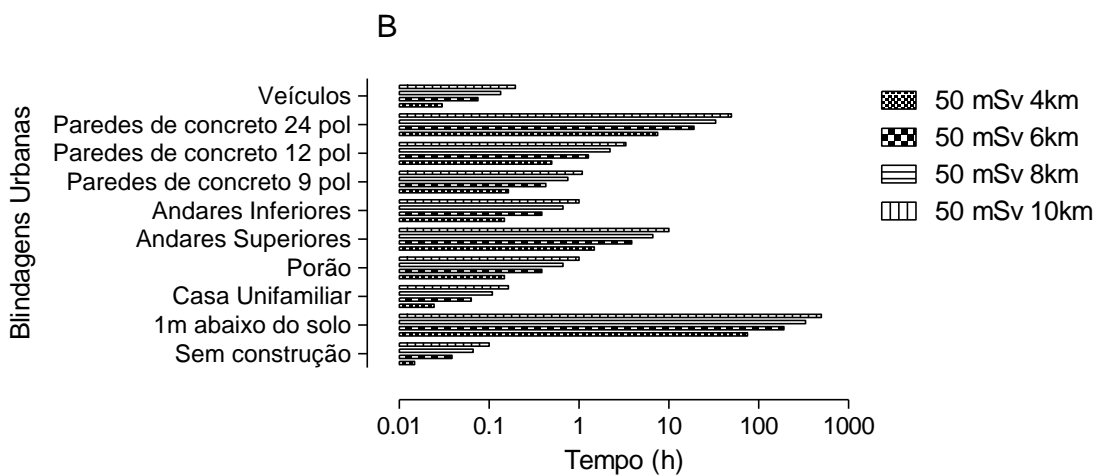


Fig.6B. Tempo, em horas, para evacuação nas diversas estruturas urbanas e distâncias.

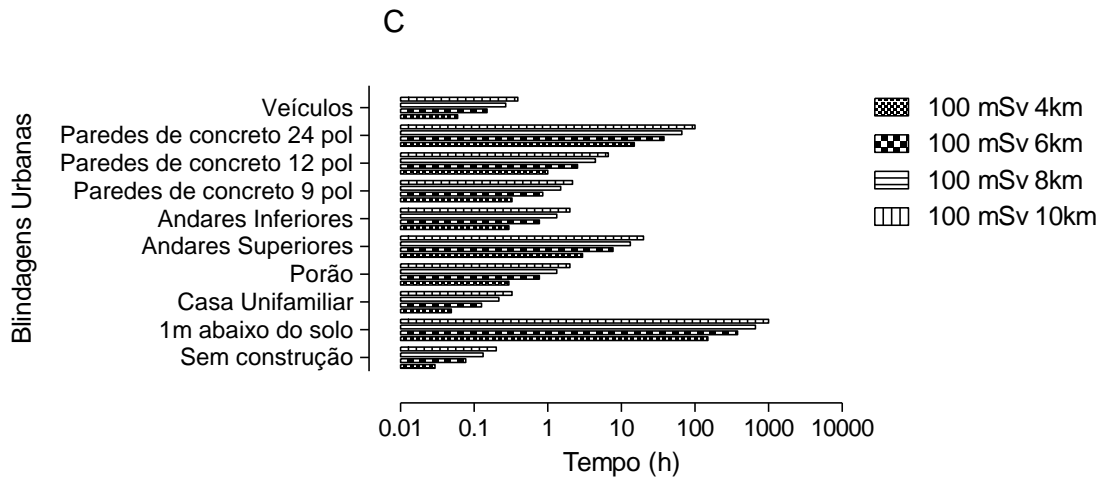


Fig.6C. Tempo, em horas, para caracterização de emergência nas diversas estruturas urbanas e distâncias.

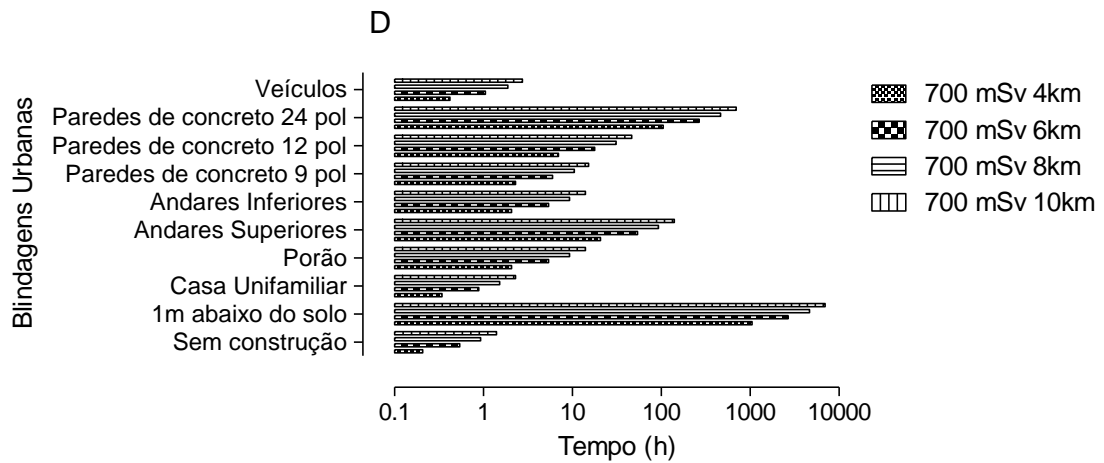


Fig.6D. Tempo, em horas, para caracterização de dose para possível desenvolvimento da SAR nas diversas estruturas urbanas e distâncias.

6. DISCUSSÃO

Analisando-se os resultados de saída do Código Hotspot (Anexo), e sabendo-se que os efeitos da radiação ionizante são provenientes da radiação nuclear imediata (*prompt radiation*) e da precipitação radioativa (*fallout*), indivíduos desprotegidos podem receber dose proveniente de *prompt radiation* suficientes para 50 % de letalidade (em semanas) até uma distância de 1,4 km. Outro efeito imediato existente é a explosão. Esta é 100 % letal até 0,27 km. Ainda, a respeito das lesões associadas aos estilhaços de janelas de vidro, observa-se que podem ocorrer até uma distância de 4,09 km. Já as mortes devido à radiação podem ter causa na radiação nuclear imediata ou na precipitação radioativa, consistindo em radiação ionizante proveniente de raios X, radiação gama, e nêutrons produzidos no primeiro minuto após a explosão nuclear.

A tabela 3 sugere que, apesar do efeito mais distante do GZ apresentado ser menor que 4 km, pode-se perceber que neste caso ainda são considerados efeitos mecânicos e térmicos. Desta forma, a menor distância estudada para efeito exclusivamente radioativo foi de 4 km.

A figura 4 evidencia uma pluma para *Inner* e *Middle* quase nula ou muito reduzida para “1 m abaixo do solo”, “andares superiores” e “parede 24 polegadas”, demonstrando maior capacidade de blindagem dessas estruturas, já que a nuvem radioativa consegue ser barrada pela estrutura, diminuindo a área em que a TEDE atinge 100 mSv no caso da *Inner* e 50 m Sv para a *Middle*. Por esta mesma razão, a pluma *Outer*, apresenta áreas de abrangência maiores nos casos “sem construção”, “Frame House/casa unifamiliar”, “porão”, “andares inferiores”, “parede 9 polegadas” e “Veículos”, possivelmente por não serem capazes de blindar a nuvem radioativa de forma tão eficiente, fazendo com que a TEDE seja superior a 1 mSv em uma área maior.

A tabela 4 evidencia a eficiência total de blindagem das estruturas urbanas. Este fato pode ser verificado por meio das doses recebidas:

a) Variando a distância ao epicentro:

A uma distância de 4 km do GZ, teria-se para “Sem construção” (apenas para a 1ª hora) 39.000 mSv, enquanto que aumentando a distância para 8 Km do GZ, a dose recebida seria de 6.200 mSv.

O mesmo ocorreria com “1 m abaixo do solo” a uma distância de 4 km do GZ (apenas para a 1ª hora) 7,8 mSv; já com 8 Km do epicentro teria-se 1,2 mSv.

Assim, a uma distância de 8 km do GZ teria-se apenas 15% da dose que se receberia a 4 km, estando em um mesmo tipo de blindagem urbana. Ou seja, a dose é consideravelmente reduzida com a distância.

b) Variando o tempo de exposição:

Permanecendo a 4 km do GZ, teria-se para “Sem construção” uma dose de 39.000 mSv na primeira hora e 81.000 mSv ao final do primeiro dia.

Já se fixando a distância em 8 km do GZ, teria-se para “1m abaixo do solo” uma dose de 7,8 mSv na primeira hora, e 16 mSv, ao final do primeiro dia.

Assim, ao final do 1º dia, ou seja, 23 horas depois da 1ª hora, a dose não aumenta proporcionalmente, consistindo de duas vezes a que se receberia na 1ª hora, ao permanecer na mesma blindagem urbana.

c) Variando apenas o tipo de blindagem urbana:

Analisando-se todas as estruturas à mesma distância do GZ e com o mesmo tempo de exposição, pode-se distribuir as blindagens em ordem decrescente de proteção:

1m abaixo do solo > Concreto parede 24 pol > andares superiores > concreto parede 12 pol > concreto parede 9 pol > andares inferiores (= porão) > veículo > Frame House > Sem Construção.

Ainda, sob uma ótica quantitativa, a tabela 4 indica que as blindagens urbanas “1 m abaixo do solo” e “Concreto parede 24 pol” parecem ser altamente eficientes, uma vez que geram uma proteção de quase 100 % para todas as distâncias estudadas. No entanto, sugere que a “Frame house/casa unifamiliar” e o “Veículo” são possivelmente ineficientes, atingindo apenas 40 % e 50 % de blindagem, respectivamente. Todas as demais estruturas, exceto “sem construção”, apresentaram percentuais de proteção na faixa dos 90 %.

A tabela 5 apresenta a proteção à Radiação Gama oferecida por cada estrutura urbana. Os efeitos são calculados separadamente para *prompt* e *fallout*. Não houve variação na eficiência de blindagem à Radiação Gama para “1 m abaixo do solo” e “Concreto parede 24 pol”, os quais permaneceram com quase 100% em *prompt* e *fallout*.

Entretanto, a “Frame house/casa unifamiliar” e o “Veículo” apresentaram proteção praticamente nula para *prompt* e, no caso de *fallout*, 40 % e 50 %, respectivamente. Comparando-se “porão”, “andares inferiores” e “andares superiores”, percebe-se que há uma proteção 4 vezes maior para efeito *prompt* nos “porões” do que em “andares superiores” ou “andares inferiores”. No entanto, para *fallout*, todos são eficientes e o andar alto é 10 % mais benéfico, chegando a blindar 99% da Radiação Gama.

As tabelas 6 e 7 evidenciam que a taxa de dose sofre variações significativas em cada estrutura urbana para o mesmo período e distância. No caso das blindagens “1 m abaixo do solo” e “Concreto parede 24 pol”, a taxa de dose é menor que 0,2% da “sem construção” em qualquer intervalo de tempo, sugerindo proteção bastante eficiente nestas. Já as estruturas “porão”, “andares inferiores” e “concreto parede 9 pol” apresentam taxas de dose semelhantes em qualquer período, representando 10 % da “sem construção”. Assim, conclui-se que estas blindagens podem oferecer uma proteção relativa. A “Frame House/casa unifamiliar” e “veículos” demonstram uma taxa de dose de cerca de 55% daquela verificada no grupo “sem construção”, podendo caracterizar uma fraca proteção.

Quanto à variação da taxa de dose com a distância para uma mesma estrutura, conclui-se ainda com as tabelas 6 e 7, que a distância ao epicentro é um fator importante pois quanto maior a distância, menor será a taxa de dose recebida. Analisando os valores, observa-se que em 6 km a taxa de dose foi quase 40 % da medida em 4 km; em 8 km, foi aproximadamente 22 % da mesma e em 10 km, apresentou valores em torno de 15 % da medida na menor distância. Desta forma, é possível verificar que a diminuição da taxa de dose com a distância não é linear.

Considerando-se a taxa de dose no 1º dia, nos 4 dias iniciais e na 1ª semana, é possível verificar uma variação decrescente, apresentando já nos 4 dias iniciais, cerca de 28 % do valor do 1º dia.

A figura 6 evidencia a diferença significativa de tempo necessário para atingir a dose limite para abrigagem, evacuação, emergência (CNEN 3.01/006, 2011) e desenvolvimento da SAR (CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 2018), considerando cada estrutura urbana e diversas distâncias, como: 4, 6, 8 e 10 km.

A figura 6A apresenta o tempo levado para atingir a dose de abrigagem. Se um indivíduo se encontra a 10 km em andares inferiores como o térreo, por exemplo, este

tempo seria de menos de 2 minutos. Entretanto, aqueles também a esta distância, só que em andares superiores, contariam com cerca de 17 minutos para atingir os 10 mSv.

A figura 6B sugere que o tempo de evacuação a 4 km seria de aproximadamente 8 minutos para o térreo e, nos andares superiores, cerca de 1,5 horas. Comparando-se o período no térreo para 6, 8 e 10 km, tem-se, respectivamente, 23 minutos, 40 minutos e 1 hora. Entretanto, nos andares superiores, o tempo seria bem mais dilatado, sendo mais de 3,5 horas já para 6 km. A figura 7 a seguir, resume o período para evacuação em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro. Nesta figura, o período em vermelho (até 10 minutos) caracteriza o primeiro grupo

Evacuação= dose de 50 mSv

	4 km	6 km	8 km	10 km
Sem construção	Red	Red	Red	Red
1m abaixo do solo	Black	Black	Black	Black
Frame house/casa unifamiliar	Red	Red	Red	Red
Porão	Red	Yellow	Yellow	Yellow
Andares Superiores	Green	Green	Green	Green
Andares Inferiores	Red	Yellow	Yellow	Yellow
Paredes de concreto 9 pol	Red	Yellow	Yellow	Green
Paredes de concreto 12 pol	Yellow	Green	Green	Green
Paredes de concreto 24 pol	Green	Green	Black	Black
Veículos	Red	Red	Red	Orange

LEGENDA:	
Evacuação	Cor
até 10 min	Red
11 a 20 min	Orange
21 a 40 min	Yellow
41 a 60 min	Light Green
1,1 a 2 h	Green
2,1 a 3 h	Dark Green
3,1 a 8 h	Black
8,1 h a 1 dia	Black
+ de 1 dia	Black

1º grupo (Red) is indicated by a blue arrow pointing down from the 'até 10 min' row to the 'último grupo' label.

último grupo (Black) is indicated by a blue arrow pointing down from the '3,1 a 8 h' row to the 'último grupo' label.

Figura 7- Período para evacuação em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.

A figura 6C refere-se à situação caracterizada como emergência ou 100 mSv. Às distâncias estudadas, os indivíduos nas estruturas “sem construção”, “Frame House/casa unifamiliar” e “veículos” recebem esta dose em um tempo estimado entre 2 e 20 minutos. Assim, a estas distâncias, o resgate necessário seria considerado imediato para estas estruturas, seguidas do “porão”, “andares inferiores” e “concreto parede 9 pol”, com 20 minutos apenas para 4 km. Ao contrário destas, “1 m abaixo do solo”, “concreto parede 24 pol” e “andares superiores” apresentam situação caracterizada como emergência em tempo superior a 2,5 horas já à distância de 4 km. A figura 8 a seguir, resume o período para uma situação característica de emergência em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.

Emergência= dose de 100 mSv

	4 km	6 km	8 km	10 km
Sem construção	Red	Red	Red	Orange
1m abaixo do solo	Black	Black	Black	Black
Frame house/casa unifamiliar	Red	Red	Orange	Orange
Porão	Orange	Yellow	Light Green	Light Green
Andares Superiores	Light Green	Green	Dark Green	Dark Green
Andares Inferiores	Orange	Yellow	Light Green	Light Green
Paredes de concreto 9 pol	Orange	Yellow	Light Green	Light Green
Paredes de concreto 12 pol	Yellow	Light Green	Green	Green
Paredes de concreto 24 pol	Dark Green	Black	Black	Black
Veículos	Red	Red	Orange	Yellow

LEGENDA:

Emergência	Cor
até 10 min	Red
11 a 20 min	Orange
21 a 40 min	Yellow
41 a 60 min	Light Green
1,1 a 2 h	Light Green
2,1 a 3 h	Green
3,1 a 8 h	Dark Green
8,1 h a 1 dia	Black
+ de 1 dia	Black

1º grupo



último grupo

Figura 8- Período para emergência em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.

A necessidade de triagem eficiente para emergência é demonstrada por meio da figura 6D, a qual permite verificar que a SAR pode ser desenvolvida em até 1 hora, à distância de 4 km, nas estruturas “Frame house/casa unifamiliar”, “veículos” ou “sem construção”. De forma análoga, em um período ainda inferior a 2 horas, a mesma distância, esta síndrome pode estar presente nos indivíduos que estiverem no “porão”, “andares inferiores” e “concreto parede 9 pol”. Ressalta-se ainda que nos “andares superiores” a 4 km a SAR pode ser desenvolvida em 20 horas, contra 2 horas nos “andares inferiores”. Já na “Frame house/casa unifamiliar”, esta síndrome pode se manifestar em menos de 1 hora a 6 km, e em mais de 5 horas se o indivíduo permanecer no “porão”, caracterizando, assim, o benefício de proteção de algumas estruturas urbanas. A figura 9 a seguir, resume o tempo no qual a dose é suficiente para um possível desenvolvimento da SAR em indivíduos que estejam em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.

SAR= dose de 700 mSv



Figura 9- Período para possível desenvolvimento da SAR em cada estrutura urbana em função da distância ao epicentro.

QUESTIONÁRIO UTILIZADO PELA FEMA (ADAPTADO)

Ainda, a avaliação dos resultados juntamente com o questionário da FEMA descrito anteriormente, sugere as seguintes abordagens:

- **O que os indivíduos devem fazer para se protegerem? / Os indivíduos necessitarão evacuar a área afetada?/ Que áreas são seguras para os respondedores da emergência atuarem?**

A figura 6A fornece o tempo em que a dose atingirá 10mSv em cada estrutura urbana, a qual caracteriza a necessidade de abrigo. A análise sugere que a uma distância de 4 km quase todas as blindagens urbanas atingem a dose de abrigo praticamente de forma imediata após a detonação, com exceção do concreto de 24 polegadas que leva 1,5 horas e 1 m abaixo do solo com 15 horas. O mesmo ocorre para 10 km do epicentro, a não ser para andares superiores com 2 horas até esta dose, 1 m abaixo do solo com 100 horas e concreto de 24 polegadas com 10 horas. Tendo em vista estes dados, recomenda-se que sempre que possível os indivíduos busquem se mover para os andares mais altos nos próprios prédios em que estão abrigados. A figura 6B, por sua vez, fornece o tempo em que a dose atingirá 50 mSv em cada estrutura urbana, caracterizando a necessidade de evacuação. Os dados desta figura sugerem que o tempo de permanência até necessitar evacuar é 10 vezes maior em andares superiores do que em pisos inferiores, e cerca de 6 vezes maior em construções com paredes de concreto de 9

polegadas do que em veículos. Em termos absolutos, para uma distância de 4 km, a evacuação seria necessária após cerca de 1 a 2 minutos da detonação para indivíduos que estiverem em casas unifamiliares, sem construção ou em veículos; cerca de 8 a 10 minutos para porão, andares inferiores e paredes de concreto de 9 polegadas; em torno de 1,5 horas para andares superiores; meia hora para concreto de 12 polegadas; 7,5 horas para concreto de 24 polegadas e 75 horas para 1 m abaixo do solo. Analogamente, por meio da Fig. 6C que estima o tempo transcorrido até que se tenha doses de 100 mSv, as quais caracterizam emergência para que a situação não se torne catastrófica, é sugerido que os indivíduos que permanecerem em veículos atingirão esta dose a uma distância de 4 km do epicentro em pouco menos de 4 minutos, tempo semelhante ao daqueles abrigados em casas unifamiliares. No entanto, pode-se recomendar que o indivíduo busque uma forma melhor de abrigagem logo após a detonação. Assim, este poderia contar com um tempo maior até chegar à situação de emergência, sendo, por exemplo, de 15 horas para um prédio com parede de 24 polegadas, 1 hora para concreto de 12 polegadas e 150 horas para 1 m abaixo do solo. Este fato é relevante uma vez que os respondedores da emergência poderiam optar por atuar ou não em um cenário com este valor de dose, reduzindo o quadro de profissionais atuantes na situação (CNEN 3.01/006, 2011). Analisando-se a figura 6D que relaciona tempo com a dose de 700 mSv, é possível sugerir que um indivíduo que tenha se abrigado 1 m abaixo do solo tenha um tempo 5000 vezes maior até apresentar os sintomas da Síndrome Aguda da Radiação (SAR) do que outro que tenha permanecido na rua sem nenhuma abrigagem. Esta análise sugere o poder das diversas blindagens urbanas frente ao efeito determinístico mais severo da radiação, a SAR. Para tal, em termos relativos a nenhuma construção, considerando o tempo até atingir a dose possível para SAR (CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 2018), tem-se proteção de quase o dobro para veículos, cerca de 10 vezes maior para concreto de 9 polegadas e porão, aproximadamente 33 vezes maior em concreto de 12 polegadas e 500 vezes para o de 24 polegadas, 5000 vezes para 1 m abaixo do solo e 1,6 vezes para a casa unifamiliar, sendo considerada em todos a distância de 10 km do epicentro. Quanto ao tempo até a dose possível para SAR, de acordo com a altura em que um indivíduo se encontra em um prédio, a figura 6D sugere 100 vezes maior que uma situação sem construção para andares superiores, e 10 vezes maior para andares inferiores.

- **Como estão sendo tomadas as decisões de evacuação?**

Para decisões de evacuação, segundo a FEMA, há aspectos intrínsecos ao cenário, como nível de comprometimento nas estradas e estruturas que levam às rotas de evacuação, e ainda, outras condições já incorporadas no cálculo da dose e taxa de dose do Código *Hotspot*, como condições do tempo, quantidade detonada e níveis de radiação.

- **Haverá abrigo para os indivíduos instruídos a evacuar a área afetada?**

Como a simulação neste trabalho é feita para um grande centro urbano, tem-se o metrô como alternativa para abrigagem e evacuação. Inicialmente poderia ser um local de abrigo, levando-se em conta que a estação fica abaixo do solo, e portanto mais protegida de acordo com os dados da Fig 6C, e posteriormente, como meio de transporte para evacuação, se forem utilizados os vagões para transportar as pessoas potencialmente afetadas para outra estação, local onde se poderia ter uma estrutura de atendimento médico fora da zona contaminada. É importante frisar que ao chegar na estação inicial (para abrigo), se faz necessário identificar a dose recebida por cada indivíduo de acordo com a localização desta pessoa no momento da detonação do IND e o quanto recebeu de dose ao caminhar até o local de abrigo. Com esta informação, pode-se adotar um código de cores em roupas ou pulseiras para facilitar a triagem. Ainda, uma descontaminação prévia com banho de corpo e cabelo, utilizando água, sabão e depois, roupas limpas se faz prioritário antes de seguir a rota de evacuação.

7. CONCLUSÃO

Um cenário de detonação de um IND pode provocar incontáveis danos, tanto para os indivíduos que se localizam próximos ao epicentro quanto para aqueles que estiverem nas áreas atingidas pela pluma radioativa, a qual é dispersa de acordo com a direção e velocidade do vento.

Entretanto, o conhecimento de alguns parâmetros típicos de um cenário como este e a simulação feita previamente em códigos consagrados como o *Hotspot*, podem auxiliar as ações de resposta necessárias durante um evento não fictício. Desta forma é possível estimar o alcance e as consequências da detonação de um IND, permitindo que os órgãos competentes possam elaborar um plano de trabalho em conjunto, já disponibilizando um dossiê com as melhores práticas, procedimentos, equipamentos e técnicas, visando à proteção dos indivíduos potencialmente afetados e o meio ambiente. Ainda, através destas simulações pode-se desenvolver pesquisas e estudos na área de saúde, visando melhorias no tratamento de pacientes contaminados que venham a ocorrer no futuro.

Exposto isso, é possível compreender porquê a aplicação da metodologia proposta neste trabalho pode resultar na otimização do tempo e de ações de resposta a emergências, melhorando procedimentos de triagem e abrigagem, de acordo com a dose recebida em cada tipo de estrutura urbana. Metodologias como esta auxiliam na redução dos riscos individuais e coletivos em um evento de explosão nuclear, diminuindo os prejuízos à saúde e ao meio ambiente, assim como abrandando custos operacionais dos órgãos governamentais.

Um trabalho futuro em continuidade a este poderá abordar o cálculo de riscos de desenvolvimento de câncer nos indivíduos potencialmente afetados pela detonação de um IND, considerando as diversas estruturas urbanas em que estes se encontravam, e utilizando o código Rad Rat (GONZALEZ, 2012) que consta de uma ferramenta on-line de avaliação de risco de radiação que pode ser usada para estimar a probabilidade de desenvolvimento de câncer relacionado à radiação com intervalos de incerteza seguindo um histórico de exposição especificado pelo usuário. O Rad Rat está disponível em <https://irep.nci.nih.gov/radrat>. Pode-se também utilizar para este mesmo fim as equações BEIR V ou VII disponibilizadas pelo *Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations*, National Academy Pressy (1996).

. Ainda, poderia-se realizar um estudo da proteção oferecida pelas estruturas urbanas características do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITELLI, T. (2006). **Física e Dosimetria das Radiações**. Ed. Atheneu. 2ª edição

BUDDEMEIER, B, Suski, N. (2011). **Improvised nuclear device case study: An analytic framework for disaster management**. Disponível em

https://www.researchgate.net/publication/254013783_Improvised_nuclear_device_case_study_An_analytic_framework_for_disaster_management; acessado em 12/12/18.

CARDOZO, M. **Trinitrotolueno, C₇H₅N₃O₆**. Disponível em

http://qnint.sbq.org.br/qni/popup_visualizarMolecula.php?id=wnRGBON_Z5_D_V6G0WeVaEPGxd1x-

[dIctL8Mji8XHsW7ZLloYljsC_Dj7lXhkrX3QcXMXCtWCBkPRaYQbgo7xg==](http://qnint.sbq.org.br/qni/popup_visualizarMolecula.php?id=wnRGBON_Z5_D_V6G0WeVaEPGxd1x-dIctL8Mji8XHsW7ZLloYljsC_Dj7lXhkrX3QcXMXCtWCBkPRaYQbgo7xg==);
acessado em 20/11/2018.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (2018). Disponível em

<https://emergency.cdc.gov/radiation/arsphysicianfactsheet.asp> , acessado em 12/12/2018.

DA VEIGA, José Eli. **Perspectiva nuclear pós-Fukushima**. Política Externa , v. 20, n. 1, p. 153-159, 2011.

DAVIS, M., M. Reeve, and B. Altevogt (2014). **Nationwide Response Issues After an Improvised Nuclear Device Attack: Medical and Public Health Considerations for Neighboring Jurisdictions: Workshop Summar**

DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY (2018). **Ready: Plan Ahead for Disasters/ Nuclear Explosions**. Disponível em <https://www.ready.gov/nuclear-explosion>; acessado em 12/12/2018.

DEVINE-WRIGHT, P & Murphy, J. **Energy Citizenship: Psychological Aspects of Evolution in Sustainable Energy Technologies**. in **Framing the Present, Shaping the Future: Contemporary Governance of Sustainable Technologies**, 2007.

DILLON, M, Buddemeier, B, (2009). **Key Response Planning Factors for the Aftermath of Nuclear Terrorism**. Disponível em

<https://narac.llnl.gov/content/mods/publications/external-references/LLNL-TR-410067.pdf>; acessado em 14/12/18.

DILLON, M., J. Kane, J., et al (2016). **Summary of Building Protection Factor Studies for External Exposure to Ionizing Radiation**. Lawrence Livermore National Security.

DONNELLY, Nemhauser JB, Smith JM; et al. (junho de 2010). **Acute radiation syndrome: assessment and management**. South. Med. J. 103 (6): 541–6

FEMA (2013). **Improvised Nuclear Device Response and Recovery: Communicating in the Immediate Aftermath**. Disponível em https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1919-25045-0892/communicating_in_the_immediate_aftermath__final_june_2013_508_ok.pdf; acessado em 20/11/2018.

FERGUSON, C., POTTER, W. (2006). **Improvised nuclear devices and nuclear terrorism**, Monterey Institute of International Studies.

GLASSTONE, S. et al (1977). **The Effects of Nuclear Weapons**, United States Department of Defense and United States Department of Energy, USA.

GOLDENBERG, J. (1981). **Como Se Faz uma Bomba Atômica**. Disponível em http://www.cienciamao.usp.br/tudo/exibir.php?midia=rec&cod=_comosefazumabombaatomica; acessado em 08/12/2018.

GONZALEZ, A, et al (2012). **RadRAT: a radiation risk assessment tool for lifetime cancer risk projection**. *Journal of Radiological Protection*, Volume 32, Number 3, disponível em <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0952-4746/32/3/205/meta>; acessado em 12/12/18.

GUIMARÃES, L. (2012). **O Legado de Fukushima**. O Globo, ed. 8 março 2012, disponível em <http://www.defesanet.com.br/tecnologia/noticia/5079/O-Legado-de-Fukushima/>; acessado em 18/11/18.

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

IAEA (1996). **IAEA-TECDOC-870 - Methods for Estimating the Probability of Cancer from Occupational Radiation Exposure**. R. S. Section. Vienna, IAEA.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2014). **Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. (BSS)**. Vienna: IAEA.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. (BSS)**. Vienna: IAEA, 2014.

LISBOA, H. (2007). **Meteorologia e Dispersão Atmosférica**, Montreal, Canadá.

NATIONAL ACADEMY PRESSY. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. **Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V**. Washington, D.C, 1996.

NATIONAL ACADEMY PRESSY. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. **Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII, phase 2**. Washington, D.C, 2006.

NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP), (2010). **Responding to Radiological and Nuclear Terrorism: A Guide for Decision Makers**. NCRP Report No. 165. Bethesda, MD.

NORMA CNEN-3.01/006 (2011), **Medidas de Proteção e Critérios de Intervenção em Situações de Emergência**, disponível em http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_06.pdf; acessado em 22/11/2018.

OSTP (Office of Science and Technology Policy, 2010). **Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation**, Second Edition. <http://www.epa.gov/rpdweb00/docs/er/planning-guidance-for-response-to-nuclear-detonation-2edition-final.pdf>; acessado em 10/11/18.

ROSOFF, H., VON WINTERFELDT, D. (2007). **A risk and economic analysis of dirty bomb attacks on the ports of Los Angeles and Long Beach**. Risk Anal. 27(3):533-46.

TAUHATA, L., et al (2003). **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - CNEN**

VALVERDE, N., Leite, T., Maurmo, A. (2010). **Manual de ações Médicas em emergências Radiológicas**. Eletrobrás

WASELENKO, J. K., et al (2004). **Strategic National Stockpile Radiation Working Group. Medical management of the acute radiation syndrome: Recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group.** *Annals of Internal Medicine* 140(12):1037–1051.

ZANNETTI, P. (1990). **Air Pollution Modeling.** Ed. Van Nostrand Reinhold, NY, USA.

ANEXO

Arquivo de saída do *Hotspot*:

- Exemplo para o caso de 1 m abaixo do solo:

HotSpot Version 3.0.3 Nuclear Explosion

set 27, 2017 03:19

Nuclear Explosion: 10,0 kT Surface Burst

Personnel exposed to a nuclear explosion may be killed or suffer injuries of various types. Casualties are primarily caused by blast, thermal radiation, and ionizing radiation. The distribution and severity of these injuries depends on device yield, height of burst, atmospheric conditions, body orientation, protection afforded by shelter, and the general nature of the terrain.

The energy of a nuclear explosion is partitioned as follows,

50% Blast and ground shock

35% Thermal Radiation (Effective partition = 18% for surface burst)

15% Ionizing Radiation

5% Prompt (first minute)

10% Delayed (minutes to years)

The 10,0 kT nuclear explosion produces a fireball of incandescent gas and vapor. Initially, the fireball is many times more brilliant than the sun at noon, but quickly decreases in brightness and continues to expand. In about 1 second, the fireball will have reached its maximum diameter of about 440 meters. After 1 minute, the fireball will have cooled sufficiently so that it no longer glows.

BLAST

Blast casualties may occur due to the direct action of the pressure wave, impact of missiles and fragments, and whole body translation and impact. The destructiveness of the blast is a function of its peak overpressure and duration of the positive pressure wave (or impulse). The 10,0 kT explosion will produce in excess of the blast required to produce 100% Lethality out to a distance of 0,27 km (0,17 miles) Injuries associated with shattered glass windows can occur out to a distance of 4,09 km (2,54 miles).

THERMAL RADIATION

Burn casualties may result from the absorption of thermal radiation energy by the skin, heating or ignition of clothing, and fires started by the thermal pulse or as side effects of the air blast or the ground shock. Exposed eyes are at risk of permanent retinal burns and flash blindness out to relatively large distances (especially at night when the diameter of the pupil is maximum). Under daytime conditions, the 10,0 kT explosion could produce temporary flash blindness from scattered light out to a distance of 22 km (14 miles). Individuals who directly view the initial fireball could experience retinal burns out to a distance of 23 km (14 miles). Unprotected individuals could receive in excess of the thermal radiation dose required for third degree burns, out to a distance of 1,4 km (0,9 miles).

IONIZING RADIATION

Radiation casualties may be caused by prompt nuclear radiation or by radioactive fallout. Prompt ionizing radiation consists of x rays, gamma rays, and neutrons produced in the first minute following the nuclear explosion. Unprotected individuals could receive in excess of the prompt ionizing radiation dose required for 50% lethality (within weeks), out to a distance of 0,69 km (0,43 miles). The delayed ionizing radiation is produced by fission products and neutron-induced radionuclides in surrounding materials (soil, air, structures, nuclear device debris). These radioactive products will be dispersed downwind with the fireball/debris cloud. As the cloud travels downwind, the radioactive material that has fallen and settled on the ground creates a footprint of deposited material (fallout).

The exposure to the fallout is the dominant source of radiation exposure for locations beyond the prompt effects of the nuclear detonation. The dose received depends upon the time an individual remains in the contaminated area. Unprotected individuals remaining in the contamination zone for the first hour following the nuclear explosion could receive in excess of the fallout dose required for 50% lethality (within weeks), out to a distance of about 24 km (15 miles). The idealized maximum width of the fallout footprint (actual width could be larger or smaller) is about 1,2 km (0,7 miles). For individuals remaining in the contamination for the first 24 hours, the downwind extent of the 50% lethality contour increases to approximately 107 km (66 miles). The 50% lethality contour width increases to about to about 7,9 km (4,9 miles).

ELECTROMAGNETIC PULSE (EMP)

The EMP range for the 10,0 kT detonation is approximately 4 km (3 miles). This range is the outer extent that any EMP effects are expected to occur. Not all equipment within the EMP-effects circle will fail. The amount of failure will increase the closer to ground zero the equipment is located, the larger the equipment's effective receptor antenna, and the equipment's sensitivity to EMP effects. Solid state devices are more sensitive than vacuum tube devices. Least affected by EMP are electro-mechanical devices such as electric motors, lamps, heaters, etc. Cell phones and handheld radios have relatively small antennas and if they are not connected to electrical power supplies during the EMP pulse, will probably not be affected by the EMP.

The effects of EMP occur at the instant of the nuclear detonation and ends within a few seconds. Any equipment that will be damaged by EMP will be damaged within those seconds. Electronic equipment entering the area after the detonation will function normally as long as they do not rely on previously damaged equipment, e.g., repeaters, power supplies, etc.

Nuclear Yield	:	10,0 kT	
Cloud Top	:	8200	m
Cloud Radius	:	2300	m
Cloud Bottom	:	5100	m

Stem Radius : 780 m
Wind Direction : 270 degrees Wind from the West
Effective Wind Speed : 6,8 m/s

Ionizing Radiation Shielding: 1 m (3 ft) underground

Prompt Gamma Transmission Factor: 0,0040
Prompt Neutron Transmission Factor: 0,0100
Fallout Gamma Transmission Factor: 0,0002
(Weathering Correction Factor : None)
(Ground Roughness Correction Factor : 0,700)

Radial Distances for Prompt Effects (first minute following nuclear explosion)

Prompt Ionizing Radiation Effects : Whole-body Midline Dose
Includes Gamma and Neutron Radiation (Neutron RBE = 3,0)

10,000 rad-eq (cGy-eq) [100% death, < 1 day]..... 0,28 km (0,17 miles)
1,000 rad-eq (cGy-eq) [100% death, days]..... 0,54 km (0,34 miles)
460 rad-eq (cGy-eq) [95% death, weeks]..... 0,64 km (0,40 miles)
400 rad-eq (cGy-eq) [85% death, weeks]..... 0,66 km (0,41 miles)
300 rad-eq (cGy-eq) [50% death, weeks]..... 0,69 km (0,43 miles)
200 rad-eq (cGy-eq) [15% death, years]..... 0,75 km (0,47 miles)
140 rad-eq (cGy-eq) [5% death, years]..... 0,80 km (0,50 miles)

Prompt Blast Effects : Lethality

Threshold 30 psi (30-50)..... 0,40 km (0,25 miles)
50 % 50 psi (50-75)..... 0,32 km (0,20 miles)
100 % 75 psi (75-115)..... 0,27 km (0,17 miles)

Prompt Blast Effects : Lung Damage

Threshold 8 psi (8-15).....	0,74 km (0,46 miles)
Severe 20 psi (20-30).....	0,48 km (0,30 miles)

Prompt Blast Effects : Eardrum rupture

Threshold 5 psi.....	0,96 km (0,60 miles)
50 % 15 psi (15-20).....	0,54 km (0,34 miles)

Prompt Blast Effects : Shattered window glass injury

Threshold 0.5 psi.....	4,09 km (2,54 miles)
------------------------	----------------------

Prompt Thermal Effects : Skin burns and Eye Damage

Eye Damage

Day

Flash Blindness	22 km (13,7 miles)
Retinal Burns	23 km (14,4 miles)

Night

Flash Blindness	73 km (45,3 miles)
Retinal Burns.....	41 km (25,5 miles)

Visibility: 20 km (12 miles)

50 % 1st Degree (2,4 cal/cm2).....	2,00 km (1,24 miles)
50 % 2nd Degree (4,7 cal/cm2).....	1,50 km (0,93 miles)
50 % 3rd Degree (7,3 cal/cm2).....	1,25 km (0,78 miles)

Visibility: 40 km (25 miles)

50 % 1st Degree (2,4 cal/cm2).....	2,18 km (1,35 miles)
50 % 2nd Degree (4,7 cal/cm2).....	1,61 km (1,00 miles)
50 % 3rd Degree (7,3 cal/cm2).....	1,32 km (0,82 miles)

Visibility: 80 km (50 miles)

50 % 1st Degree (2,4 cal/cm²)..... 2,35 km (1,46 miles)

50 % 2nd Degree (4,7 cal/cm²)..... 1,70 km (1,06 miles)

50 % 3rd Degree (7,3 cal/cm²)..... 1,38 km (0,86 miles)

Electromagnetic Pulse (EMP)

Maximum extent of radial EMP effects... 4 km (3 miles).

Ionizing Radiation Shielding: 1 m (3 ft) underground

Prompt Gamma Transmission Factor: 0,0040

Prompt Neutron Transmission Factor: 0,0100

Fallout Gamma Transmission Factor: 0,0002

(Weathering Correction Factor : None)

(Ground Roughness Correction Factor : 0,700)

Centerline Distance 0,030 km (0,019 mi)

Blast (maximum overpressure) 4,9E+04 psi

Prompt Neutron 9,0E+04 rad-eq

Prompt Gamma 1,7E+03 rad

Total Prompt Ionizing Radiation 9,2E+04 rad-eq

Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles): 1,6E+04 cal/cm²

Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles): 1,6E+04 cal/cm²

Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles): 1,6E+04 cal/cm²

Centerline Distance 0,100 km (0,062 mi)

Blast (maximum overpressure) 9,0E+02 psi

Prompt Neutron 4,6E+04 rad-eq

Prompt Gamma 1,0E+03 rad

Total Prompt Ionizing Radiation 4,7E+04 rad-eq

Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles): 1,4E+03 cal/cm²

Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles): 1,4E+03 cal/cm²

Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles): 1,4E+03 cal/cm²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	< 00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	> 2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	3,6E+02 rem/hr
External Dose in First Hour	4,9E+00 rem
External Dose in First 6-hours	5,6E+00 rem
External Dose in First Day	6,1E+00 rem
External Dose in First 4-days	6,4E+00 rem
External Dose in First Week	6,5E+00 rem
External Dose in First Month	6,7E+00 rem
External Dose in First Year	6,9E+00 rem
External Dose in 50-years	7,0E+00 rem

Centerline Distance 0,200 km (0,124 mi)

Blast (maximum overpressure)	1,4E+02 psi
Prompt Neutron	1,8E+04 rad-eq
Prompt Gamma	5,3E+02 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	1,8E+04 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	3,4E+02 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	3,5E+02 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	3,6E+02 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	< 00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	> 2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	1,6E+02 rem/hr
External Dose in First Hour	4,0E+00 rem

External Dose in First 6-hours	4,7E+00 rem
External Dose in First Day	5,1E+00 rem
External Dose in First 4-days	5,4E+00 rem
External Dose in First Week	5,5E+00 rem
External Dose in First Month	5,8E+00 rem
External Dose in First Year	6,0E+00 rem
External Dose in 50-years	6,0E+00 rem

Centerline Distance 0,300 km (0,186 mi)

Blast (maximum overpressure)	5,3E+01 psi
Prompt Neutron	7,2E+03 rad-eq
Prompt Gamma	2,7E+02 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	7,5E+03 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	1,5E+02 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	1,5E+02 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	1,6E+02 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	< 00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	> 2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	9,6E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	3,5E+00 rem
External Dose in First 6-hours	4,2E+00 rem
External Dose in First Day	4,6E+00 rem
External Dose in First 4-days	4,9E+00 rem
External Dose in First Week	5,0E+00 rem
External Dose in First Month	5,3E+00 rem
External Dose in First Year	5,5E+00 rem
External Dose in 50-years	5,5E+00 rem

Centerline Distance 0,400 km (0,248 mi)

Blast (maximum overpressure)	2,8E+01 psi
Prompt Neutron	3,0E+03 rad-eq
Prompt Gamma	1,4E+02 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	3,1E+03 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	8,3E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	8,6E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	8,9E+01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	< 00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	> 2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	6,8E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	3,1E+00 rem
External Dose in First 6-hours	3,9E+00 rem
External Dose in First Day	4,3E+00 rem
External Dose in First 4-days	4,6E+00 rem
External Dose in First Week	4,7E+00 rem
External Dose in First Month	4,9E+00 rem
External Dose in First Year	5,2E+00 rem
External Dose in 50-years	5,2E+00 rem

Centerline Distance 0,500 km (0,311 mi)

Blast (maximum overpressure)	1,7E+01 psi
Prompt Neutron	1,3E+03 rad-eq
Prompt Gamma	7,9E+01 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	1,4E+03 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	5,2E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	5,5E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	5,6E+01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1) >	2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	5.2E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	2.9E+00 rem
External Dose in First 6-hours	3.6E+00 rem
External Dose in First Day	4.0E+00 rem
External Dose in First 4-days	4.4E+00 rem
External Dose in First Week	4.5E+00 rem
External Dose in First Month	4.7E+00 rem
External Dose in First Year	4.9E+00 rem
External Dose in 50-years	5.0E+00 rem

Centerline Distance 0,600 km (0,373 mi)

Blast (maximum overpressure)	1.2E+01 psi
Prompt Neutron	5.7E+02 rad-eq
Prompt Gamma	4.5E+01 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	6.1E+02 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	3.5E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	3.7E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	3.9E+01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1) >	2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	4.2E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	2.7E+00 rem
External Dose in First 6-hours	3.4E+00 rem
External Dose in First Day	3.8E+00 rem
External Dose in First 4-days	4.2E+00 rem

External Dose in First Week	4,3E+00 rem
External Dose in First Month	4,5E+00 rem
External Dose in First Year	4,7E+00 rem
External Dose in 50-years	4,8E+00 rem

Centerline Distance 0,700 km (0,435 mi)

Blast (maximum overpressure)	8,9E+00 psi
Prompt Neutron	2,6E+02 rad-eq
Prompt Gamma	2,6E+01 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	2,8E+02 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	2,5E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	2,7E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	2,9E+01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	> 2,5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	3,5E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	2,5E+00 rem
External Dose in First 6-hours	3,3E+00 rem
External Dose in First Day	3,7E+00 rem
External Dose in First 4-days	4,0E+00 rem
External Dose in First Week	4,1E+00 rem
External Dose in First Month	4,3E+00 rem
External Dose in First Year	4,6E+00 rem
External Dose in 50-years	4,6E+00 rem

Centerline Distance 0,800 km (0,497 mi)

Blast (maximum overpressure)	6,9E+00 psi
Prompt Neutron	1,2E+02 rad-eq
Prompt Gamma	1,5E+01 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	1,4E+02 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	1,9E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	2,1E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	2,2E+01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:01
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1) >	2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	3,0E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	2,4E+00 rem
External Dose in First 6-hours	3,1E+00 rem
External Dose in First Day	3,6E+00 rem
External Dose in First 4-days	3,9E+00 rem
External Dose in First Week	4,0E+00 rem
External Dose in First Month	4,2E+00 rem
External Dose in First Year	4,4E+00 rem
External Dose in 50-years	4,5E+00 rem

Centerline Distance 0,900 km (0,559 mi)

Blast (maximum overpressure)	5,6E+00 psi
Prompt Neutron	5,7E+01 rad-eq
Prompt Gamma	9,1E+00 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	6,6E+01 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	1,5E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	1,6E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	1,7E+01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:02
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1) >	2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	2,6E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	2,3E+00 rem
External Dose in First 6-hours	3,0E+00 rem
External Dose in First Day	3,4E+00 rem
External Dose in First 4-days	3,8E+00 rem
External Dose in First Week	3,9E+00 rem
External Dose in First Month	4,1E+00 rem
External Dose in First Year	4,3E+00 rem
External Dose in 50-years	4,4E+00 rem

Centerline Distance 1,000 km (0,621 mi)

Blast (maximum overpressure)	4,6E+00 psi
Prompt Neutron	2,8E+01 rad-eq
Prompt Gamma	5,2E+00 rad
Total Prompt Ionizing Radiation	3,3E+01 rad-eq
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	1,2E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	1,3E+01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	1,4E+01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:02
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1) >	2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	2,3E+01 rem/hr
External Dose in First Hour	2,2E+00 rem
External Dose in First 6-hours	2,9E+00 rem
External Dose in First Day	3,3E+00 rem
External Dose in First 4-days	3,7E+00 rem

External Dose in First Week	3,8E+00 rem
External Dose in First Month	4,0E+00 rem
External Dose in First Year	4,2E+00 rem
External Dose in 50-years	4,3E+00 rem

Centerline Distance 2,000 km (1,242 mi)

Blast (maximum overpressure)	1,4E+00 psi
Prompt Neutron	Minimal Neutron
Prompt Gamma	Minimal Gamma
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	2,4E+00 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	2,9E+00 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	3,4E+00 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:04
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	> 2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	9,9E+00 rem/hr
External Dose in First Hour	1,6E+00 rem
External Dose in First 6-hours	2,3E+00 rem
External Dose in First Day	2,7E+00 rem
External Dose in First 4-days	3,1E+00 rem
External Dose in First Week	3,2E+00 rem
External Dose in First Month	3,4E+00 rem
External Dose in First Year	3,6E+00 rem
External Dose in 50-years	3,7E+00 rem

Centerline Distance 4,000 km (2,484 mi)

Blast (maximum overpressure)	Minimal Blast
Prompt Neutron	Minimal Neutron

Prompt Gamma	Minimal Gamma
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	4,0E-01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	6,0E-01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	7,9E-01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:09
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	> 2.5E+03 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	3,1E+00 rem/hr
External Dose in First Hour	7,8E-01 rem
External Dose in First 6-hours	1,3E+00 rem
External Dose in First Day	1,6E+00 rem
External Dose in First 4-days	1,8E+00 rem
External Dose in First Week	1,9E+00 rem
External Dose in First Month	2,1E+00 rem
External Dose in First Year	2,3E+00 rem
External Dose in 50-years	2,3E+00 rem

Centerline Distance 6,000 km (3,727 mi)

Blast (maximum overpressure)	Minimal Blast
Prompt Neutron	Minimal Neutron
Prompt Gamma	Minimal Gamma
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	1,2E-01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	2,2E-01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	3,3E-01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:14
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	1,6E-01 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	8,5E-01 rem/hr

External Dose in First Hour	2,6E-01 rem
External Dose in First 6-hours	4,9E-01 rem
External Dose in First Day	6,3E-01 rem
External Dose in First 4-days	7,3E-01 rem
External Dose in First Week	7,6E-01 rem
External Dose in First Month	8,3E-01 rem
External Dose in First Year	9,1E-01 rem
External Dose in 50-years	9,2E-01 rem

Centerline Distance 8,000 km (4,969 mi)

Blast (maximum overpressure)	Minimal Blast
Prompt Neutron	Minimal Neutron
Prompt Gamma	Minimal Gamma
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	4,5E-02 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	1,0E-01 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	1,8E-01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:19
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	9,9E-02 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	3,8E-01 rem/hr
External Dose in First Hour	1,2E-01 rem
External Dose in First 6-hours	2,7E-01 rem
External Dose in First Day	3,6E-01 rem
External Dose in First 4-days	4,2E-01 rem
External Dose in First Week	4,4E-01 rem
External Dose in First Month	4,9E-01 rem
External Dose in First Year	5,4E-01 rem
External Dose in 50-years	5,4E-01 rem

Centerline Distance 10,000 km (6,211 mi)

Blast (maximum overpressure)	Minimal Blast
Prompt Neutron	Minimal Neutron
Prompt Gamma	Minimal Gamma
Thermal @ Visibility = 20 km (12 miles):	1,9E-02 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 40 km (25 miles):	5,3E-02 cal/cm ²
Thermal @ Visibility = 80 km (50 miles):	1,1E-01 cal/cm ²

Fallout Information

Cloud Arrival Time (hr:min)	00:24
Dose Rate at 1 hr post detonation (H+1)	7,3E-02 rem/hr
Actual Dose Rate @ Cloud Arrival Time	2,1E-01 rem/hr
External Dose in First Hour	7,1E-02 rem
External Dose in First 6-hours	1,8E-01 rem
External Dose in First Day	2,4E-01 rem
External Dose in First 4-days	2,9E-01 rem
External Dose in First Week	3,0E-01 rem
External Dose in First Month	3,4E-01 rem
External Dose in First Year	3,7E-01 rem
External Dose in 50-years	3,8E-01 rem